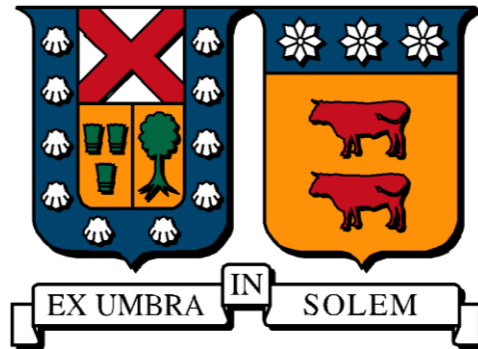


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**  
**VALPARAÍSO – CHILE**

ESTIMACIÓN DE BATIMETRÍA DE LAGUNA DE AGUAS  
CLARAS DE TRANQUES DE RELAVE MEDIANTE LA  
UTILIZACIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE  
SATÉLITES

**FELIPE ORLANDO ALTAMIRANO DÍAZ**  
**Ingeniero Civil**

**DICIEMBRE 2021**



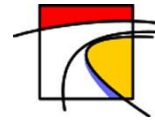
**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**  
**VALPARAÍSO – CHILE**

ESTIMACIÓN DE BATIMETRÍA DE LAGUNA DE AGUAS  
CLARAS DE TRANQUES DE RELAVE MEDIANTE LA  
UTILIZACIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES  
SATELITALES

Memoria de título presentada por  
**FELIPE ORLANDO ALTAMIRANO DÍAZ**  
Como requisito parcial para optar al título de  
**Ingeniero Civil**

Profesor Guía  
Dr. Gonzalo Suazo Fuentealba

**DICIEMBRE 2021**



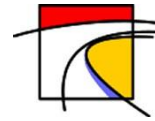
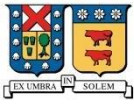
## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre y padre por su increíble apoyo a lo largo de todos estos años, incluso en los momentos más difíciles. En segundo lugar, agradezco el apoyo de mis familiares más cercanos. También agradezco a mi polola quien me soportó el carácter mucho tiempo.

En tercer lugar, a mis amigos Ingeniebríos, quienes conocí durante la carrera y me brindaron su amistad, cariño y apoyo hasta el día de hoy, sin ellos probablemente me hubiera demorado mucho más en terminar este proceso. A mis amigos de Plan Común quienes fueron un apoyo importante los primeros años de universidad. Amigos de la educación media con quienes pude siempre contar desde el inicio y siguen siendo importantes en mi vida.

Al profesor Gonzalo Suazo, agradecer su disposición para considerar el desarrollo de este trabajo.

A Víctor Araya, agradecimiento especial por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo, por colaborar con mi desarrollo personal y profesional, por ser un gran amigo, consejero y guía.



## RESUMEN

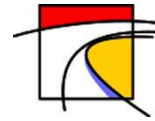
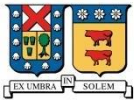
Uno de los recursos más importantes para la extracción de minerales de cobre es el agua. Debido a la sequía de la zona centro y norte del país, la industria minera se ha planteado como desafío mejorar el control sobre el agua utilizada y recuperada de los procesos, así como aquella almacenada en depósitos de relaves. Contar con una caracterización de este tipo permite una adecuada caracterización, por ejemplo, de balance de agua del depósito, y de la adopción de medidas para aminorar las pérdidas del recurso. Una de las variables a controlar es el volumen de agua presente en la laguna de aguas claras, formada por procesos de sedimentación y consolidación de los relaves (más aquellas recargas naturales o de origen antrópico). Esta agua suele ser bombeada a las plantas de proceso, por lo que es necesaria su correcta estimación.

Para la estimación volumen de aguas claras, la gran minería nacional, suele utilizar un bote con tecnología cuerda o sonar, que recorre la laguna de aguas claras de manera periódica. Las desventajas de estos métodos son el tiempo requerido para cubrir grandes áreas y la dificultad de acceso a las zonas donde la profundidad de la laguna es baja o somera.

En el presente trabajo se desarrolla y presenta un algoritmo de procesamiento de imágenes satelitales para la estimación de la profundidad de la laguna de aguas claras en base a la reflexión de la luz sobre el agua. Para ello, se realiza una calibración en base a batimetrías disponibles de lagos con características similares a las lagunas de aguas claras de tranques de relaves. Se adapta un algoritmo para clasificar zonas de interés mediante puntos de entrenamiento utilizando técnicas de clasificación espectral. Se genera un algoritmo de procesamiento de datos de reflexión de luz proveniente de las distintas bandas para ajustar parámetros de un modelo matemático. Finalmente se aplica el modelo para estimar la batimetría y se muestran los resultados tanto para un lago como para el tranque de relaves.

La aplicación del modelo dio resultados aceptables de manera eficiente en el tranque de relaves considerando la homogeneidad de la composición del fondo. Pero como se pudo ver en los mapas batimétricos estimados, aún existen errores de medición, de resolución espacial o de procesamiento secundario asociado a las correcciones atmosféricas realizadas. Lo anterior indica que se debe contar con otras correcciones atmosféricas y radiométricas más precisas, algún indicador o normalizador.

*Palabras-Clave: balance de agua, volumen laguna aguas claras, batimetría, reflexión de luz, imágenes satelitales, prueba de laboratorio.*



## ABSTRACT

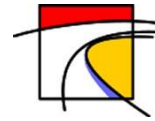
One of the most important resources for mineral extraction is the water that is used in the different processes. Due to the drought present in the last years in the center - north of the country, the mining industry has been forced to improve control over used water, improving the water balance of the tailings dam tank. One of the important points to control is the volume of water produced from the consolidation of the deposited tailings material. This water is accumulated in the so-called clear water lagoon and is subsequently pumped to be reused in the material refining process. Knowing the volume of water is essential for the tank's water balance algorithm, which allows optimizing the water recovery process.

In general, for the measurement of water, a boat is used that runs through the clear water lagoon, determining the depth of the water by means of a rope or sonar, and by integration, the corresponding volume. The disadvantages of these methods are the time required to cover large areas and the difficulty of access to areas where the depth of the lagoon is low (less than 15 cm), which represent a considerable area in many cases.

In this work develops and presents a satellite image processing algorithm for the estimation of the depth of the clear water lagoon based on the reflection of light on the water. For this purpose, a calibration is performed based on available bathymetries of lakes with similar characteristics to the clear water lagoons of tailings dams. An algorithm is adapted to classify areas of interest by training points using spectral classification techniques. An algorithm for processing light reflection data from the different bands is generated to fit parameters of a mathematical model. Finally, the model is applied to estimate the bathymetry and the results are shown for both a lake and the tailings dam.

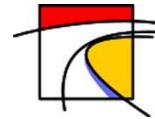
The application of the model gave acceptable results in an efficient way in the tailings dam considering the homogeneity of the bottom composition. But as could be seen in the estimated bathymetric maps, there are still errors of measurement, spatial resolution or secondary processing associated with the atmospheric corrections made. This indicates that other more accurate atmospheric and radiometric corrections, some indicator or normalizer, should be available.

Keywords: clear water lagoon volume, bathymetry, light reflection, satellite images.



# ÍNDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS .....	8
INDICE DE TABLAS .....	10
1. Introducción.....	11
1.1. Motivación.....	11
1.2. Objetivo(s).....	12
1.3. Plan de Trabajo .....	12
2. Estado del Arte .....	14
2.1. Relaves mineros.....	14
2.1.1 Depósitos de relave.....	15
2.2. Batimetría.....	20
2.2.1 Técnica del Escandallo .....	20
2.2.2 Técnica de la ecosonda.....	20
2.2.3 Teledetección.....	22
2.3. Monitoreo con imágenes multiespectrales.....	24
2.3.1 Tranques de relave.....	26
3. Marco Teórico .....	30
3.1. Reflexión.....	30
3.1.1 Fenómeno de emisión de luz .....	30
3.1.2 Fenómeno de reflexión, refracción y absorción de luz.....	32
3.1.3 Leyes de absorción y reflexión.....	34
3.1.4 Métodos de medición - Sensores .....	34
3.1.5 Imágenes como almacenamiento de información .....	36
3.1.6 Proceso de captación de imágenes.....	37
3.2. Satélites .....	38
3.2.1 Programas .....	38
3.2.2 Misión Sentinel-2 .....	40
3.3. Atmósfera.....	45
3.3.1 TOA.....	45
3.3.2 BOA.....	46
3.4. Algoritmos .....	48



3.4.1	Distancia mínima.....	49
4.	Metodología de trabajo.....	50
4.1.	Extracción de imágenes (Preprocesamiento).....	50
4.1.1	Obtención de imágenes satelitales.....	51
4.1.2	Preprocesamiento.....	51
4.2.	Algoritmo de Clasificación.....	52
4.2.1	Puntos de entrenamiento.....	52
4.2.2	Mapa de clasificación.....	53
4.3.	Máscaras binarias.....	53
4.3.1	Máscara geométrica.....	53
4.3.2	Máscara de clasificación espectral.....	54
4.3.3	Máscara de clasificación por grupos de altura.....	55
4.4.	Curvas Altura vs Reflexión.....	56
4.5.	Algoritmo de inversión Altura vs Reflexión.....	57
4.5.1	Ajuste de curva a los datos.....	57
4.5.2	Estimación de la profundidad del agua.....	59
5.	Resultados.....	60
5.1.	Aplicación en Lagos.....	62
5.2.	Aplicación en Tranque de relave.....	64
5.3.	Discusión.....	65
6.	Conclusiones.....	67
7.	Referencias.....	68
8.	Anexos.....	70
8.1.	Marco Teórico.....	70
8.1.1	Terminología.....	70
8.1.2	Conversión de la imagen a radiancia – Radiancia en el sensor.....	72

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2–1: Descarga de relaves. Fuente: Portal Minería Chilena .....	14
Figura 2–2: Imagen satelital del tranque de relaves Laguna Seca. Fuente: Bing Satélite....	15
Figura 2–3: Esquema de construcción por el método de aguas arriba. Fuente: Ramírez, 2007. .....	16
Figura 2–4: Esquema de construcción por el método de aguas abajo. Fuente: Ramírez, 2007. .....	16
Figura 2–5: Esquema de construcción por el método de eje central. Fuente: Ramírez, 2007. .....	17
Figura 2–6: Embalse de relaves de Syncrude, Canadá. Fuente: Bing Satélite. ....	17
Figura 2–7: Imagen satelital de la planta minera Delta ENAMI. Fuente: Bing Satélite .....	18
Figura 2–8: Imagen satelital de Planta minera Centinela. Fuente: Bing Satelite. ....	18
Figura 2–9: Relaves en pasta. Fuente: Mining Journal. ....	19
Figura 2–10: Barrido con sondador acústico.....	21
Figura 2–11: Sondadores acústicos. (a) área cubierta con ecosonda multihaz; (b) área cubierta con ecosonda monohaz. ....	21
Figura 2–12: Esquema de sistema LiDAR. (a) El pulso láser es emitido de manera discreta; (b) El pulso láser es emitido de manera continua. ....	23
Figura 2–13: Arreglo de Imágenes satelital de la localización del archipiélago de San Andrés y Provincia. Imagen de Landsat. Fuente: Ariza, 2014. ....	25
Figura 2–14: Banda 1 (azul), banda 2 (verde), banda 3 (rojo), banda 4 (infrarrojo). Fuente: Ariza, 2014. ....	25
Figura 2–15: (a) Imagen típica de un área de estudio (Landsat 8 OLI image); (b) Imagen típica de un depósito de relaves de hierro en el área de estudio (GoogleEarth image).Fuente: Defu Che, 2018.....	26
Figura 2–16: Evaluación de riesgos de todos los depósitos de relaves en el área de estudio, representada por un punto de color asociado a su nivel de riesgo. Fuente: Defu Che, 2018. .....	27
Figura 2–17: Distribución de muestras y tabla de colores de referencia. Imagen izquierda con cámara NIR y derecha con cámara VIS. Fuente: Araya, 2018.....	28
Figura 2–18: Índices iluminación activa laser 980 nm con cámara NIR. Fuente: Araya, 2018. .....	28
Figura 2–19: Imagen satelital de tranques de relaves. Imagen a la izquierda se ve el tranque de relaves El Torito y a la derecha se ve el tranque de relaves Laguna Seca.....	29
Figura 3–1: Espectro electromagnético entre rango ultravioleta e infrarrojo.....	30
Figura 3–2: Ancho de banda del espectro electromagnético en rango infrarrojo.....	31
Figura 3–3: Esquema representativo de la Ley del Cuadrado Inverso. ....	32

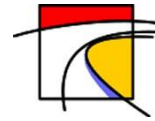


Figura 3–4: Gráficos esquemáticos de la Intensidad espectral. A la izquierda se ve la radiación solar emitida y a la derecha dos superficies de distintas propiedades. ....	32
Figura 3–5: Representación esquemática de la Ley del Coseno de Lambert. ....	33
Figura 3–6: Esquema representativo de la Ley de Snell .....	33
Figura 3–7: Píxel formado a partir de canales RGB.....	36
Figura 3–8: Diferencia entre imagen RGB, imagen multiespectral (MSI) e imagen hiperespectral (HSI).....	37
Figura 3–9: Vista esquemática del satélite Sentinel-2 en el espacio. ....	40
Figura 3–10: Mosaicos del producto Level-1C. ....	41
Figura 3–11: Dirección de la órbita en que se recuperan datos a lo largo de 15.000 km.....	42
Figura 3–12: Órbita típica que muestra la disposición de los Granules del producto Level-1B. Ancho de franja de 290 km.....	42
Figura 3–13: Bandas Multiespectrales (MSI) vs Resolución espacial .....	43
Figura 3–14: Representación esquemática del TOA y BOA. Fuente: Gastellu-Etchegorry (2015). ....	45
Figura 3–15: Color verdadero: RGB = bandas 4/3/1 (665, 560, 443 nm). Izquierda: escena original, al centro: banda cirrus (1.375 $\mu$ m), derecha: corrección atmosférica después del cirrus. ....	48
Figura 3–16: Clasificación por distancia espectral.....	48
Figura 4–1: Interfaz gráfica de <a href="https://scihub.copernicus.eu/">https://scihub.copernicus.eu/</a> durante la descarga de imágenes Sentinel-2.....	51
Figura 4–2: (a) Clasificación visual de los grupos del lago Crescent Lake: agua profunda, agua superficial y otros.; (b) Clasificación visual de los grupos del tranque de relaves Laguna Seca: agua profunda, agua superficial, terreno natural, relave seco, relave consolidado, relave húmedo y otros. ....	53
Figura 4–3: Máscara geométrica: (a) Polígono del lago Crescent Lake; (b) Polígono del tranque de relaves Laguna Seca.....	54
Figura 4–4: Resultado de la clasificación espectral mediante el entrenamiento. (a) Crescent Lake con los tres grupos clasificados; (b) Laguna Seca con los siete grupos clasificados. .	54
Figura 4–5: Máscara binaria de clasificación por grupos de altura del tranque de relaves Laguna Seca.....	55
Figura 4–6: Índice normalizado de iluminación activa con láser 980 nm con cámara NIR. 56	
Figura 4–7: Curvas Altura vs Reflectancia para las 12 bandas del tranque de relaves Laguna Seca.....	57
Figura 4–8: Ajuste de curva para cada banda del tranque de relaves Laguna Seca. ....	58

