

MONITOREO DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA EN LA LAGUNA DEL SAUCE MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

PROYECTO FINAL DE CARRERA
2021



Estudiantes: Ricardo Agustín Acuña Pintos, Paula Teperino Echarte
Tutor responsable: MSc Eduardo Vasquez
Carrera: Tecnólogo en Cartografía



1. Aprobación

FACULTAD DE INGENIERÍA

El tribunal docente integrado por los abajo firmantes aprueba informe de Proyecto Final de Grado:

- Título: Monitoreo de concentración de clorofila en la Laguna del Sauce mediante técnicas de teledetección
- Autores: Ricardo Agustín Acuña Pintos y Paula Teperino Echarte
- Tutor: MSc. Eduardo Vasquez
- Carrera: Tecnólogo en Cartografía
- Puntaje:
- Tribunal:
 - Profesor/a (Nombre y firma)

 - Profesor/a (Nombre y firma)

 - Profesor/a (Nombre y firma)

1. Aprobación	1
2. Introducción	4
2.1. Objetivos	6
2.2. Objetivos específicos	6
2.3. El agua	7
2.3.1. El agua y el Desarrollo Sostenible	7
2.3.2. Calidad del agua	7
2.3.3. Eutrofización	8
2.3.4. Parámetros que indican la calidad del agua de la Cuenca según el Observatorio Ambiental Nacional	9
2.4. Contexto	13
3. Teledetección	16
3.1. Fundamentos físicos de la teledetección	16
3.2. El espectro electromagnético	18
4. Satélites para la observación de la Tierra	20
4.1. Landsat	20
4.1.1 Landsat 7 y Landsat 8	20
4.2. Sentinel	23
4.2.1. Sentinel 2	23
5. Firma espectral	25
5.1. Interacción de las radiaciones con los objetos de la superficie terrestre	25
5.2. La reflectancia en la vegetación	25
5.3. La reflectancia en el agua	27
5.4. Índices de vegetación	28
5.4.1. NDVI	28
5.4.2. Herramientas tecnológicas que se pueden sumar al NDVI	29
6. Sistemas de Información Geográfica (SIG)	30
6.1. Software de procesamiento	30
6.1.2. SNAP	30
6.1.3. ArcGIS Pro	31
7. Metodología	32
7.1. Descarga de imágenes	32
7.2. Corrección atmosférica de imágenes Sentinel 2	33
7.2.1. Instancias seguidas	33
7.3. Firma espectral	34
7.4. Geometría de bandas	34
7.5. Muestras	34
8. Análisis y resultados	35

8.1. Correlación lineal entre NDVI y CAB	35
8.1.1. Enero 2017	36
8.1.2. Mayo 2017	36
8.1.3. Septiembre 2017	37
8.1.4. Diciembre 2017	37
8.2. Correlación lineal entre NDVI y CAB solo para valores positivos de NDVI	38
8.2.1. Enero 2017	38
8.2.2. Mayo 2017	38
8.2.3. Septiembre 2017	39
8.2.4. Diciembre 2017	39
8.3. Coeficientes de dispersión de los gráficos generados	40
8.4. Análisis de NDVI	40
8.4.1. Análisis por muestra y año.	41
8.4.1.1. Año 2017	41
8.4.1.2. Año 2018	42
8.4.1.3. Año 2019	43
8.4.1.4. Año 2020	44
8.4.2. Variación anual por muestra	45
9. Conclusiones	50
10. Recomendaciones	51
11. Bibliografía	52

2. Introducción

La Laguna del Sauce se ubica en el extremo sureste de la cuenca del mismo nombre (Figura 1). Los extremos norte y noroeste se caracterizan por la presencia de serranías fuertes que se van suavizando lentamente. Al este, las sierras aparecen inmediatamente y conforman su límite oriental donde cientos de pequeños arroyos serranos y cañadas bajan hacia sus aguas desde lo alto de las Sierras de la Ballena.

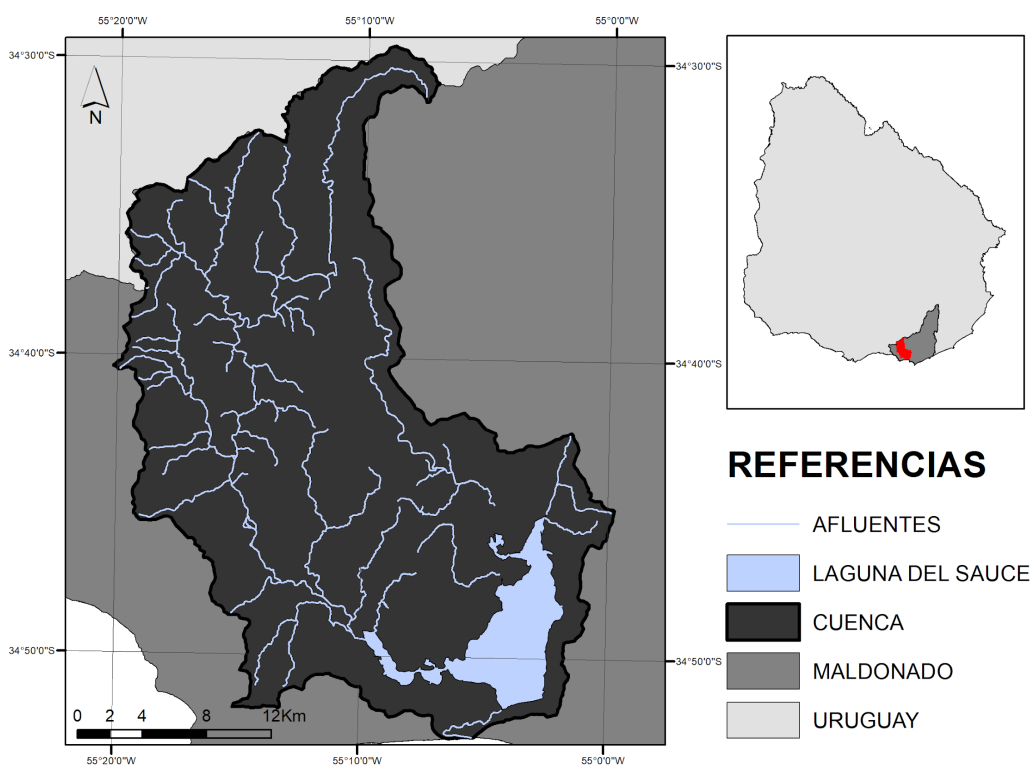


Figura 1 – Ubicación de la Laguna del Sauce y su cuenca - Fuente: Elaboración propia

Su espejo de agua comprende las lagunas encadenadas de los Cisnes, del Potrero y del Sauce propiamente, constituyéndose en la laguna más extensa del Departamento de Maldonado. Es además la única fuente de abastecimiento de agua para la Planta Potabilizadora del mismo nombre, desde donde se abastece de agua potable a más del 95% de la población fija y flotante del Departamento de Maldonado. La laguna del Sauce abastece de agua potable a las ciudades de Maldonado, Punta del Este, San Carlos, Pan de Azúcar, Piriápolis y Balneario Solís. Actualmente provee también a zonas del Departamento de Canelones y a requerimiento refuerza la provisión de agua potable a las zonas de La Barra de Maldonado y José Ignacio.

La relevancia de los valores biológicos identificados en la cuenca de Laguna del Sauce se pone de manifiesto al analizar la diversidad de ecosistemas representados, la riqueza de especies, y las funciones que cumplen algunos de esos ecosistemas como sitio de cría de aves acuáticas. Según estudios académicos¹, se han registrado para la cuenca de la Laguna del Sauce y sector costero

¹ Comisión de cuenca de la Laguna del Sauce. Sitio web: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/comision-cuenca-laguna-del-sauce> <http://www.ose.com.uy/>

adyacente 10 de los 16 ecosistemas terrestres naturales presentes en el territorio nacional, estando también representados la mayor parte de los ecosistemas acuáticos.

La ONU propuso, mediante el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos los habitantes”. Para esto se hace necesario monitorear la calidad que se le brinda a las personas y así detectar anomalías que afecten la salud de las mismas. En Uruguay el agua potable llega a un 99% de la población, según cifras oficiales. Puntualmente en el Departamento de Maldonado, la principal fuente de agua de su población es la Laguna del Sauce, que tiene una producción anual de 19.960.490 metros cúbicos, según datos de OSE².

La calidad del agua de la misma se ha visto afectada por numerosas razones que, muchas veces, han preocupado a quienes la consumen habitualmente como también a sus autoridades. Entre las razones se puede destacar la lentitud en la renovación de las aguas, lo que la condiciona a una mayor sensibilidad ante los aportes de materiales y sedimentos. Esto hace que la Laguna presente un grado de eutrofización. Se habla de eutrofización cuando un ecosistema presenta un nivel anormalmente alto de nutrientes. A su vez, cuando el sistema está eutrofizado, es más habitual la aparición de algas tóxicas en ciertas condiciones climáticas. Para hacerle frente a esto, es necesario estudiar y monitorear la zona en un período de tiempo.



Figura 2 – Objetivos de desarrollo sostenible planteados por ONU.

² Portal de Obras Sanitarias del Estado. Sitio web: <http://www.ose.com.uy/>

2.1. Objetivos

1. Realizar análisis cualitativo de las aguas de la Laguna del Sauce mediante monitoreo satelital desde el año 2017.

2.2. Objetivos específicos

1. Corregir atmosféricamente las imágenes Sentinel 2 para contar con el valor de píxel más ajustado a la realidad.
2. Analizar la firma espectral de cada imagen BOA, evaluando el comportamiento de la curva de reflectancia del agua y la vegetación.
3. Evaluar la correlación existente entre los valores de clorofila y el NDVI para usarlo como indicador satelital.
4. Definir muestreo y evaluar presencia de clorofila con resultados del objetivo 3.

2.3. El agua

Según Naciones Unidas, “el agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico, la energía, la producción de alimentos, los ecosistemas y para la supervivencia de los seres humanos. El agua también forma parte crucial de la adaptación al cambio climático, y es un decisivo vínculo entre la sociedad y el medioambiente. El agua es, además, una cuestión de derechos. A medida que crece la población mundial se genera una necesidad creciente de conciliar la competencia entre las demandas comerciales de los recursos hídricos para que las comunidades tengan lo suficiente para satisfacer sus necesidades.”³

2.3.1. El agua y el Desarrollo Sostenible

El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 trata de “garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”. Las metas de este objetivo cubren tanto los aspectos del ciclo del agua como los sistemas de saneamiento. Dado que el agua es un elemento crucial en muchas esferas de la vida humana, la consecución de este objetivo contribuirá al progreso de otros ODS, principalmente los relacionados con la salud, la educación, el crecimiento económico y el medio ambiente.

Hablamos de Desarrollo Sostenible cuando nos referimos a “satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades”.

2.3.2. Calidad del agua

La calidad del agua de un recurso hídrico es el conjunto de sus características físicas, químicas y composición y estado de los organismos que habitan en él (Chapman, 1996). Sin embargo, en general se define de acuerdo a su uso potencial comparando estas características con valores estándares que se consideran requisitos para asegurar su uso correcto (De León, 2011). Los sistemas acuáticos presentan diversos servicios ecosistémicos, destacándose el abastecimiento de agua potable, riego, consumo animal, recreación y purificación de las aguas. La mala gestión de los sistemas hídricos puede afectar su calidad del agua, generar procesos de eutrofización (aumento de fósforo y nitrógeno que son los nutrientes limitantes de producción primaria), desequilibrios tróficos, inundación, erosión e impactos sobre aguas subterráneas, entre otros (Molden, 2007). Por tanto, la calidad del agua es un componente fundamental de la calidad ambiental incidiendo en sus distintas dimensiones, biofísica, social y económica.

En Uruguay el Decreto Reglamentario 253/79 (Ley 14.859, Uruguay) establece valores límites para determinados parámetros y representa la referencia de calidad del agua a nivel nacional. Este decreto clasifica el estado de los cuerpos de agua continentales en 4 clases:

³ Naciones Unidas. (2016). Agua. Sitio web: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>

- Clase 1: Aguas destinadas o que puedan ser destinadas al abastecimiento de agua potable a poblaciones con tratamiento convencional.
- Clase 2: Aguas destinadas al riego de hortalizas o plantas frutícolas u otros cultivos destinados al consumo humano en su forma natural, cuando éstas son usadas a través de sistemas de riego que provocan el mojado del producto; o aguas destinadas a recreación por contacto directo con el cuerpo humano.
- Clase 3: Aguas destinadas a la preservación de los peces en general y de otros integrantes de la flora y fauna hídrica, o también aguas destinadas al riego de cultivos cuyo producto no se consume en forma natural o en aquellos casos que siendo consumidos en forma natural se apliquen sistemas de riego que no provocan el mojado del producto.
- Clase 4: Aguas correspondientes a los cursos o tramos de cursos que atraviesan zonas urbanas o suburbanas que deban mantener una armonía con el medio, o también aguas destinadas al riego de cultivos cuyos productos no son destinados al consumo humano en ninguna forma.⁴

2.3.3. Eutrofización

Es un proceso natural y/o antropogénico que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas. Sus efectos pueden interferir de modo importante con los distintos usos que el hombre puede hacer de los recursos acuáticos (abastecimiento de agua potable, riego, recreación, etc.).

Las masas de agua eutróficas tienen un alto nivel de productividad y de biomasa en todos los niveles tróficos; proliferan las algas, tienen aguas profundas pobres en oxígeno y un crecimiento intenso de las plantas acuáticas. En contraste, los cuerpos de agua oligotróficos, poseen concentraciones bajas de nutrientes y una mayor diversidad en las comunidades de plantas y animales.

Los factores que afectan el grado de eutrofización son:

- Clima: los climas cálidos favorecen el proceso.
- Cuerpos de agua poco profundos y/o de bajo caudal son más propicios para el desarrollo del proceso
- Área de drenaje: la poca cubierta arbórea sujeta a precipitaciones abundantes favorece la erosión y el arrastre de nutrientes hacia el cuerpo de agua
- Geología: en áreas de drenaje donde predominan rocas sedimentarias hay mayor aporte de fósforo por escorrentía. Los suelos arcillosos drenan pobremente y también favorecen la escorrentía y consecuentemente el aporte de nutrientes.

⁴ Extraído del Espacio Interdisciplinario de Udelar. (2018). Conceptos sobre monitoreo de calidad de agua. Sitio web: <https://www.aguasurbanas.ei.udelar.edu.uy/index.php/2018/11/17/conceptos-sobre-monitoreo-de-calidad-de-agua/>

Las causas de la eutrofización pueden ser:

1. Naturales:

- Aportes atmosféricos: precipitación;
- Resuspensión de los sedimentos del fondo;
- Liberación desde los sedimentos anóxicos;
- Descomposición y excreción de organismos;
- Fijación de nitrógeno por microorganismos.

2. Antropogénicas:

- Vertidos de residuos industriales, agrícolas, urbanos y de plantas de tratamiento;
- Deforestación que aumenta la erosión y disminuye el reciclaje de nutrientes en la cuenca, aumentando su ingreso al cuerpo de agua;
- Fertilizantes aplicados en exceso;
- Aguas residuales de granjas (silos, tambos);
- Tanques sépticos;
- Uso de detergentes con grandes cantidades de fósforo;
- Aporte de contaminantes por agua de lluvia;
- Sistema de alcantarillado de ciudades y pueblos.⁵

2.3.4. Parámetros que indican la calidad del agua de la Cuenca según el Observatorio Ambiental Nacional

Aunque en este trabajo se hará énfasis en la presencia de clorofila-a, se hace necesario definir otros parámetros que indican la calidad del agua.

Turbidez: como una propiedad óptica de partículas en suspensión en el agua es notoria en aguas costeras y, particularmente, en estuarios y lagunas costeras donde varía ampliamente a lo largo del año, alcanzando un máximo durante las inundaciones de la estación lluviosa, sin embargo, casi siempre está presente. La transparencia del agua es importante en las áreas con vegetación acuática y animales, y el papel más importante en cuanto al grado de transparencia en un ecosistema acuático surge del efecto de material en suspensión que impide o permite la mayor o menor entrada de luz, y que presenta una atención especial en relación con la productividad primaria y el flujo de energía en la comunidad (Reid & Word, 1976).

Fósforo: constituye en muchos sistemas acuáticos el nutriente limitante de la producción primaria, siendo determinante del estado trófico de los mismos. El aumento de este elemento en el medio acuático está relacionado a diversas actividades humanas, principalmente con el uso de fertilizantes y detergentes (Arocena 2015). El aporte de materia orgánica proveniente de vertidos domésticos, agrícolas e industriales constituye una de las perturbaciones más comunes de los ambientes acuáticos. La descomposición de la materia orgánica provoca la reducción de la

⁵ Centro Científico Tecnológico Mendoza. Eutrofización. Sitio web:
<https://www.mendoza.conicet.gov.ar/porta/enciclopedia/terminos/Eutrofizac.htm>

concentración de oxígeno en el agua y aporta nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo. Este fenómeno da origen a un proceso que se denomina eutrofización. La proliferación excesiva de plantas acuáticas, microalgas y cianobacterias constituye uno de los efectos más notorios de este fenómeno. Una de las principales consecuencias es el desarrollo de floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas, las cuales afectan la calidad del agua para utilización por el hombre y la conservación de la biodiversidad. La eutrofización se ha convertido en la problemática más extendida tanto a nivel nacional (Scasso & Mazzeo 2000) como mundial (Hosper 1998) de los sistemas acuáticos.

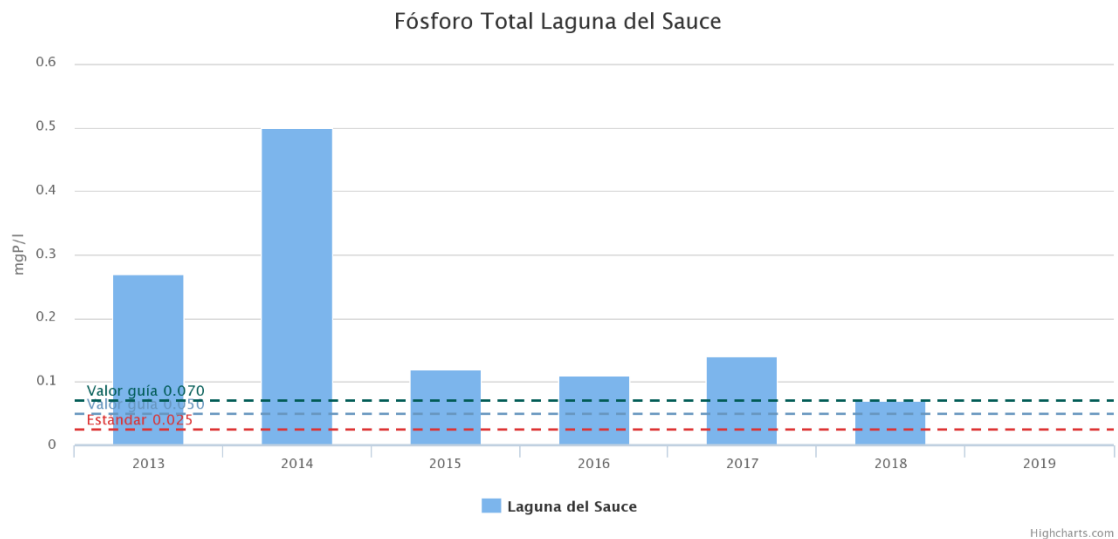


Figura 3 – Indicador de Fósforo Total en la Laguna del Sauce - Fuente: Observatorio Ambiental Nacional.

Clorofila-a: es el pigmento común a todos los organismos productores primarios y tiene relación directa con la productividad primaria y el desarrollo vegetal, por lo que es utilizado como un indicador indirecto de la biomasa algal en los sistemas acuáticos. Puede utilizarse como indicador del estado trófico considerando otros parámetros asociados (como nutrientes, composición biológica).

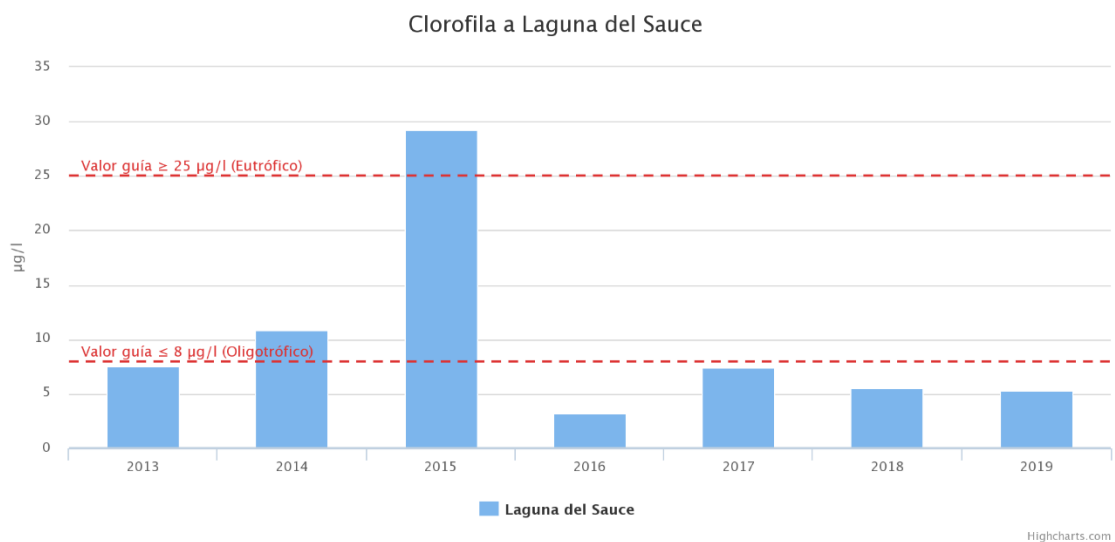


Figura 4 – Indicador de Clorofila en la Laguna del Sauce - Fuente: Observatorio Ambiental Nacional.

El indicador (Figura 3) corresponde al promedio anual de la biomasa de microalgas y cianobacterias planctónicas (fitoplancton) medida a través de la concentración de la clorofila a en la superficie de cuerpos de agua. La concentración promedio anual (media aritmética) de los niveles de clorofila a ($\mu\text{g/L}$) medidos en las estaciones de muestreo de cada curso de agua en un año. Para el cálculo del promedio deben considerarse al menos 4 muestreos distribuidos a lo largo del año. Se calcula como:

$$\frac{\Sigma(\text{concentración de Cla en } \mu\text{g/L por estación de monitoreo por cuerpo de agua})}{(\text{cantidad de datos de Cla por cuerpo de agua por año})}$$

La normativa de referencia de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 1982), clasifica el estado trófico de los sistemas según la concentración de clorofila a (Cla) en las siguientes categorías:

- Ultraoligotróficos: $< 2,5 \mu\text{g Cla/L}$
- Oligotrófico: $2,5 - 8,0 \mu\text{g Cla/L}$
- Mesotrófico: $8,0 - 25 \mu\text{g Cla/L}$
- Eutrófico: $25 - 75 \mu\text{g Cla/L}$
- Hipereutrófico: $> 75 \mu\text{g Cla/L}$

Estado Trófico: da cuenta de su grado de "eutrofización", el cual es originado a partir del enriquecimiento de las aguas superficiales con nutrientes (nitrógeno y fósforo principalmente) y estimula el desarrollo de las plantas, las algas y las cianobacterias. Las actividades humanas que se desarrollan en los suelos de las cuencas hidrográficas aportan nutrientes a las aguas, ya sea mediante aportes difusos (escorrentía, erosión o fertilización de los campos agrícolas) o puntuales (efluentes domésticos, industriales o aguas pluviales urbanas). Estos aportes de nutrientes representan en muchos casos un exceso de nutrientes en los cuerpos de agua superficiales, que pueden manifestarse a través de problemas de floraciones de cianobacterias y déficit de oxígeno. En orden creciente (y relacionados con el aumento de la concentración de nutrientes), los estados tróficos de los cuerpos de agua van desde la oligotrofia a la hipereutrofia. El fósforo es un nutriente relevante en la determinación del estado trófico, porque normalmente es el limitante del desarrollo de los productores primarios (plantas, algas, cianobacterias), por su menor proporción en el ambiente. Existen diferentes índices que caracterizan y miden el grado de eutrofización de los cuerpos de agua, basados en la concentración de nitrógeno, fósforo, clorofila o la turbidez en el agua. En este caso se define el estado trófico de los sistemas acuáticos en base a la concentración de fósforo total.

Nivel trófico	IET lóticos	Escala cromática
Ultraoligotrófico	$\leq 47,0$	Light Blue
Oligotrófico	$47,0 < IET \leq 52,0$	Blue
Mesotrófico	$52,0 < IET \leq 59,0$	Green
Eutrófico	$59,0 < IET \leq 63,0$	Yellow
Supereutrófico	$63,0 < IET \leq 67,0$	Orange
Hipereutrófico	$> 67,0$	Red

Figura 5 – Niveles de eutrofización - Fuente: Observatorio Ambiental Nacional.

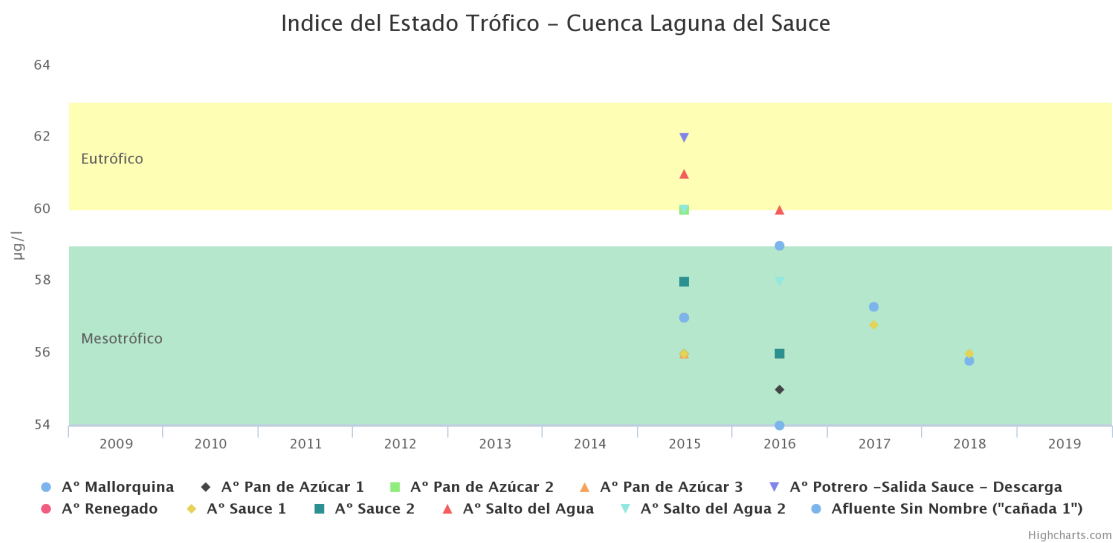


Figura 6 – Indicador de Estado Trófico en la Laguna del Sauce - Fuente: Observatorio Ambiental Nacional.

La cuenca de la Laguna del Sauce presenta un estado trófico entre meso y eutrófico. Los tributarios de la Laguna del Sauce muestran un estado trófico general de mesotrófico con algunas estaciones que presentan en algunos años estados eutróficos.

Floraciones algales: Según Pearl (1994) existen ciertas condiciones que se dan dentro del medio acuático que pueden favorecer el crecimiento de las cianobacterias como los procesos de: eutrofización, altas temperaturas en la superficie ($>20^{\circ}\text{C}$), ambientes alcalinos y sistemas poco profundos sometidos a largas exposiciones de radiación solar. La cuenca tiene una zona de captación con explotaciones agrícolas y ganaderas que, en muchas ocasiones, el exceso de purines y de fertilización son responsables de la existencia de contaminación difusa y exceso de nutrientes en el agua. La cuenca de la Laguna del Sauce es un sistema que en el siglo XXI es afectada de manera recurrente por floraciones de cianobacterias con periodos de alta concentración de clorofila-a (Ch-a), especialmente en el período de verano tardío y comienzos de otoño.