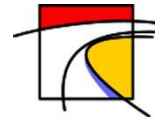


Figura 5–1: Comparación de Curvas de Altura vs Reflexión entre lago estadounidense Crescent Lake (línea continua) y tranque de relave Laguna Seca (línea segmentada). Se muestran las bandas 2 y 8 (azul y magenta respectivamente). ..... 60

Figura 5–2: Curvas H vs R de las 12 bandas en conjunto del tranque de relaves Laguna Seca ..... 61

Figura 5–3:(a) Batimetría real del lago Crescent Lake obtenida de base de datos de lagos estadounidenses. Septiembre de 2013; (b) Imagen satelital con canales visibles (RGB) del lago Crescent Lake. Septiembre de 2020. .... 62

Figura 5–4: Imagen satelital que muestra la reflectancia en la banda 2 del lago Crescent Lake. Imagen obtenida con fecha de septiembre 2020..... 63

Figura 5–5: Estimación de batimetría del lago Crescent Lake mediante modelo matemático utilizando parámetros de ajuste de la banda 2 del tranque de relave Laguna Seca. .... 63

Figura 5–6:(a) Batimetría real del tranque de relaves Laguna Seca obtenida mediante un DEM. Abril de 2020; (b)Imagen satelital con canales visibles (RGB) del tranque de relaves Laguna Seca. Abril de 2020. .... 64

Figura 5–7: Imagen satelital del tranque de relaves Laguna Seca. Imagen izquierda muestra la reflectancia de la banda 2 y la derecha muestra la reflectancia de la banda 3. Imagen obtenida con fecha abril de 2020..... 65

Figura 5–8: Estimación de batimetría del tranque de relaves Laguna Seca mediante modelo matemático. Imagen a la izquierda se utilizó parámetros de ajuste de la banda 2 y a la derecha se utilizó de la banda 3. .... 65

Figura 8–1: Irradiancia, emitancia y reflectancia. Fuente: Gastellu-Etchegorry (2015). ..... 71

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Niveles de procesamiento de las imágenes satelitales. .... 41

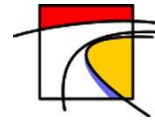
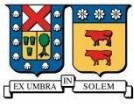
Tabla 3-2: Banda espectral con su respectiva longitud de onda, resolución espacial y propósito. .... 44

Tabla 4-1: Tabla que resume el nombre del sitio, la zona UTM, la fecha de la batimetría y la fecha de las imágenes satelitales. .... 50

Tabla 4-2: Clasificación de bandas según su resolución. .... 51

Tabla 4-3: Sitio estudiado con su respectiva Resolución espacial y espectral, Zona y Coordenadas UTM. .... 52

Tabla 4-4: Valores de los parámetros de las curvas ajustadas asociado a cada banda. .... 58



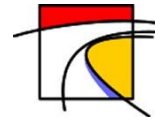
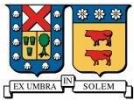
# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

La extracción de minerales es una de las principales actividades económicas de Chile, para lo cual se requiere de grandes sistemas de producción, tales como molinos o celdas de flotación, que permiten separar el mineral de valor económico de la roca natural a gran escala (Sánchez, 2020). Asociado a cada uno de los procesos productivos se requiere de agua en volúmenes consistentes con la escala de producción. Tomando en consideración que este recurso se ha vuelto escaso en la zona norte y centro del país, uno de los desafíos para la industria minera es la optimización y recuperación del recurso hídrico.

Por otro lado, los porcentajes o leyes del mineral han caído en las últimas décadas a valores inferiores al 1%, lo que se asocia a grandes volúmenes de material procesado y a la generación de grandes cantidades de roca y relaves sin valor comercial. Los relaves son transportados desde la planta de producción a grandes estructuras de almacenamiento conocidos como depósitos o tranques de relaves. En Chile se suele utilizar la parte gruesa del relave (granulometría similar a una arena) para la construcción del muro resistente del depósito, mientras que la parte fina o lama se deposita en la cubeta. En general, debido a su alto contenido de humedad el relaves en la cubeta decanta y se consolida, por lo que el agua que se libera es redirigida y acumulada en un sector denominado laguna de aguas claras. Desde esta laguna se intenta recuperar agua para ser reutilizada en el proceso productivo de modo de disminuir el uso de agua fresca.

En la cubeta de un depósito de relaves, tanto el agua como el material sólido se ven sometidos a diferentes fenómenos tales como evaporación del espejo de agua, escorrentía e infiltración, lo que modifica el volumen de agua acumulado en la laguna de aguas claras. Para cuantificar el volumen de agua en los distintos procesos se realiza un balance de agua y monitoreo de sus variables y componente críticas, lo que permite reducir la incertidumbre en la cuantificación de volúmenes de recuperación de agua. En particular, para la medición del volumen acumulado en la laguna de aguas claras se utilizan técnicas de batimetría. Entre ellas están la técnica del escandallo, la técnica de la ecosonda y la técnica de teledetección. La primera consiste en utilizar un cable de longitud conocida y un plomo que es descolgado desde un bote en distintas posiciones de la laguna, siendo su principal desventaja que abarca sólo un punto a la vez y el proceso es relativamente lento. La técnica de la ecosonda consiste en la emisión de un pulso de sonido y la medición del tiempo de viaje dentro del agua, con lo cual se estima la profundidad. Ésta es una técnica bastante limitada, ya que los equipos pueden llegar a ser muy costosos y tienen problemas en profundidades bajas, donde el bote puede atascarse. Por último, la técnica de teledetección permite obtener información de los objetos sin mantener contacto con ellos, utilizando métodos de imagen y no-imagen. El método no-imagen corresponde al sistema LIDAR, este es un dispositivo que determina la distancia desde el emisor láser hasta el objeto o superficie, midiendo el tiempo de retraso desde la emisión del pulso y su detección de señal reflejada. Este dispositivo puede instalarse



en un avión o dron, sin embargo, poseen desventajas: el costo de servicio y abarcar grandes cantidades de área, respectivamente hablando.

El método de imagen utiliza imágenes espectrales de satélites, lo que consiste en medir la luz solar reflejada en el terreno a través de una celda fotosensible equipada en los satélites ópticos que orbitan la Tierra. Dentro de los primeros estudios sólo se utilizaba una banda intentando de correlacionar la imagen con la profundidad del agua (Lyzenga, 1978). Gracias a los avances en la división de la luz en forma espectral (imágenes asociadas a distintas longitudes de onda), se determinó un algoritmo que puede utilizar otras bandas espectrales de los satélites para intentar predecir la profundidad del agua (Lyzenga, 2006).

En trabajos más recientes, se midió la batimetría en zonas de arrecife de coral donde sus mediciones fueron corroboradas mediante ecosondas e interpolaciones (Ariza et al. 2014).

Se han usado técnicas de teledetección para monitorear desplazamientos en tranques de relave de hierro en China.

En este trabajo se utilizarán imágenes espectrales satelitales para continuar la investigación de Araya et al. (2018), donde en laboratorio se observó la relación entre la reflexión de la luz y los contenidos de agua en relave saturado, lo cual se puede relacionar con la altura de agua por sobre el nivel del relave.

De esta forma se utilizará esta idea para extender la relación entre la reflexión de luz y la profundidad de la columna de agua agregando bandas espectrales por medio de imágenes satelitales. Se calibrará un algoritmo en base a la información batimétrica de lagos y posteriormente se aplicará a un caso de estudio de depósitos de relave en Chile

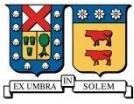
## 1.2. Objetivo(s)

Desarrollar una metodología para monitorear la batimetría del agua acumulada en depósitos de relave mediante el uso de imágenes multiespectrales obtenidas por satélites.

Como objetivo específico se plantea consolidar algoritmos de clasificación espectral a depósitos de relaves, para separar zonas de laguna y relaves en distintos estados de humedad.

## 1.3. Plan de Trabajo

- Estudio de tecnologías satelitales e imágenes espectrales, identificando distintas plataformas, modelos de satélites e instrumentos de medición disponibles.
- Seleccionar plataforma de imágenes espectrales con criterios técnico-económicos.
- Revisión bibliográfica de batimetría y técnicas de medición, en conjunto a investigación de uso de imágenes satelitales para la estimación de batimetría.
- Revisión bibliográfica de trabajos previos realizados en laboratorio.
- Estudio de técnicas de procesamiento digital de imágenes.
- Estudio de algoritmos de clasificación espectral desarrollado en investigaciones anteriores.
- Adaptación de algoritmos de clasificación de zonas de interés para separar laguna de aguas claras mediante máscaras binarias.



- Estudio de batimetrías de lagos conocidos para comprender la relación entre la reflexión de la luz y la profundidad del agua.
- Generar algoritmo que procese datos de reflexión de luz proveniente de las distintas bandas para la estimación de la batimetría.
- Generación de modelo de inversión para la estimación de profundidad de columna de agua a partir de reflexión de luz capturada en imágenes satelitales.
- Aplicar modelo y metodología desarrollada para estimar la batimetría de tranques de relave en Chile.

## 2. Estado del Arte

### 2.1. Relaves mineros

Las plantas mineras generan residuos sólidos llamados “relaves”, que corresponden a una “suspensión fina de sólidos en líquido”, compuesto fundamentalmente por el material presente en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso, originando una “pulpa”. Dicha pulpa presenta una razón aproximada de agua/sólidos del orden de 1:1 a 2:1. Su comportamiento y las propiedades dependen tanto de la razón agua/sólidos como de las características de las partículas sólidas (Ramirez, 2007)

Para la depositación del material proveniente de la planta se encuentran diversas alternativas, la selección de una de ellas, dependerá de la combinación de estos factores: características del relave, disponibilidad de recursos hídricos, producción del yacimiento y características del lugar de emplazamiento del futuro depósito.

El marco normativo nacional para los depósitos de relave está dado por el Decreto Supremo N°248 “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves” del Ministerio de Minería. En dicho documento se explica que los depósitos son obras estructuradas en forma segura para contener los relaves derivados de la planta de concentración, considerando además, otras obras anexas. La función principal es servir como depósito, generalmente determinante, de los materiales sólidos presentes en los relaves, permitiendo la recuperación, en gran medida, del agua utilizada en el proceso como se muestra en la Figura 2–1.



Figura 2–1: Descarga de relaves. Fuente: Portal Minería Chilena

### 2.1.1 Depósitos de relave

Los diversos tipos de depósitos de relaves que se consideran en Chile actualmente son:

- Tranques de relaves
- Embalses de relaves
- Depósitos de relaves espesados
- Depósitos de relaves filtrados
- Depósitos de relaves en pasta

#### 2.1.1.1 Tranques de Relave

Son aquellas estructuras en que los muros perimetrales están compuestos por la fracción gruesa (arenas) que, a través de un proceso de cicloneo, es separada de la fracción fina (lomas) del relave integral. Estas últimas son depositadas en la cubeta del embalse, las que, al ser descargadas sobre el talud interno del muro, ayudan a la impermeabilización del mismo. En la Figura 2-2 se muestra una imagen satelital del tranque de relaves Laguna Seca ubicado en el norte del país.



Figura 2-2: Imagen satelital del tranque de relaves Laguna Seca. Fuente: Bing Satélite.

Existen tres sistemas de construcción de tranques de relave:

### Construcción del muro hacia aguas arriba

El método consiste en la edificación de un muro inicial de material de empréstito compactado, desde el cual se deposita la arena cicloneada hacia el talud aguas arriba del muro, mientras que las lamas se vacían en la cubeta del depósito. Una vez que está cercano a llenarse, se continúa el trabajo del levantamiento del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor altura en la dirección hacia aguas arriba, originando así, una nueva etapa de descarga.

Es importante mencionar que si bien este procedimiento requiere un menor volumen de material, produce muros menos resistentes frente a oscilaciones sísmicas. En consecuencia de lo anterior, la normativa vigente en el país prohíbe la construcción de este tipo de tranques (Figura 2–3).

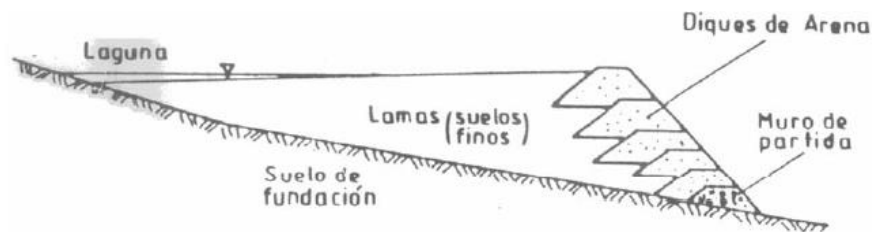


Figura 2–3: Esquema de construcción por el método de aguas arriba. Fuente: Ramírez, 2007.

### Construcción del muro hacia aguas abajo

Al igual que el método de aguas arriba, se comienza con el levantamiento de un muro de material de empréstito compactado, pero la arena cicloneada se vacía hacia el talud aguas abajo del muro y las lamas en la cubeta. Una vez que el muro se ha peraltado lo suficiente, la acción siguiente es su levantamiento, frente a lo cual los hidrociclones se desplazan a una mayor elevación en la dirección aguas abajo, generando una nueva etapa de descarga.

Este método requiere de un gran volumen de arenas, pero permite lograr muros más inalterables desde el punto de vista de la resistencia sísmica, como se ve en la Figura 2–4 (Ramírez, 2007).

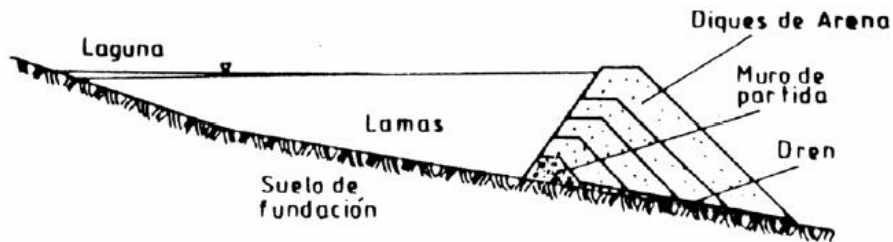


Figura 2–4: Esquema de construcción por el método de aguas abajo. Fuente: Ramírez, 2007.

### Construcción del muro por el método de eje central o mixto

Siguiendo el mismo procedimiento original, se construye un muro con material de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas cicloneadas hacia el talud aguas abajo y las lamas hacia el talud aguas arriba. La disimilitud con el método de aguas bajo, al momento

próximo del llenado, se eleva la línea de alimentación, siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida.