2.4. Contexto

A partir de la carta de uso de suelo proporcionada por el SIT-MVOT, se observa que la mayor parte de la superficie de la cuenca de Laguna del Sauce corresponde a campo natural (47,6%), seguida por el monte nativo (16,9%) (Tabla 1). La ganadería de carne es la principal actividad dentro de la cuenca. En evaluaciones previas (Rodríguez et al. 2010) se constató que la mayoría de los predios son criadores (42% de vacas de cría/stock) con una baja proporción de ovinos, 0.7 de relación lanar: vacuno (L/V). Esta actividad se realiza en la mayoría de los casos en predios menores a 50 ha bajo la modalidad de producción extensiva (MGAP-SNIG 2016). Sin embargo, se registran en la zona algunos casos de producción intensiva (MGAP-DICOSE 2015). Es de destacar que la producción ganadera se desarrolla mayoritariamente sobre campo natural y pasturas regeneradas. La superficie de esta cobertura de suelo no ha tenido variaciones importantes en los últimos 15 años. La superficie de pasturas mejoradas, incluidas las praderas artificiales, los campos fertilizados, mejorados y los cultivos forrajeros para ganadería, llega al 2016 a valores similares al del año 2004 –tomado como inicio de la serie–. Sin embargo, en la última década el mejoramiento experimentó un crecimiento sostenido, donde en su año con mayor diferencia supera el 17%, con respecto al año base, lo que representa 55.330 ha mejoradas en el año 2008. Asimismo, esta tendencia de crecimiento es opuesta a lo que sucede en el resto del territorio nacional. A pesar de esto la concentración de ganado por hectárea dentro de la cuenca es similar a la del nivel nacional, que muestra una disminución a partir de 2009 (MGAP-DIEA 2015).⁶

COBERTURA DE SUELO	HECTÁREA	%
Herbáceo Natural	33608,8	47,6
Monte Nativo	11901,4	16,9
Plantación Forestal	9118,8	12,9
Cultivos > 4-5 ha	6467,1	9,2
Aguas Naturales	4154,7	5,9
Cultivos Regados y de Secano < 4-5 ha	1749,8	2,5
Arbustos	1011,1	1,4
Áreas Urbanas Dispersas	704,2	1,0
Área Natural inundable	437,9	0,6
Área Urbana	437,8	0,6
Equipamiento Urbano	308,9	0,4

⁶ Instituto Sudamericano para Estudios sobre Resiliencia y Sostenibilidad (SARAS) - 2018.

Áreas Desnudas	256,8	0,4
Canteras, Areneras, Minas a Cielo Abierto	188,9	0,3
Aguas Artificiales	97,9	0,1
Frutales	91,2	0,1
TOTAL	70535,3	100,0

Tabla 1: Cobertura del suelo en hectáreas de diferentes usos correspondiente al año 2015. Elaboración propia en base a datos del Sistema de Información Territorial (SIT).

COBERTURA DE SUELO DEL AÑO 2015 EN LA CUENCA LAGUNA DEL SAUCE

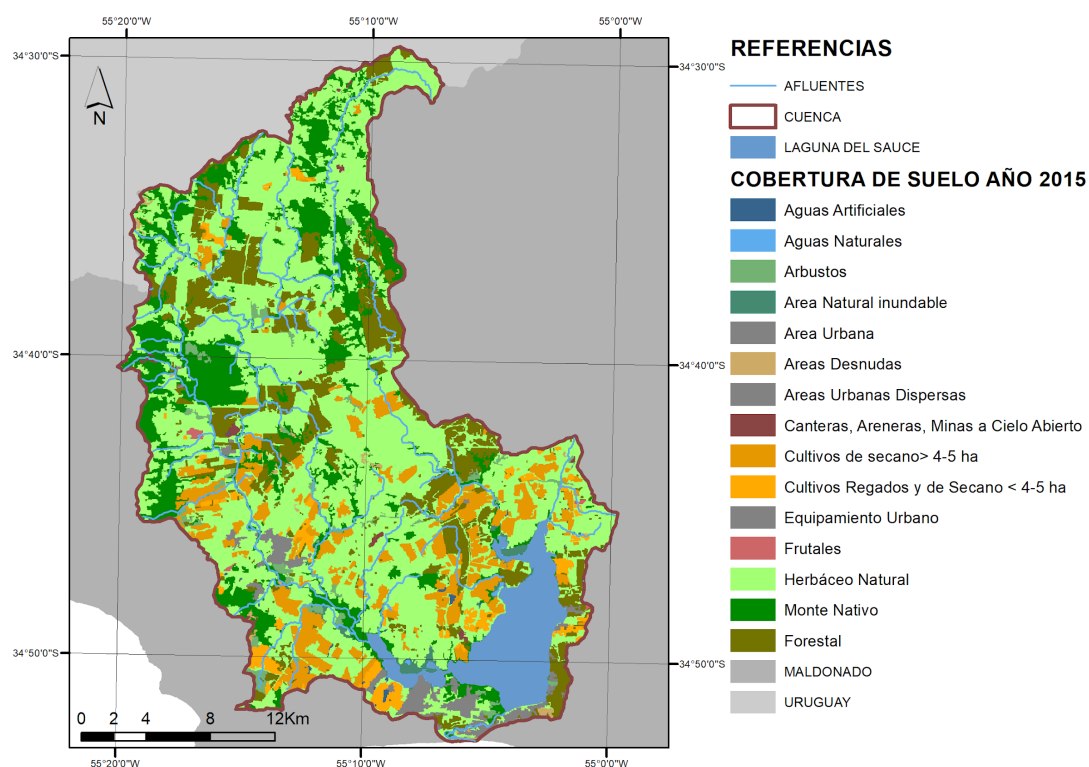


Figura 7 – Cobertura de suelo del año 2015 - Fuente: Elaboración propia en base a datos de DINAMA.

A raíz de los diferentes usos del suelo, se puede hablar de diferentes impactos ambientales. Por su parte, la ganadería, tanto extensiva como intensiva, erosiona el suelo. Esto incrementa las escorrentías superficiales y subsuperficiales facilitando el aporte de nutrientes y patógenos a los cuerpos de agua, los cuales sufren un enriquecimiento de nutrientes que modifican su grado de eutrofización. Respecto a la forestación en la zona, específicamente de Eucalyptus y Pinus, se conoce que causa pérdida de la biodiversidad fragmentando el hábitat. Esto, además, modifica las propiedades físico-químicas del suelo y altera el régimen hídrico causando un incremento de estados eutróficos en cuerpos de agua, principalmente en épocas de sequía. Por su parte, la

agricultura de secano, causa también pérdida de la biodiversidad de la zona y causa la erosión del suelo. Esto incrementa las escorrentías y facilita el aporte de nutrientes y plaguicidas a los cuerpos de agua, generalmente en el verano y verano tardío cuando se producen las cosechas. La urbanización es otro uso del suelo que causa fragmentación del hábitat y a su vez, impermeabilización del suelo. Esto modifica el ciclo hidrológico en la zona facilitando el aporte de contaminantes a los cursos de agua.

3. Teledetección

El uso de productos teledetectados como fotografías aéreas e imágenes satelitales ha sido central para el análisis de espacios y superficies. Con el avance tecnológico y el desarrollo de misiones continuas en imágenes satelitales se ha revitalizado el uso de estas herramientas en dichos estudios.

La teledetección ha significado un gran avance para el monitoreo de la superficie terrestre. Desde 1972 con el lanzamiento del primer satélite Landsat se han obtenido de manera continua imágenes satelitales de todo el mundo, lo que ha permitido analizar la dinámica terrestre a largo plazo (De Jong y Van Der Meer, 2005).

La utilización de esta fuente de información es de gran importancia para el desarrollo de estudios multitemporales sobre todo en áreas donde los registros oficiales son inexistentes y/o deficientes. La información recabada por los distintos sensores es muy variada por lo que se han podido desarrollar estudios de monitoreo ambiental, urbano, búsqueda de recursos e incluso aplicaciones militares (Weng, 2010).

Con el rápido avance de la tecnología y con la dinámica global de difusión del conocimiento, las diferentes agencias espaciales han facilitado el acceso a la información proporcionada por los satélites a través de servidores y portales web, donde cualquier usuario interesado tenga la posibilidad de descargar imágenes satelitales para la monitorización de los recursos y la gestión del territorio. Tanto la calidad (resolución) como la disponibilidad de las imágenes ha mejorado enormemente desde sus orígenes, existiendo además programas dirigidos especialmente para el tratamiento de las imágenes como lo es SNAP (Sentinel Application Platform), ofrecido por la Agencia Espacial Europea.

3.1. Fundamentos físicos de la teledetección

El término "Remote Sensing" (Teledetección) se utilizó por primera vez en el año 1960, estando referido entonces a la observación y medida de un objeto sin estar en contacto con él. Actualmente se la considera como la adquisición de información en torno a un objeto sin estar en contacto físico con el mismo. La información es adquirida detectando y midiendo cambios que el objeto induce en su entorno; los citados cambios pueden referirse a un campo electromagnético emitido o reflejado, ondas acústicas reflejadas o alteradas o bien a perturbaciones del campo gravitatorio o del potencial magnético debido a la presencia del objeto.

La forma con la que se consigue la interacción con la superficie depende de cada sensor, estableciéndose un flujo por:

- Reflexión: cuando el sensor capta un flujo energético proveniente del sol reflejado por la superficie terrestre;
- Emisión: cuando un dispositivo situado en la superficie emite una señal al espacio y es captada por el sensor;

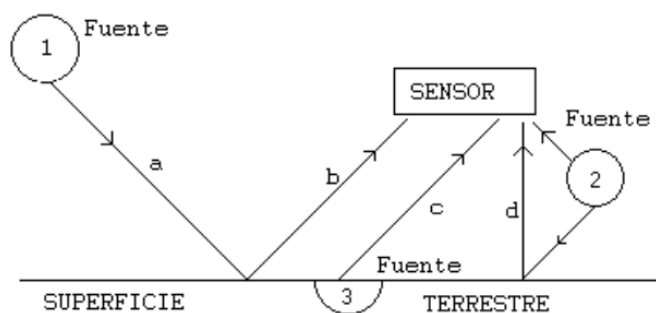
- Reflexión – emisión: cuando es el propio sensor quién emite y capta la onda una vez reflejada en el objeto que se pretende estudiar.

En cualquiera de estos tres casos, el flujo energético constituye una forma de radiación electromagnética transmitida por radiación.

Generalmente, el uso más usual del término teledetección se realiza en referencia a las técnicas electromagnéticas de adquisición de información. Estas técnicas abarcan el conjunto del espectro electromagnético desde las ondas de radio de baja frecuencia pasando por las regiones de las microondas, infrarrojo lejano, infrarrojo próximo, visible, ultravioleta, rayos X, rayos gamma, hasta los rayos cósmicos.

Un Sistema de Teledetección de la superficie terrestre, basado en las ondas electromagnéticas, se caracteriza por la concurrencia de los siguientes elementos:

- Fuente o fuentes de la radiación electromagnética: interacción de las ondas electromagnéticas con la superficie terrestre o interacción de las ondas electromagnéticas con la atmósfera;
- Receptor o receptores de las ondas electromagnéticas.



- a.- Radiación incidente.*
- b.- Radiación reflejada.*
- c.- Radiación emitida.*

Figura 8: Sistema de Teledetección. Fuente: Curso de Teledetección aplicada a la observación e información territorial - Módulo 1: Fundamentos, Santiago Ormeño Villajos (UPM).

Existen interacciones entre el flujo energético por su paso a través de la atmósfera, a la hora del comportamiento del sistema de teledetección. La distorsión provocada, se rectifica mediante correcciones dirigidas a redefinir las longitudes de onda obtenidas por el sensor, procurando que cada elemento refleje sus longitudes de onda características; esto es conocido como firma espectral.

3.2. El espectro electromagnético

En base a la teoría cuántica, a menor longitud de onda, ocurre un aumento de la energía contenida por la radiación electromagnética. La longitud de onda se relaciona con la frecuencia – la inversa de la longitud de onda $f=1/L$ –. Con este principio, se puede decir que una onda de gran frecuencia tendrá consecuentemente, una menor longitud de onda.

La radiación electromagnética previamente, ha sido emitida por un cuerpo incandescente. Sus propiedades físicas dependen de la temperatura del cuerpo emisor, correspondiendo las altas temperaturas a grandes emisiones de energía y elevadas frecuencias de onda.

Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, están establecidas una serie de bandas donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas, dependiendo de su longitud de onda es denominado espectro electromagnético. Las bandas espectrales más utilizadas en teledetección con la tecnología actual son las siguientes:

- Espectro visible (0,4 – 0,7 μm): se denomina de esta forma ya que es el único tipo de radiación electromagnética que consigue distinguir el ojo humano. Dentro del espectro visible se observan tres bandas elementales: rojo (0,7 – 0,6 μm), verde (0,6 – 0,5 μm) y azul (0,5 – 0,4 μm). El espectro visible coincide con el máximo de radiación emitida por el sol;
- Infrarrojo cercano (0,7 – 1,3 μm): resulta de especial importancia para discriminar masas vegetales, ya que el NIR coincide con el máximo de reflexión de estas;
- Infrarrojo medio (1,3 – 8 μm): en esta región del espectro se entremezclan los procesos de reflexión solar en objetos y la emisión de energía electromagnética desde la superficie terrestre. De 1,3 μm hasta 2,5 μm resulta de gran utilidad para estimar la humedad del suelo. Desde 2,5 μm hasta 8 μm resulta el espectro idóneo para la identificación y detección de incendios forestales además de procesos que alcanzan elevadas temperaturas en la superficie terrestre, tal como erupciones volcánicas;
- Infrarrojo lejano o térmico (8 – 14 μm): en estas longitudes de onda se detecta con gran claridad el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres;
- Micro-ondas (a partir de 1 mm): es un tipo de energía muy transparente a la atmósfera terrestre. Este tipo de espectro es utilizado cuando es el propio sensor quién emite y recibe la radiación solar (radar) y según sea reflejada, se discrimina entre los diferentes objetos.

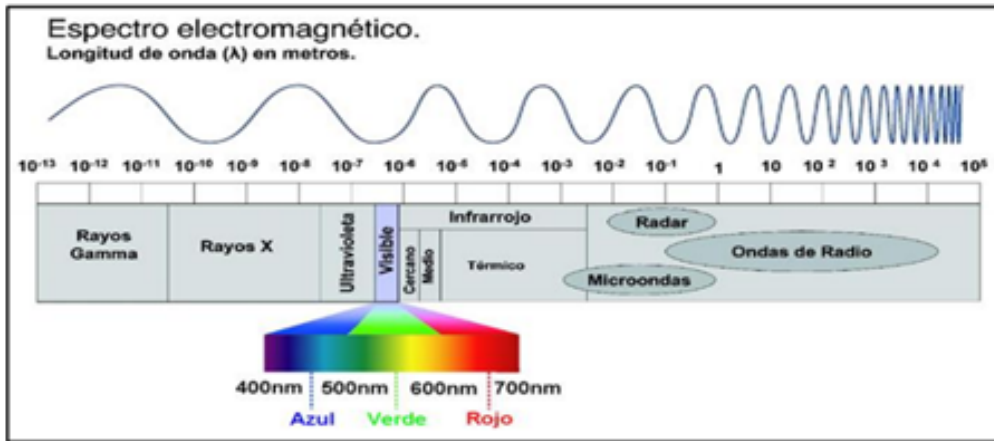


Figura 9: Espectro electromagnético. Fuente: Luz y pigmentos fotosintéticos – KhanAcademy.

Para que la radiación emitida o reflejada por la cubierta terrestre sea captada con las mínimas interferencias por el sensor que se encuentra situado en el espacio, se elige con qué espectro electromagnético trabajar. Esta elección se debe a la absorción de parte del espectro electromagnético por la atmósfera. Este comportamiento es lo que hace referencia a ventanas atmosféricas.

4. Satélites para la observación de la Tierra

4.1. Landsat

La misión Landsat fue puesta en órbita por primera vez en el año 1972, estableciendo a Estados Unidos como líder mundial con respecto a la teledetección terrestre. Este sistema ha contribuido a la comprensión del medio ambiente terrestre, generando usos revolucionarios de datos espaciales por parte de la industria comercial, alentando una nueva generación de satélites comerciales que proporcionan imágenes espaciales regionales de alta resolución. Las operaciones de la misión han cambiado con el tiempo, aprovechando las capacidades de monitoreo global cada vez más.

Las primeras investigaciones que utilizaron datos de Landsat, demostraron la importancia de las mediciones del índice espectral de la vegetación como un registro de las condiciones de la vegetación (Jackson, 1983; National Research Council, 1986; Tucker; 1979). La densidad del follaje es un atributo fundamental del paisaje; describe la absorción de la luz solar, la capacidad fotosintética y las tasas de evaporación.

Comenzó a hacerse realidad la posibilidad del desarrollo de capacidades integradas al monitoreo y modelado de la tierra, del océano y la atmósfera. Años siguientes, varias agencias federales se involucraron en el programa Landsat-7, construido y lanzado por la NASA y luego producidos y comercializados por el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) para la supervisión de las operaciones diarias y mantenimiento de los archivos Landsat para investigaciones en ciencias de la tierra y aplicaciones de la comunidad.

La constelación consta de ocho satélites. Sus imágenes están compuestas por siete u ocho bandas espectrales, elegidas especialmente para el monitoreo de la vegetación, aplicaciones geológicas y estudio de los recursos naturales.

4.1.1 Landsat 7 y Landsat 8

Landsat 7 fue lanzado en 1999, orbitando la Tierra a una altitud de 705 kilómetros desde entonces. El monitoreo es llevado a cabo a través de “Enhanced Thematic Mapper Plus” (ETM+) y a su vez, consta de un instrumento que elimina el movimiento en zigzag del campo de visión de la imagen causado por su propio movimiento satelital, “Scan Line Corrector” (SLC).

Este satélite que ha provisto de información casi ininterrumpida desde su lanzamiento, en la actualidad presenta un problema a causa de una falla en el instrumento que corrige las líneas escaneadas, dando como resultado que todas las escenas adquiridas desde el 14 de Julio de 2003 hayan sido colectadas conteniendo franjas de datos inválidos (gaps).

Los gaps provocan aproximadamente, la pérdida de un 22% de la información de cada imagen; están dispuestos en franjas inclinadas hacia la izquierda unos 80° respecto a la orientación horizontal debido a la rotación de la imagen y aparecen en intervalos de 33 píxeles. Estas franjas

tienen hasta 15 píxeles en el borde de la imagen, y van disminuyendo gradualmente camino al centro hasta desaparecer.

En la secuencia de escenas tomadas a una misma localización geográfica, las franjas de datos inválidos se van desplazando, hasta coincidir nuevamente en un ciclo de 4 tomas.

Con respecto a los satélites anteriores, no hay mejoras en la resolución temporal, ni en la resolución radiométrica; pero sí, un aumento en la resolución espacial en la banda del infrarrojo térmico, esta pasa de 120m (ETM – Landsat 6) a 60m (remuestreada a 30m).

Especificaciones técnicas:

- Resolución espacial: 30 metros;
- Resolución espectral: 8 bandas (Azul, Verde, Rojo, 2 de Infrarrojo Cercano, Infrarrojo de onda corta, Térmica y Pancromática);
- Resolución temporal: 16 días;
- Resolución radiométrica: 8 bits.

BANDAS	LONGITUD DE ONDA (NM)	GSD (M)
1 - Azul	450 - 520	30
2 - Verde	530 - 600	30
3 - Rojo	360 - 690	30
4 - Infrarrojos	770 - 900	30
5 - Swir 1	1550-1750	30
6 - Infrarrojos Térmicos	10400 - 12500	60 * (30)
7 - Swir 2	2090 - 2350	30
8 - Pancromática	520 - 900	15

* Las bandas TIRS se obtienen a resoluciones de 60 metros pero son remuestreados a 30 metros para información del producto final

Tabla 2: Tabla representativa de bandas espectrales, longitud de onda y resolución espacial de cada una de ellas.

Landsat 8, lanzado en 2013, incorpora dos instrumentos de barrido para el monitoreo de la cubierta terrestre: Operational Land Imager (OLI) y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS). Incluye, además, dos nuevas bandas espectrales, Aerosol costero – Banda 1 – diseñada específicamente para recursos hídricos, estudios sobre la calidad del agua, investigación en zonas costeras como por ejemplo el estudio de la contaminación, etcétera; y por otro lado, la banda Cirrus – Banda 9 – siendo un nuevo canal infrarrojo utilizado para la detección de nubes.

El sensor TIRS recoge dos bandas espectrales, la Banda 10 y la Banda 11. La primera es de 10.60 – 11.19 μm y la segunda de 11.50 – 12.51 μm . Estas bandas representan la Banda 6 de Landsat 7 (10.40 – 12.50 μm). Ambas son de mucha utilidad a la hora de proporcionar temperaturas más precisas acerca de la superficie terrestre, estudiar el proceso de la transferencia de calor y humedad en el ámbito de la agricultura, entre otros procesos.

La resolución radiométrica de este satélite aumenta de 8 a 16 bits. Esto hace que proporcione una mejora significativa a la hora de la detección de cambios en la superficie terrestre; mientras que la resolución temporal se mantiene en 16 días.

Los datos producidos por Landsat 8 son totalmente compatibles con todos los datos de los productos estándar a nivel 1 creados utilizando desde Landsat 1 a Landsat 7.

Especificaciones técnicas:

- Resolución espacial: 30 metros;
- Resolución espectral: 11 bandas (Azul costero, Azul, Verde, Rojo, Infrarrojo Cercano, 2 de Infrarrojo de onda corta, Pancromática, Cirrus, 2 de Infrarrojo Térmico);
- Resolución temporal: 16 días;
- Resolución radiométrica: 16 bits.

BANDAS	LONGITUD DE ONDA (MM)	RESOLUCIÓN (M)
1 - Aerosol Costero	0,435 - 0,451	30
2 - Azul	0,452 - 0,512	30
3 - Verde	0,533 - 0,590	30
4 - Rojo	0,636 - 0,673	30
5 - Infrarrojo Cercano (Nir)	0,851 - 0,879	30
6 - Infrarrojo de Onda Corta (Swir) 1	1,566 - 1,651	30
7 - Infrarrojo de Onda Corta (Swir) 2	2,107 - 2,294	30
8 - Pancromática	0,503 - 0,676	15
9 - Cirrus	1,363 - 1,384	30
10 - Tir 1	10,60 - 11,19	100
11 - Tir 2	11,50 - 12,51	100

Tabla 3: Tabla representativa de bandas espectrales, longitud de onda y resolución espacial de cada una de ellas.

Otra novedad que implementa esta misión es la banda de evaluación o control de calidad QA o QB, donde cada píxel de esta banda contiene un valor decimal que representa las combinaciones de bits del relleno de la atmósfera, de la atmósfera y de las condiciones de los sensores.

Los bits de control de calidad mejoran la integridad de las investigaciones científicas, ya que suministran información sobre cuáles píxeles pueden verse afectados por condiciones nubosas. Por ende, cada valor decimal (valor de píxel) representa una condición que puede afectar el cálculo de un valor físico.

4.2. Sentinel

La ESA desarrolló una familia de misiones denominadas “Centinelas” específicamente para las necesidades operativas del programa Copernicus. Cada misión de Sentinel está basada en una constelación de dos satélites para cumplir con los requisitos de revisión y cobertura, proporcionando conjuntos de datos robustos para los Servicios de Copernicus. Llevan una gama de tecnologías, como radar e instrumentos de imágenes multiespectrales para la vigilancia terrestre, oceánica y atmosférica.

4.2.1. Sentinel 2

La misión Copernicus Sentinel-2 comprende una constelación de dos satélites en órbita polar, colocados en la misma órbita sincrónica del sol, a 180° entre sí, con el objetivo de monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre. Su amplia franja de 290 kilómetros de ancho y su alto tiempo de revisión (10 días en el Ecuador con un satélite, y 5 días con 2 satélites en condiciones libres de nubes que resultan en 2-3 días en latitudes medias) apoyan el monitoreo de los cambios de la superficie terrestre.

Tiene como objetivo, proporcionar adquisiciones globales sistemáticas de imágenes multiespectrales de alta resolución aliadas a una alta frecuencia de revisión, como, la continuidad de imágenes multiespectrales proporcionadas por la serie SPOT de satélites y el instrumento Mapeo Temático USGS LANDSAT, y por último, datos de observación para la próxima generación de productos operativos, como mapas de cobertura terrestre, detección de cambios de tierra y variables geofísicas.

Con su gran conjunto de 13 bandas espectrales, amplia franja y alta frecuencia de revisita, el instrumento multiespectral (MSI) de Sentinel-2, soporta una amplia gama de estudios y programas de tierras, reduciendo el tiempo necesario para construir un archivo de imágenes europeo libre de nubes. Sus bandas espectrales proporcionan datos para la clasificación de la cubierta terrestre y el cambio de la misma, la corrección atmosférica y la separación de nubes y nieves.

BANDAS	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)	LONGITUD DE ONDA (NM)
1 - ULTRA AZUL (COSTERO Y AEROSOL)	60	443
2 - AZUL	10	490
3 - VERDE	10	560
4 - ROJO	10	665
5 - VISIBLE E INFRARROJO CERCANO (VNIR)	20	705
6 - VISIBLE E INFRARROJO CERCANO (VNIR)	20	740
7 - VISIBLE E INFRARROJO CERCANO (VNIR)	20	783
8 - VISIBLE E INFRARROJO CERCANO (VNIR)	10	842
8a - ROJO DE BORDE (RedEdge)	20	865
9 - VAPOR DE AGUA	60	940
10 - CIRRUS	60	1375
11 - ONDA CORTA INFRARROJA (SWIR)	20	1610
12 - ONDA CORTA INFRARROJA (SWIR)	20	2190

Tabla 4: Tabla representativa de bandas espectrales, longitud de onda y resolución espacial de cada una de ellas.

5. Firma espectral

5.1. Interacción de las radiaciones con los objetos de la superficie terrestre

La reflectancia espectral juega un papel importante en Percepción Remota, es por esto, que se analizan las características espectrales de objetos que aparecen muy frecuentemente en aplicaciones de esta tecnología como son la vegetación, el suelo y el agua.

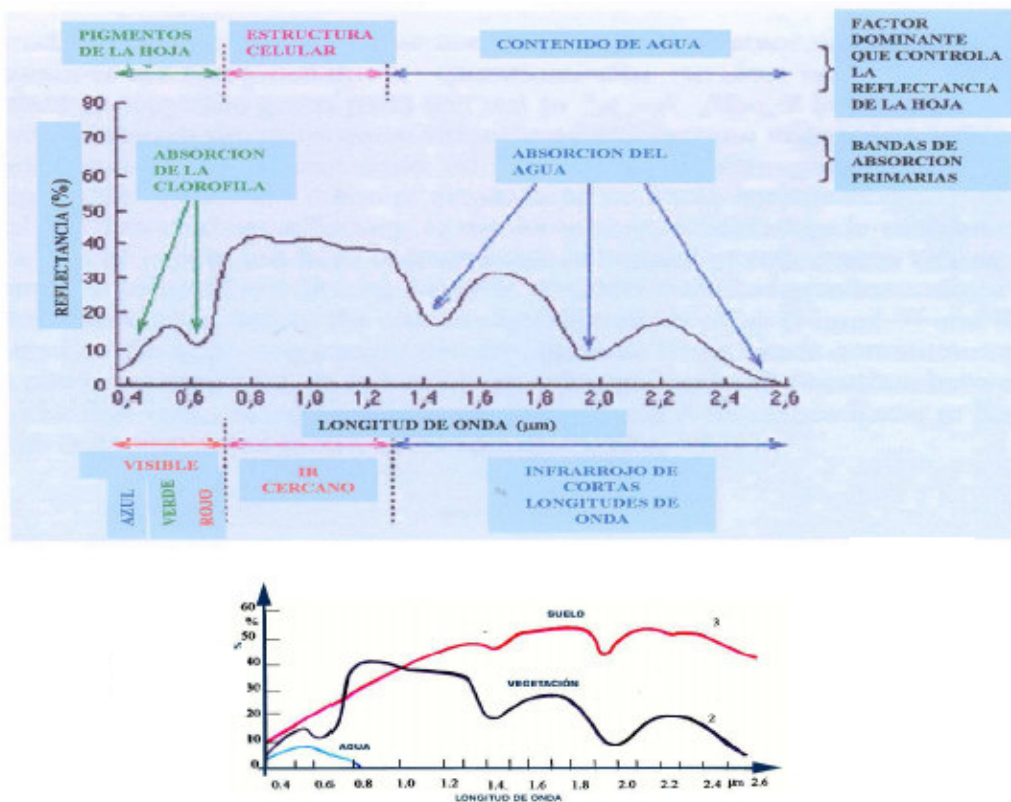


Figura 10: curvas de reflectancia espectral de la vegetación, el suelo y el agua. Fuente: La reflectancia en el agua.

5.2. La reflectancia en la vegetación

La reflectancia en la vegetación, es relativamente baja en la región visible, con un máximo en el verde de aproximadamente 0,53 µm, aumenta bruscamente en el infrarrojo (IR) y disminuye a valores bajos de 2,5 µm. La baja reflectancia en el visible se atribuye a la gran absorción de los pigmentos vegetales, principalmente la clorofila. Aunque, estos pigmentos son altamente transparentes a la radiación IR, y la elevada reflectancia en dicha región estaría determinada por la estructura interna de la hoja.

Los valores mínimos de reflexión a 1,45, 1,95 y 2,5 µm corresponden a la elevada absorción de las moléculas de agua presentes en la hoja.

Las superficies internas y externas de la hoja están tapizadas por una simple capa de células epidérmicas carentes de clorofila y recubiertas por una delgada película de ceras. El tejido mesodérmico entre las dos epidermis está formado por dos capas. La capa superior contiene células oblongas dispuestas en forma regular y ordenada (tejido en empalizada). Estas células son ricas en las clorofilas a y b que están contenidas en cuerpos subcelulares denominados cloroplastos, componentes predominantes del grupo de cromoplastos que también contienen pigmentos como xantofilas y carotenos (las clorofilas reflejan el verde, las xantofilas el amarillo, verde y rojo; y los carotenos el rojo). La parte inferior del tejido mesodérmico es esponjoso, formado por células de forma irregular, flojamente empaquetadas, dejando entre ellas numerosos espacios intercelulares y cavidades en el aire. Se indican en la imagen, posibles trayectorias para la radiación que atraviesa la hoja. Generalmente solo una pequeña fracción de la radiación incidente es reflejada directamente por la superficie externa, ya que la cutícula y la epidermis son casi transparentes al visible y al IR cercano. Otra fracción de radiación puede ser transmitida directamente a través de la hoja.

Finalmente, el resto de la radiación sufre interacciones con la estructura interna de la hoja. Parte de ella puede ser absorbida por los pigmentos de la hoja, pero una fracción importante sufre reflexiones y refracciones múltiples en el tejido esponjoso debido a la sensible diferencia de índices de refracción entre el aire ($n=1.0$) y las paredes de las células hidratadas ($n=1.3$).

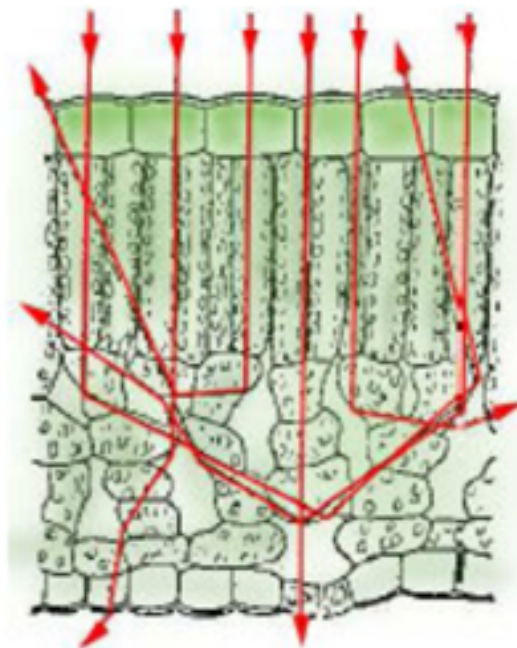


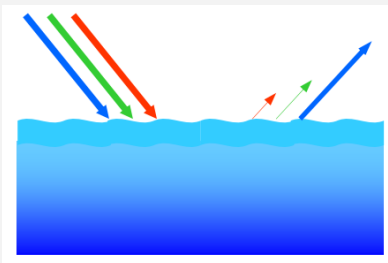
Figura 11: Corte transversal de una hoja, mostrando estructura interna. Fuente: La Reflectancia en los vegetales.

Como consecuencias de las reflexiones, parte de la radiación vuelve hacia atrás, pudiendo emerger como radiación reflejada. Como la clorofila es transparente al IR cercano, la hoja refleja intensamente dicho rango espectral (en dicha región típicamente es reflejado un 40-50% de la radiación incidente en la hoja). Entonces, se puede decir que las características espectrales de la radiación reflejada por una hoja en la región visible depende fundamentalmente de la absorción de radiación por parte de los pigmentos de la hoja, mientras que en el IR cercano, en la región de 0.7 a 1.3 μm , es consecuencia primaria de la estructura interna de la hoja. Para valores superiores a

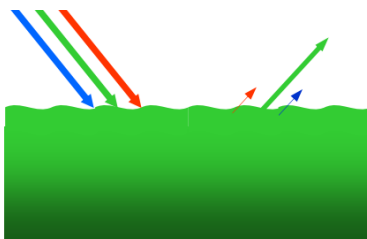
1.3 μm aparecen mínimos de reflectancia a 1.4, 1.9 y 2.7 μm asociados a las bandas de absorción del agua.

5.3. La reflectancia en el agua

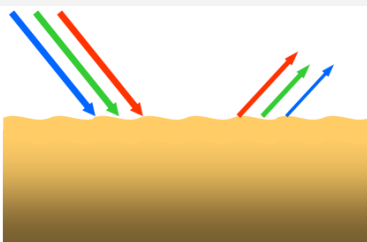
El agua absorbe intensamente en el infrarrojo cercano. Los cuerpos de agua en dicha región aparecerán como cuerpos oscuros, facilitando su observación y delineamiento. Para longitudes de onda visibles, hay factores que dificultan la interpretación. En efecto, la reflectancia de un cuerpo de agua puede generarse por interacción con la superficie (reflexión especular), con material en suspensión o con el fondo del mismo cuerpo de agua. El agua clara absorbe poca energía con longitudes de onda por debajo de 0.6 μm , pero, a medida que aumenta la turbidez, la reflectancia en el visible aumenta rápidamente. Igualmente, la presencia de clorofila (algas, fitoplancton) modifica la reflectancia del agua, efecto que se aplica al monitoreo por percepción remota de concentraciones de algas.



Para agua clara, la reflectancia es baja en el visible y desaparece en los infrarrojos .



Efecto clorofila: a medida que aumenta la concentración de clorofila en el agua (por presencia de algas, phytoplankton), disminuye la reflectancia en el azul y aumenta la reflectancia en el verde. Existe un punto “hinge point”, punto de cruce de concentraciones clorofila de distinta magnitud (510- 520 nm).



Efecto de la turbidez: el pico de reflectancia se corre hacia longitudes de onda más altas a medida que aumenta la turbidez. Reflectancia en volumen. El agua clara refleja muy poco, pero el agua turbia es capaz de reflejar importantes cantidades de la radiación solar incidente

Figura 12 : Variación de la firma espectral del agua.

5.4. Índices de vegetación

El análisis de la vegetación y la detección de los cambios en los patrones de vegetación son claves para la evaluación y el monitoreo de recursos naturales. Entonces no resulta sorprendente que la detección y la evaluación cuantitativa de la vegetación verde es una de las aplicaciones principales de la teledetección para el manejo de recursos naturales y la toma de decisiones (EASTMAN, 2003).

La clorofila absorbe energía fuertemente en las bandas centradas en 0.45 y 0.67 μm . Es por ello que nuestros ojos perciben la vegetación sana de color verde, debido a la gran absorción en azul y rojo por las hojas y la reflexión en el verde. Cuando la vegetación no está sana, disminuye la clorofila, y el resultado es un incremento de la reflectancia espectral en el rojo, por lo que las hojas se ven con un tono amarillento (mezcla de verde y rojo).

5.4.1. NDVI

El índice de vegetación diferencial normalizado o índice NDVI, responde a uno de los parámetros calculados mediante el juego de bandas para el estudio de cubiertas vegetales. Su fundamento radica en el análisis de los valores de reflectancia de longitudes de onda en diferentes secciones del espectro electromagnético. Más concretamente en la banda visible del rojo y en la banda del infrarrojo cercano. Su resultado ayuda a identificar de manera rápida la distribución y el tipo de vegetación en imágenes aéreas o satelitales.

Los Sistemas de Información Geográfica y software basado en análisis ráster, son una herramienta ideal para trabajar este tipo de índices y localizar los lugares en los que existe una mayor cubierta vegetal y el estado en el que se encuentra. Si bien estos análisis han partido siempre de imágenes satelitales, la aparición de los drones ha acercado el cálculo de este indicador para el análisis de la vegetación en superficie de una manera más precisa.

El fundamento del análisis parte del estudio de las dos bandas multispectrales en las que la vegetación interacciona de una manera relevante dentro del espectro electromagnético. Por un lado, la parte del espectro visible en el que la vegetación muestra una elevada absorción en la sección del rojo debido a la presencia de clorofila generando imágenes multispectrales oscuras. Por otro lado, la parte del infrarrojo cercano en el que la vegetación se comporta de manera opuesta generando elevados niveles de reflexión obteniéndose imágenes multispectrales brillantes (niveles radiométricos bajos versus niveles radiométricos elevados).

Este comportamiento también se traduce en el estado en el que se encuentra la vegetación, pues un estrés hídrico o vegetación menos joven varía su pigmentación afectando de manera directa a los valores del índice NDVI. Así, se pueden diferenciar cubiertas vegetales en diferentes estados. El índice es obtenido mediante la siguiente relación:

$$\text{NDVI} = (\text{Banda infrarroja cercana} - \text{Banda roja}) / (\text{Banda infrarroja cercana} + \text{Banda roja})$$

O lo que es lo mismo, y en términos de nomenclatura cuando se trabajan las bandas multiespectrales:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

El intervalo de valores posibles oscila entre -1 y 1. Los valores negativos están asociados a zonas de agua y nieve. Valores positivos próximos a 0 representan zonas rocosas y desnudas que pueden adquirir algo de vegetación hasta llegar a valores próximos a 0,3. A partir de este valor se encuentra presencia de vegetación. Cuanto mayor sea el valor, más frondosa será la vegetación hasta adquirir valores próximos a 1. Se debe tener en cuenta que, aspectos como la floración, la existencia de suelo expuesto, la presencia de masas de agua, o la pérdida de hojas pueden influir bruscamente en los valores del NDVI.

Para el cálculo del índice NDVI es necesario recurrir a un SIG o a cualquier gestor de imágenes ráster o multiespectrales trabajando con los valores de píxel de cada una de las bandas puestas en juego. Los softwares SIG como ArcGIS, gvSIG, QGIS y aplicaciones específicas destinadas a los análisis multiespectrales como SNAP disponen de calculadoras ráster y herramientas directas para el cálculo de este índice específico.

El resultado del álgebra de mapas entre ambas capas multiespectrales da como resultado un nuevo mapa ráster en el que se pueden identificar los valores del índice NDVI comprendido entre unos límites máximos de -1 a 1 y su correspondiente interpretación.

Una alternativa analítica de mayor sensibilidad se puede obtener gracias al cálculo del índice de clorofila desde imágenes Sentinel o Landsat. Una relación entre las bandas del verde, el NIR o el rojo de borde ayuda a identificar el estado de la vegetación e identifica enfermedades como la clorosis o la llegada de estaciones del año.

5.4.2. Herramientas tecnológicas que se pueden sumar al NDVI

Este índice de vegetación es una herramienta potente para el manejo integrado de los recursos naturales y los sistemas de producción agropecuarios. Integra los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permiten un modelamiento y análisis integrado de la información a partir de la teledetección, la cartografía y las bases de datos georreferenciadas.

6. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica complementan el tratamiento y uso de imágenes satelitales, como herramienta orientada a la medición y visualización del territorio. Permite combinar capas de información territorial, según la orientación y finalidad de la investigación. Con los datos extraídos de las diferentes capas espectrales que entregan los sensores remotos, se interpretan las imágenes satelitales ya que la tecnología GPS (Global Position System) ubica y coordina los diferentes puntos de interés permitiendo completar los estudios con datos y material de campo.

La Investigación a realizarse se puede centrar en aspectos espaciales, comparando diferentes lugares y realidades territoriales en un mismo periodo de tiempo o aspectos temporales, comparando la misma ubicación espacial de los fenómenos, mediante análisis en diferentes unidades de tiempo como por ejemplo, cambios en los recursos naturales, seguimiento de enfermedades en la vegetación, así como periodos de helada y sequía, impactos socioeconómicos, comparación de los cultivos en diferentes latitudes, entre otros.

6.1. Software de procesamiento

6.1.2. SNAP

La aplicación SNAP (Sentinel Application Platform) es un recurso gratuito ofrecido por la Agencia Espacial Europea para el procesado y análisis de imágenes satelitales junto a las herramientas Toolboxes propias de Sentinel específicas para trabajar las imágenes en función del modelo de satélite, ya sean imágenes de radar de Sentinel 1 o las habituales imágenes multibanda de Sentinel 2 y Sentinel 3. En cualquier caso, las herramientas de SNAP pueden emplearse para la gestión de imágenes multiespectrales provenientes de misiones como Envisat, Landsat, MODIS o SPOT.

Además de las imágenes a procesar, se pueden incluir otros servicios como WMS o archivos shapefile. Pero, como inconveniente, el procesado de imágenes y su movilización es más lenta de lo habitual dentro de un SIG. Los proyectos generan archivos adicionales que requieren de tiempos relativamente prolongados para guardar los cambios que se realicen. Por otro lado, como punto a favor, SNAP compone por defecto las imágenes RGB con mayor contraste, nitidez y colorido en comparación a los tratamientos convencionales de los SIG de escritorio.

Otras funciones convencionales dentro del SNAP las encontramos a través del grupo de plugins que se pueden instalar para desempeñar análisis particulares de productos específicos de Sentinel. Entre ellos se encuentra la opción de corrección atmosférica para pasar las imágenes del nivel 1C al nivel 2A con ayuda del plugin Sen2Cor, equiparando resoluciones a 10, 20 y 60 metros.

SNAP permite la visualización de las imágenes de manera escalar a través de niveles de visualización, de forma de optimizar el renderizado de la visualización de las imágenes. Aun así, seguirá siendo un software convencional como QGIS, ArcGIS, gvSIG.

El grupo de herramientas Toolboxes de Sentinel, son herramientas de análisis de imágenes radar y bandas multiespectrales que se encuentran disponibles para el tratamiento de interferogramas o datos SAR a través de las herramientas Sentinel Toolbox S1TBX, Sentinel Toolbox S2TBX y Sentinel Toolbox S3TBX. Herramientas SAR, ópticas, polarimetría, ortorectificación, reclasificaciones supervisadas, digitalización, análisis de histogramas o tratamiento de archivos DEM se encuentran disponibles en el menú principal de SNAP junto al grupo de herramientas Sentinel Toolbox.

Aunque SNAP permite la gestión de cualquier imagen satélite, parte de sus herramientas se encuentran destinadas a la gestión de productos Sentinel estandarizados a través de su estructura de carpetas y metadatos. Es por ello, que para el tratamiento y gestión de imágenes satelitales de Sentinel es importante recurrir a la estructura de bandas de trabajo disponible en la plataforma Copernicus en lugar de las convencionales bandas aisladas disponibles en otras plataformas satélite. Accediendo a la carpeta del producto Sentinel y cargando el XML en SNAP, es posible la incorporación masiva de todos los datos de imagen en un solo paso.

6.1.3. ArcGIS Pro

ArcGIS Pro es un software repleto de funciones desarrollado con mejoras e ideas de la comunidad de usuarios. Admite la visualización de datos, el análisis avanzado y el mantenimiento de datos verificados en 2D, 3D y 4D; el intercambio de datos en la suite de productos ArcGIS.

Combina múltiples fuentes de datos para la creación de mapas inteligentes y atractivos. Utiliza herramientas analíticas científicas en datos 2D, 3D y 4D para identificar patrones, hacer predicciones y responder preguntas. Comparte rápidamente proyecto e información dentro de cada organización, en línea y a través de aplicaciones móviles.

Permite combinar datos a partir de múltiples fuentes y formatos, soportando diversos estándares para asegurar la inclusión de cualquier tipo de datos; desplegar datos en 2D y 3D simultáneamente y de esta forma, gestionar múltiples mapas y diseños en un flujo de trabajo único basado en proyectos; simplificar la edición y análisis de datos, realizar análisis interactivos 2D y 3D; publicar mapas y resultados de análisis como servicios web o capturas de alta calidad.

7. Metodología

El análisis de floraciones algales en la zona de estudio mediante el procesado de imágenes de satélite puede dividirse en 5 etapas:

7.1. Descarga de imágenes

La primera etapa consiste en determinar qué tipo de imágenes usar para saber de dónde obtenerlas. Para este trabajo se utilizaron imágenes Sentinel-2 del programa Copernicus de la ESA disponibles en el portal de Earth Explorer del USGS. A su vez, las imágenes descargadas fueron del nivel 1C, es decir, sin correcciones atmosféricas.

Frente a la consideración de trabajar con imágenes Sentinel o Landsat, fueron escogidas las imágenes Sentinel 2 para la observación de los cambios en la Laguna del Sauce ya que consta con un escáner multiespectral. Esto quiere decir, que permite obtener información en las dos longitudes de onda, visibles e infrarrojas. De esta forma, es posible monitorizar los cambios en la tierra, el agua y la vegetación, con una resolución de 10 metros; a diferencia de Landsat, que consta de una resolución en cada píxel de 30x30 metros. Este factor permite que en zonas donde hay vegetación de menor escala, también puedan ser utilizadas las imágenes satelitales para poder trabajar con ellas.

Otro aspecto positivo que aportan las imágenes Sentinel 2 frente a las imágenes Landsat es la resolución temporal. Los satélites Sentinel 2 cuentan con una mayor frecuencia de visitas. Esto quiere decir que se disponen de imágenes de la misma zona, en menor tiempo.

La descarga de imágenes a través del portal de Copernicus es efectuada de la siguiente forma:

1. Definir zona de interés;
2. Seleccionar rango de fecha;
3. Porcentaje de nubes menor a 5%;
4. Corrección atmosférica 2A;
5. Se muestran 25 imágenes, seleccionando la imagen de la fecha más conveniente y la calidad de la misma según parámetros establecidos.

AÑO	MES	DÍA
2017	01	11
2017	05	01
2017	09	18
2017	12	29
2018	01	08

2018	05	26
2018	08	26
2018	10	10
2019	02	02
2019	04	08
2019	07	07
2019	11	11
2020	03	23
2020	07	14
2020	09	29
2020	12	06

Tabla 5: Fechas de las imágenes descargadas.

Luego de la descarga de imágenes, se procedió a realizar su corrección atmosférica y así poder pasarlas del nivel 1C al 2A.

7.2. Corrección atmosférica de imágenes Sentinel 2

A la hora de la descarga de imágenes, se encuentran las imágenes de nivel 1C y las de nivel 2A. Las imágenes de nivel 1C se encuentran ortorectificadas y con niveles de reflectancia por encima de la atmósfera (TOA), mientras que las imágenes de nivel 2A se encuentran ortorectificadas con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera (BOA). Estas últimas, a diferencia de las de nivel 1C, corresponden a imágenes corregidas atmosféricamente, ofreciendo datos de reflectancia más próximos a la realidad.

Por una cuestión de disponibilidad, las imágenes descargadas fueron de nivel 1C. Esto motivó a realizar correcciones atmosféricas, pasando al nivel 2A y de esta forma, se obtuvieron imágenes más nítidas, con mayor brillo y contraste, y sin la textura blanquecina producida por el efecto de la presencia de la atmósfera.

7.2.1. Instancias seguidas

Para corregir atmosféricamente las imágenes se utilizó el Plugin Sen2Cor de SNAP, para con esto, pasar de un nivel de producto 1C a 2A, replicando la estructura del archivo de bandas y realizando un nuevo redimensionado de píxeles a 10 metros de resolución espacial.

El algoritmo Sen2Cor trabaja sobre la banda 10 (cirrus) corrigiendo la presencia de nubes de la imagen y sobre las bandas del azul, rojo y SWIR para medir la transparencia atmosférica mediante el factor AOT (Aerosol Optical Thickness).

El algoritmo se encuentra dentro de la sección Thematic Land Processing. En la pestaña *I/O Parameters* se selecciona el paquete de archivos de Sentinel que se cargaron en un principio y en *Processing Parameters* se activa la casilla *Display Execution Output*, eligiendo la resolución de bandas de 10 metros. Como último paso, se ejecuta el algoritmo obteniendo imágenes más nítidas y con valores de píxel corregidos y almacenados automáticamente en la misma carpeta que las imágenes de nivel 1C descargadas en un principio.

7.3. Firma espectral

Se importa el archivo XML de la imagen BOA que contiene todas las bandas. Con la herramienta Create/ Spectral Profile se crean polígonos en lugares donde se ve que el área es homogénea. Se toma para cada imagen un área para el agua y otra para la vegetación. Se repite el mismo procedimiento para las 16 imágenes, obteniendo así, cada firma espectral.

7.4. Geometría de bandas

Una vez obtenida la imagen corregida atmosféricamente, se le aplica *Band Math* con el nombre del índice a calcular; en este caso NDVI. Los parámetros que aparecen por defecto, quedan iguales, sin realizar ninguna modificación.

La expresión a utilizar para la matemática de bandas es la siguiente: $(B8 - B4) / (B8 + B4)$; correspondiendo B8 a la banda del NIR y B4 a la banda del rojo. Se ejecuta el algoritmo.

Para visualizar el nuevo producto generado, en la pestaña *Product Explorer* dentro de la carpeta de bandas, se muestra índice. El producto final consta de una imagen en escala de grises donde los valores obtenidos varían entre -1 y 1. Recorriendo la imagen dentro de la solapa de *Píxel Info*, se pueden apreciar los valores de NDVI.

7.5. Muestras

Una vez calculado el NDVI, se ingresa en el buscador la herramienta *Pin Manager* para ingresar puntos de muestreo. De esta forma, los pines pueden crearse en el momento, o bien, se pueden importar desde un archivo de muestras en formato de texto o XML.

Una vez establecidas las muestras en la zona de estudio, se procede a determinar el valor de píxel para el NDVI. Con esto, se construye la tabla con los valores necesarios que van a posibilitar el objetivo del proyecto.

8. Análisis y resultados

Es importante comenzar el análisis resaltando que este estudio carece de información *in situ*, por lo que todo análisis será resultado de la información obtenida exclusivamente de las imágenes satelitales.

8.1. Correlación lineal entre NDVI y CAB

Se procedió a determinar el parámetro biofísico de la clorofila. Para esto, se aplicó la herramienta *Biophysical Processor/CAB* del software SNAP, la cual genera un nuevo producto TIFF que contiene una banda con información de concentración de Clorofila A y B (gr/cm^2).

Con los rasters que contienen información de NDVI y CAB de la Laguna, se procedió a analizar la correlación lineal entre ambas creando un gráfico de dispersión. Se optó por realizar este análisis para el primer año de este estudio (2017), para dar el puntapié inicial en el monitoreo de la concentración de clorofila.

Con los rasters correspondientes al NDVI y a la CAB, se prosiguió a realizar máscaras de la Laguna del Sauce. Dentro de las mismas fueron creados 3000 puntos aleatorios, de los cuales se extrajeron los valores del Índice de Vegetación Normalizado y de la Clorofila A y B. Estos valores son la base para realizar los diagramas de dispersión de cada mes del año 2017.

Los gráficos de dispersión permiten visualizar la relación entre dos variables, de forma que una variable se muestra en el *eje x* y la otra, en el *eje y*. Para cada registro, se traza un punto donde las dos variables se intersecan en el gráfico. Cuando los puntos resultantes forman una estructura no aleatoria, existe una relación lineal entre las dos variables. Es decir, cuando los *valores x* pequeños se corresponden con *valores y* pequeños y los *valores x* grandes se corresponden con *valores y* grandes (línea en pendiente ascendente), existe una correlación lineal positiva. Cuando los *valores x* pequeños se corresponden con *valores y* grandes y los *valores x* grandes se corresponden con *valores y* pequeños (línea en pendiente descendente), existe una correlación lineal negativa. Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación calculado para la línea de tendencia del gráfico (R^2) oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que se está intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por lo tanto, menos fiable será.

Con los parámetros necesarios para cada gráfico, se procedió a interpretar los resultados.

8.1.1. Enero 2017

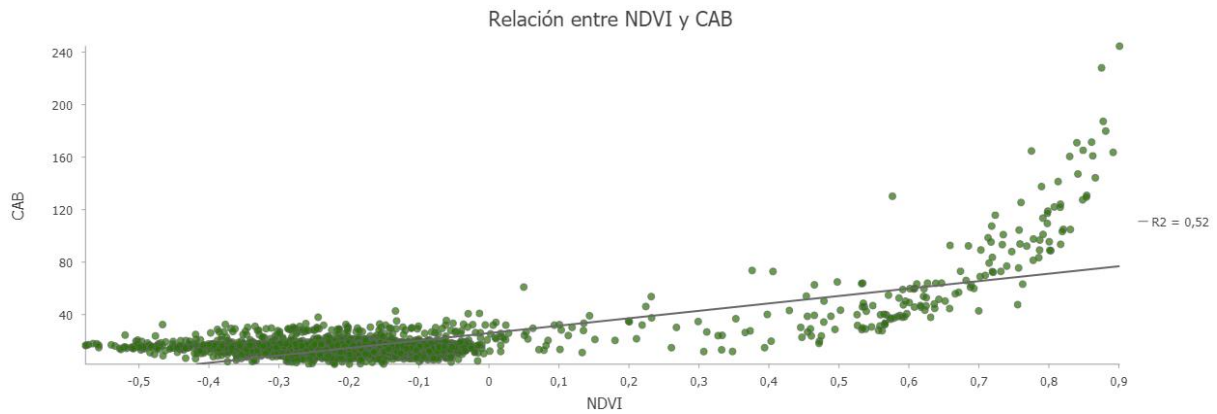


Figura 13 : Gráficos de dispersión del NDVI y CAB para imagen de enero de 2017.

Al interpretar el gráfico de dispersión para los datos de la imagen de enero de 2017, se obtuvo que el coeficiente de determinación entre NDVI y CAB resultaba $R^2 = 0,52$, por lo que se puede observar una débil correlación lineal positiva entre ambas variables.