Este método requiere de un volumen de arenas intermedio a diferencia de los métodos anteriores, permitiendo lograr muros suficientemente estables (Figura 2–5).

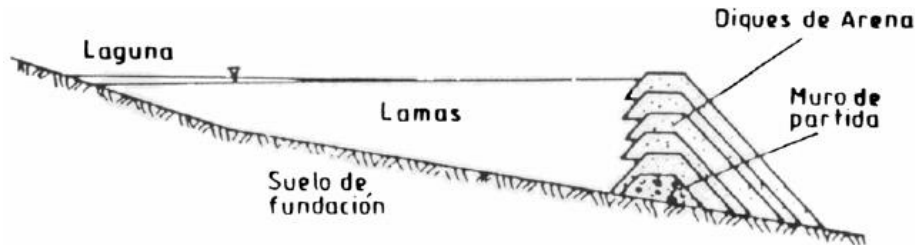


Figura 2–5: Esquema de construcción por el método de eje central. Fuente: Ramírez, 2007.

### 2.1.1.2 Embalse de relaves

Este tipo de depósito de relaves consiste en erigir un muro resistente hecho de material de empréstito compactado, impermeabilizando el talud interior del muro y también parte o todo su coronamiento. Los relaves se depositan completos en la cubeta sin necesidad de recurrir a una clasificación. Adicional a lo anterior, se debe disponer de un sistema de evacuación de las aguas claras en la laguna. Los embalses de relaves no se diferencian en gran cantidad de las presas de embalse de aguas.

Desde el punto de vista sísmico, los embalses de relaves son los más resistentes para los tranques de relave. A continuación, en la Figura 2–6 se muestra una imagen satelital del embalse de relaves de Syncrude, ubicado en Canadá.



Figura 2–6: Embalse de relaves de Syncrude, Canadá. Fuente: Bing Satélite.

### 2.1.1.3 Depósito de relaves espesados

Los depósitos de relaves espesados son aquellos depósitos de forma cónica, en los cuales el relave descargado ha sido sometido previamente a un proceso de espesamiento, lo cual, al incrementar las concentraciones de sólidos en peso en comparación al relave convencional, puede ser considerado como autosoportante, con mayor estabilidad estática y sísmica que los depósitos convencionales. En la Figura 2–7 se muestra una imagen satelital como ejemplo de lo anterior.



Figura 2–7: Imagen satelital de la planta minera Delta ENAMI. Fuente: Bing Satélite

### 2.1.1.4 Depósito de relaves filtrados

Este tipo de depósitos de relaves es muy semejante al de los relaves espesados, con la diferencia de que el material suele contener menos agua debido al proceso de filtrado, empleando equipos similares a los que se utilizan para filtrar concentrados, como son los filtros de prensa o de vacío. A continuación, en la Figura 2–8 se muestra una imagen satelital de la planta minera Centinela que corresponde a un ejemplo de depósito de relaves filtrados.



Figura 2–8: Imagen satelital de Planta minera Centinela. Fuente: Bing Satelite.

### 2.1.1.5 Depósito de relaves en pasta

Los relaves en pasta corresponden una mezcla de agua con sólido, que contienen cuantiosas partículas finas y un bajo contenido de agua, de tal manera que esta mezcla posea una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad. Una buena pasta de relaves requiere al menos de un 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 micrones (Ramirez, 2007).



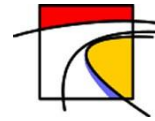
*Figura 2-9: Relaves en pasta. Fuente: Mining Journal.*

### 2.1.1.6 Otros depósitos de relaves

Existen otros tipos de depósitos de relaves que son viables de desarrollar. Sin embargo, en Chile la normativa posee importantes restricciones para otorgar permisos a proyectos de depósitos alternativos, estas restricciones abarcan desde el punto de vista legal, hasta la seguridad de las personas y del medio ambiente.

A pesar de lo mencionado anteriormente, es importante reconocer que en el pasado se realizaron proyectos en el país que utilizaron otras técnicas, tales como:

- Depósitos en minas subterráneas en explotación
- Depósitos en minas subterráneas abandonadas
- Depósitos en minas explotadas a cielo abierto
- Depósitos de relaves radioactivos
- Depósitos costeros
- Depósitos submarinos



## 2.2. Batimetría

La batimetría es un conjunto de técnicas que permiten determinar el relieve de superficies subacuáticas, para este caso, en aguas claras de tranques de relaves chilenos. Ésta queda determinada mediante un levantamiento de las coordenadas (X, Y, Z), de tal forma que se pueda describir el fondo y sus variaciones espaciales. Para este caso, se utilizará la batimetría para poder predecir cuánta cantidad de agua hay almacenada en las lagunas de aguas claras de tranques de relave y así poder controlar el uso del recurso. A continuación, se presentan las técnicas de batimetría más utilizadas en la actualidad.

### 2.2.1 Técnica del Escandallo

El escandallo fue una de las primeras sondas utilizadas y simplemente eran pesos de plomo atados a una cuerda que se dejaba caer hasta tocar el fondo.

Para efectuar las mediciones se debe esperar que la cadena o cuerda que sujeta la plomada esté detenida haciendo un pequeño contacto con el fondo hasta que quede en forma vertical antes de efectuar la lectura (Gomez, 2013).

Al entregar una profundidad puntual, se debe realizar una exploración del área mayor a lo normal, es decir, con corridas separadas que pueden variar desde 1 hasta 2,5 metros a lo largo del sitio, lo cual tiene dificultad la obtención de grandes porciones de área.

El escandallo tiene poca precisión en las medidas efectuadas, al ser afectado por la variación de longitud del material empleado y la no verticalidad de la sonda.

Actualmente el escandallo sigue siendo usado en trabajos muy específicos como la obtención de calidades de fondo, aunque se disponga de métodos electrónicos de sondas, ya que estas últimas omiten la naturaleza del fondo y su funcionamiento en un momento determinado no puede ser el adecuado. Según el SHOA, esta metodología es factible de ser empleada sólo hasta una longitud de 15 metros en línea perpendicular a los sitios correspondientes a puertos y muelles.

### 2.2.2 Técnica de la ecosonda

En general, las batimetrías han sido realizadas utilizando ecosondas acústicas colocadas sobre embarcaciones. Estas se basan en el tiempo que demora una onda acústica en recorrer la distancia que separa a la ecosonda del fondo. La onda acústica sale del transductor y viaja a través del agua hasta llegar al fondo, donde la onda es reflejada y regresa al transductor. Al emitir un sonido de frecuencia constante se mide el tiempo desde que sale del transductor y regresa a él. La distancia se calcula en base al tiempo medido y la velocidad de propagación en el medio. Las ecosondas acústicas se clasifican según el número de haces, estos pueden ser multihaz o monohaz. Utilizando la ecosonda, la medida de profundidad se realiza de manera continua a lo largo del rumbo que sigue la embarcación, obteniendo un registro gráfico que se debe relacionar con el posicionamiento planimétrico para tener un correcto mapa batimétrico. El haz al ser emitido constantemente, la anchura de la zona que detecta acústicamente aumenta con la profundidad y por este motivo es que las trayectorias del barco deben ser paralelos a la costa (Figura 2–10). La primera franja barrerá isóbatas (líneas de igual batimetría) más someras, al aumentar la profundidad y la distancia a la costa, irá aumentando progresivamente el ancho de la zona barrida (Gomez, 2013).

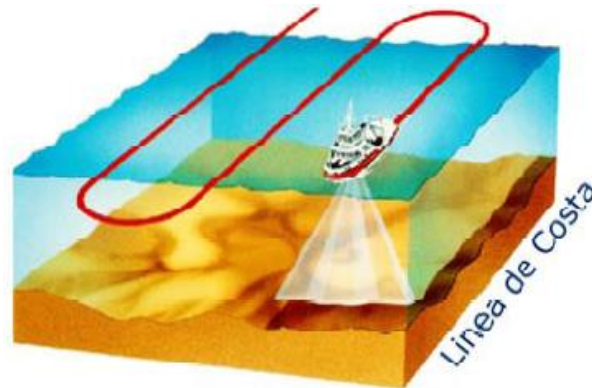


Figura 2-10: Barrido con sonador acústico.

Las ecosondas multihaz dan una cobertura completa del fondo y, además, facilitan información sobre la composición del fondo. Estas ecosondas suministran batimetrías en un amplio rango de profundidades y pueden trabajar con valores de turbidez en el agua. Sin embargo, realizar un levantamiento batimétrico con ecosondas multihaz es bastante costoso.

Por otra parte, como alternativa para la obtención de batimetría comprometiendo una buena calidad y menores costos, es emplear ecosondas monohaz, la cual funciona con un haz simple que obtiene la profundidad en un punto mediante la medición del tiempo de respuesta y la velocidad de propagación de la onda de frecuencia conocida. Pero sigue siendo un método costoso ya que se debe programar una campaña de datos con la embarcación y planificar las líneas o trayectorias para la toma de puntos sobre el fondo (Sánchez-Carnero, 2012).

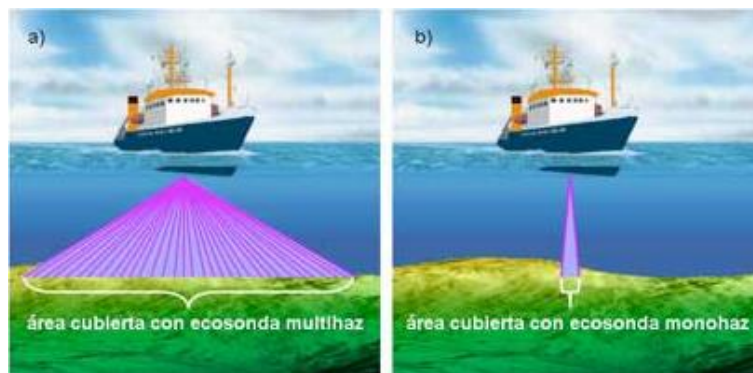
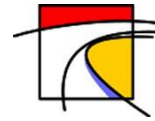


Figura 2-11: Sondadores acústicos. (a) área cubierta con ecosonda multihaz; (b) área cubierta con ecosonda monohaz.

Otro factor importante es que el método está restringido a las condiciones climáticas existentes, como pueden ser los vientos de grandes velocidades que no permitan estabilizar la embarcación, lluvias intensas u oleaje para los casos costeros. Por último, el método está limitado a zonas de aguas poco profundas o zonas fluviales de baja profundidad donde no es posible que la embarcación navegue. Los factores mencionados anteriormente facilitan que las técnicas de teledetección sean un método competitivo y atractivo para obtener una batimetría fiable a bajo costo (Lyzenga, 2006).



### 2.2.3 Teledetección

La estimación de las profundidades mediante teledetección se remonta a tecnología de scanners multiespectrales desarrolladas en los años 1960, las cuales se basaban en películas sensibles a distintas longitudes de onda, que podían utilizarse para representar cartográficamente aspectos como los distintos tipos de vegetación. Posteriormente se desarrolló un nuevo tipo de sensor donde los datos se producían en forma de matrices corológicas, donde cada scanner está designado para recibir radiaciones de canales específicos, lo que se tradujo en un avance considerable en el procesamiento de imágenes. A raíz de lo anterior, ya se podía ver que existía una relación entre la profundidad del agua y la reflexión de la radiación de la luz medida, ya sea de manera activa o pasiva (zonas más claras representaban menores profundidades y zonas más oscuras representaban mayores profundidades).

Sin embargo, el auge de esta tecnología se ha impulsado con la comercialización y disponibilidad al público en general, de la información de alta resolución que proporcionaban los satélites multiespectrales y el desarrollo de sensores multiespectrales con mayor número de bandas. La medida de la profundidad mediante teledetección es capaz de proporcionar medidas precisas sobre espacios abiertos en mucho menos tiempo que una embarcación equipada con ecosonda (Lyzenga, 2006).

La batimetría por teledetección puede clasificarse en dos amplias categorías: Método de no-imagen y Método de imagen

#### 2.2.3.1 Método de no-imagen

El método de no-imagen está representado por el LiDAR (Light Detection Ranging) y se basa en detectar la distancia entre el sensor y la superficie del fondo usando una onda doble (LiDAR batimétrico).

El LiDAR es un sistema activo montado normalmente sobre aviones, helicópteros o dron. Se utilizan dos rayos láser emitidos, el primero es verde de 32 nm que se utiliza para detectar el fondo del mar y otro infrarrojo de 1064 nm que se utiliza para detectar la superficie del agua. Estos pulsos utilizados conjuntamente permiten determinar la posición de la superficie del agua, calcular las trayectorias de los rayos con precisión y deducir la profundidad del agua. El tiempo transcurrido desde que el pulso emitido sale del emisor laser hasta su detección a través de la señal reflejada por el punto o la superficie muestreada, permite determinar la distancia y construir la información batimétrica.

Por comparación con el radar, la menor longitud de onda utilizada por los sensores LiDAR permite mayor nivel de detalle en la observación. Por otro lado, con una mayor longitud de onda de radar se puede detectar objetos a larga distancia, pero con menor detalle. La longitud de onda del radar está entre 3 cm y 3 mm, mientras que LiDAR tiene una longitud de onda cercano a los 1000 nm.

El sensor emite pulsos láser en cortos intervalos de tiempo sobre un área (símil a las ecosondas multihaz) y recibe la señal reflejada desde la superficie muestreada, como se muestra en la Figura 2-12.

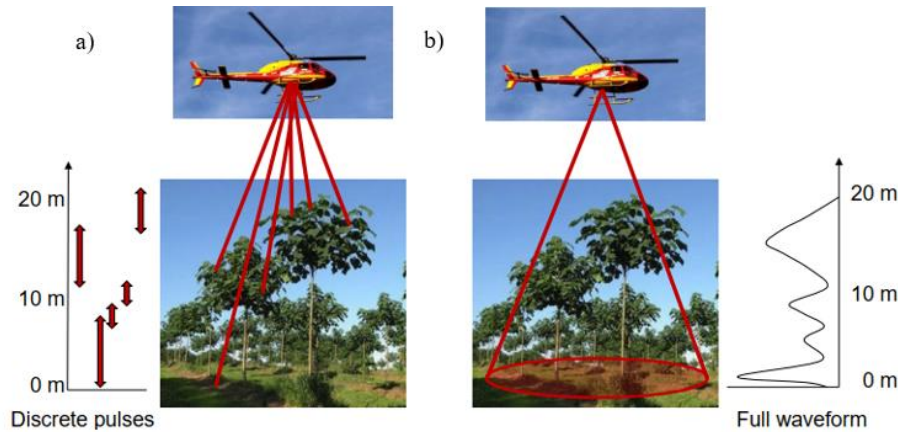


Figura 2–12: Esquema de sistema LiDAR. (a) El pulso láser es emitido de manera discreta; (b) El pulso láser es emitido de manera continua.