8.1.2. Mayo 2017

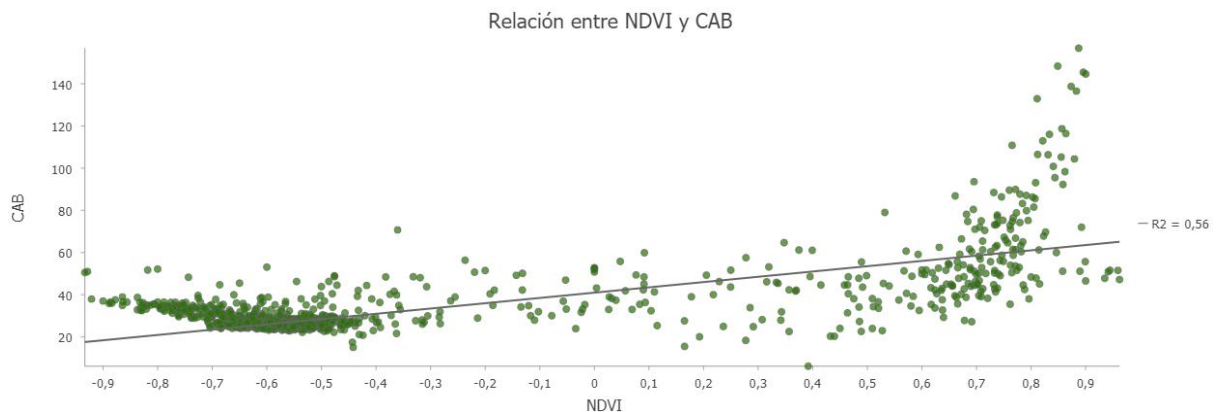


Figura 14 : Gráficos de dispersión del NDVI y CAB para imagen de mayo de 2017.

Para la imagen de mayo de 2017, se obtuvo que el coeficiente de determinación entre NDVI y CAB resultaba $R^2 = 0,56$ indicando también, una débil correlación lineal positiva entre ambas variables.

8.1.3. Septiembre 2017

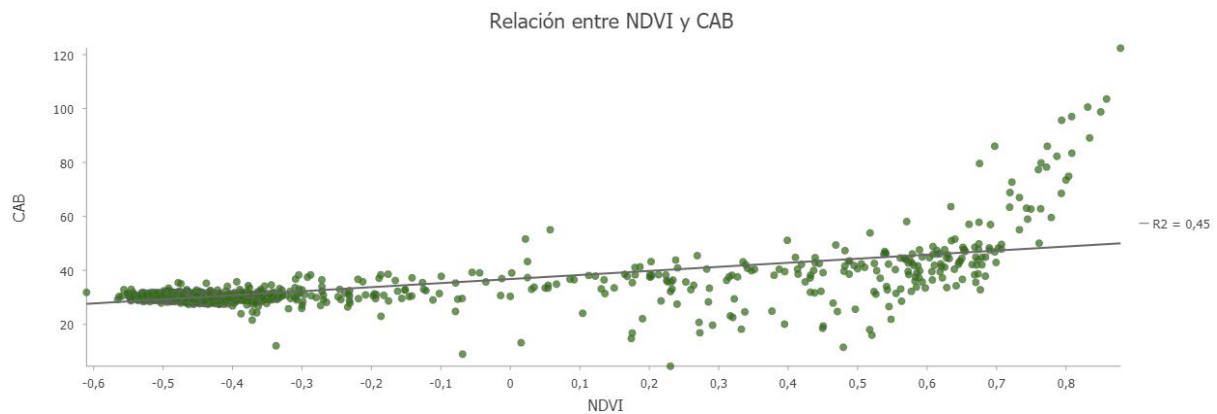


Figura 15 : Gráficos de dispersión del NDVI y CAB para imagen de septiembre de 2017.

Al repetir el proceso para la imagen de mayo de 2017, se obtuvo que el coeficiente de determinación entre NDVI y CAB resultaba $R^2 = 0,45$, resultando, también, una muy débil correlación lineal positiva entre ambas variables.

8.1.4. Diciembre 2017

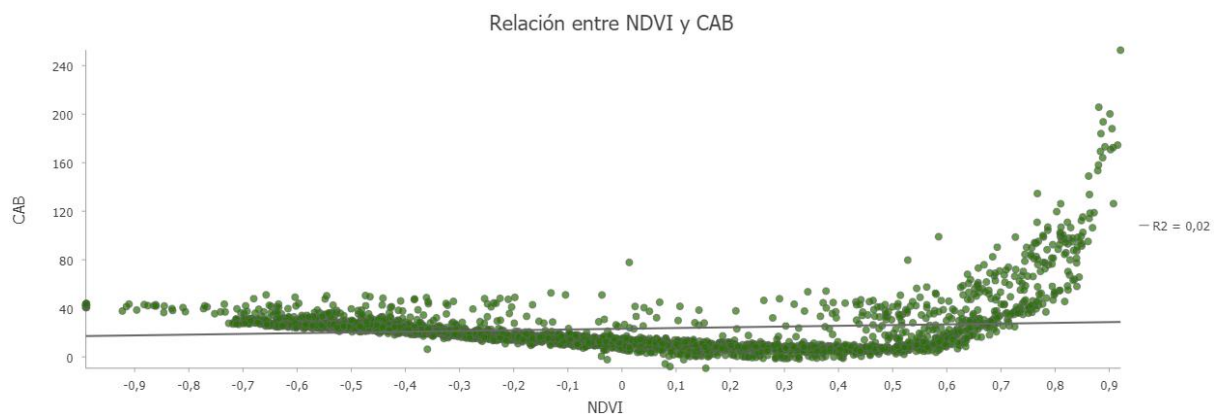


Figura 16 : Gráficos de dispersión del NDVI y CAB para imagen de diciembre de 2017.

Ya en la imagen de diciembre de 2017, se obtuvo que el coeficiente de determinación entre NDVI y CAB resultaba $R^2 = 0,02$, contrastando con los demás gráficos, ya que, al tender a 0, se puede interpretar que no existe correlación lineal entre ambas variables.

8.2. Correlación lineal entre NDVI y CAB solo para valores positivos de NDVI

Visto que al analizar en detalle los gráficos de dispersión entre dichas variables (NDVI y CAB), se observa que comienza a haber correlación lineal a partir de valores positivos de NDVI, y que la misma se fortalece a partir de $NDVI=0,45$, se procedió a realizar un segundo análisis de correlación lineal acotado a los valores $NDVI \geq 0,45$.

8.2.1. Enero 2017

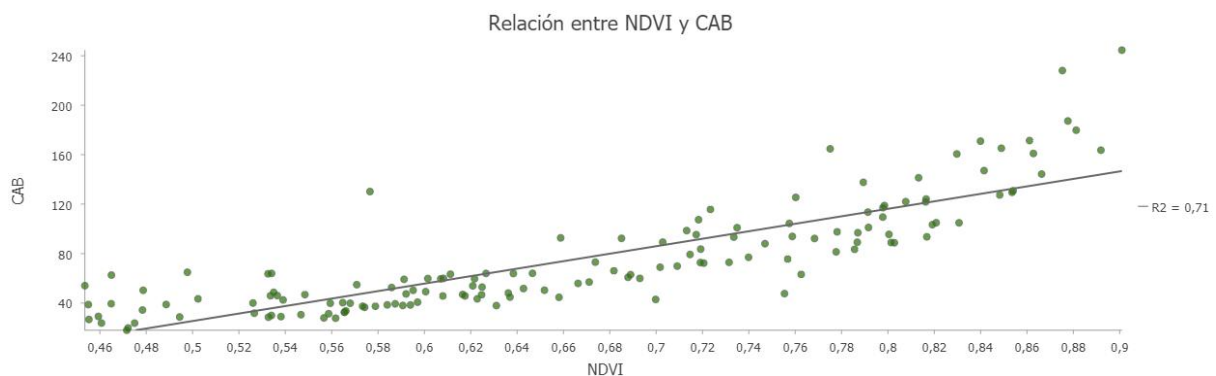


Figura 17 : Gráficos de dispersión del NDVI y CAB para imagen de enero de 2017 acotado a los valores $NDVI \geq 0,45$.

Al interpretar el gráfico de dispersión para los datos de la imagen de enero de 2017, ahora acotado a los valores $NDVI \geq 0,45$, se obtuvo que el coeficiente de determinación entre NDVI y CAB aumentó, siendo este $R^2 = 0,71$, por lo que se puede observar una correlación lineal positiva más fuerte entre ambas variables.

8.2.2. Mayo 2017

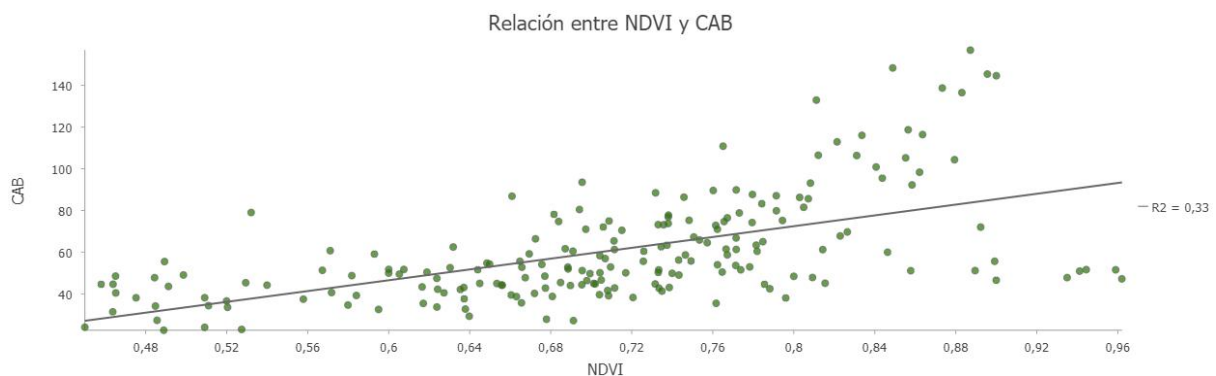


Figura 18 : Gráficos de dispersión del NDVI y CAB para imagen de mayo de 2017 acotado a los valores $NDVI \geq 0,45$.

Al interpretar el gráfico de dispersión acotado para los datos de la imagen de mayo de 2017, se obtuvo que el coeficiente de determinación entre NDVI y CAB varió, siendo este $R^2 = 0,33$, debilitando la correlación lineal.

8.2.3. Septiembre 2017

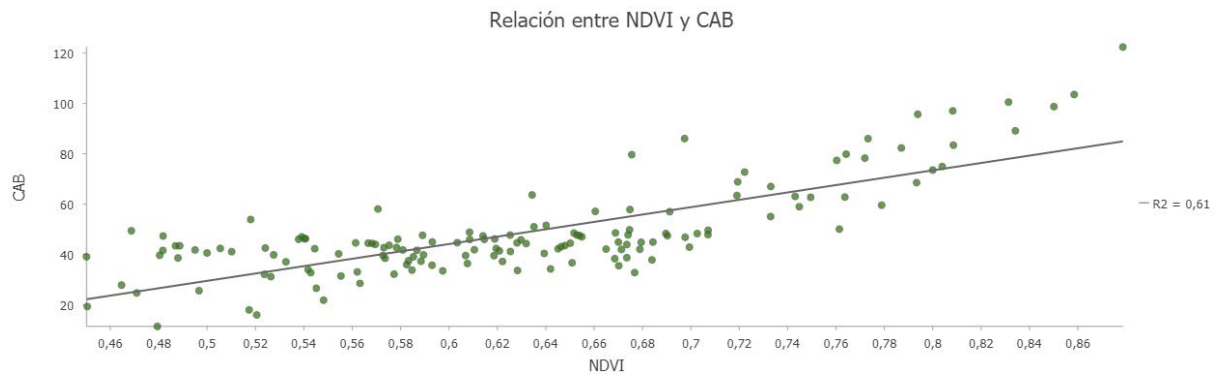


Figura 19 : Gráficos de dispersión del NDVI y CAB para imagen de septiembre de 2017 acotado a los valores NDVI \geq 0,45.

Ya en el gráfico de dispersión acotado para los datos de la imagen de septiembre de 2017, se ve un aumento en el coeficiente de determinación entre NDVI y CAB, siendo este $R^2 = 0,61$, por lo que se puede observar que en este intervalo de valores de NDVI la correlación lineal es positiva y más fuerte.

8.2.4. Diciembre 2017

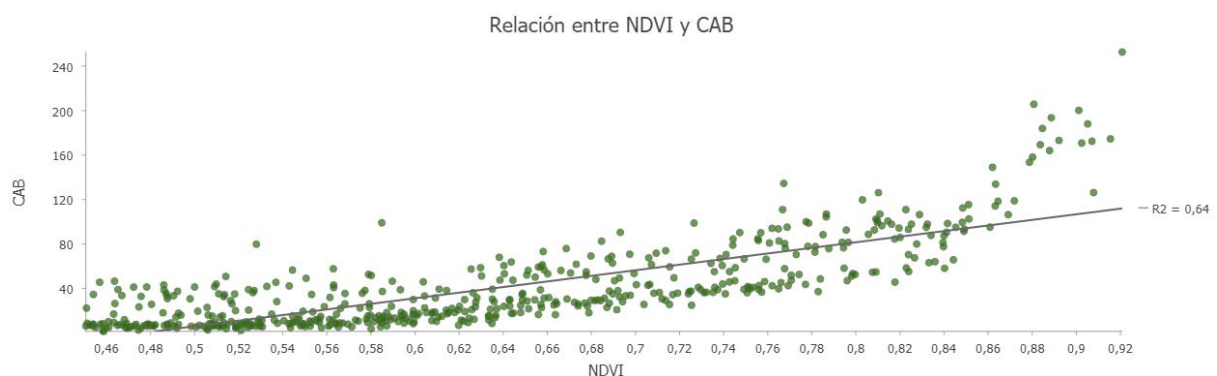


Figura 20 : Gráficos de dispersión del NDVI y CAB para imagen de diciembre de 2017 acotado a los valores NDVI \geq 0,45.

En la imagen de diciembre de 2017, se obtuvo que el coeficiente de determinación entre NDVI y CAB resultaba $R^2 = 0,02$, interpretando que no existe correlación lineal entre ambas variables. Al interpretar el gráfico de dispersión acotado, se ve un aumento considerable en el coeficiente de determinación entre NDVI y CAB, siendo este $R^2 = 0,64$, por lo que se puede observar una correlación lineal positiva mucho más fuerte en este intervalo de valores NDVI.

8.3. Coeficientes de dispersión de los gráficos generados

COEFICIENTE DE DISPERSIÓN PARA TODOS LOS VALORES DE NDVI		COEFICIENTE DE DISPERSIÓN PARA LOS VALORES DE NDVI $\geq 0,45$	
FECHA	COEFICIENTE	FECHA	COEFICIENTE
Enero 2017	0,52	Enero 2017	0,71
Mayo 2017	0,56	Mayo 2017	0,33
Septiembre 2017	0,45	Septiembre 2017	0,61
Diciembre 2017	0,02	Diciembre 2017	0,64

Tabla 6 : Coeficientes de determinación del año 2017.

Al acotar los datos obtenidos y generar un gráfico utilizando solamente valores NDVI $\geq 0,45$, se puede apreciar una mejora significativa en la correlación de ambas variables, ya que los NDVI $\geq 0,5$ representa el dosel de la vegetación densa y saludable.

8.4. Análisis de NDVI

Luego de verificar la correlación entre la concentración de clorofila y el índice NDVI, se procedió a determinar el índice NDVI en, específicamente, 8 muestras ubicadas en diferentes puntos de la Laguna, sobre o cerca de alguna estación de monitoreo de la DINAMA.

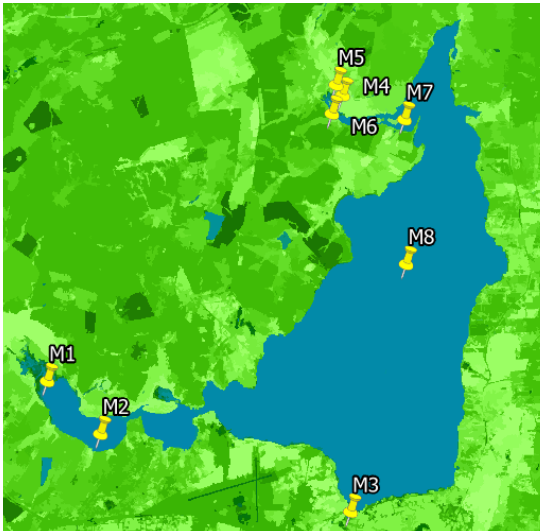
MUESTRA	LONGITUD	LATITUD	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
M1	-55.14935189	-34.83417175	
M2	-55.13499074	-34.84549285	
M3	-55.06823468	-34.86149059	
M4	-55.07243627	-34.77040628	
M5	-55.07423616	-34.76818078	
M6	-55.07518181	-34.77450693	
M7	-55.05592853	-34.77546313	
M8	-55.05474864	-34.80709017	

Tabla 7: Coordenadas de las muestras

Los resultados del cálculo del NDVI varían de -1 a 1. Los valores negativos corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras artificiales, rocas, nubes. El suelo desnudo generalmente abarca un rango entre 0.1 a 0.2; y las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0.2 y 1. El dosel de vegetación sano y denso debería encontrarse por encima de 0.5, mientras que la vegetación dispersa probablemente abarcará valores en un rango de 0.2 a 0.5.

Sin embargo, lo mencionado anteriormente es solo una regla general y siempre se debe tener en cuenta la temporada, el tipo de planta y peculiaridades regionales para saber exactamente el significado de los valores de NDVI. En la mayoría de los casos, los valores de NDVI entre 0.2 y 0.4 hacen referencia a áreas con vegetación escasa; la vegetación moderada tiende a variar entre 0.4 y 0.6 y por último, cualquier valor por encima de 0.6 indica la mayor densidad posible de hojas verdes.

8.4.1. Análisis por muestra y año.

8.4.1.1. Año 2017

MUESTRAS	INFORMACIÓN DEL PÍXEL MUESTRA DE NDVI - 2017			
	11 DE ENE	01 DE MAY	18 DE SET	29 DE DIC
M1	-0.35545	0.55125	0.53604	0.45837
M2	-0.2777	-0.7193	-0.45326	-0.11475
M3	-0.53814	-0.6129	-0.47748	-0.41118
M4	0.26387	0.77375	0.50442	0.68635
M5	-0.11558	-0.54575	-0.45993	0.84303
M6	-0.05815	0.64758	-0.44779	0.85372
M7	-0.05435	-0.625	-0.46735	-0.36842
M8	-0.07842	-0.55195	0.78412	0.6004

Tabla 8: Información del NDVI por píxel por muestra para el año 2017.

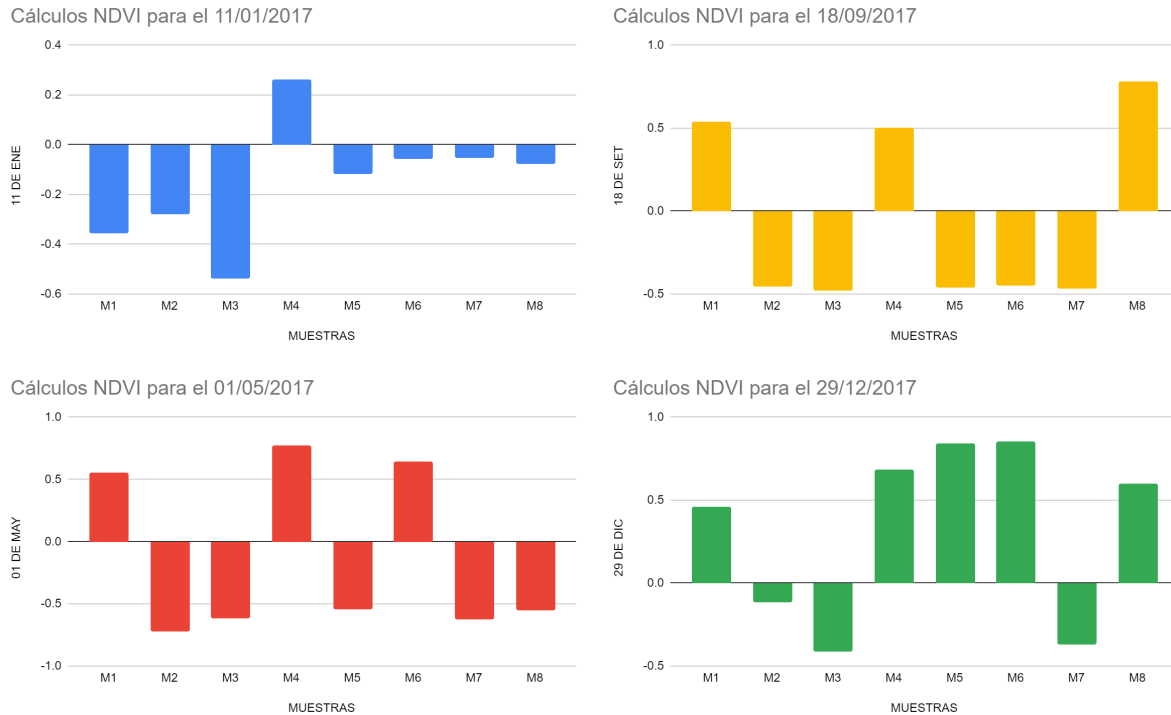


Figura 21: Valores de NDVI en los puntos de muestreo a lo largo del año 2017.

Comenzando por el año 2017, se puede destacar que la muestra número 4, ubicada al norte de la Laguna del Sauce en la desembocadura del Arroyo Sauce, es la única que refleja siempre resultados positivos y, por lo tanto, denota presencia de clorofila. La muestra número 1, ubicada en el extremo sureste de la Laguna del Sauce en la desembocadura del Arroyo Pan de Azúcar también refleja resultados positivos en casi todas las fechas estudiadas, exceptuando enero de ese año. Las demás muestras varían en las diferentes épocas del año.

8.4.1.2. Año 2018

MUESTRAS	INFORMACIÓN DEL PÍXEL MUESTRA DE NDVI - 2018			
	08 DE ENE	26 DE MAY	26 DE AGO	10 DE OCT
M1	0.34915	0.77572	0.69413	0.7224
M2	-0.125	0.63401	-0.69679	-0.25034
M3	-0.43639	-0.195	-0.52657	-0.11864
M4	0.63508	0.81386	-0.43046	0.71234
M5	0.32438	0.84923	0.67501	0.04021
M6	0.48294	0.8249	-0.49754	0.33394

M7	0.59685	-0.43723	-0.35207	-0.43338
M8	0.81775	-0.33168	-0.36929	-0.39515

Tabla 9: Información del NDVI por píxel por muestra para el año 2018.

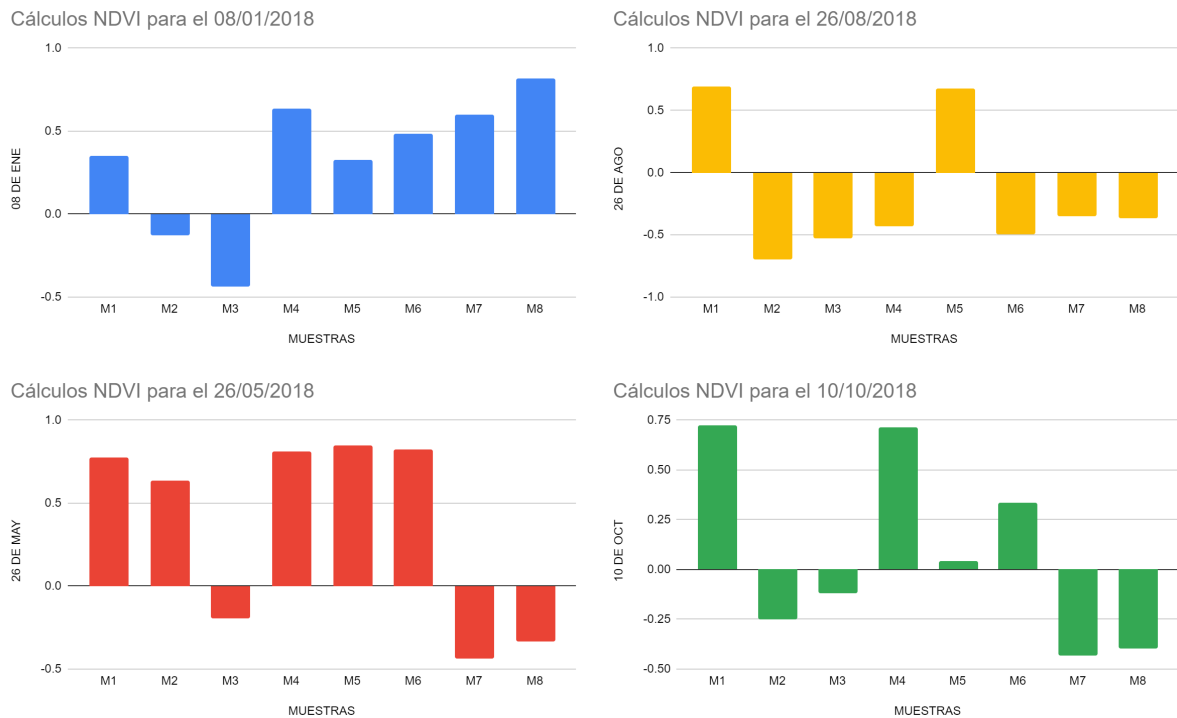


Figura 22: Valores de NDVI en los puntos de muestreo a lo largo del año 2018.

Para el año 2018, se puede destacar la muestra número 5, ubicada al norte de la Laguna del Sauce en la desembocadura del Arroyo Sauce, que refleja siempre resultados positivos y, por lo tanto, denota presencia de clorofila, junto a la muestra número 1, que también refleja resultados similares. Las demás muestras varían en las diferentes épocas del año.

8.4.1.3. Año 2019

MUESTRAS	INFORMACIÓN DEL PÍXEL MUESTRA DE NDVI - 2019			
	02 DE FEB	08 DE ABR	07 DE JUL	11 DE NOV
M1	0.73342	-0.536	0.60478	0.59846
M2	-0.36111	-0.45679	-0.6175	-0.03917
M3	-0.42857	-0.61412	-0.58996	-0.22155
M4	-0.33853	-0.52427	0.52744	0.72439

M5	-0.32125	-0.64878	0.64431	-0.16746
M6	0.78279	0.72066	0.67263	0.49425
M7	-0.4498	0.7414	-0.52033	0.8331
M8	-0.32558	-0.65385	-0.45556	-0.1709

Tabla 10: Información del NDVI por píxel por muestra para el año 2019.

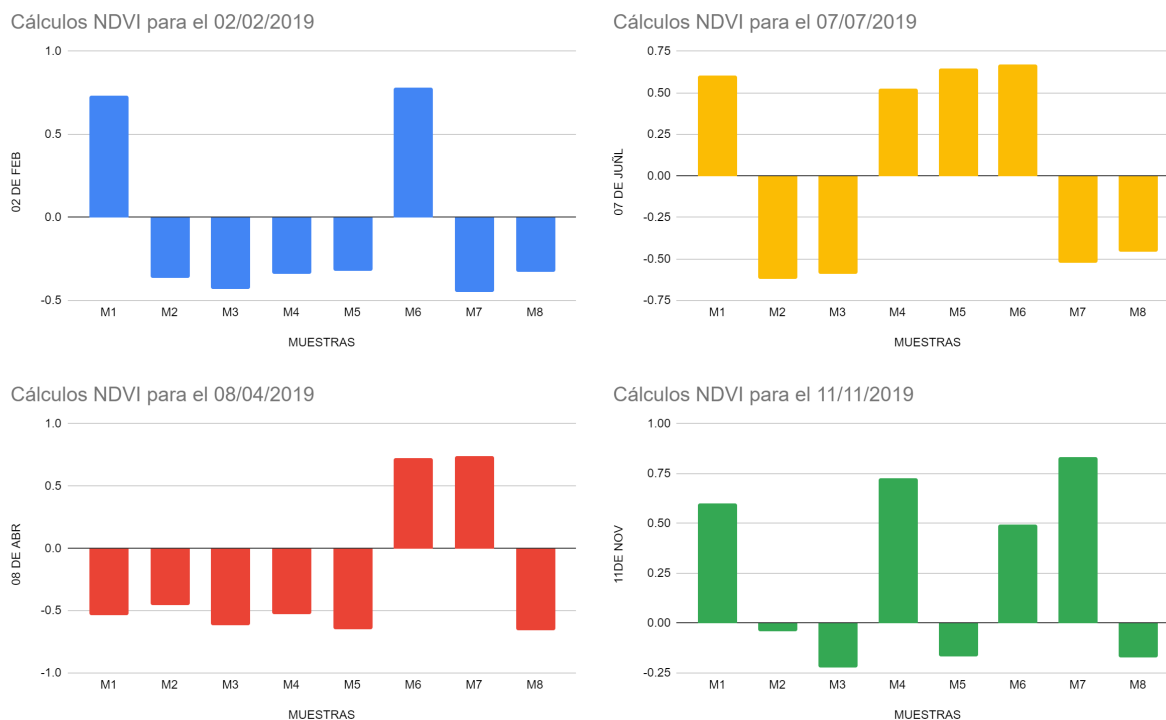


Figura 23: Valores de NDVI en los puntos de muestreo a lo largo del año 2019.

Para el año 2019, se puede destacar que la muestra número 6, ubicada al norte de la Laguna del Sauce en la desembocadura del Arroyo Sauce, es la única que siempre refleja resultados positivos y, denotando presencia de clorofila. La muestra número 1, también refleja resultados positivos en casi todas las fechas estudiadas, exceptuando febrero de ese año. Las demás muestras varían en las diferentes épocas del año.

8.4.1.4. Año 2020

MUESTRAS	INFORMACIÓN DEL PÍXEL MUESTRA DE NDVI - 2020			
	23 DE MAR	26 DE AGO	10 DE OCT	06 DE DIC
M1	0.35241	0.81068	0.47515	0.87199
M2	-0.62061	-0.62682	0.66512	0.5894

M3	0.56259	-0.62644	-0.28814	-0.45763
M4	0.10703	0.76409	0.61903	0.76619
M5	0.43265	-0.35329	0.72641	-0.33679
M6	0.61697	0.66342	0.6024	0.77167
M7	-0.49386	0.6772	0.86987	-0.36617
M8	-0.31707	-0.36364	0.2102	-0.33716

Tabla 11: Información del NDVI por píxel por muestra para el año 2020.

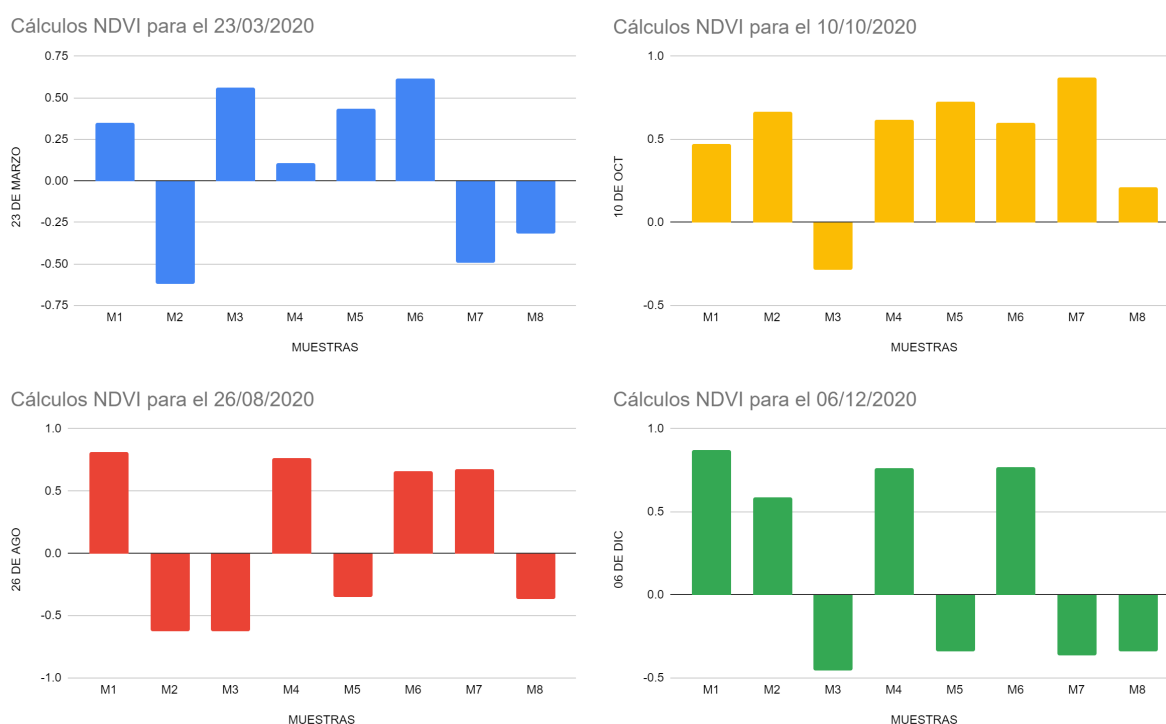


Figura 24: Valores de NDVI en los puntos de muestreo a lo largo del año 2020.

Para el año 2020, se puede destacar que las muestras número 4 y número 6, ubicadas en la desembocadura del Arroyo Sauce, siempre reflejan resultados positivos y, por lo tanto, denota presencia de clorofila, junto a la muestra número 1, que también refleja resultados similares. Las demás muestras varían en las diferentes épocas del año.

8.4.2. Variación anual por muestra

Comenzando por el año 2017, se puede destacar que según la información obtenida del cálculo del NDVI para las 8 muestras (figura 25), en 3 de ellas - muestra 2, muestra 3 y muestra 7 - la presencia de clorofila es nula durante todo el año. En las muestras restantes (1, 4, 5, 6 y 8) la presencia de clorofila varía según la época del año. Esto puede ser consecuencia de diferentes factores. *A priori* solo se podría concluir que en las zonas de las desembocaduras de los cursos de

agua y épocas de más calor, las muestras presentaron un índice mayor, lo cual refleja presencia de clorofila.

Variación anual del cálculo de NDVI por muestra 2017

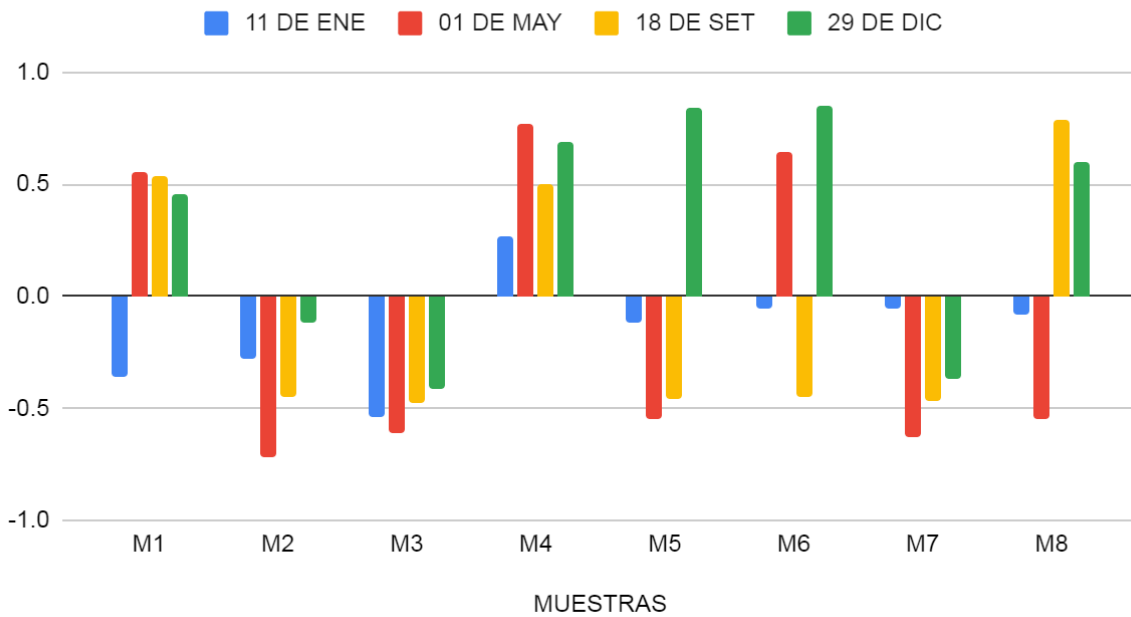


Figura 25: Variación anual del cálculo del NDVI por muestra para el año 2017.

Ya en el año 2018 la situación cambia. Según la gráfica (figura 26) se puede destacar una mayor presencia de clorofila durante el año en cada una de las muestras. Únicamente la muestra 3 se destaca por no tener presencia de clorofila en todas las fechas estudiadas. Para este año se puede mantener la conclusión a *priori* del 2017, donde se afirma que en las épocas de más calor, las muestras presentan presencia de clorofila, destacándose las muestras en zonas de desembocaduras.

Variación anual del cálculo de NDVI por muestra 2018

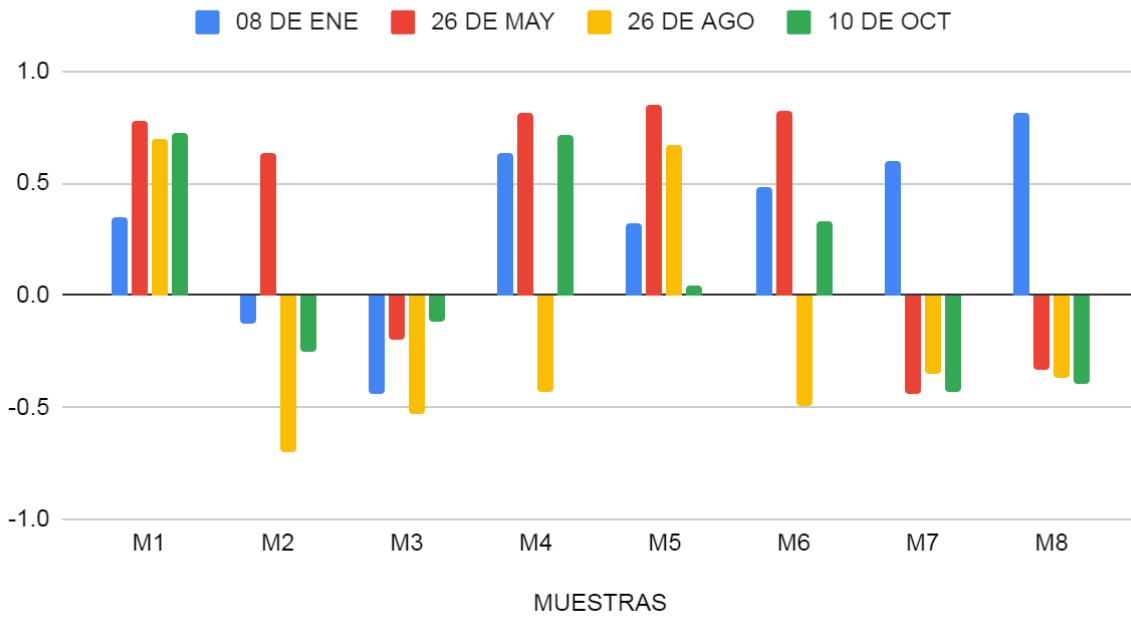


Figura 26: Variación anual del cálculo del NDVI por muestra para el año 2018.

En el año 2019 la tendencia se modifica y se reduce la presencia de clorofila a lo largo del año para varias de las muestras, incluso en los meses más cálidos. Por ejemplo, en la imagen correspondiente al 02 de febrero y siendo verano, se puede apreciar solamente clorofila en 2 muestras, mientras que para la imagen del 07 de julio, siendo invierno, la presencia de clorofila se destaca en la mitad de las muestras.

Variación anual del cálculo de NDVI por muestra 2019

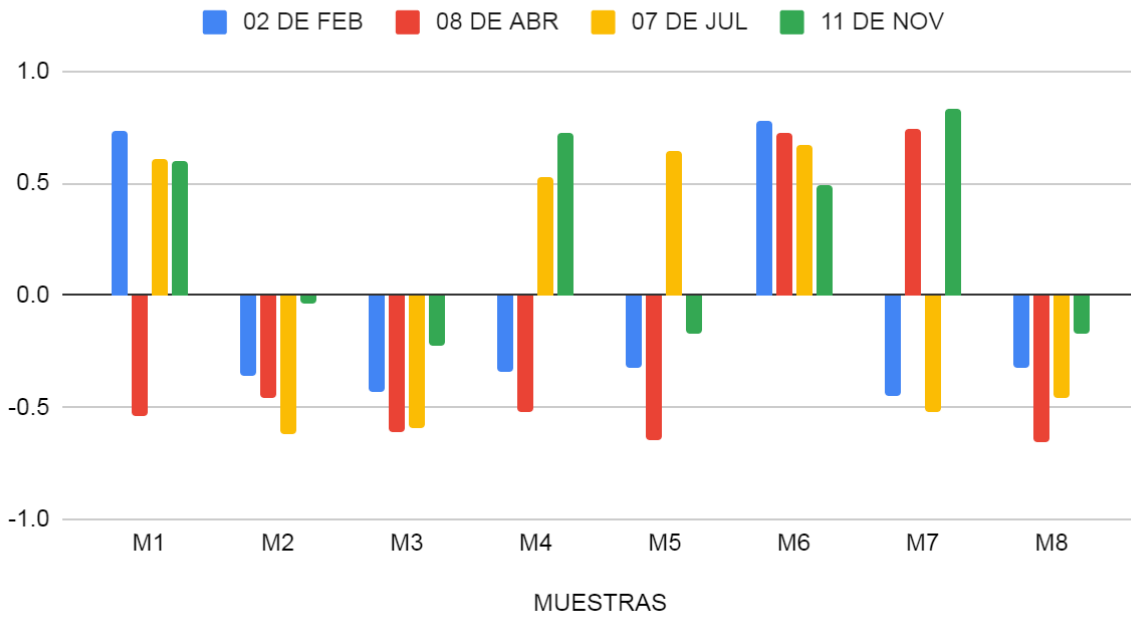


Figura 27: Variación anual del cálculo del NDVI por muestra para el año 2019.

Ya para el año 2020, la teoría de que “*a mayor temperatura, mayor presencia de clorofila*” vuelve a destacarse, obteniendo valores positivos para clorofila en 4 de las 8 muestras en la imagen de diciembre y 7 de las 8 muestras de la imagen de octubre (verano y primavera, respectivamente). Además, se reafirma la teoría de que hay mayor presencia de clorofila en las zonas de desembocaduras de cursos de agua.

Variación anual del cálculo de NDVI por muestra 2020

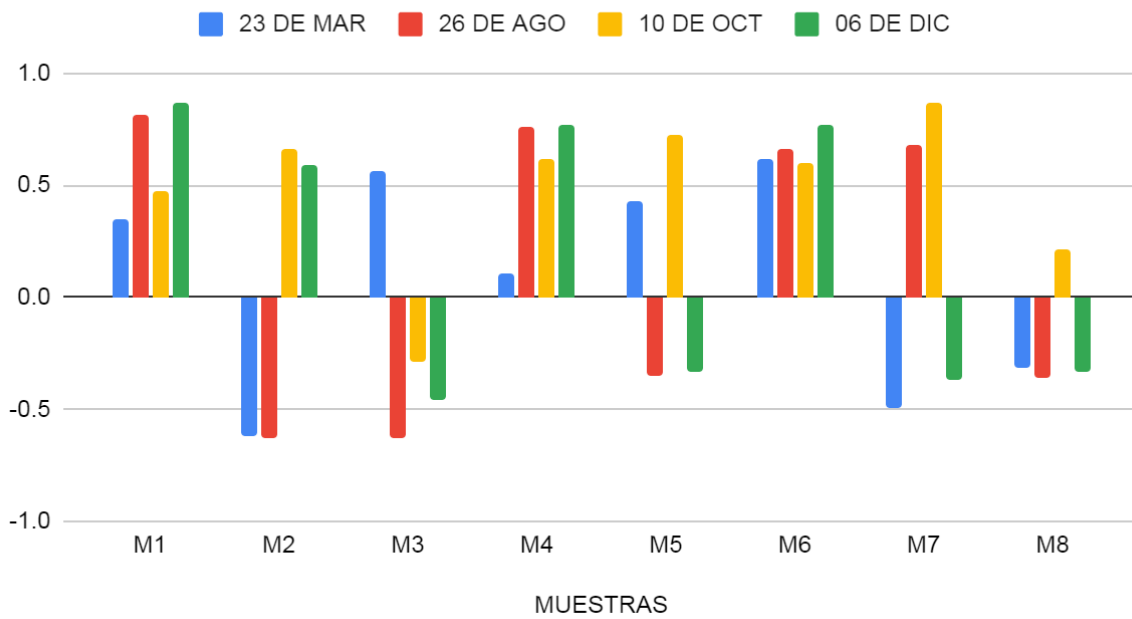


Figura 28: Variación anual del cálculo del NDVI por muestra para el año 2020.

9. Conclusiones

El agua es un decisivo vínculo entre la sociedad y el medio ambiente. En base a lo planteado por Naciones Unidas en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, cuyo propósito es la garantización de disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos los habitantes, es que se lleva a cabo este estudio cualitativo del agua de la Laguna del Sauce en los últimos cuatro años. Se habla de un recurso necesario para el desarrollo socioeconómico, la energía, la producción de alimentos, ecosistemas y para la supervivencia de los seres humanos.

Debido a que este espejo de agua se clasifica como clase 1, es decir, agua destinada para el abastecimiento de agua potable (para el departamento de Maldonado) es que se decide analizar la calidad de la misma mediante técnicas de teledetección. La información obtenida de las imágenes satelitales demuestran lo útil que estas son para analizar y monitorear el medio ambiente, lo cual ayuda a mejorar nuestra calidad de vida.

Se realizó un arduo estudio sobre las posibilidades de utilizar imágenes multiespectrales para detectar las diferentes concentraciones de clorofila. A su vez, se efectuó un estudio de las herramientas necesarias para obtener dichas imágenes, y cómo procesar las mismas.

Al no llevarse a cabo medidas *in situ* en las diferentes zonas de la Laguna, se compararon las medidas obtenidas de valores de CAB a partir de las imágenes de satélites con los valores del NDVI. Es por esto que, al analizar la información contenida en cada píxel en el primer año de estudio, se pudo determinar que el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) se correlaciona con valores altos de concentración de Clorofila A y B, lo cual se justifica debido a que el NDVI evalúa el proceso fotosintético, indicando que *a mayor proceso fotosintético, mayor contenido de clorofila*. Esto dio el puntapié para determinar ocho muestras específicas y poder monitorear la concentración de clorofila en los años que restan.

Al analizar las respectivas muestras de cada año se pudo constatar que la presencia de valores positivos de NDVI resaltan la presencia de clorofila. Este fenómeno se destaca mayormente en los meses de temperatura más agradable, es decir, durante primavera y verano; a excepción del año 2019 donde se denota presencia de clorofila en el mes de julio. Este monitoreo justifica que cuando se produce la cosecha de los cultivos de verano, el suelo con barbecho tiende a lixiviar mayores nutrientes hacia los distintos cursos de agua.

Por lo tanto, se puede afirmar que hay una relación entre los usos del suelo, el clima y la potencial aparición de clorofila en las desembocaduras de los cursos de agua de la Laguna del Sauce.

10. Recomendaciones

Se sugiere hacer estudios más detallados, contando con datos proveniente de pruebas in situ, además de la información satelital.

Al trabajar con pruebas in situ, es necesario tener en cuenta las restricciones de dicho muestreo. Estas muestras corresponden a un momento específico del año, por ejemplo, si en determinado día ocurren lluvias muy fuertes con un proceso que duró aproximadamente una semana y la imagen que se tiene es anterior al periodo, en las mediciones se van a obtener valores altos, pero con respecto al NDVI, valores bajos. La variabilidad de fechas con respecto a la toma de la imagen, o el estado del tiempo en ese momento, genera dificultad al querer realizar muestreos en el lugar que coincidan con la toma de dicha imagen. Por lo tanto, el principal problema en análisis cualitativos de este tipo es la incertidumbre del valor real para la fecha de la foto.

11. Bibliografía

1. Alawadi, F. (2010, October). Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm surface algal bloom index (SABI). In Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2010 (Vol. 7825, p. 782506). International Society for Optics and Photonics.
2. Crisci, C., Goyenola, G., Terra, R., Lagomarsino, J. J., Pacheco, J. P., Díaz, I., ... & Ghattas, B. (2017). Dinámica ecosistémica y calidad de agua: estrategias de monitoreo para la gestión de servicios asociados a Laguna del Sauce (Maldonado, Uruguay). Innotec, (13 ene-jun), 46-57.
3. Rodríguez, A., Méndez, G., Inda, H., Lagomarsino, J. J., & Steffen, M. (2010). Características y problemática de la Laguna del Sauce. Bases técnicas para el manejo integrado de Laguna del Sauce y cuenca asociada.

10.1. Sitios web

4. ArcGIS Pro Gráfico de dispersión | Documentación. (2021). Diagrama de dispersión, ArcGIS Pro. <<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.6/help/analysis/geoprocessing/charts/scatter-plot.htm>>
5. ArcGIS Pro: Software de mapeo Profesional 2D y 3D | SIG Aeroterra S.A. (s. f.). Aeroterra. <<https://www.aeroterra.com/es-ar/productos/arcgis-pro/introduccion>>
6. Calvo, A. (2019, 19 julio). Sentinel: una nueva puerta para la agricultura de precisión. Agroptima. <<https://www.agroptima.com/es/blog/sentinel-agricultura-precision/#:%7E:text=Algunas%20de%20las%20ventajas%20que,a%2010%20x%2010%20m>>
7. Calvo, A. (2019, 19 julio). Sentinel: una nueva puerta para la agricultura de precisión. Agroptima. <<https://www.agroptima.com/es/blog/sentinel-agricultura-precision/#:%7E:text=Algunas%20de%20las%20ventajas%20que,a%2010%20x%2010%20m>>
8. Earth Observatory. Glossary. (s. f.). <<http://earthobservatory.nasa.gov/glossary>>
9. Ferber, L. R. (2004, 1 junio). Do cyanobacteria dominate in eutrophic lakes because they fix atmospheric nitrogen? Wiley Online Library. <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2427.2004.01218.x>>
10. GEARS - Geospatial Ecology and Remote Sensing. (2018, 22 marzo). NDVI from Sentinel-2 in SNAP. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=9Y_5Q-932mM>
11. Geocento Spain proveedor online de imágenes de satélites. <<http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-images-landsat-7en/>>
12. Gis&Beers. Imágenes Sentinel 2. (2020, 4 octubre). <<http://www.gisandbeers.com/lo-deberias-saber-imagenes-sentinel-2/>>
13. IDECOR. Cómo calcular NDVI con SNAP – idecor.cba.gov.ar. (s. f.). <<https://idecor.cba.gov.ar/paso-a-paso-como-calcular-ndvi-con-snap/>>

14. Instituto Sudamericano para Estudios sobre Resiliencia y Sostenibilidad, S. A. R. A. S. (2018). Aportes para la rehabilitación de la Laguna del Sauce y el OT de su cuenca. Instituto Sudamericano para Estudios sobre Resiliencia y Sostenibilidad. <http://saras-institute.org/wp-content/uploads/2019/06/Capitulo-3_Principales-usos-suelo-actuales-y-tendenciales.pdf>
15. Introducción a la teledetección cuantitativa. (s. f.). f. Recuperado 20 de mayo de 2021, de <<http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000032-25950268dd/5.-Firmas%20espectrales.pdf>>
16. Jacobsen, B. A. (1993, 1 enero). Disturbance events affecting phytoplankton biomass, composition and species diversity in a shallow, eutrophic, temperate lake. *Hydrobiologia*. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00008838?error=cookies_not_supported&code=989f5b30-333f-4eef-a2e3-914f4026623a>
17. Neoalgae. Ficocianina. (2020, 25 noviembre). Neoalgae. <<https://neoalgae.es/producto/ficocianina/>>
18. Researchgate. Software para corregir los datos inválidos en las imágenes Landsat. (s. f.). Software para corregir los datos inválidos en las imágenes Landsat. <https://www.researchgate.net/publication/285601066_Software_para_corregir_los_datos_invalidos_en_las_imagenes_Landsat_7>
19. ScienceDirect. Health impacts from cyanobacteria harmful algae blooms: Implications for the North American Great Lakes. (2016, 1 abril). <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568988316300300?via%3Dihub>>
20. Sen2Cor para corrección atmosférica de Sentinel 2. (2019, 15 septiembre). Gis&Beers. <<http://www.gisandbeers.com/sen2cor-correccion-atmosferica-sentinel-2/>>
21. SIG Arteaga. (2018, 25 junio). Curso Imágenes Satelitales clase IV | Corrección Atmosférica SENTINEL 2, NDVI DRONE. YouTube. <<https://www.youtube.com/watch?v=D0YbbHjdvyY&t=843s>>
22. SNAP - Calculate Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). (2016, 19 enero). [Vídeo]. YouTube. <<https://www.youtube.com/watch?v=mD-JVUTCbKY>>
23. Teledeteccion. (s. f.). UM. <<https://www.um.es/geograf/sig/teledet/>>
24. UN-SPIDER. (s. f.). Aplicación de datos del mes: Floraciones de algas nocivas. UN-SPIDER Knowledge Portal. <<https://www.un-spider.org/es/enlaces-y-recursos/fuentes-de-datos/daotm-floraciones-algas-nocivas>>
25. Vista de Dinámica ecosistémica y calidad de agua: estrategias de monitoreo para la gestión de servicios asociados a Laguna del Sauce (Maldonado, Uruguay). (s. f.). LATU. <<https://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTECA/article/view/405/745>>

10.2. Información de cursos de la carrera Tecnólogo en Cartografía

26. VASQUEZ, Eduardo. Manual Tratamiento de Imágenes NDVI. Curso Captura de Datos por Percepción Remota. Uruguay: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería - 2020.
27. VASQUEZ, Eduardo. Clasificación. Curso Captura de Datos por Percepción Remota. Uruguay: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería - 2020.