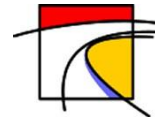
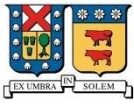
La onda de onda típica de batimetría LiDAR se compone en tres partes diferenciadas: una primera que corresponde al pulso de retorno del reflejo sobre la superficie, una segunda que es atribuible a la dispersión sobre la columna de agua y una última parte que es el reflejo de la señal sobre el fondo del mar. La primera es la señal más fuerte, aunque bastante variable con las condiciones de la superficie, de tal forma que puede desaparecer sobre una superficie del agua en calma como consecuencia de la reflexión especular. Para los casos costeros, la superficie de las olas complica el uso de la señal que corresponde al retorno del fondo, exagerando el valor y la varianza de su amplitud. La segunda parte que corresponde a la dispersión sobre la columna de agua es atenuada exponencialmente con respecto al producto de la profundidad del agua y el coeficiente de difusión. La última parte que corresponde al retorno del fondo es la última que alcanza el sensor. Esta componente es típicamente varios órdenes más baja que la parte de la señal correspondiente al retorno de la superficie. Para maximizar la profundidad a la cual puede penetrar, en batimetría LiDAR usualmente se emplea la luz láser verde. Las longitudes de onda mayores no son adecuadas ya que favorecen la absorción por el agua. Las longitudes de onda más corta no son ideales tampoco por la fuerte dispersión y absorción por los constituyentes del agua, y por consiguiente, profundidades de penetración menores (Wang, 2007).

El rango de profundidad efectiva del LiDAR es entre 1,5 hasta los 60 metros. Los factores que afectan este método son la turbidez del agua, el material del fondo, el estado del mar, ángulo de incidencia del sol y la intensidad. Mientras que las limitaciones principales es el costo de emplear el método, el ancho de barrido y aguas muy turbias.

### 2.2.3.2 Método de imagen

Las imágenes satelitales se encuentran en formato ráster, el cual es una matriz de píxeles y cada píxel tiene un valor digital o de reflectancia.

El método de imagen estima la profundidad a partir de los valores de los píxeles. Se emplea el rango visible e infrarrojo lejano del rango espectral. Este método puede ser implementado analítica o empíricamente, o mediante una combinación de ambos, donde cada implementación tiene sus propias fortalezas y limitaciones.



## Modelo Analítico

La determinación de la batimetría por imágenes ópticas mediante un modelo analítico se basa en la manera en que la luz se propaga en el agua. Para implementar este modelo se requiere conocimiento de algunas propiedades ópticas del agua, tales como el coeficiente de atenuación y dispersión. Se emplea el modelo de transferencia radiativa de flujo, que requiere las firmas espectrales del material disuelto y suspendido y la reflectancia del suelo (Spitzer, 1986). El modelo de transferencia radiativa supone que el suelo tiene una alta reflectividad y un apropiado nivel de calidad del agua. Por lo tanto, es inaplicable en aguas costeras que tienen pobre reflectancia del fondo debido a la alta turbidez.

Hasta hace pocos años, todos los modelos empleaban bandas individuales, desperdiciando los datos de las otras bandas disponibles. Esta limitación ha sido superada por un algoritmo que hace posible el uso de las bandas multiespectrales (Lyzenga, 2006).

La determinación de la batimetría por imágenes de teledetección mediante un modelo analítico se ve afectada por la calidad del agua y las condiciones atmosféricas, es muy sensible a profundidades por encima de 30 metros. Cautelando estas condiciones, ofrece un alto grado de precisión (Gao, 2009).

## Modelo Empírico

La batimetría determinada por imágenes ópticas mediante un modelo empírico se basa en que la relación entre la radiancia recibida de la columna de agua y la profundidad es establecida empíricamente, sin considerar cómo la luz es transmitida a lo largo de la columna de agua. Si las propiedades ópticas no son uniformes, se debería emplear multibandas (Lyzenga, 2006).

El desarrollo de modelos empíricos requiere de un conjunto de medidas in situ, como pueden ser reflectancia del agua y del suelo, coeficiente de atenuación de la difusión vertical promediada y la concentración de los constituyentes inorgánicos suspendidos. El establecimiento del modelo empírico se construye mediante un análisis de regresión por mínimos cuadrado, que considera la relación entre las profundidades de agua observadas y la reflectancia espectral. El método empírico establece que la reflectancia total del agua está vinculada principalmente a la profundidad del agua y secundariamente a la turbidez del agua (Lafon, 1997).

La determinación de la batimetría por imágenes de teledetección mediante un modelo empírico se ve afectada por la calibración atmosférica, turbidez del agua y la reflectancia del fondo. Además, es sensible a profundidades por encima de 30 metros y el grado de precisión se torna variable dependiendo de la profundidad (Gao, 2009).

### 2.3. Monitoreo con imágenes multiespectrales

En esta sección se abordan los estudios existentes con método de imagen en caso de arrecifes y de tranques. Arrecifes de coral

El estudio de la batimetría en zonas de arrecifes de coral se llevó a cabo en imágenes Landsat ETM+ sobre Archipiélago de San Andrés y Providencia (Colombia), tal como se muestra en

la Figura 2–13. La imagen de satélite fue corregida atmosférica y radiométricamente, con el fin de obtener los valores físicos de la reflectividad del fondo de arrecife.

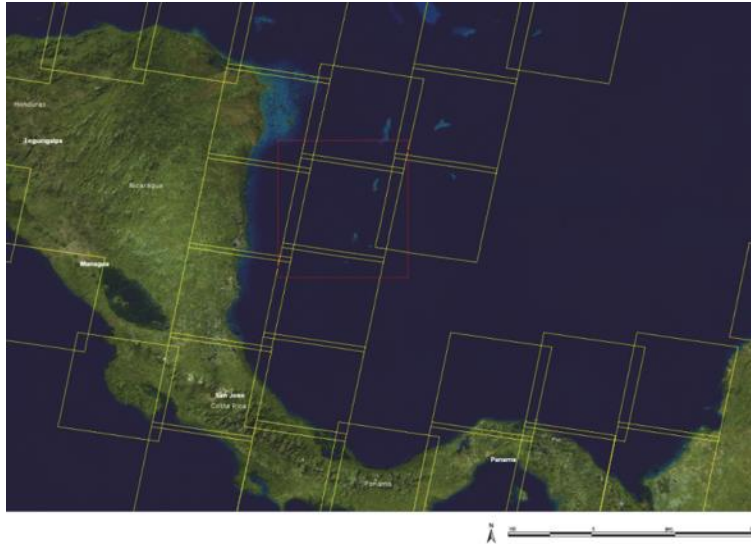


Figura 2–13: Arreglo de Imágenes satelital de la localización del archipiélago de San Andrés y Provincia. Imagen de Landsat. Fuente: Ariza, 2014.

Las mediciones de profundidad utilizadas en la validación del modelo fueron derivadas de lecturas de ecosonda en campo e interpolación de mapas batimétricos (Figura 2–14). La exactitud de la prueba reveló que el modelo batimétrico resultante es útil para el mapeo en zonas de arrecifes de coral del mar Caribe hasta 25m de profundidad aproximadamente.

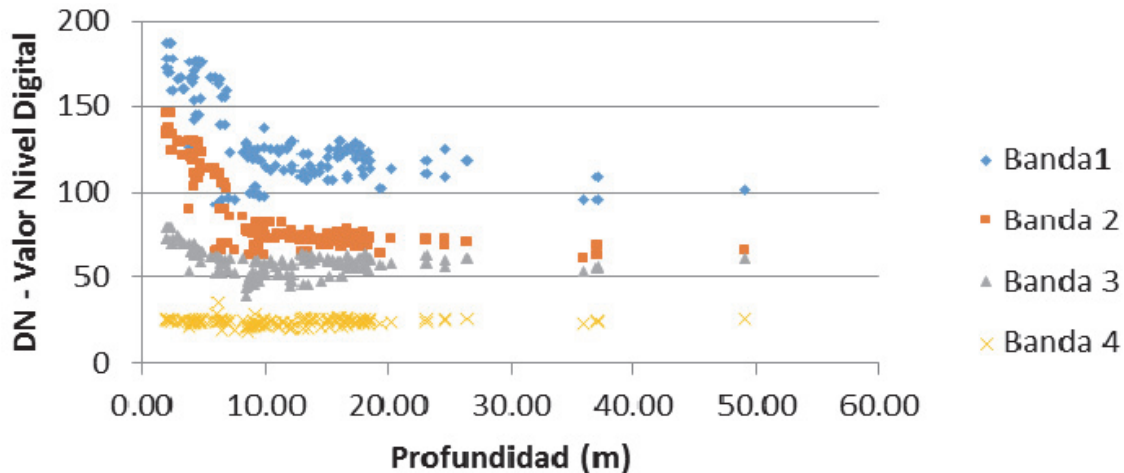


Figura 2–14: Banda 1 (azul), banda 2 (verde), banda 3 (rojo), banda 4 (infrarrojo). Fuente: Ariza, 2014.

Los datos no conformes a la realidad fueron generados por suposiciones inherentes a la teoría utilizada, la interpolación de datos, las características de la imagen de satélite y los errores durante la ejecución del método.

Se concluye que un estudio más profundo en esta área relacionada a los modelos batimétricos facilitaría las posibilidades de desarrollar un sistema de seguimiento de arrecifes de coral basados en teledetección. La teledetección a escala regional permite contribuir al control de las condiciones ecológicas, físicas y químicas del archipiélago. Además, la ventaja de la

teledetección aplicada a los modelos de batimetría es la gran accesibilidad en comparación a la resonancia convencional de embarcaciones, pudiendo así trabajar con grandes porciones de área (Ariza, 2014).

### 2.3.1 Tranques de relave

#### 2.3.1.1 Monitoreo en el mundo

Para el monitoreo de tranques de relave de hierro, se propuso un método de teledetección para evaluar el riesgo de seguridad de los tranques en condiciones de lluvia mediante el uso del coeficiente de escorrentía y área de captación. El área de estudio es zona típica de producción de hierro en Chengde, China (Figura 2–15).

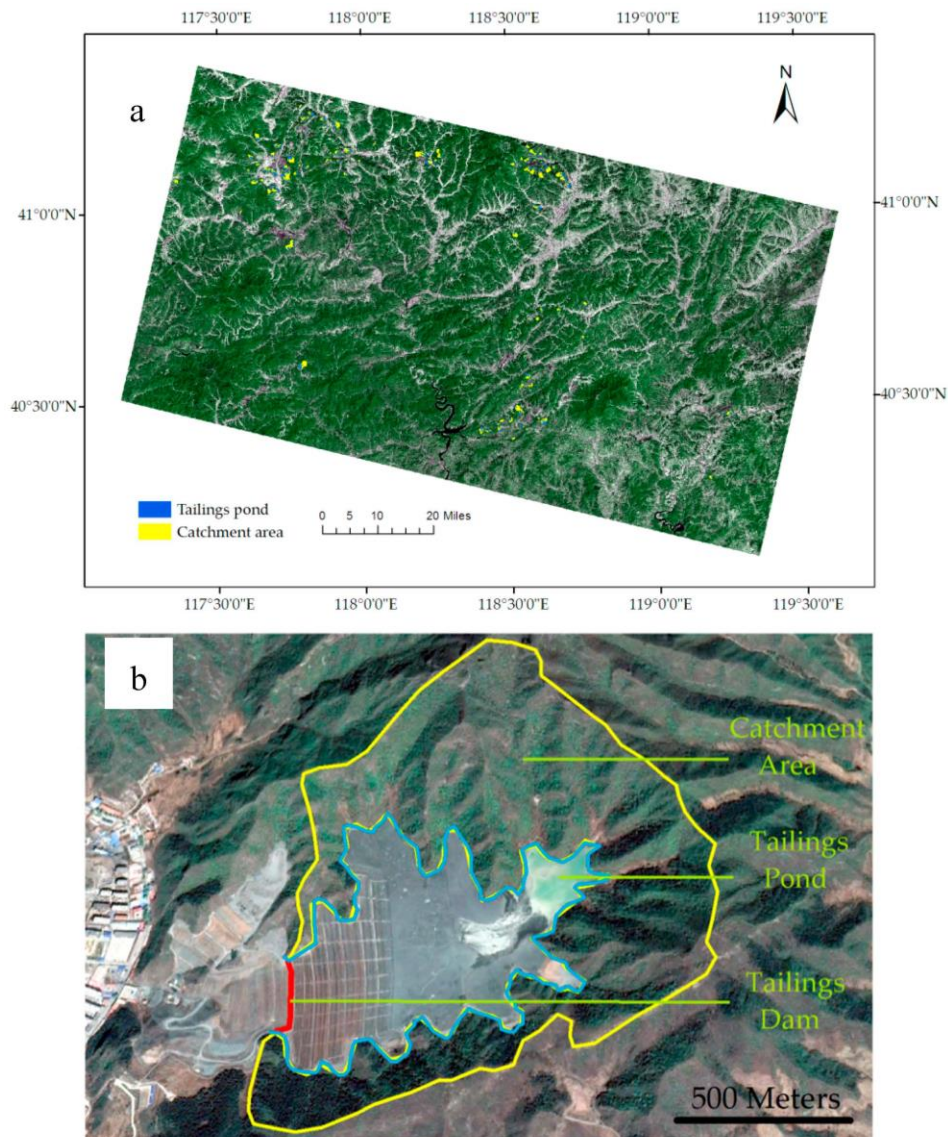


Figura 2–15: (a) Imagen típica de un área de estudio (Landsat 8 OLI image); (b) Imagen típica de un depósito de relaves de hierro en el área de estudio (GoogleEarth image). Fuente: Defu Che, 2018.

En el artículo se estimó la cobertura de vegetación en el área de estudio utilizando el modelo de dicotomía de píxeles y el tipo de vegetación se clasificó mediante el método de la máquina de vectores de soporte (SVM) a partir de imágenes de Landsat 8 OLI. En base a un DEM, se utilizaron las pendientes, áreas de captación, la cobertura vegetal y el tipo de vegetación para construir el coeficiente de escorrentía mediante la asignación de peso de cada factor utilizando el modelo de proceso de jerarquía analítica (AHP) tanto en forma cuantitativa como cualitativa.