MONITOREO DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA EN LA LAGUNA DEL SAUCE MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

PROYECTO FINAL DE CARRERA
2021



Estudiantes: Ricardo Agustín Acuña Pintos, Paula Teperino Echarte
Tutor responsable: MSc Eduardo Vasquez
Carrera: Tecnólogo en Cartografía



1. Anexo

1.1 Corrección Atmosférica en SNAP

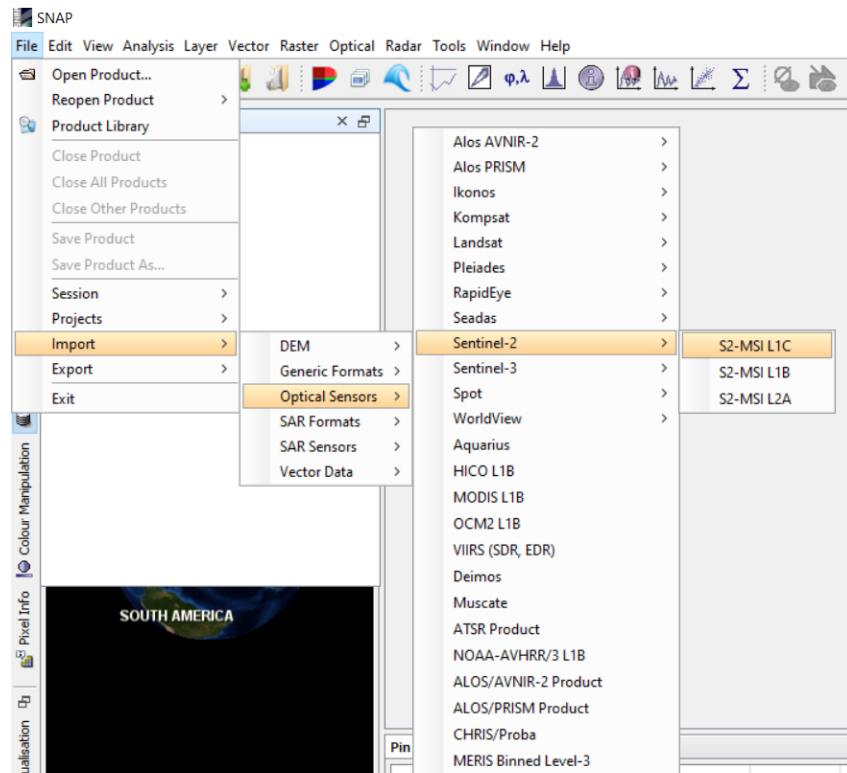


Figura 1: Paso 1 - Corrección Atmosférica

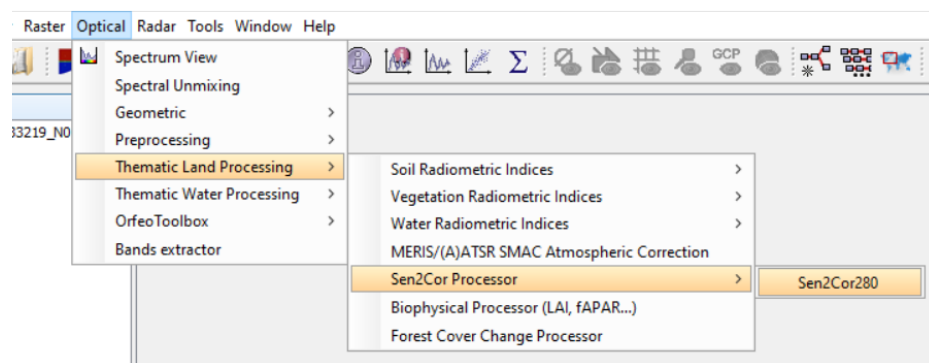


Figura 2: Paso 2 - Corrección Atmosférica

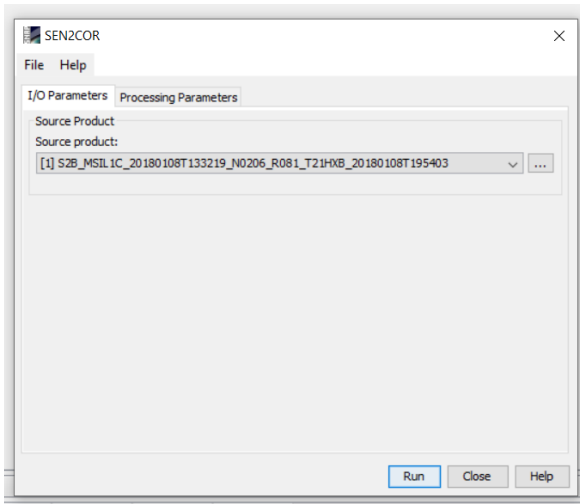


Figura 3: Paso 3 - Corrección Atmosférica

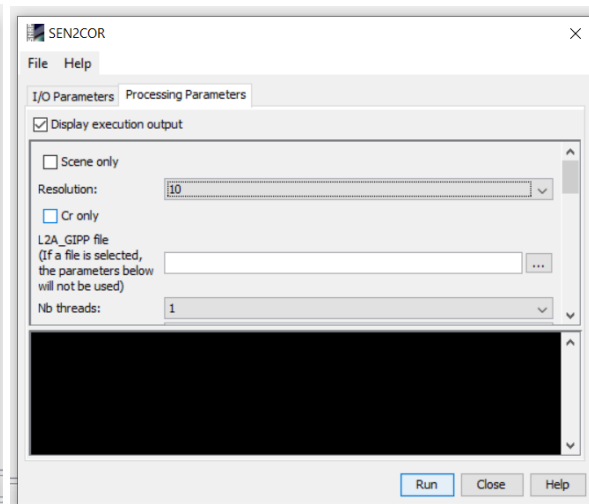


Figura 4: Paso 4 - Corrección Atmosférica

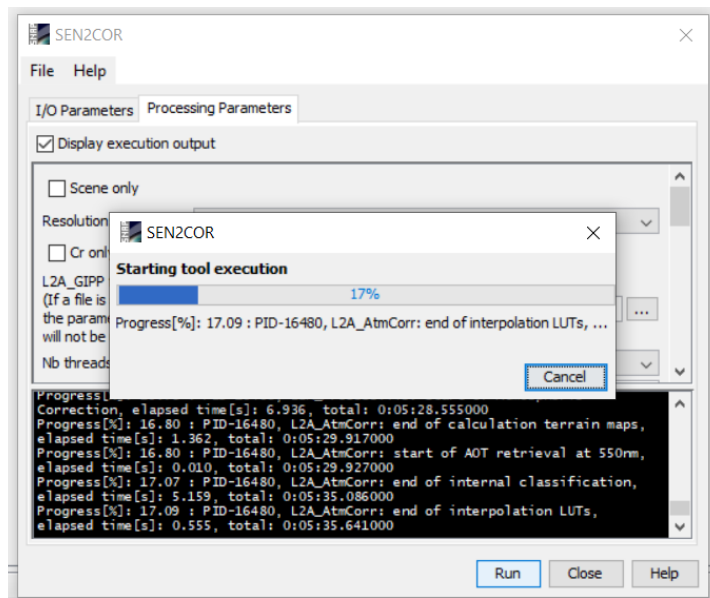


Figura 5: Paso 5 - Corrección Atmosférica

1.2 Geometría De Bandas en SNAP

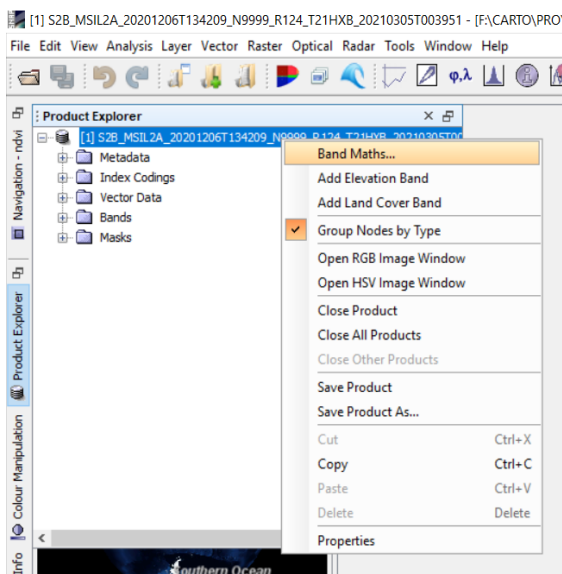


Figura 6: Paso 3 - Geometría de bandas.

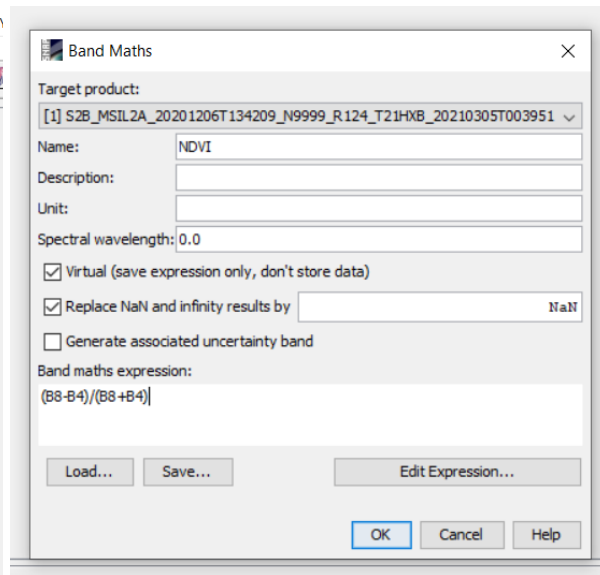


Figura 7: Paso 4 y 5 - Geometría de bandas.

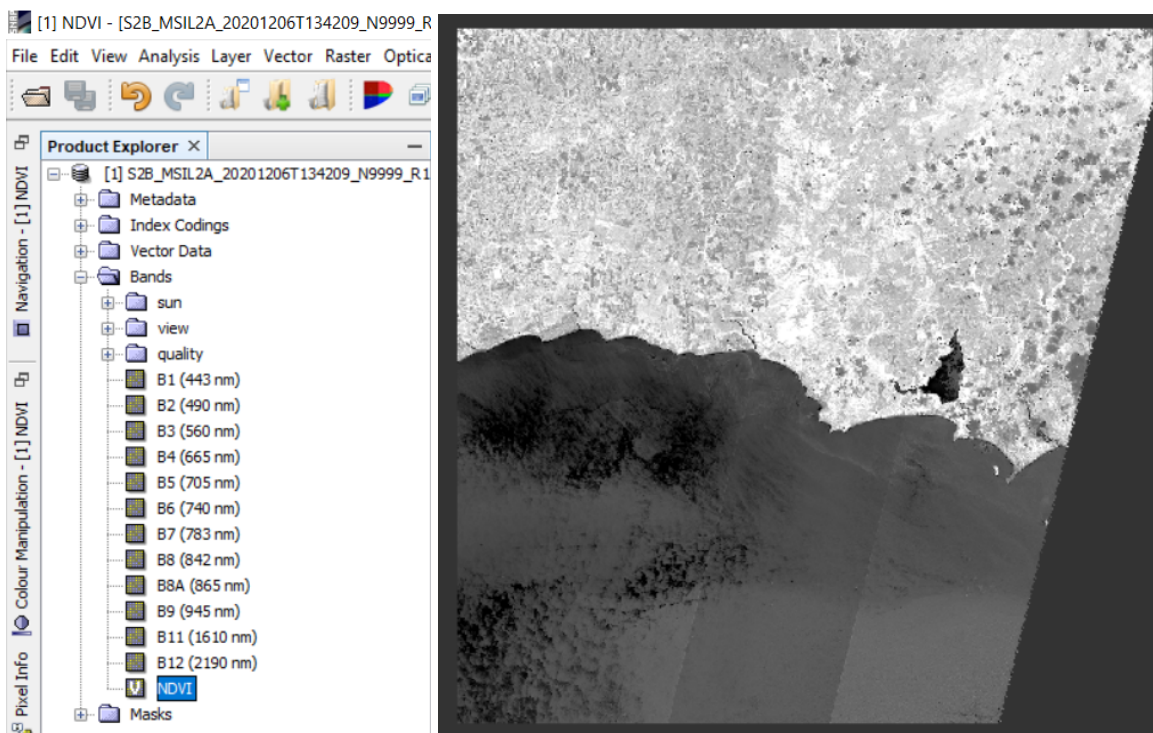


Figura 8 y 9: Algoritmo ejecutado - Geometría de bandas.

1.3 Toma de muestras

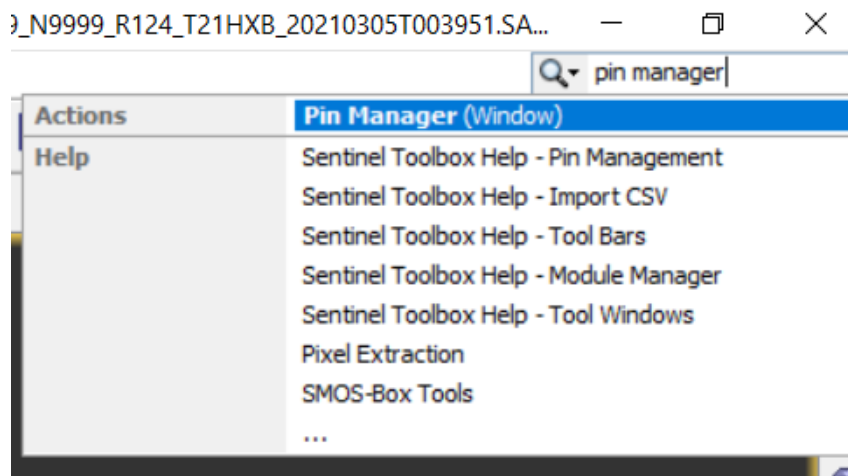


Figura 10: Paso 1.

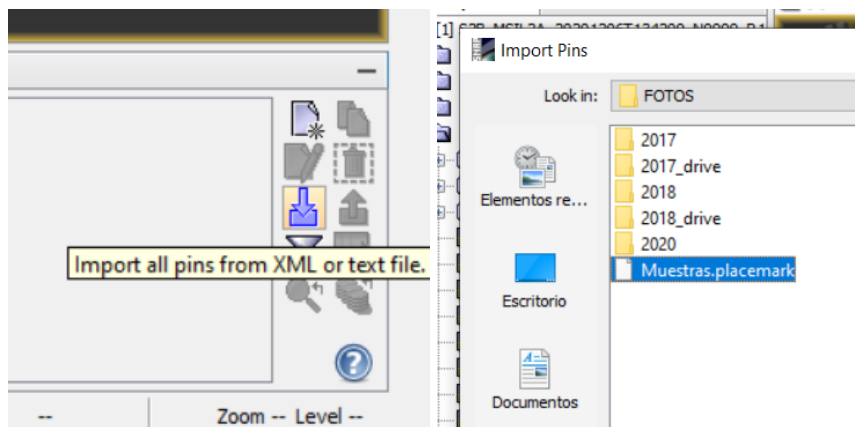


Figura 11 y 12: Paso 2.

X	Y	Lon	Lat	Color	Label
6922.500	5623.500	-55.149352	-34.834172		M1
7051.500	5751.500	-55.134991	-34.845493		M2
7658.500	5940.500	-55.068235	-34.861491		M3
7639.500	4929.500	-55.072436	-34.770406		M4
7623.500	4904.500	-55.074236	-34.768181		M5
7613.500	4974.500	-55.075182	-34.774507		M6
7789.500	4988.500	-55.055929	-34.775463		M7
7793.500	5339.500	-55.054749	-34.807090		M8
7394.500	5567.500	-55.097875	-34.828329		Pradera
7231.500	6808.500	-55.113135	-34.940454		Agua

Figura 13: Coordenadas de las muestras.

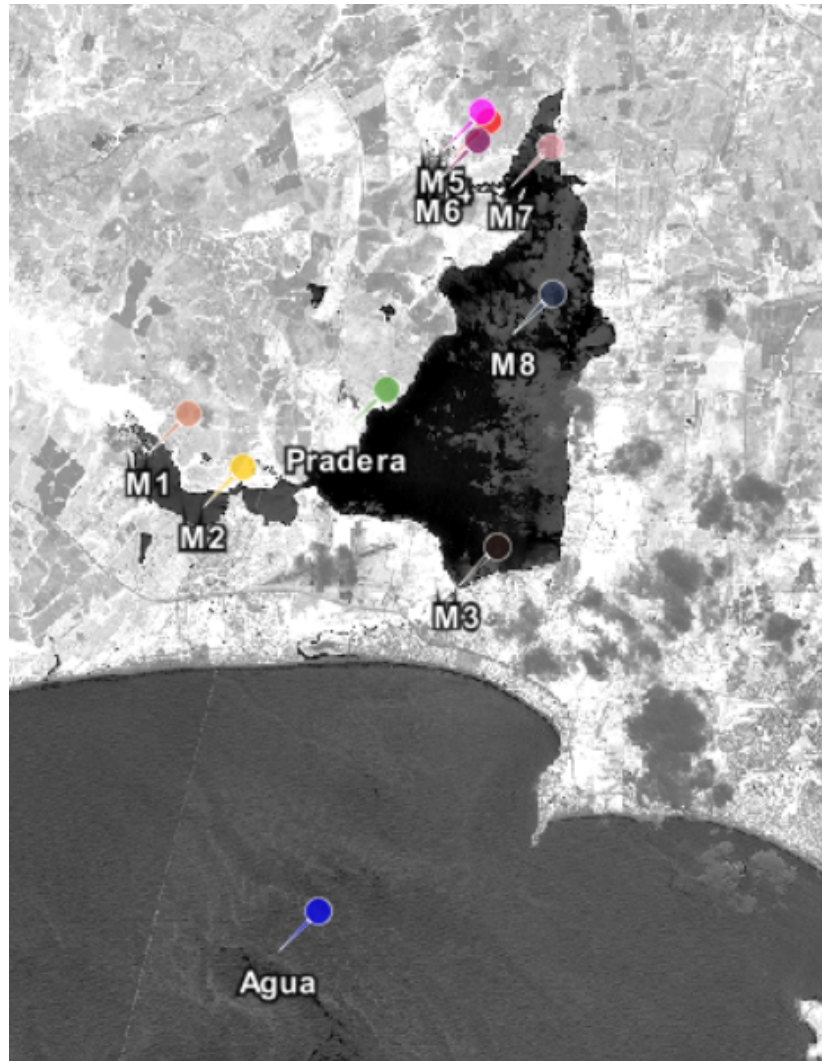


Figura 14: Muestras establecidas en el área de estudio.

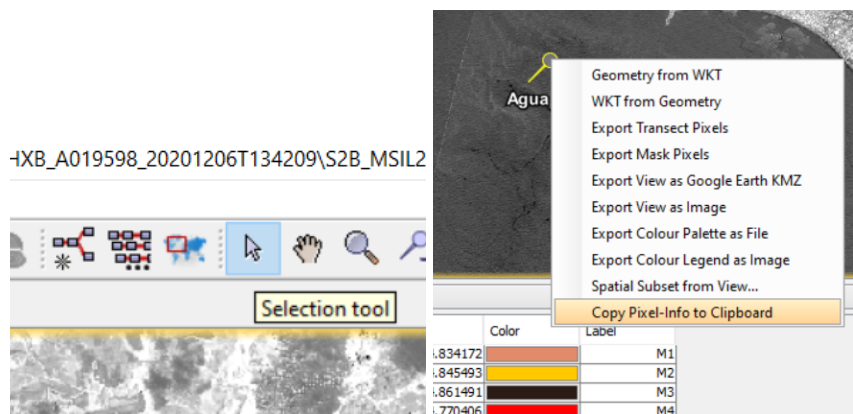


Figura 15 y 16: Herramienta de selección y copia de la información del píxel.

BandName	Wavelength	Unit	Bandwidth	Unit	Value	Unit	Solar Flux	Unit
B1:	443	nm	58	nm	0.0426	dl		
B2:	490	nm	130	nm	0.0479	dl		
B3:	560	nm	100	nm	0.0452	dl		
B4:	665	nm	90	nm	0.0352	dl		
B5:	705	nm	97	nm	0.0502	dl		
B6:	740	nm	40	nm	0.032	dl		
B7:	783	nm	71	nm	0.0309	dl		
B8:	842	nm	175	nm	0.0292	dl		
B8A:	865	nm	79	nm	0.0277	dl		
B9:	945	nm	79	nm	0.0233	dl		
B11:	1610	nm	172	nm	0.026	dl		
B12:	2190	nm	276	nm	0.0242	dl		
quality_aot:					0.077	none		
quality_wvp:					1.043	cm		
quality_cloud_confidence:					0%			
quality_snow_confidence:					0%			
quality_scene_classification:					6			
view_zenith_mean:					10.02169	°		
view_azimuth_mean:					292.21701	°		
sun_zenith:					24.9772	°		
sun_azimuth:					67.0901	°		
view_zenith_B1:					10.1091	°		
view_azimuth_B1:					295.14499	°		
view_zenith_B2:					9.92034	°		
view_azimuth_B2:					287.96701	°		

Figura 17: Valores del pixel exportados a planilla Excel.

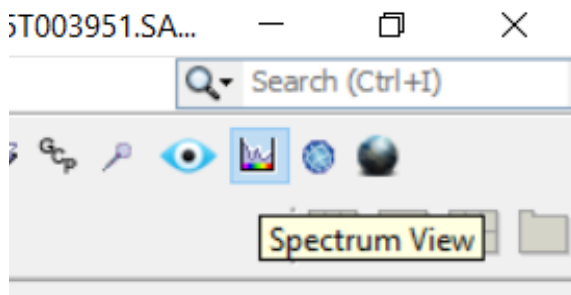


Figura 18: Paso 1 - Firma Espectral.

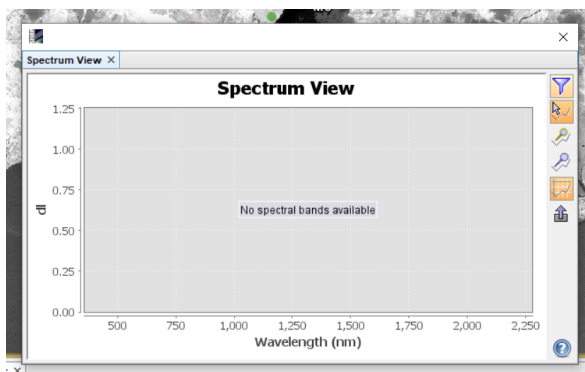


Figura 19: Paso 2 - Firma Espectral.

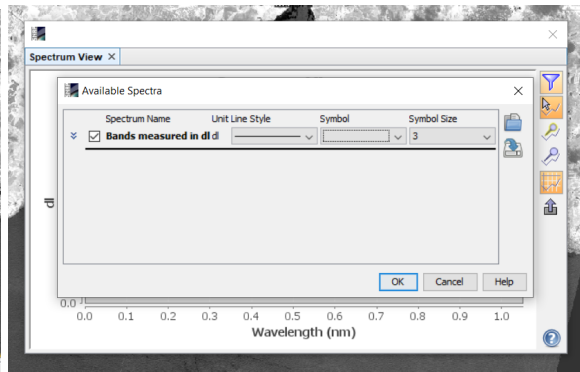


Figura 20: Paso 3 - Firma Espectral.

1.4 Firmas espectrales de las muestras en el área

1.4.1. Año 2017

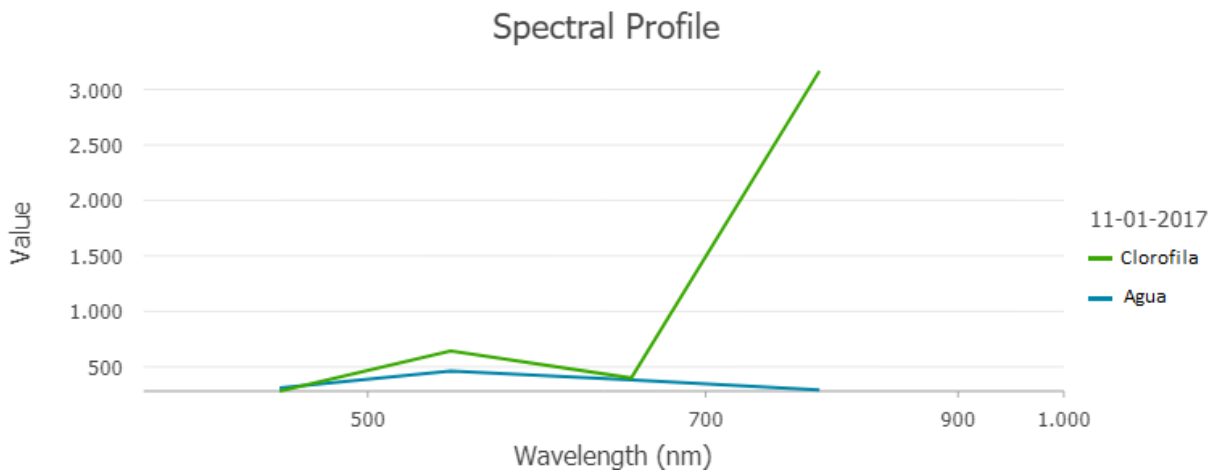


Figura 21: Firma Espectral en el área de la muestra.

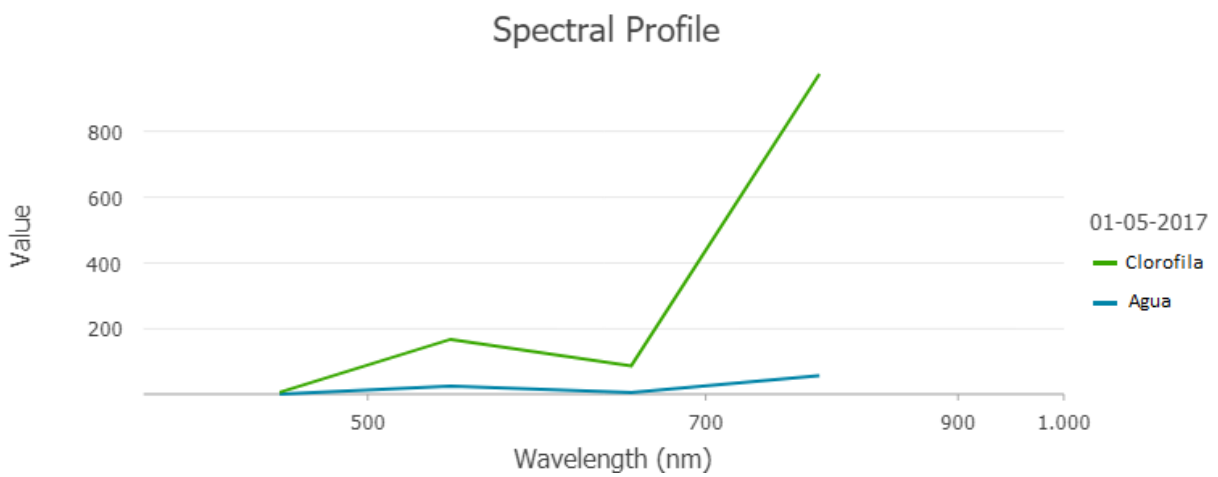


Figura 22: Firma Espectral en el área de la muestra.

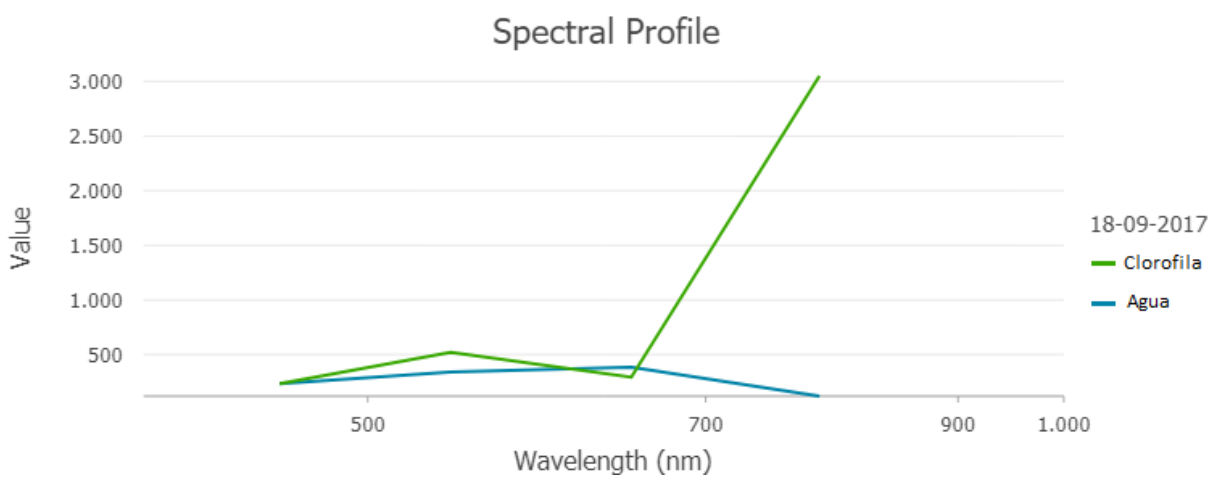


Figura 23: Firma Espectral en el área de la muestra.

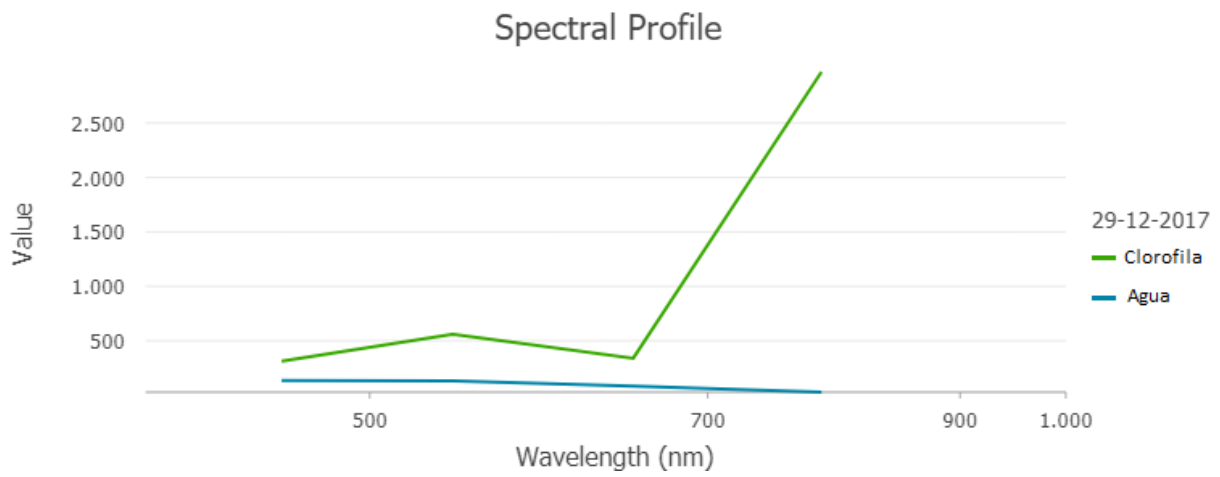


Figura 24: Firma Espectral en el área de la muestra.

1.4.2. Año 2018

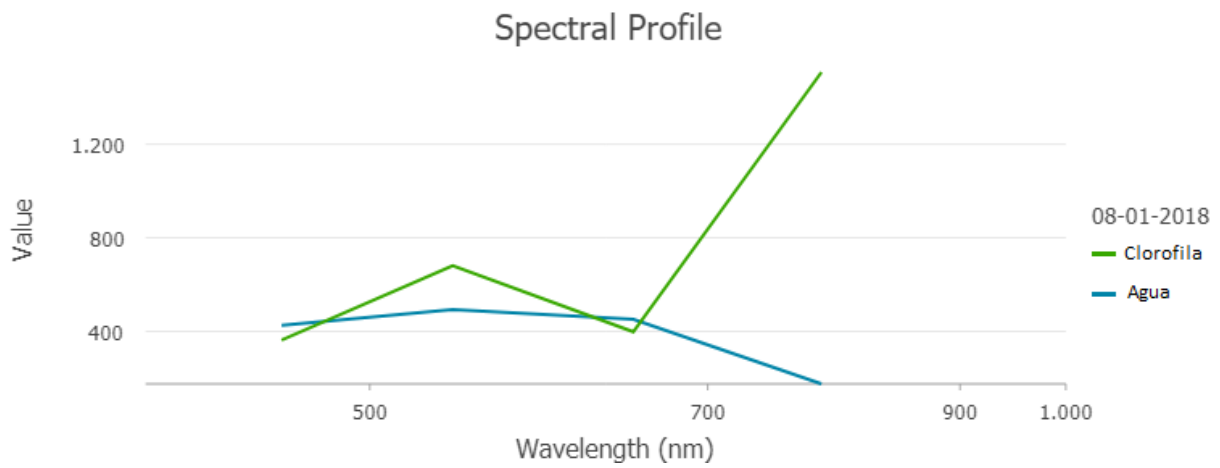


Figura 25: Firma Espectral en el área de la muestra.

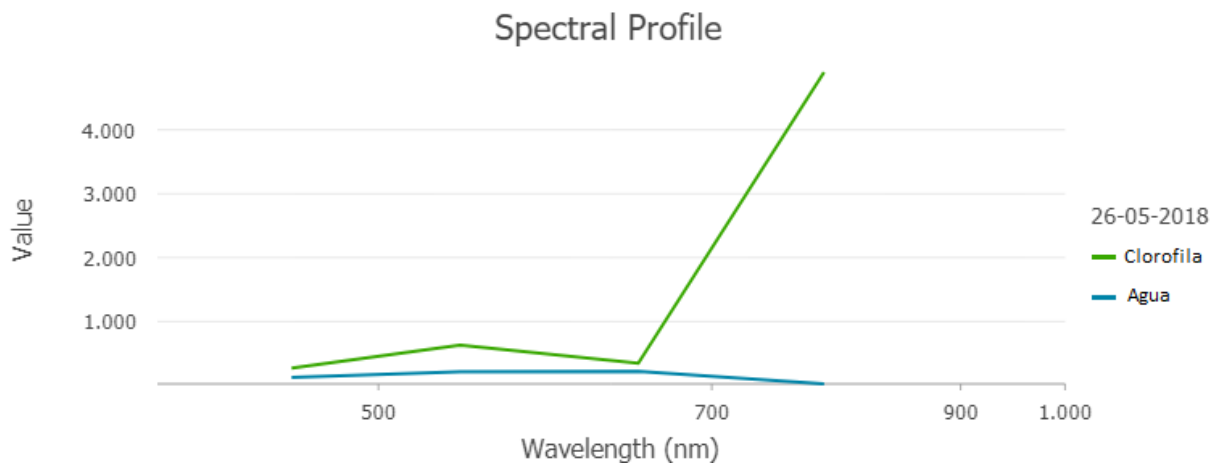


Figura 26: Firma Espectral en el área de la muestra.

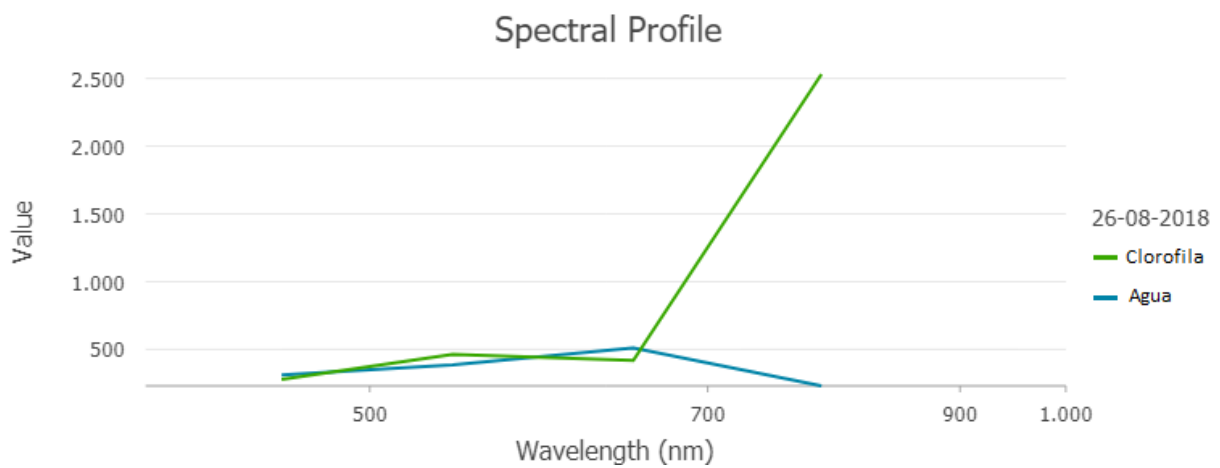


Figura 27: Firma Espectral en el área de la muestra.

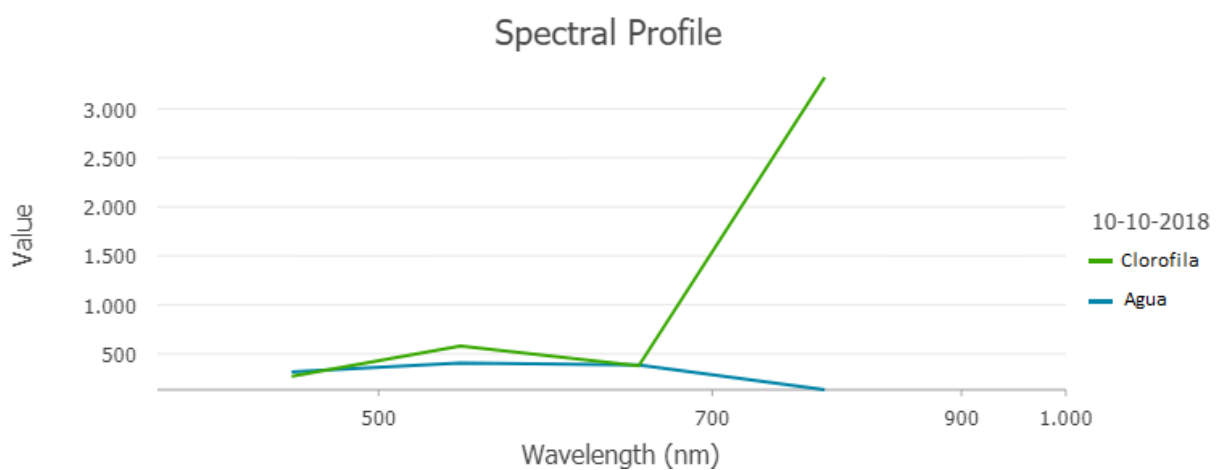


Figura 28: Firma Espectral en el área de la muestra.

1.4.3. Año 2019

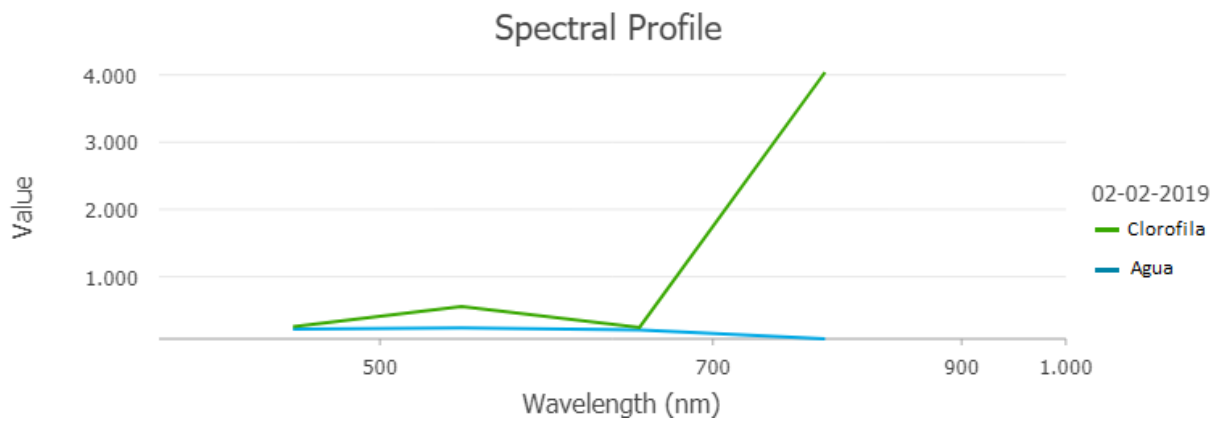


Figura 29: Firma Espectral en el área de la muestra.

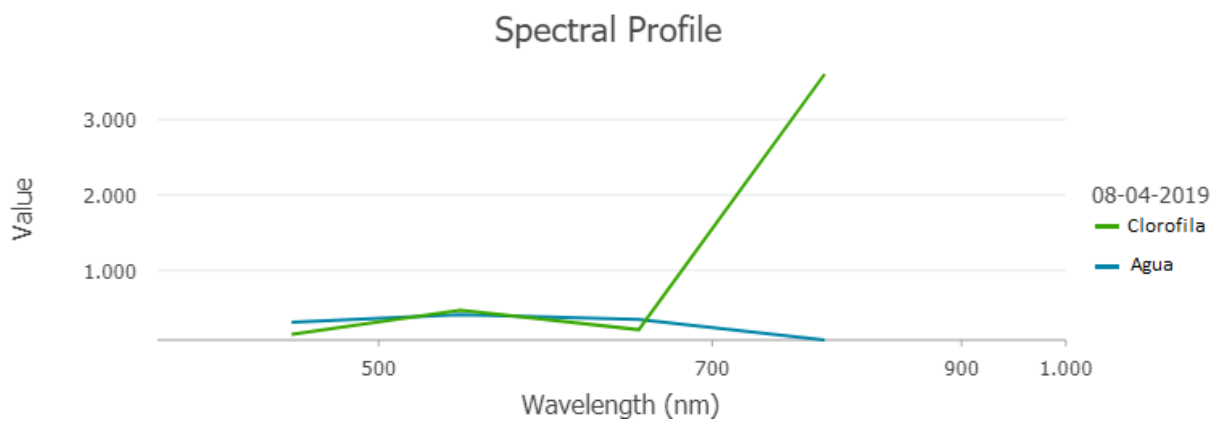


Figura 30: Firma Espectral en el área de la muestra.

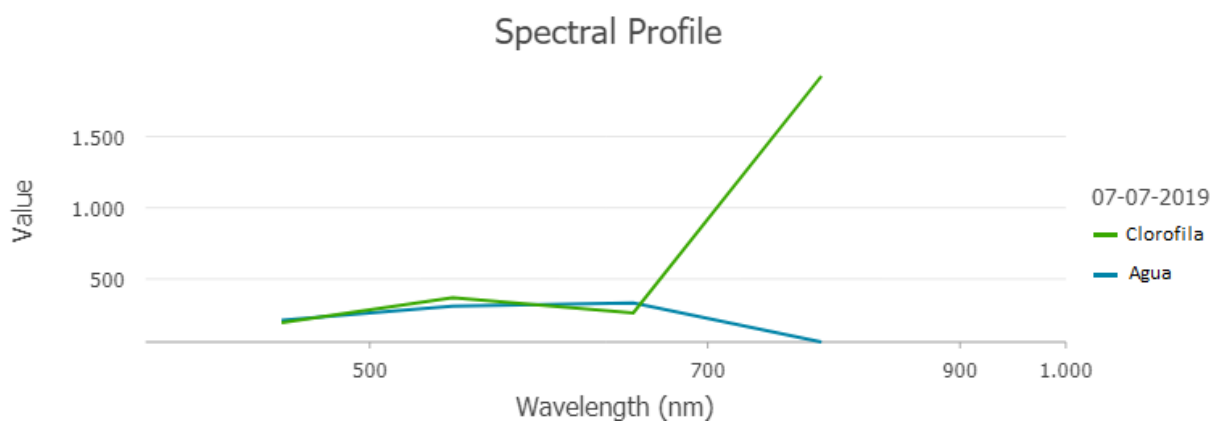


Figura 31: Firma Espectral en el área de la muestra.

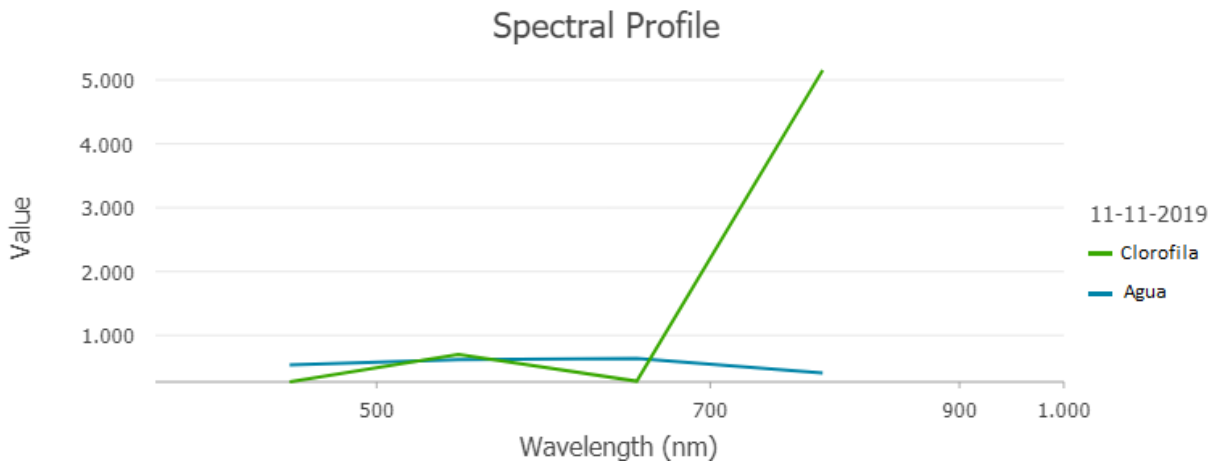


Figura 32: Firma Espectral en el área de la muestra.

1.4.4. Año 2020

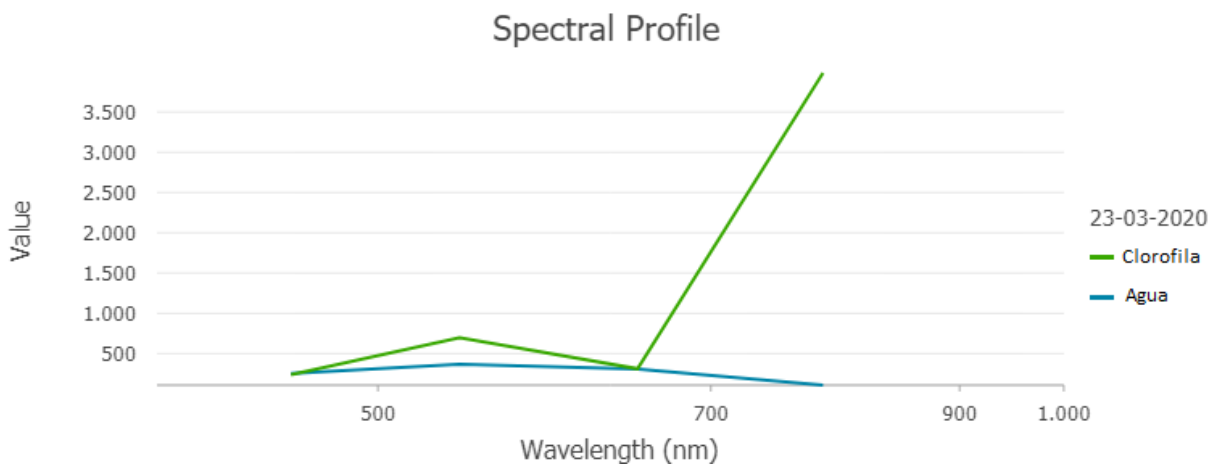


Figura 33: Firma Espectral en el área de la muestra.

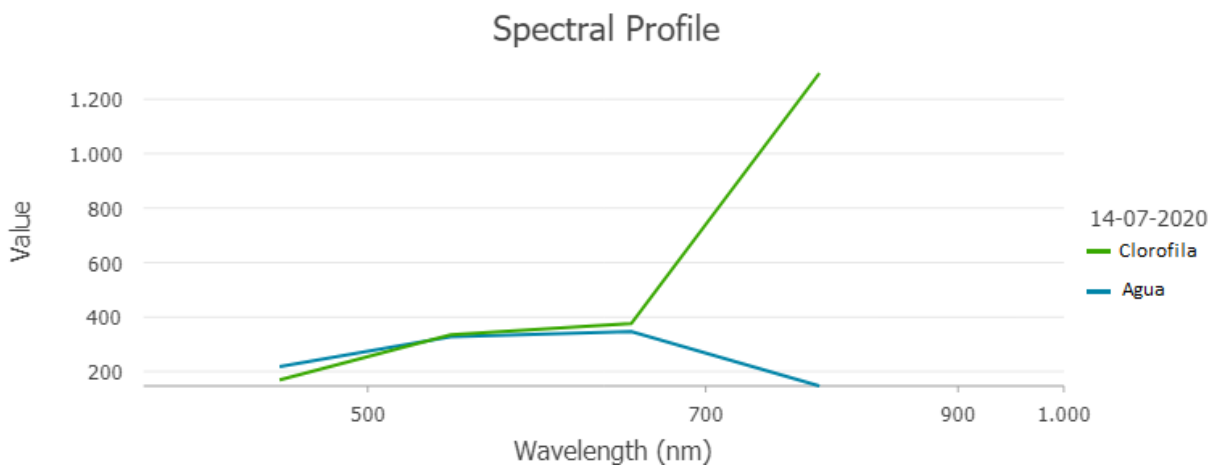


Figura 34: Firma Espectral en el área de la muestra.

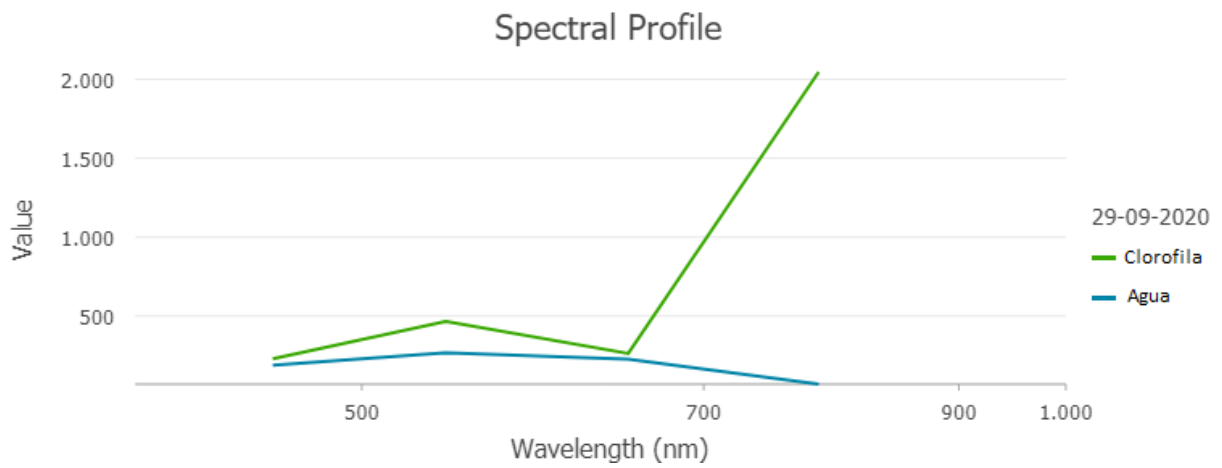


Figura 35: Firma Espectral en el área de la muestra.

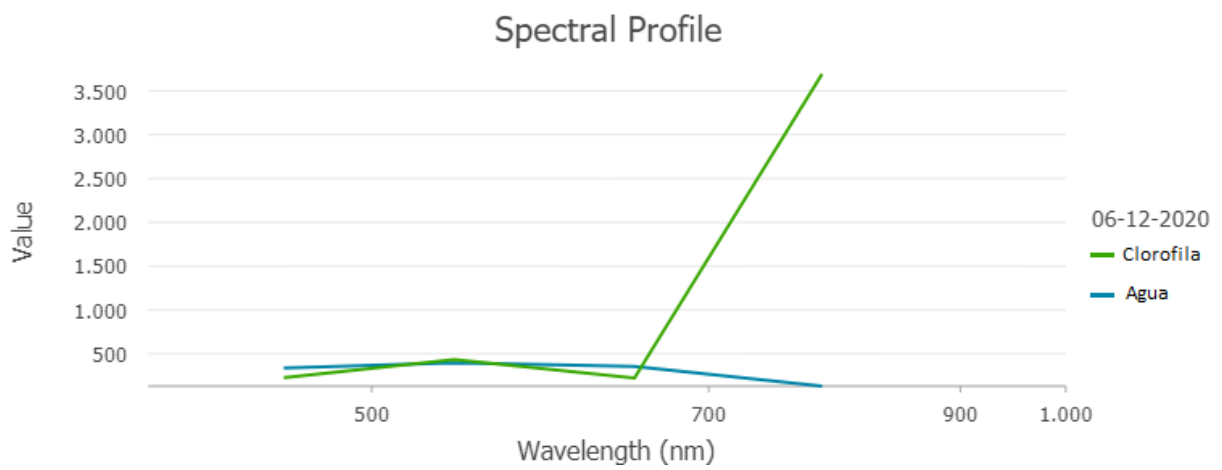


Figura 36: Firma Espectral en el área de la muestra.

1.5 Correlación - ArcGisPRO

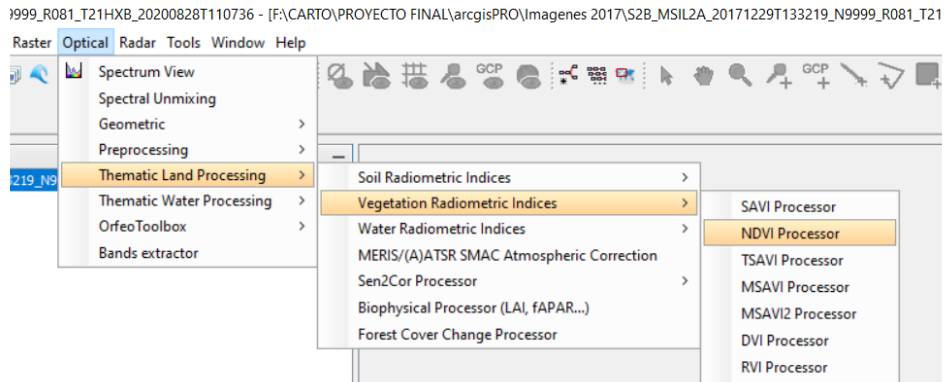


Figura 37: Cálculo del NDVI en SNAP de imágenes Sentinel 2A.

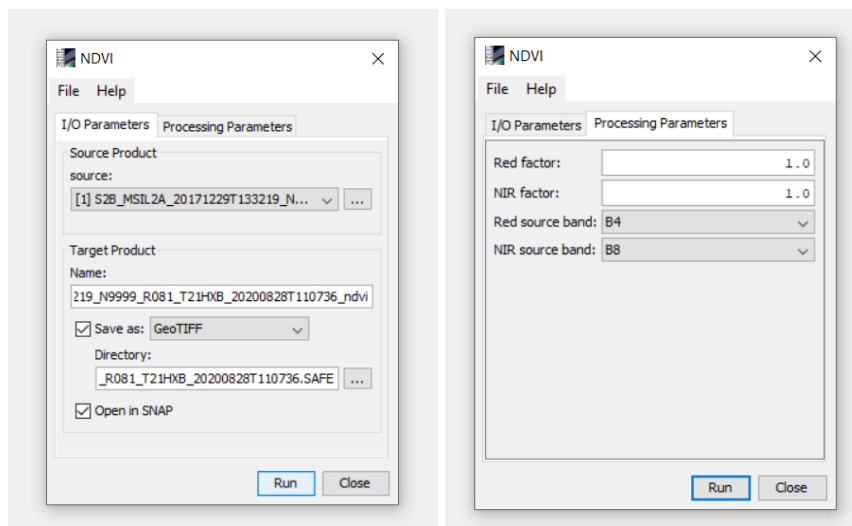


Figura 38 y 39: Parámetros del cálculo del NDVI.

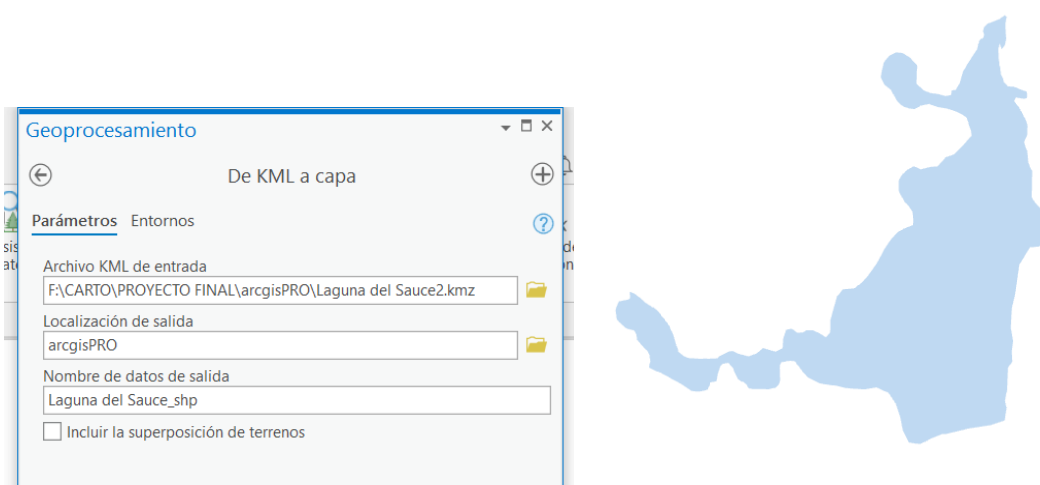


Figura 40 y 41: Conversión de KML de la Laguna del Sauce en Shapefile.