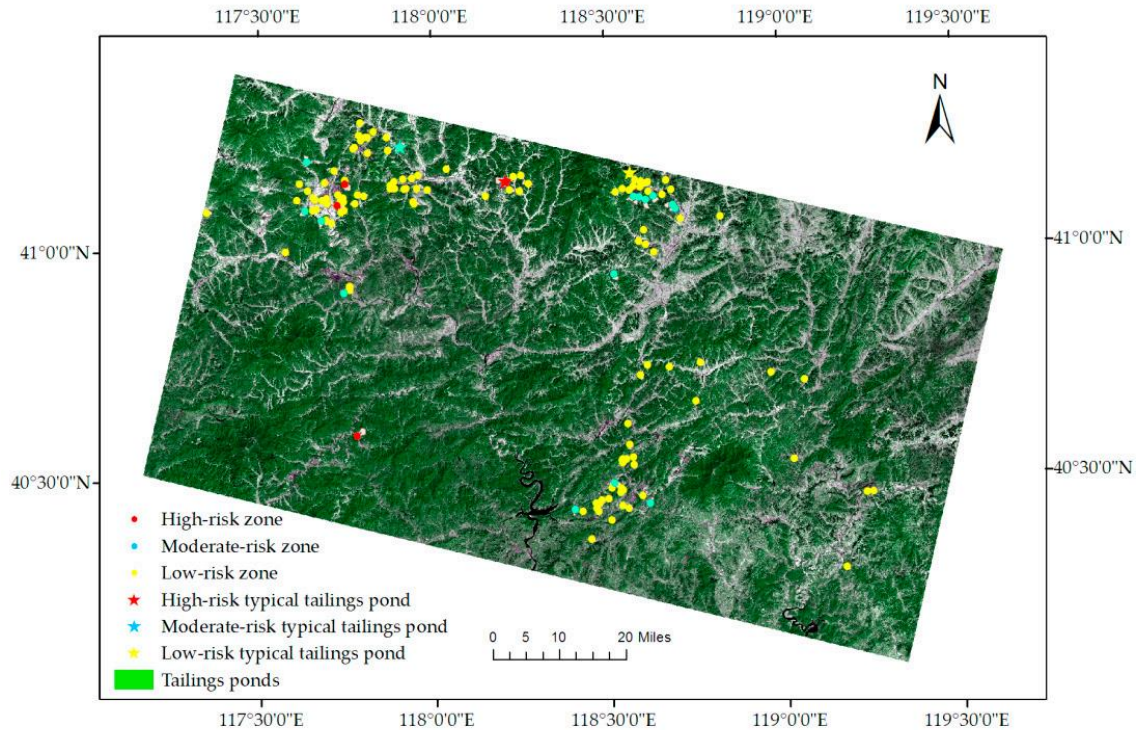


Figura 2–16: Evaluación de riesgos de todos los depósitos de relaves en el área de estudio, representada por un punto de color asociado a su nivel de riesgo. Fuente: Defu Che, 2018.

Los resultados mostraron que había 124 estanques de relaves de bajo riesgo, 16 estanques de relaves de riesgo moderado y 4 estanques de relaves de alto riesgo en el área de estudio. Este método podría ser útil para seleccionar estanques de relaves específicos para un monitoreo de seguridad enfocado (Defu Che, et al. 2018).

Se concluye que hay un gran número de depósitos de relaves en Chengde, siendo estos una amenaza para la seguridad de la producción y la vida de los residentes locales. Durante la temporada de lluvias, la amenaza es mayor porque estos depósitos pueden ser destruidos por inundaciones torrenciales. La investigación manual de la evaluación de riesgos llevaría mucho tiempo y sería ineficaz en la zona montañosa. Utilizando métodos de teledetección, los factores de influencia del coeficiente de escorrentía, la cobertura vegetal, el tipo de vegetación, la pendiente y la información sobre la cuenca hidrográfica pueden obtenerse a tiempo. El modelo AHP es útil para estimar el coeficiente de escorrentía mediante ponderación de los factores. Estos datos beneficiarían a los responsables de la toma de decisiones a la hora de supervisar los depósitos seleccionados durante temporada de lluvias.

Hay que prestar más atención a los depósitos de relaves de riesgo alto y moderado en la temporada de lluvias. Por un lado, el sistema de drenaje de depósitos de relave debe mantener un funcionamiento normal. En caso de lluvias intensas, la escorrentía será drenada a tiempo por el sistema de drenaje y supondrá una pequeña amenaza para las presas. Por otro lado, se debe instalar el equipo de control necesario en las balsas de riesgo alto y moderado, y el personal de vigilancia debería inspeccionarlos oportunamente en la temporada de lluvias. En definitiva, la evaluación y las medidas correspondientes podrían reducir el riesgo de seguridad de las balsas de residuos frente a las inundaciones

### 2.3.1.2 Monitoreo en Chile

Se explora la relación entre la reflexión de la luz sobre la superficie de depósitos de relave y su contenido de humedad. Se realizaron los primeros estudios en laboratorio utilizando cámaras multispectrales en distintas muestras de relave, tal como se muestra en la Figura 2–17.



Figura 2–17: Distribución de muestras y tabla de colores de referencia. Imagen izquierda con cámara NIR y derecha con cámara VIS. Fuente: Araya, 2018.

En una prueba de campo se utiliza un dron con cámara similar para el monitoreo del tranque el cual también resulta ser útil para conocer la geometría. Los resultados obtenidos en términos de la intensidad de reflexión normalizada a suelo seco mostraron una alta correlación (Figura 2–18), de esta forma se proporciona una tecnología precisa y costo-eficiente para la estimación de humedad (Araya, 2018).

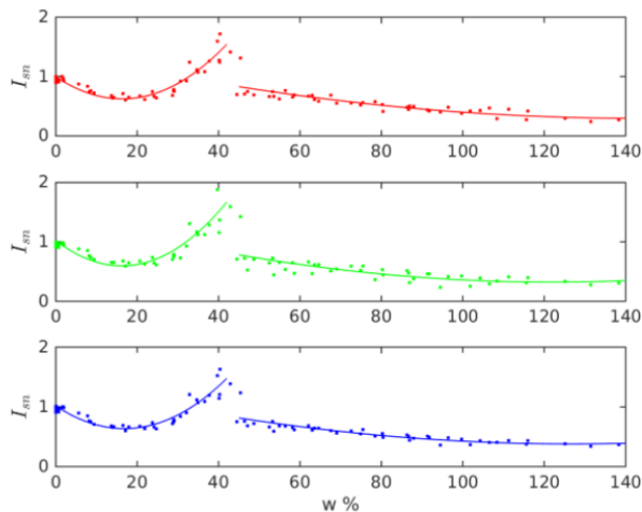


Figura 2–18: Índices iluminación activa laser 980 nm con cámara NIR. Fuente: Araya, 2018.

El artículo explora la relación entre la reflexión de la luz sobre la superficie de depósitos de relave y su contenido de humedad. La utilización de luz activa a una longitud de onda dada presenta una nueva alternativa atractiva dado que no depende de las condiciones de luz ambiental y tiene la capacidad de iluminar zonas a las cuales no tiene acceso la luz ambiental, por ejemplo, dentro de grietas. Los resultados obtenidos en el campo se vieron afectados por los filtros empleados por las cámaras comerciales utilizadas y la significativa generación de una capa salina en la superficie que dificultó el análisis de las imágenes.



*Figura 2–19: Imagen satelital de tranques de relaves. Imagen a la izquierda se ve el tranque de relaves El Torito y a la derecha se ve el tranque de relaves Laguna Seca.*

Finalmente, el presente trabajo se centrará en continuar con la investigación de la relación de la reflexión en las distintas bandas espectrales y la columna de agua por sobre el relave mediante imágenes multiespectrales de Sentinel-2. Lo anterior se basa en la observación de los tranques de relaves como se muestran en la Figura 2–19, donde se puede ver que existe una relación entre la batimetría y la reflexión de la luz. De esta forma se implementará un modelo matemático que pueda estimar la batimetría de las lagunas de aguas claras en tranques de relave.

### 3. Marco Teórico

En esta sección se presentan los conceptos teóricos que permiten abordar los algoritmos y técnicas de medición utilizados en este trabajo. Se comienza desde el concepto físico de reflexión de la luz, pasando por una explicación de la forma de medición de esta por medio de satélites y de su diferenciación en la atmósfera superior (TOA) y en la atmosfera inferior (BOA) hasta los algoritmos básicos para su procesamiento.

#### 3.1. Reflexión

##### 3.1.1 Fenómeno de emisión de luz

El sol como fuente de luz, emite radiación en un amplio rango del espectro electromagnéticas. Lo cual se traduce en que la luz emanada en formada de “paquetes de energía” compuesta por fotones viajan con un patrón sinusoidal de diferentes frecuencias y a su vez se trasladan a la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s). Lo anterior permite clasificar la energía en bandas que agrupan rangos de luz en función de sus características espectrales, las cuales dependen de la longitud de onda a la que se encuentra la emisión. La literatura permite clasificar estas bandas como se muestra en la Figura 3–1.

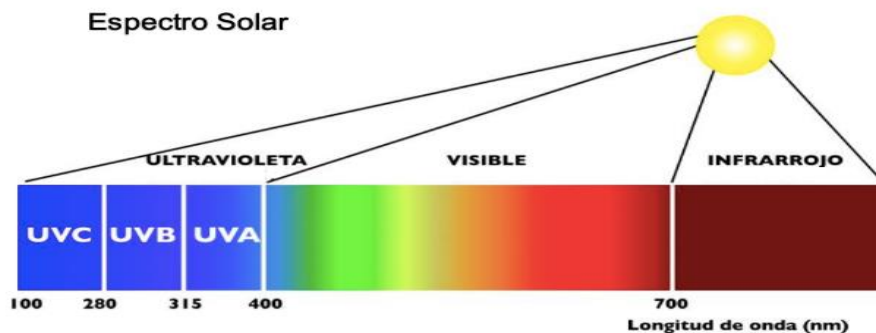
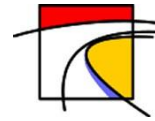


Figura 3–1: Espectro electromagnético entre rango ultravioleta e infrarrojo.

Las distintas bandas presentadas se caracterizan como:

- Ultravioleta (UV): Radiación electromagnética que se encuentra en el rango de longitud de onda de [1-400 nm], entre la luz visible y los rayos X. Constituye el 10% de la radiación solar proveniente del sol.
- Visible (VIS): Segmento del espectro electromagnético donde el ojo humano puede ver, el cual comprende un rango de longitud de onda de [400-700 nm].
- Infrarrojo (IR): La luz infrarroja corresponde al espectro de luz con longitud de onda más larga de la luz solar y a la vez la que abarca el mayor rango de longitudes de onda, comprendiendo entre [750-1000000 nm]. Queda acotada por la banda de luz visible (VIS) y por la energía en el rango de microondas (no presentes en la luz solar). Este rango espectral



no es visible a los ojos, sin embargo, es posible sentirlo como energía térmica, siendo en este caso la piel el sensor.

La banda infrarroja (IR) se divide en tres subbandas, correspondientes al infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo lejano (FIR). La banda (NIR) corresponde al espectro de luz que comprende una longitud de onda entre [700-3000 nm], también denominado infrarrojo de onda corta, el cual comprende el inicio de la energía térmica, entre los 2500-3000nm. Por su parte la banda (MIR) corresponde al rango del espectro de luz que comprende el peak de la energía térmica, el cual abarca entre los [ 3000-30000 nm]. Finalmente, la banda (FIR) posee radiación a longitudes de onda entre los [30000 nm -1mm], también conocido como infrarrojo de onda larga.

En técnicas de medición basadas en monitoreo remoto (remote sensing), suele hacerse uso de la banda VNIR (visible near infrared) y SWIR (short wave infrared). VNIR comprende el rango de longitud de onda de [400-1000 nm], juntando el espectro visible y el inicio de la banda NIR, mientras que SWIR abarca el rango de [1000-2500 nm], tomando la última parte del rango NIR. En la Figura 3–2 se puede observar el ancho de banda del espectro infrarrojo.

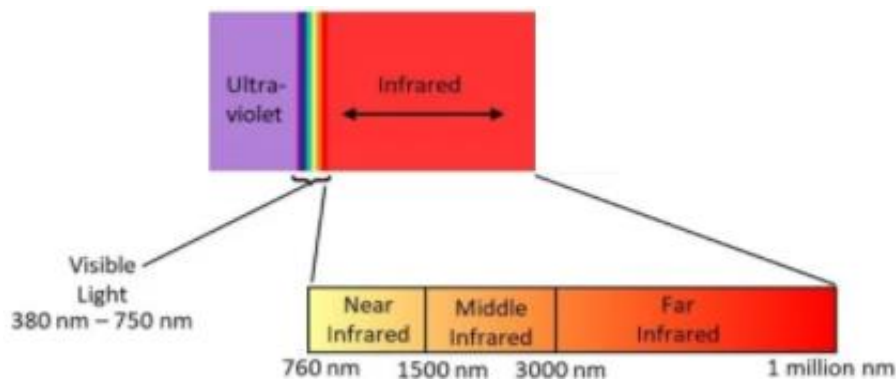


Figura 3–2: Ancho de banda del espectro electromagnético en rango infrarrojo.

Además de la fuente natural de luz proveniente del sol, existen fuentes artificiales como la iluminación incandescente (ampolletas comunes) o fluorescente (lámparas) las cuales poseen su propio espectro electromagnético. Dentro de las más comunes se encuentran las fuentes de luz que emiten energía dentro del rango VIS, para iluminación ambiental, y en el rango NIR y UV con fines industriales, comerciales y medicinales.

De esta forma, la luz, al ser emitida ya sea desde una fuente natural (el sol) o artificial (lámpara), no continúa viajando a través de un medio infinitamente, sino que posee un límite de alcance físico, dado que la “potencia” de la energía va siendo esparcida a medida que aumenta la distancia desde el punto de origen y la ubicación del paquete de fotones viajando a través del medio. Este fenómeno queda determinado por la “Ley del Cuadrado Inverso”, la cual explica que la intensidad por unidad de área varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de interés ( $E=I/d^2$ ), siendo E la iluminancia (termino definido en 1.1.2), I la intensidad y d la distancia a la fuente, lo cual se presenta en la Figura 3–3.

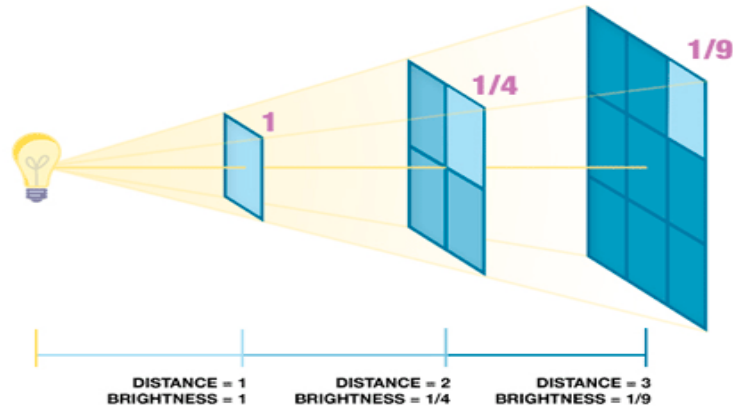


Figura 3-3: Esquema representativo de la Ley del Cuadrado Inverso.

### 3.1.2 Fenómeno de reflexión, refracción y absorción de luz

Una vez emitida la energía, el proceso de interacción entre la llegada de luz a una superficie y lo que ocurre posterior a ello, se verá afectado por el tipo de material y las características de la superficie incidente, situación representada esquemáticamente en la Figura 3-4, de la cual se puede observar que la intensidad espectral reflejada en la superficie 1 y la superficie 2, no son iguales, dado que poseen características físicas y/o químicas diferentes.

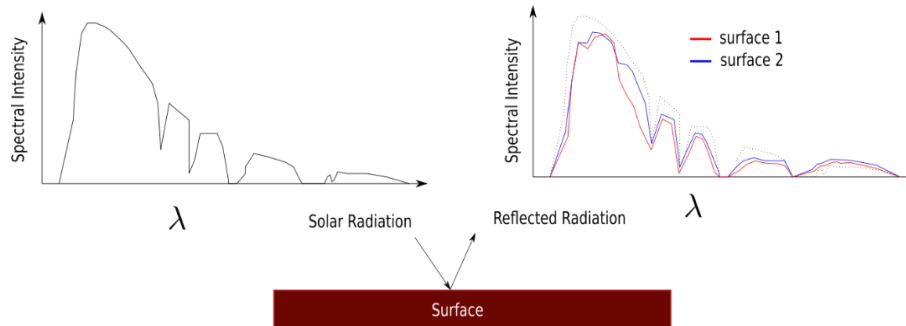


Figura 3-4: Gráficos esquemáticos de la Intensidad espectral. A la izquierda se ve la radiación solar emitida y a la derecha dos superficies de distintas propiedades.

Este fenómeno es llamado reflexión, en donde la luz incide en una superficie de características distintas al medio por el que viaja y luego cambia de dirección, volviendo a propagarse en el medio de origen.

La onda de luz reflejada se propaga por el mismo plano por el que viene la onda incidente, y además el ángulo de incidencia es el mismo al ángulo de reflexión. Aquí, la onda reflejada no cambia de longitud de onda ni su velocidad. No obstante, el ángulo de incidencia de la luz en la superficie afecta a la densidad de la luz reflejada, según la “Ley del Coseno de Lambert”, la que explica que el flujo de luz reflejada será función del coseno del ángulo incidente. Esto quiere decir que a mayor ángulo de inclinación, menor será la densidad de la luz reflejada, tal como se muestra en la Figura 3-5.

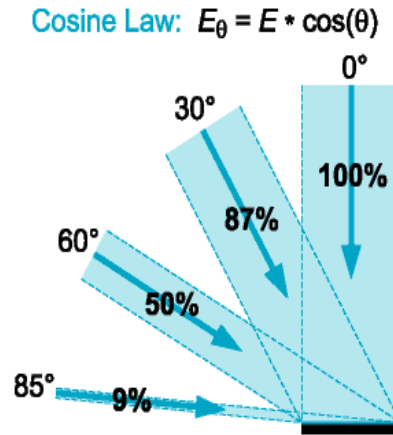


Figura 3-5: Representación esquemática de la Ley del Coseno de Lambert.

Por otro lado, no toda la luz incidente es reflejada, también hay una parte de ella que se refracta, es decir, al llegar a la superficie, una parte de luz pasa a través de la superficie, cambiando de dirección y velocidad según la “Ley de Snell”, pero manteniéndose en el plano de origen. Snell entrega la inclinación respecto a la vertical, con la que la onda viajará por el nuevo medio, la cual depende del índice de refracción  $n$ , el cual es propio de cada material. La situación se esquematiza en la Figura 3-6, en donde  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ .

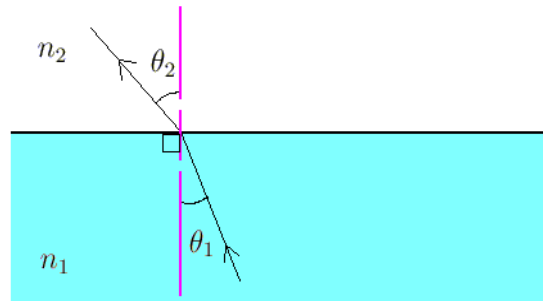
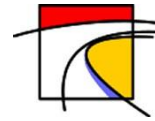


Figura 3-6: Esquema representativo de la Ley de Snell

Las propiedades del material quedan intrínsecamente representadas en el coeficiente de refracción de cada material, que queda demostrado en el cambio de variación del ángulo de propagación al pasar de un material a otro.

Una vez que la onda es refractada, esta puede ser absorbida por el material o lograr pasar a un nuevo medio de propagación. Este proceso afecta a la variación entre la luz incidente y la reflejada, permitiendo definir al material como un filtro de radiación incidente. Lo anterior se puede resumir en la ecuación (3-1), donde la Energía incidente es igual a la sumatoria de la Energía reflejada, Energía absorbida y Energía transmitida.

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad (3-1)$$



### 3.1.3 Leyes de absorción y reflexión

Como se mencionó en la sección anterior, una vez que la luz incide en una superficie con distinto índice de refracción, una parte de luz se refleja y la otra se refracta. Ahora, es importante tener la capacidad de estimar cómo influyen las características del material incidente, a través del índice de refracción, en la cantidad de luz que será reflejada. Para entender este fenómeno es necesario definir algunos coeficientes tales como el índice de refracción compleja ( $m$ ), descrito en la ecuación (3-2)

$$m = n - jK \quad (3-2)$$

Donde  $n$  es la parte real del índice y  $K$  es la parte imaginaria o a veces llamada extinta. Además, cuando los fotones entran en un medio, éstos son absorbidos bajo la “Ley de Beers”, según la ecuación (3-3)

$$I = I_0 e^{-kx} \quad (3-3)$$

Donde  $I$  es la intensidad de luz observada,  $I_0$  es la intensidad inicial,  $k$  el índice de absorción y  $x$  la distancia recorrida por los fotones. Como era de esperarse,  $k$  y  $K$  están relacionados a través de la longitud de onda ( $\lambda$ ) del rayo de luz, como se muestra en la ecuación (3-4).

$$k = \frac{4K}{\lambda} \quad (3-4)$$

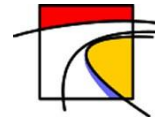
Finalmente, la cantidad de luz reflejada queda determinada por la “Ley de Fresnel” según la ecuación (3-5), la que explica que la reflexión de luz dependerá del índice de refracción real, de la longitud de onda y de la capacidad de absorción del medio.

$$R = \frac{(n - 1)^2 + K^2}{(n + 1)^2 + K^2} \quad (3-5)$$

Cabe destacar que la ecuación (3-5) es válida para cuando la luz incide perpendicular a la superficie, ya que cuando existe inclinación de la onda, la ecuación que rige el fenómeno es una función trigonométrica compleja, que no será expuesta en este trabajo, dado que escapa al alcance de este trabajo.

### 3.1.4 Métodos de medición - Sensores

Para conocer la intensidad de luz reflejada, es posible medir a través de sensores la reflexión de luz, proceso que permite conocer propiedades de interés del filtro de radiación, como lo que ocurre con el ojo humano, el cual actúa como un sensor de luz en el espectro visible, entregando información respecto al color del material. No obstante, la luz visible es solo un rango estrecho del espectro completo de la radiación solar, por lo que el ojo humano no puede evidenciar toda la información generada en el proceso de reflexión. Sin embargo, se han desarrollado sensores artificiales de energía espectral que permiten captar luz a longitudes de onda distintas del espectro visible, la cual puede ser transformada de información de interés.



Actualmente se pueden identificar dos tipos de instrumentación para analizar la reflexión de los materiales, estos son:

- Instrumentos activos
- Instrumentos pasivos

#### **3.1.4.1 Instrumentos activos**

Los instrumentos activos tienen la capacidad de emitir un haz energético, que posteriormente captan tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. La característica de la onda electromagnética reflejada corresponde con la reflectividad de la superficie estudiada. Esta tecnología se usa principalmente en los sistemas radar y LiDAR (Chuvieco, 2008).

- a) Sistema radar: funcionamiento basado en emitir un impulso de radio (longitudes de onda comprendidas entre 0.1 cm y 1m), que se refleja en el objetivo y es reflejado. A partir de las características de la onda de reflexión se obtiene información del objeto. Tienen una gran importancia en el ámbito meteorológico.
- b) Sistema LiDAR: funciona emitiendo pulsos de luz polarizada entre el violeta y el infrarrojo cercano. En función del tiempo y la intensidad de la señal reflejada, se obtienen datos de altura y distancia de los objetos. Ampliamente utilizados para generar modelos de elevación digital.

#### **3.1.4.2 Instrumentos pasivos**

Estos instrumentos pasivos captan la energía electromagnética que proviene de la cubierta terrestre, ya sea producto de la reflexión de los rayos solares o emitida desde focos a elevada temperatura (Chuvieco, 2008). Algunos de los instrumentos más comunes se describen a continuación.

- a) Espectrómetros Instrumento para medir la variación de flujo radiante proveniente de una superficie, en función de la excitación mediante luz a diferentes longitudes de onda. Esto es altamente utilizado para determinar características físicas y composición química del material.
- b) Cámaras hiperespectrales: Cámaras que captan imágenes que involucran bandas espectrales estrechas y contiguas, incluyendo varios espectros, según la precisión de la cámara, pudiendo llegar al orden de los cientos de bandas.
- c) Cámaras multiespectrales: Cámaras que captan bandas espectrales de diferentes anchos de banda y no necesariamente contiguas. Normalmente poseen menor precisión que las cámaras hiperespectrales, teniendo alrededor de 10 a 15 bandas, las que a su vez son más anchas.
- d) Satélites artificiales: Cuerpos que rodean la tierra y permiten obtener información a través de la recolección de datos, entre ellos, imágenes multiespectrales.

En el caso de sensores que procesan la reflexión de luz almacenada en imágenes, estas pueden ser RGB, multiespectral o hiperespectral, las cuales se van a diferenciar, entre otras cosas, en función del número de bandas que posee el sensor.

### 3.1.5 Imágenes como almacenamiento de información

Como se comentó anteriormente, existen sensores de luz que poseen la capacidad de almacenar información de reflexión de luz en imágenes, utilizando una precisión en función del tamaño de píxel que posee la imagen. El píxel corresponde a una división de la imagen, formada por una matriz, que en su conjunto permiten representar la información almacenada. La precisión de la imagen se mide en PPI (pixel per inch), que corresponde a número de píxeles por unidad de pulgada, por lo tanto, a mayor PPI, se tendrá mayor calidad de imagen, dado que existe una mayor densidad de píxeles.

La forma de representar la intensidad de luz en un píxel es través de la profundidad de bits, o mejor dicho, la cantidad de bits por píxel. Cuanto más sea la profundidad, mayor será la cantidad de tonos que se puede representar en la imagen. En función de la cantidad de bits se pueden definir las siguientes escalas de colores.

- Imagen bitonal: Representada por píxeles que constan de 1 bit y poseen un canal, por lo tanto, solo pueden tomar dos colores, siendo el valor 0 para el negro y 1 para el blanco.
- Imagen a escala de grises: Compuesta por píxeles que tienen entre 2 a 8 bits y un solo canal. La cantidad de bits permite generar  $2^x$  cantidad de combinaciones, siendo  $x$  el número de bits. Por ejemplo, si se tiene un píxel con 2 bits, la cantidad de tonos posibles serán 4.
- Imagen a color: Poseen entre 8 a 24 bits. Las imágenes de 24 bits están divididas en tres canales, 8 para el rojo, 8 para el verde y 8 para el azul. Cada canal posee una capacidad de combinación de 256 bits, lo que permite a la imagen tener un total de 16.7 millones de tonos por píxel.

Lo anterior permite identificar información del material fotografiado, en función del valor que posea cada píxel en la escala de 0 a 255, siendo 0 la ausencia de luz y 255 el color blanco o saturación del píxel. Un ejemplo de esto se puede observar en la Figura 3–7, donde se muestra un píxel de color rosado, formado a partir del espectro visible en los canales RGB, con sus correspondientes valores en cada canal.

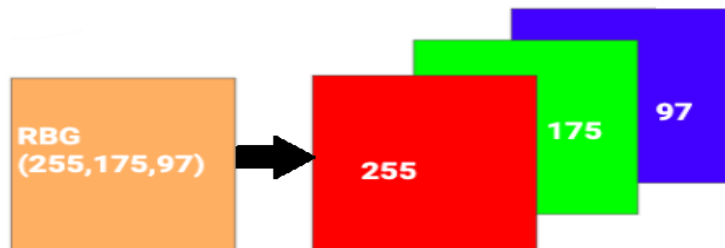
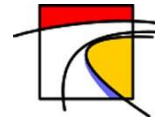


Figura 3–7: Píxel formado a partir de canales RGB.

Cada píxel posee canales de información, que corresponden a bandas espectrales, que almacenan la luz en función de la longitud de onda. En general, existen tres tipos de imágenes en función del número de bandas espectrales, las cuales se describen a continuación.



- **RGB:** Imagen que posee tres canales, correspondientes a las bandas rojo, verde y azul. Esta imagen entrega información en el espectro visible de la luz, y es el que ocupa la mayoría de las cámaras comerciales.
- **Multiespectral:** Este tipo de imágenes dividen la luz en pequeño número de bandas espectrales, generalmente entre 3 y 15 bandas. Esto permite almacenar información de reflexión de luz fuera del espectro visible, ya que suelen incluir bandas en el rango NIR y VIS, descritos anteriormente. El uso de este tipo de imágenes normalmente es por parte de satélites y laboratorio.
- **Hiperespectral:** Al igual que las imágenes multiespectrales, estas imágenes dividen la luz en bandas que incluyen espectros más allá del rango visible, sin embargo, la cantidad de bandas son mucho más que en el caso anterior, pudiendo almacenar información mucho más precisa. Normalmente usadas en laboratorio para un mayor alcance del espectro de luz.

En la Figura 3–8 es posible observar cualitativamente la continuidad de la información en función del número de bandas que posee cada imagen, donde las bandas se puede extender en el eje de las longitudes de onda.

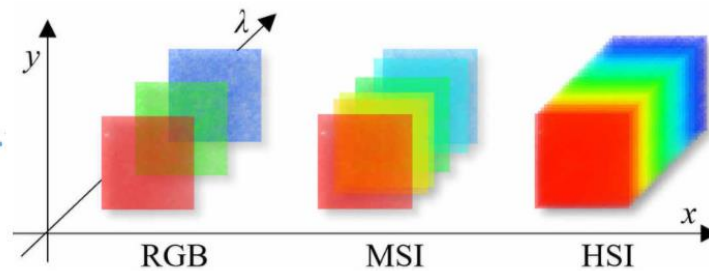


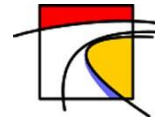
Figura 3–8: Diferencia entre imagen RGB, imagen multiespectral (MSI) e imagen hiperespectral (HSI).

### 3.1.6 Proceso de captación de imágenes

Los sensores de luz pueden ser usados en la laboratorio, los cuales generalmente están anclados o fijos para medir, como también pueden ser usados en terreno en donde son montados en aeroplanos o satélites, midiendo la radiación electromagnética en rangos específicos de longitud de onda. Dichas mediciones son cuantificadas y convertidas en una imagen digital, donde cada elemento de la imagen (los píxeles para este caso) tiene un valor discreto en unidades de Digital Number (DN) (NASA, 2013).