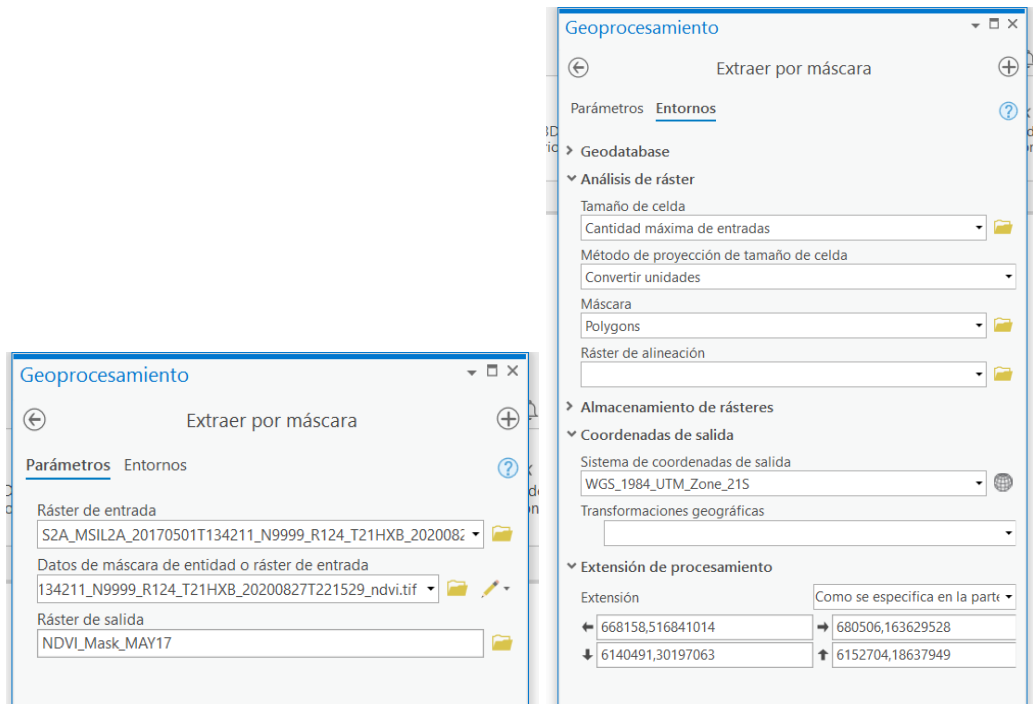


Figura 42 y 43: Máscara de la Laguna del Sauce, con el ráster del NDVI como ráster de entrada y extensión de la capa de la laguna.



Figura 44:: Resultado.

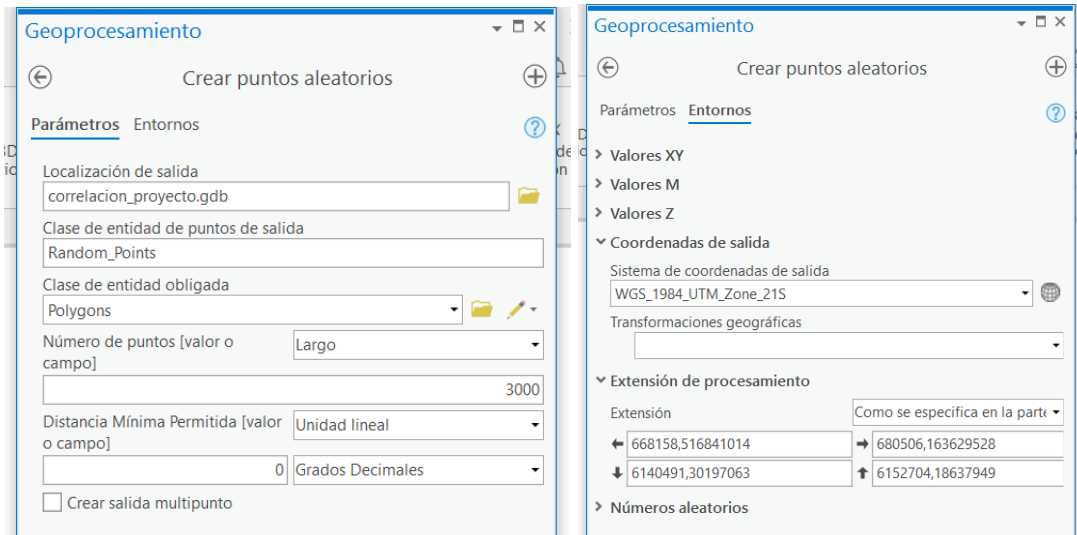


Figura 45 y 46: Parámetros para crear puntos aleatorios con la herramienta Create Random Points.

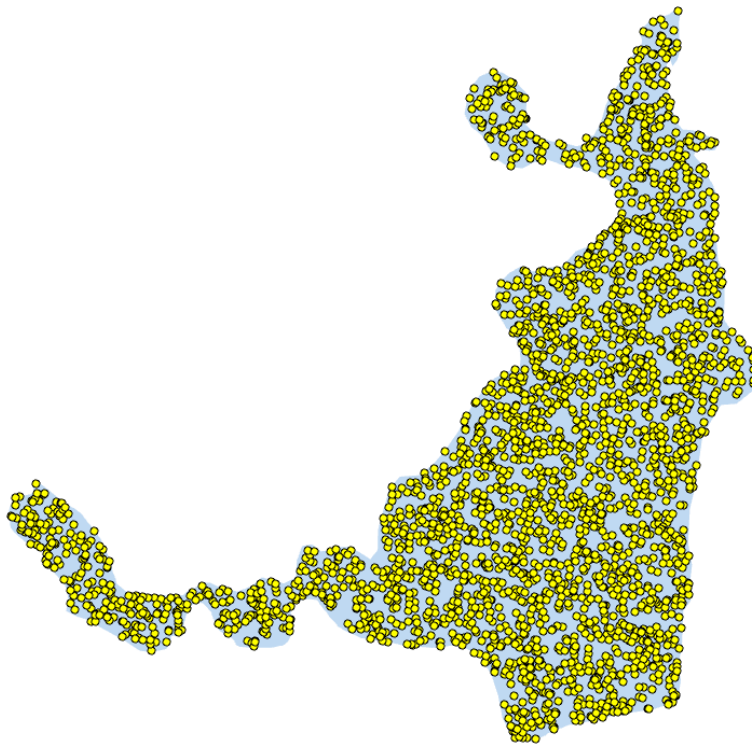


Figura 47: Resultado.

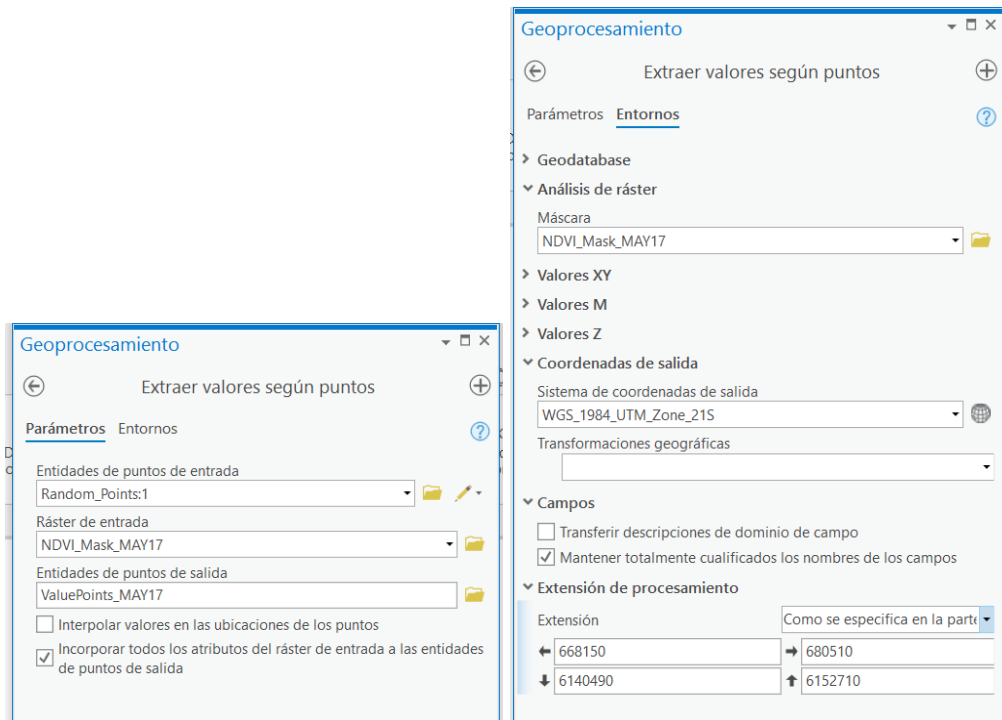


Figura 48 y 49: Parámetros para extraer valores de NDVI de puntos aleatorios con la herramienta Extract Value to Point.

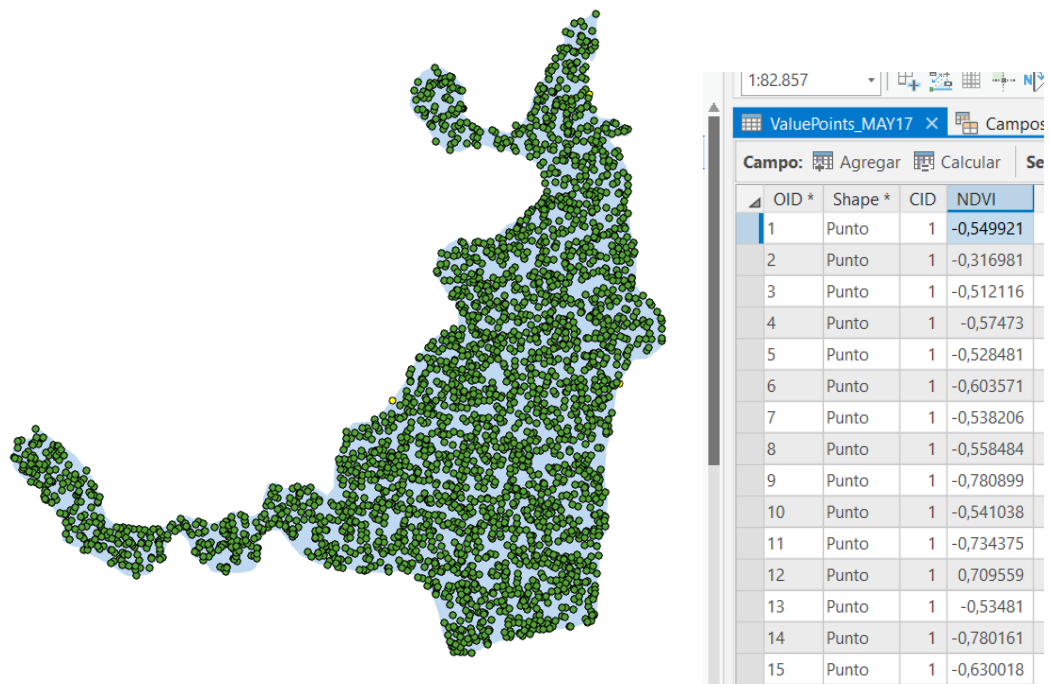


Figura 50 y 51: Capa de puntos con valores de NDVI en la tabla de atributos.

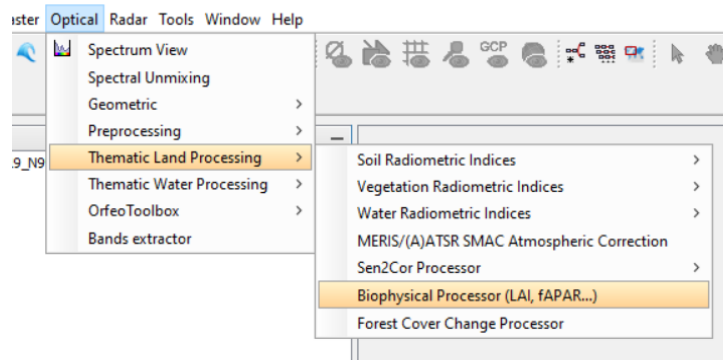


Figura 52: Cálculo de CAB en SNAP.

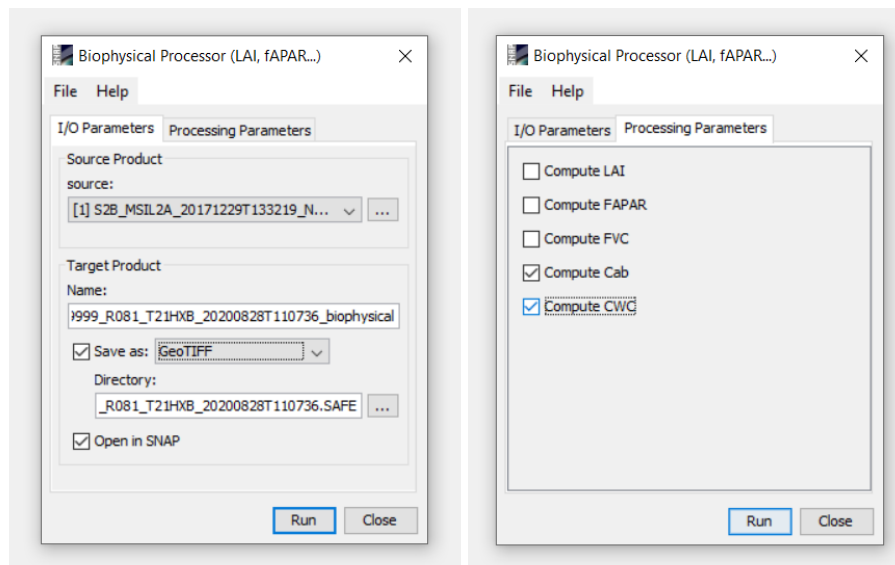


Figura 53 y 54: Parámetros para el cálculo de CAB.

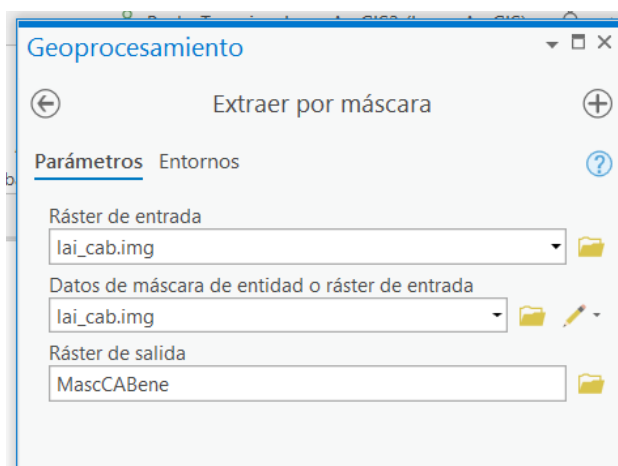


Figura 55: Máscara de la Laguna del Sauce, con el ráster de CAB como ráster de entrada y extensión de la capa de la laguna.

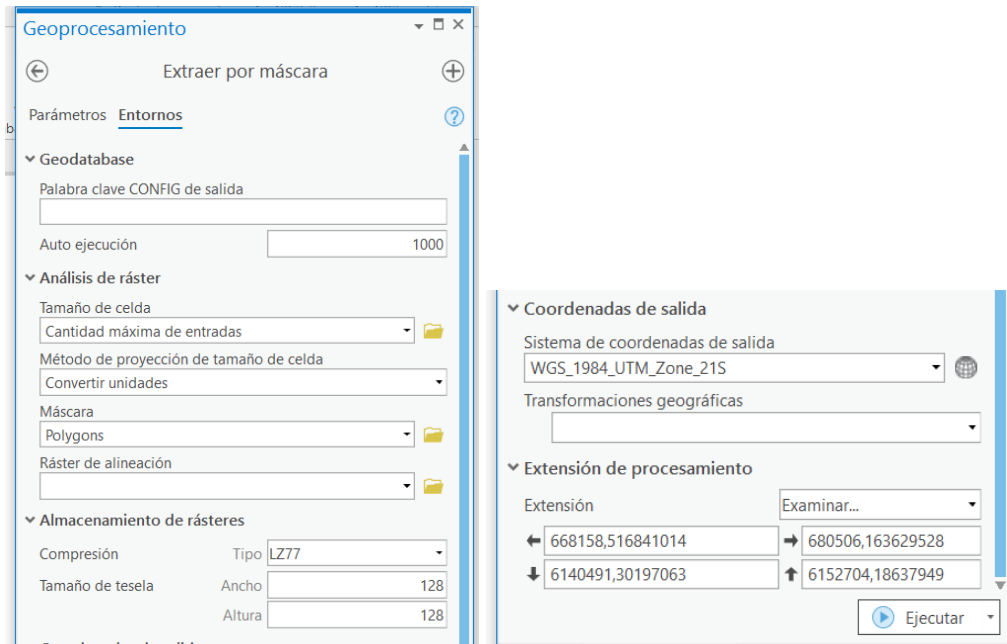


Figura 56 y 57: Máscara de la Laguna del Sauce, con el ráster de CAB como ráster de entrada y extensión de la capa de la laguna.



Figura 58: Resultado.

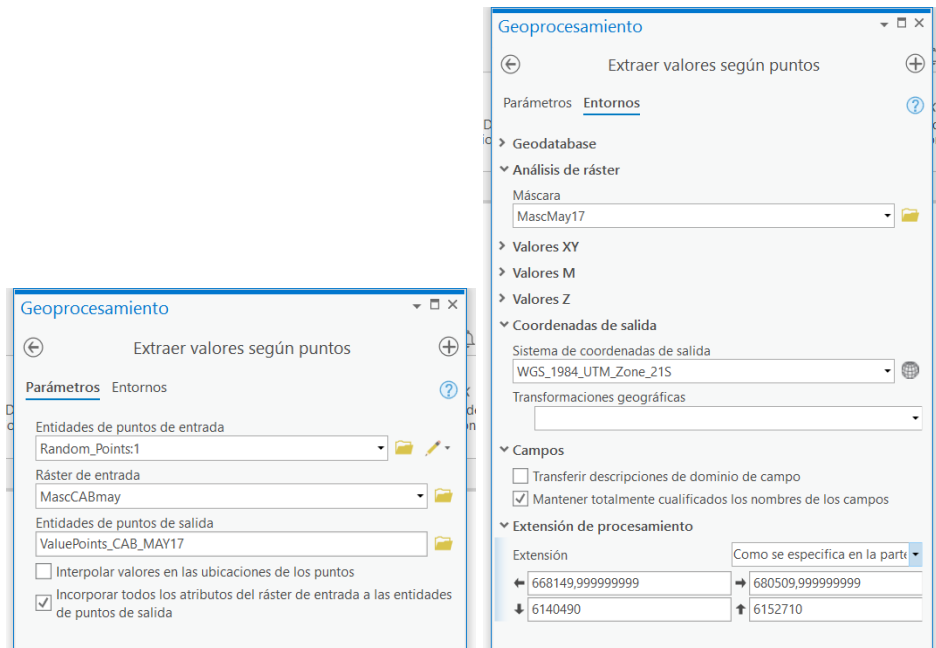


Figura 59 y 60: Parámetros para extraer valores de CAB de puntos aleatorios con la herramienta Extract Value to Point.

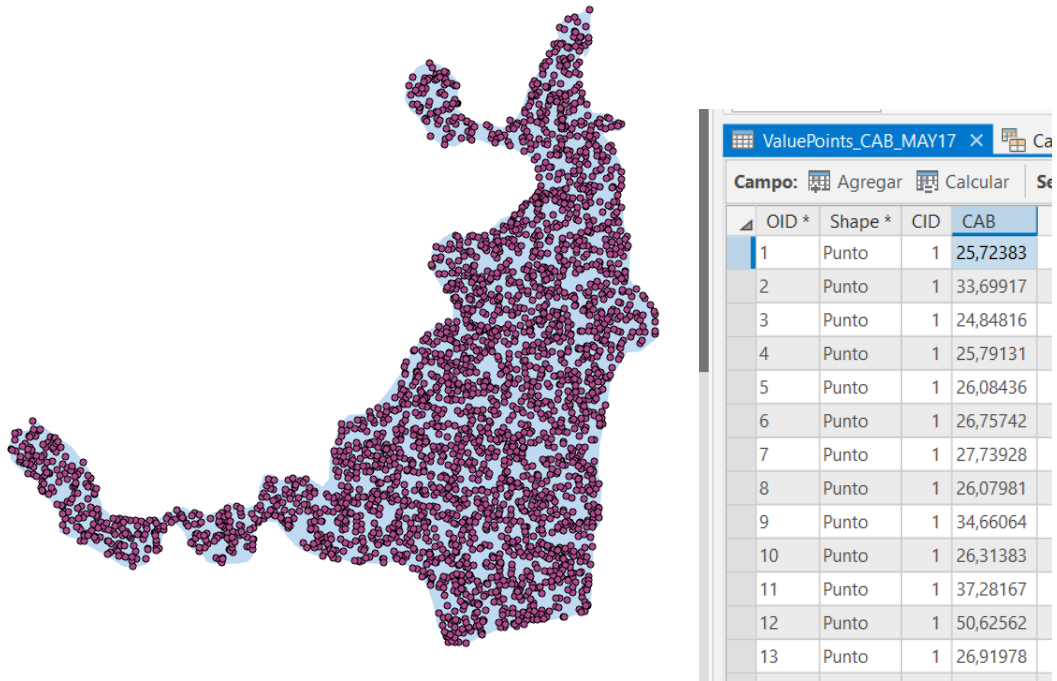


Figura 61: Capa de puntos con valores de NDVI en la tabla de atributos.

OID *	Shape *	CID	NDVI	CAB
1	Punto	1	0,473389	7,756791
2	Punto	1	-0,240612	18,25677
3	Punto	1	-0,628571	27,38672
4	Punto	1	-0,477032	23,27562
5	Punto	1	-0,048366	15,51586
6	Punto	1	0,609037	18,73974
7	Punto	1	-0,142857	13,89802
8	Punto	1	-0,635104	30,83225
9	Punto	1	-0,369106	22,08927
10	Punto	1	0,010651	5,218397
11	Punto	1	0,143488	12,95234
12	Punto	1	0,182213	9,254381
13	Punto	1	-0,321574	15,67165
14	Punto	1	-0,587814	25,02632
15	Punto	1	-0,32	20,09451

Figura 62: Capa de puntos con valores de NDVI y CAB para cada uno.

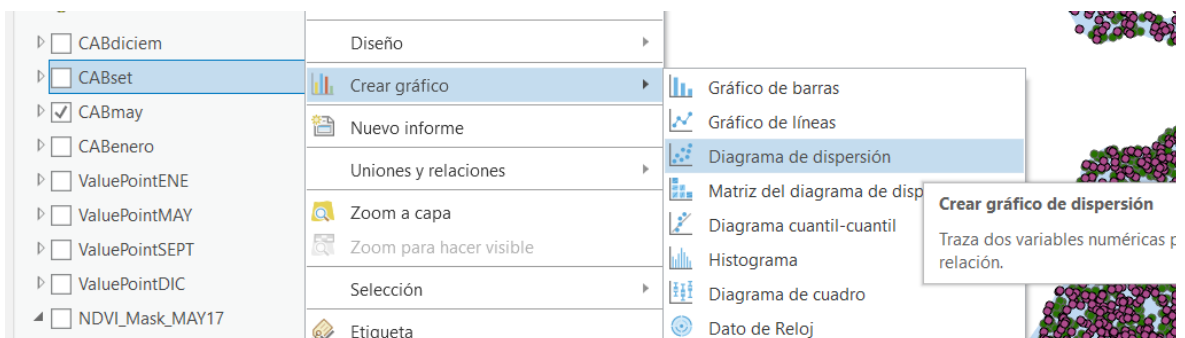


Figura 63: Elaboración de diagrama de dispersión para cada capa con ambos valores.

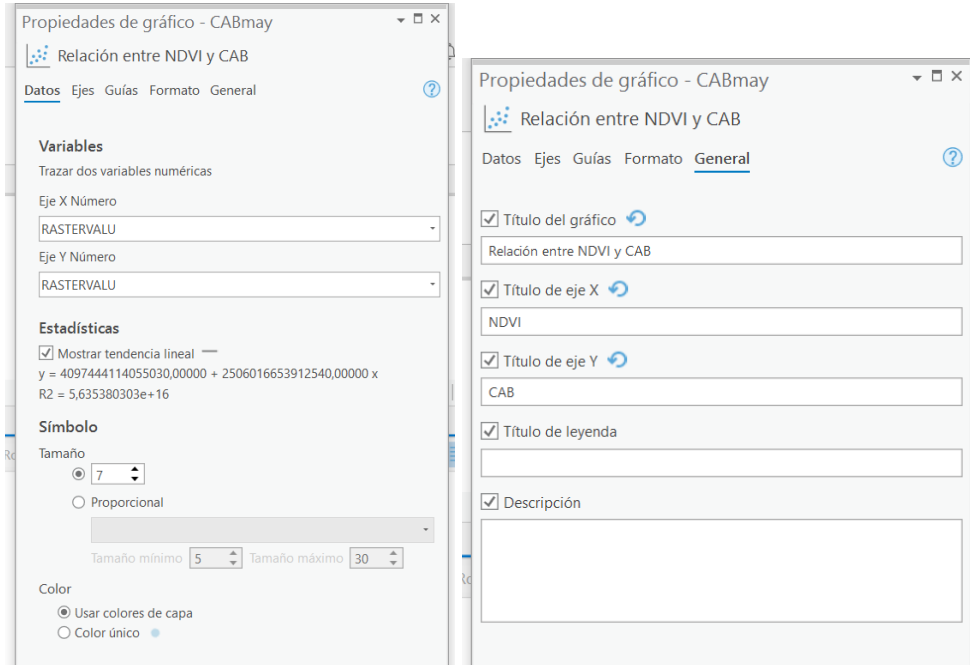


Figura 64 y 65: Parámetros para el gráfico de dispersión.

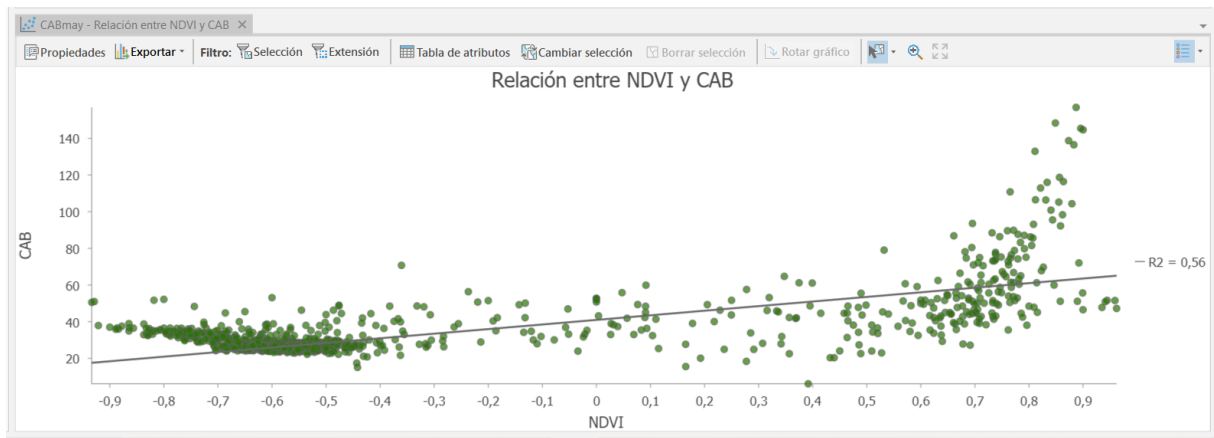


Figura 66: Resultado diagrama de dispersión.