Las imágenes resultantes tienen diferentes características (resoluciones) dependiendo del sensor. Dado lo anterior se tienen diferentes tipos de resoluciones:

- **Resolución Espacial:** basado en el tamaño del detector, longitud focal y altura del sensor la cual define el tamaño del píxel. También es denominada resolución geométrica (NASA, 2013).



- Resolución Espectral: definido por dos longitudes de onda es la localización de la banda espectral dentro del espectro electromagnético para sensores multiespectrales. Para cada banda corresponde una imagen (NASA, 2013).
- Resolución Radiométrica: Es el rango de valores de brillo disponibles normalmente medida en bits (dígitos binarios), los cuales en la imagen corresponden al máximo rango de DN's; por ejemplo, una imagen con 8 bit de resolución tiene 256 niveles de brillo (Richards and Jia, 2006).
- Resolución Temporal: corresponde al tiempo requerido para la revisita de la misma área de la Tierra (NASA, 2013).

## 3.2. Satélites

### 3.2.1 Programas

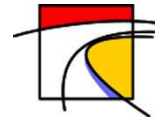
Los satélites de observación terrestre se distinguen según su órbita, resolución y la amplitud del barrido de los sensores. Estos parámetros son definidos al comienzo de la misión espacial y depende del objetivo de aplicación del satélite. Los principales programas de teledetección son de inversión pública, pero debido a los avances y al potencial que tiene la teledetección es que el sector privado ha hecho una gran inversión en programas comerciales. A continuación, se describen los principales programas de teledetección espacial.

#### 3.2.1.1 Programa Copernicus

Este es un proyecto dirigido por la ESA el cual se encarga de poner en órbita y distribuir la información obtenida por los satélites. El programa Copernicus pretende convertirse en el más ambicioso y completo de todos los programas de observación terrestre puestos en marcha hasta la fecha. Su objetivo principal consiste en lograr una completa, continua y autónoma capacidad de observación terrestre para poder facilitar los resultados a la comunidad, convirtiéndose en una fuente exacta, fiable y continua para el estudio del medio. El programa pretende ser referente mundial respecto a la gestión y conservación del medio ambiente, ayudando a comprender y mitigar los efectos del cambio climático para asegurar la seguridad civil. Para ello, se ponen en marcha 6 misiones Sentinel, cada una de ellas con un objetivo en concreto. En particular, este trabajo de título se centra en la misión Sentinel-2 la cual pretende desarrollar observaciones de la superficie terrestre para monitorear la vegetación, el suelo y la cobertura de agua en la superficie y zonas costeras.

#### 3.2.1.2 Programa Landsat

Es un conjunto de satélites que fueron desarrollados por la NASA desde comienzos de los 1970's, cuyas imágenes han sido muy utilizadas para investigación ambiental. Este programa está constituido por una serie de 7 misiones que están (o han estado) en órbita, contando con más de dos millones de imágenes de media resolución. En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión Landsat 8 continuando el legado de las misiones anteriores y puesto en marcha debido a un fallo crítico de Landsat 7, el cual quedó prácticamente inservible. El programa Landsat fue pionero en ofrecer imágenes satelitales corregidas tanto geoméricamente como radiométricamente de forma de libre acceso para la comunidad, el cual fue precursor del programa Copernicus. Está previsto que en septiembre de 2021 se ponga en órbita el satélite Landsat 9 continuando la misión de observación, pero contando con una mayor resolución.



### 3.2.1.3 Programa Spot

Se desarrolló por parte del gobierno de Francia, en colaboración con Bélgica y Suecia el programa SPOT (System Probatoire d'Observation de la Terre) a modo de ampliación del programa Landsat. El primer satélite de la serie fue lanzado en 1986, mientras que el último fue lanzado en 2014. Los nuevos satélites, además de contar con tecnologías actuales, disponen de los atributos que los volvieron famosos, los cuales son caracterizados por mantener la órbita para obtener imágenes consecutivas de un lugar concreto. También tienen la posibilidad de giro del sensor, permitiendo variar su ángulo para obtener imágenes más precisas, disminuyendo las interferencias por pendientes y sombras. Estas características los vuelven ideales para hacer seguimiento de la evolución de la vegetación, realización de mapas cartográficos y representaciones 3D fuera de ámbitos urbanos. En la actualidad el programa se encuentra en la 5<sup>o</sup> generación de satélites, correspondiendo al SPOT 6 y SPOT 7, contando con grandes resoluciones espaciales.

### 3.2.1.4 Programas Comerciales

Los programas comerciales que más destacan se nombran a continuación:

#### **Ikonos**

El satélite Ikonos fue lanzado en 1999 en Estados Unidos. Posee sensor pancromático (0.45 – 0.9  $\mu\text{m}$ ) con resolución espacial de 1 m y sensores multiespectrales (en las tres bandas del espectro visible) con resolución espacial de 4 m. Estos sensores son capaces de identificar objetos situados en la superficie terrestre de menos de un metro cuadrado. Además, posee una resolución temporal de 3 días dependiendo de la latitud. Actualmente el satélite sigue operativo en órbita, pero debido a irregularidades en la precisión ya no se suministran imágenes procedentes del Ikonos.

#### **Quickbird**

Este satélite fue lanzado a órbita en 2001, convirtiéndose en el satélite comercial de mayor resolución hasta la fecha. Está equipado con sensor pancromático con resolución espacial de 61 cm y sensor multiespectral (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) con resolución espacial de 2.5 m. El uso de las imágenes satelitales es destinado en su mayoría a urbanismo, investigación y aplicación a cartografía. En 2015 fue sacado de órbita ya que no se estaban captando imágenes con la calidad que requería la empresa.

#### **WorldView**

Los satélites WorldView 1 y 2 son satélites ópticos de alta resolución que fueron lanzados en 2007 y 2009 respectivamente, esperándose un período operativo mínimo de 11 años. Estos satélites se encuentran equipados con un sensor pancromático con resolución espacial de 50 cm, mientras que WorldView 2 posee sensor multiespectral de 8 bandas con resolución espacial de 1.85 m. Ambos satélites poseen una resolución temporal de 1.7 días. Adicionalmente, en la actualidad se encuentran orbitando WorldView 3 y 4 contando con las mismas especificaciones técnicas, de esta forma se genera una doble resolución temporal. Su principal campo de aplicación radica en defensa nacional y aplicaciones militares. Sin embargo, en rubros donde el coste de adquisición no es un problema, sus imágenes son empleadas para la exploración minera, detección de depósitos petrolíferos, clasificación del terreno, monitorización de especies vegetales y seguimiento de desastres naturales.

### 3.2.2 Misión Sentinel-2



Figura 3–9: Vista esquemática del satélite Sentinel-2 en el espacio.

Sentinel-2 (Figura 3–9) es una misión que apoyará las tareas de monitoreo en la Tierra y tiene por objetivo:

- Tener una gran cobertura temporal: La misión pone en la misma órbita a dos satélites gemelos (Sentinel-2A y Sentinel-2B) que vuelan con desfase de  $180^\circ$  en un ciclo de repetición de órbita corta (10 días); y para la doble operación de satélites en configuración gemela, estos proporcionan una frecuencia de 5 días.
- Gran cobertura espacial y alta frecuencia de cobertura: Posee una amplia cobertura de franjas (290 km) con capacidades de adquisiciones globales de masas terrestres.
- Alto tiempo de operación durante la parte diurna de la órbita.
- Rango óptico de amplio espectro (visible a infrarrojo de onda corta) incluyendo 13 bandas espectrales
- Accesibilidad al gran volumen de datos de Sentinel-2: Se pondrá data de observación (cobertura del suelo, mapa de detección de cambios de tierra y variables geofísica) a disposición para la siguiente generación de productos operativos

El satélite Sentinel-2 se encuentra en una órbita sincrónica al sol. Esta órbita se utiliza para asegurar que el ángulo de la luz solar sobre la Tierra se mantenga constante, de esta forma el anclaje de la órbita con respecto al ángulo del sol minimiza el impacto potencial de sombras y niveles de iluminación en el suelo. Lo anterior es fundamental para evaluar los datos en series de tiempo. La constelación Sentinel-2 orbita en promedio a una altura de 786 km.

La adquisición sistemática de data se hace sobre la tierra y zonas costeras en una banda de latitud que se extiende desde 84N a 84S. Esto incluye islas de grandes áreas (mayores a  $100 \text{ km}^2$ ), islas en la Unión Europea, otras islas con 20 km de costa, Mar Mediterráneo, mares cerrados y porciones de tierra que posean masas de agua en general.

Los productos son una recopilación de gránulos elementales de tamaño fijo, junto con una sola órbita. Un gránulo es la partición indivisible mínima de un producto (que contiene todas las posibles bandas espectrales). Dicho tamaño depende del “Level” (nivel) del producto.

- Para productos Level-0, Level-1A y Level-1B: Los Granules son una subimagen de un determinado número de líneas a lo largo trayecto y separadas por detector. Tienen un tamaño de 25 km de ancho y 23 km a lo largo.

- Para productos orto-rectificados (Level-1C y Level-2A): Los Granules (también llamados Tiles) consisten en una imagen cuadrada orto-rectificada de 100 km por 100 km en la proyección UTM/WGS84. Hay un Tile por banda espectral (ver Figura 3–10).

El tipo de productos que ofrece Sentinel-2 se puede resumir en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Niveles de procesamiento de las imágenes satelitales.

Nivel de Procesamiento	Descripción	Granule
0	Data del MSI (comprimido)	25km x 23km
1A	Data del MSI descomprimido, con bandas espectrales y geometría definidas, pero no aplicadas	25km x 23km
1B	Calibrado radiométricamente, con bandas espectrales y geometría definidas, pero no aplicadas	25km x 23km
1C	Orto-rectificado en proyección UTM, reflectancia en TOA	100x100km en UTM
2A	Orto-rectificado en proyección UTM, reflectancia en BOA. Salidas de espesor óptico de aerosol, mapa de vapor de agua, mapa de clasificación de escena e indicadores de calidad de la data	100x100km en UTM

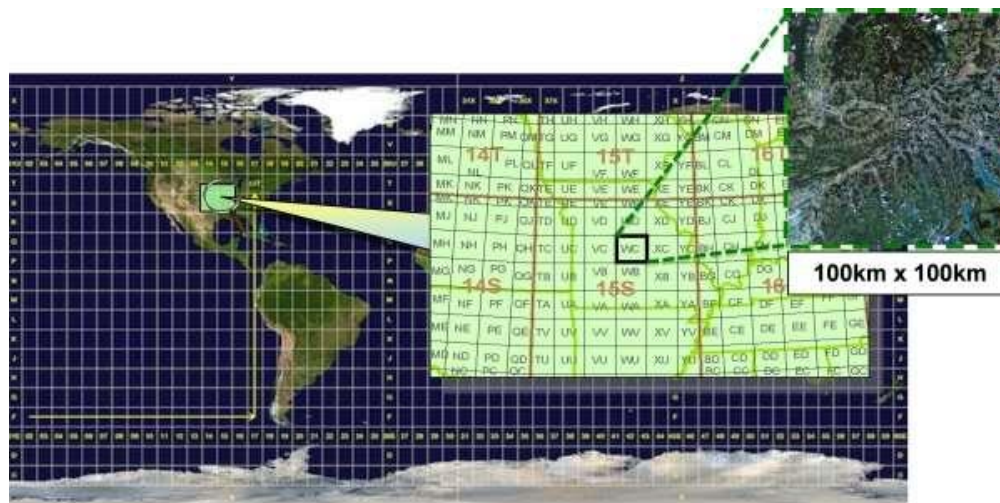


Figura 3–10: Mosaicos del producto Level-1C.

La máxima adquisición continua de data (Data-take) de una imagen de un satélite es 15.000 km (ver Figura 3–11). Si esta data es recibida por dos estaciones separadas, el Data-take se subdivide en Datastrips (aproximadamente 5000 km). Esta data está compuesta de data-item (imagen en Granules o Tiles de una zona de interés, vistas previas, subsecuencias de imágenes, datos auxiliares del satélite, parámetros usados e indicadores de la calidad de la data) y metadata (estructura que contiene la descripción del producto). Este generador de imágenes avanzado utiliza un concepto de barrido y su diseño ha sido impulsado por los

requisitos de una gran franja de 290 km junto con el alto rendimiento geométrico y espectral requerido para las mediciones (ver Figura 3–12).

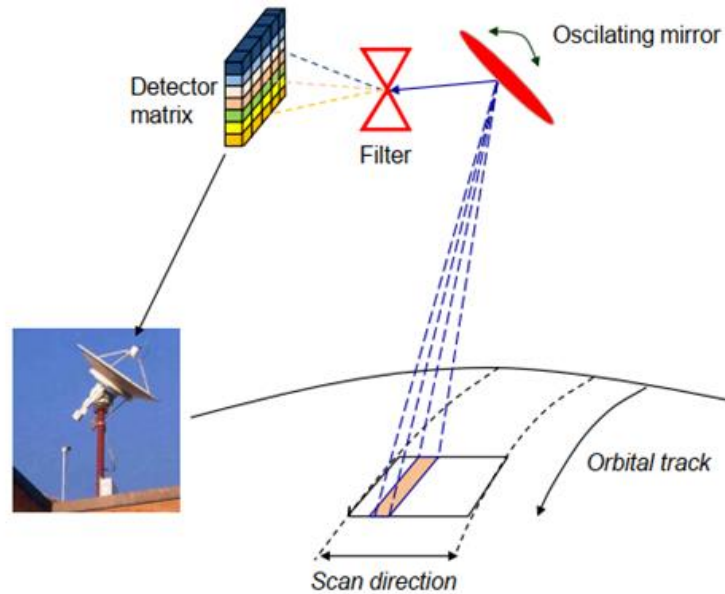


Figura 3–11: Dirección de la órbita en que se recuperan datos a lo largo de 15.000 km



Figura 3–12: Órbita típica que muestra la disposición de los Granules del producto Level-1B. Ancho de franja de 290 km.



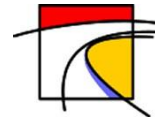


Tabla 3-2: Banda espectral con su respectiva longitud de onda, resolución espacial y propósito.

Banda	Centro	Ancho espect.	Res. espacial	Propósito
#	$\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	[m]	
B1	443	20	60	Corrección atmosférica, vapor, costero
B2	490	65	10	Corrección atmosférica, sensible a la vegetación y suelo
B3	560	35	10	Peak en verde, sensibilidad total de clorofila en la vegetación
B4	665	30	10	Máxima absorción de la clorofila
B5	705	15	20	Posición al borde del rojo, consolidación de correcciones atmosféricas/ línea base de fluorescencia
B6	740	15	20	Posición del borde rojo, corrección atmosférica, recuperación de la carga de aerosol.
B7	783	20	20	Leaf Area Index (LAI), borde de la meseta del infrarrojo cercano (NIR).
B8	842	115	10	LAI
B8a	865	20	20	Meseta NIR, sensibilidad total de clorofila, biomasa, LAI y proteína; referencia de absorción de vapor de agua; recuperación de la carga y el tipo de aerosol.
B9	945	20	60	Absorción de vapor de agua, corrección atmosférica.
B10	1375	30	60	Detección de cirrus para corrección atmosférica
B11	1610	90	20	Sensible a la lignina, el almidón y la biomasa aérea de los bosques. Separación de nieve / hielo / nubes.
B12	2190	180	20	Evaluación de las condiciones de la vegetación mediterránea. Distinción de suelos arcillosos para el seguimiento de la erosión del suelo. Distinción entre biomasa viva, biomasa muerta y suelo, p. Ej. para el mapeo de cicatrices de quemaduras.

### 3.3. Atmósfera

Dependiendo de la altura en la que se mide la radiación, se tienen dos conceptos TOA y BOA. El primero hace referencia a la radiación medida en la atmosfera superior (Top), mientras que el segundo hace referencia a la medición en la atmosfera inferior (Bottom). En la Figura 3–14 se puede ver la representación esquemática de la ubicación del TOA, la atmósfera y BOA, considerando que el satélite captura la data por encima del TOA. Estos conceptos son desarrollados en la presente sección.

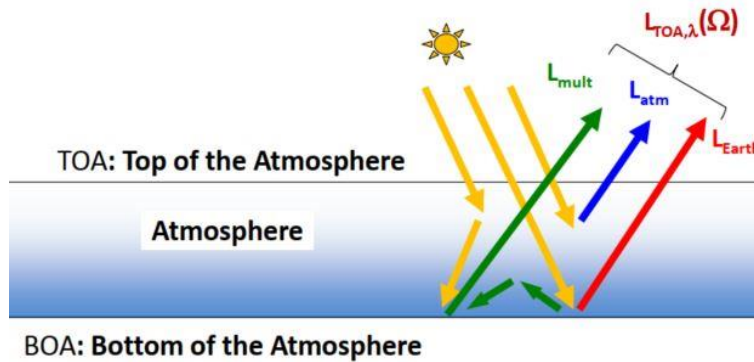


Figura 3–14: Representación esquemática del TOA y BOA. Fuente: Gastellu-Etchegorry (2015).

#### 3.3.1 TOA

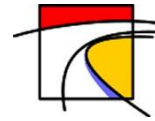
La medición de la radiación en la atmosfera superior (TOA) combina la parte reflejada en la superficie y la parte reflejada en la atmósfera, lo cual no permite analizar directamente las características del terreno, además de poseer una mayor variabilidad debido a las condiciones atmosféricas.

Para reducir la variabilidad es posible convertir imágenes con valores de radiancia a valores de reflectancia en TOA, a través de una normalización de la irradiancia solar. Esta reflectancia TOA, la cual es la razón de la energía reflejada con respecto al total de la energía incidente (NASA, 2013) puede ser calculada según la ecuación (3-6).

$$\rho_p = \frac{(\pi * L_\lambda * d^2)}{ESUN_\lambda * \cos(\theta_s)} \quad (3-6)$$

Donde:

- $L_\lambda$  = Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite)
- $d$  = Distancia Tierra-Sol en Unidades Astronómicas
- $ESUN_\lambda$  = Irradiancia Media Solar exo-atmosférica
- $\theta_s$  = Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a  $\theta_s = 90^\circ - \theta_e$ , donde  $\theta_e$  es la elevación solar
- $\rho_p$  = Reflectancia ( $0 < \rho_p < 1$ )



Las imágenes Sentinel-2 se distribuyen con valores de reflectancia TOA escalados entre 0 y 10000, los cuales pueden ser convertidos a reflectancia TOA con un cálculo simple utilizando el Valor de Cuantificación provisto en los metadatos.

### 3.3.2 BOA

Para un análisis estandarizado, se obtiene implícitamente la radiación reflejada en la atmosfera inferior (BOA), con lo cual se reduce la variabilidad generada por las características atmosféricas temporales. En este nivel de procesamiento L2A se incluye una clasificación de escena y una corrección atmosférica del producto L1C orto-rectificado en TOA. Los resultados adicionales son un mapa de espesor óptico de aerosol (AOT), un mapa de vapor de agua (WV) y un mapa de clasificación de escenas (SCM), junto al indicador de calidad para nubes y probabilidad de nieve a una resolución de 60 m.

El algoritmo de corrección es una combinación de técnicas del estado del arte para realizar correcciones atmosféricas (Incluyendo la corrección sobre las nubes de cirrus) (Richter, 2011).

El algoritmo de clasificación de escenas permite la detección de nubes, nieve, sombras de nubes, y la generación de un mapa de clasificación, el cual consiste en 4 clases diferentes de nubes (incluyendo cirrus), junto a seis clasificaciones diferentes de sombras, sombras de nubes, vegetación, suelos/desiertos, agua y nieve (J. Louis, 2010).

El tipo de aerosol y la visibilidad o espesor óptico de la atmósfera se obtienen utilizando el algoritmo de Dense Dark Vegetation (DDV) (Kaufman, 1988), el cual requiere que la escena contenga áreas de referencia con comportamiento conocido de la reflectancia.

La recuperación de vapor de agua sobre la tierra se realiza con el algoritmo de Atmospheric Pre-corrected Differential Absorption (método APDA) que se aplica a dos bandas (B8a y B9) (Schläpfer et al., 1998). La Banda B8a es el canal de referencia en una zona de ventana atmosférica. La Banda B9 es el canal de medición en la zona de absorción. La profundidad de absorción se evalúa en forma de radiancia para una atmósfera sin vapor de agua asumiendo que la reflectancia de la superficie para el canal de medición es la misma que para el canal de referencia. La profundidad de absorción es entonces una medida del contenido de la columna de vapor de agua.

Para calcular los valores de reflectancia en BOA, en primera instancia el algoritmo de corrección trabaja sobre la banda 10 (cirrus o nubes traslúcidas) corrigiendo la presencia de nubes y sobre las bandas del azul, rojo y SWIR para realizar una medición de transparencia atmosférica mediante el factor AOT. La corrección trabajará los datos de radiancia y reflectividad pasando de TOA a BOA y generando una réplica de bandas corregidas del lote L1C, omitiendo la Banda B10 del cirrus.

Las variables conflictivas en la transformación de radiancia a reflectancia BOA son la geometría de iluminación, el contenido en vapor de agua y el espesor óptico de aerosoles en la atmósfera (AOT). La calidad de los resultados de una corrección atmosférica depende de la exactitud de los datos de entrada disponibles sobre estas variables y efectos, y del modelo con el que se aplican a la imagen de radiancia o reflectancia TOA. A continuación, se presenta



la principal estrategia seguida por el algoritmo de corrección Sen2Cor, el cual recurre a un código de transferencia radiativa libRadtran (Mayer & Kylling, 2005):

- Como dato de entrada para estimar el ángulo efectivo de iluminación, se utiliza la aproximación de que el terreno es plano. Se puede también usar un modelo digital del terreno global, pero no es la opción por defecto. En cualquier caso, estos modelos globales tienen la ventaja de cubrir toda la superficie terrestre, pero carecen de la resolución espacial adecuada para obtener la pendiente real del terreno a la escala de un píxel de Sentinel-2. Por lo tanto, en zonas donde la variación del relieve es brusca la estimación de la iluminación efectiva no puede ser correcta.
- Se calcula el AOT a partir de la propia imagen, es decir, sin necesidad de información auxiliar, mediante un método empírico. El método está basado en la forma esperada del espectro de píxeles con muy baja reflectancia en las regiones del azul y el rojo (donde la contribución de la dispersión atmosférica es mayor). Este AOT se debe transformar a visibilidad horizontal equivalente. Esta es la estrategia habitual en teledetección para realizar los cálculos en un código de transferencia radiativa, libRadtran en el caso de Sen2Cor. De todas maneras, no deja de ser una simplificación en que se asume una distribución vertical de los aerosoles. Una vez se dispone del valor de visibilidad, se ejecuta libRadtran para obtener la contribución atmosférica a la señal.
- Se calcula la masa de vapor de agua atmosférico también a partir de la propia imagen, según el análisis de la absorción de la señal TOA a 930 nm (método APDA). A partir de esta estimación, se recurre a libRadtran para determinar el efecto del vapor de agua en la transmisividad atmosférica. Hay que advertir que este efecto es pequeño para la mayoría de las bandas de Sentinel-2, así que los posibles errores cometidos en su cálculo no son tan relevantes como en los anteriores parámetros.
- Para el tratamiento del cirrus se utiliza la banda 10 expresamente elegida para ello. En esta banda la absorción por el vapor de agua atmosférico de la señal reflejada por el terreno es casi total, mientras que la señal reflejada por el cirrus (a bastante altura en la atmósfera) sí llega al sensor. Esto permite tener un mapa de cirrus con el que Sen2Cor establece (parecido a como hace para el AOT) correlaciones con la señal en otras bandas, así estima qué parte de la señal en esas bandas proviene del cirrus. Dado que toda la información proviene de la propia imagen, se pueden tener errores importantes a costa de utilizar aproximaciones estadísticas y empíricas.

En la Figura 3–15 se puede ver el resultado visible de una corrección atmosférica

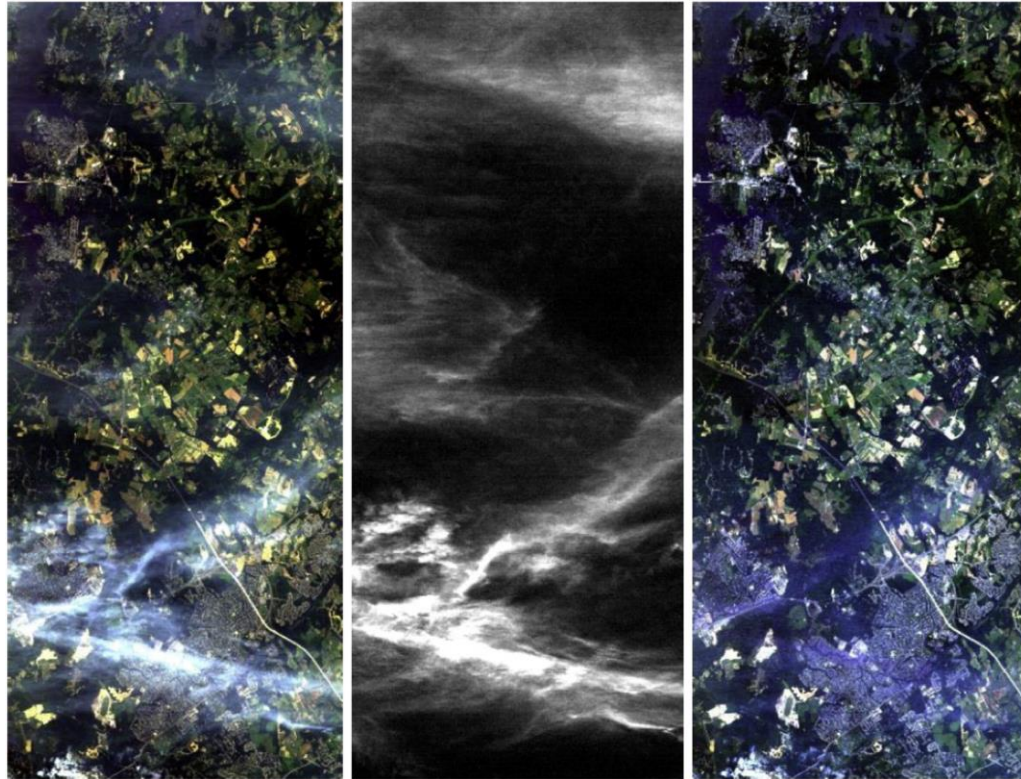


Figura 3–15: Color verdadero: RGB = bandas 4/3/1 (665, 560, 443 nm). Izquierda: escena original, al centro: banda cirrus (1.375  $\mu\text{m}$ ), derecha: corrección atmosférica después del cirrus.

### 3.4. Algoritmos

Para diferenciar las zonas de interés, en este caso para batimetría, se generó un algoritmo de clasificación espectral, el cual opera en base a la distancia mínima espectral entre puntos de entrenamiento y puntos de clasificación.

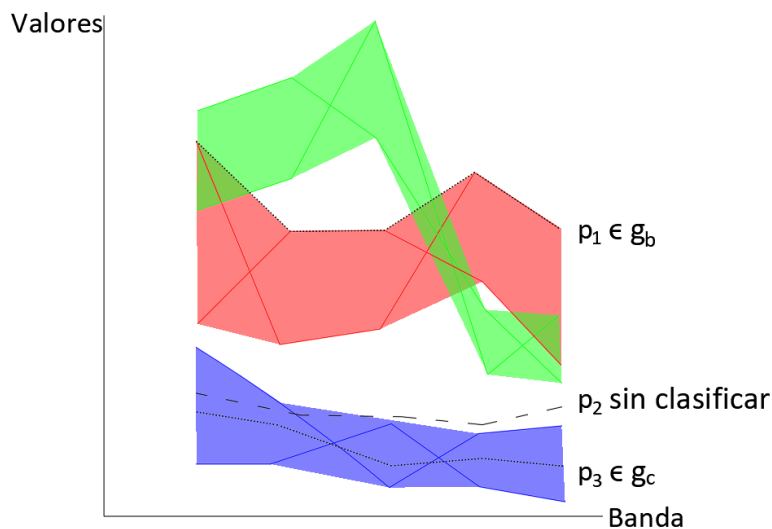
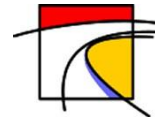


Figura 3–16: Clasificación por distancia espectral.



En la Figura 3–16 se muestran rangos espectrales de tres grupos ( $g_a$ ,  $g_b$  y  $g_c$ ); las líneas de colores dentro de los rangos (el área semi-transparente) representa las firmas espectrales de los píxeles que definieron los límites superior e inferior del rango respectivo. El píxel  $p_1$  (línea interpunteada) pertenece a la grupo  $g_b$  debido a que su firma espectral está completamente dentro del rango del grupo  $g_b$  (es el límite superior). El píxel  $p_3$  pertenece al grupo  $g_c$ . Por último, el píxel  $p_2$  queda sin clasificar ya que su firma espectral no cae completamente dentro de ningún rango. Pero debido a su distancia espectral se podría clasificar dentro del grupo  $g_c$ .

### 3.4.1 Distancia mínima

El algoritmo Distancia Mínima calcula la distancia euclídea  $d(x,y)$  entre las firmas espectrales de los píxeles de la imagen y las firmas espectrales de entrenamiento, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Donde:

- $x$  = vector de firma espectral de un píxel de la imagen;
- $y$  = vector de firma espectral del área de entrenamiento;
- $n$  = número de bandas de la imagen.

Por lo tanto, la distancia es calculada para cada píxel en la imagen, asignando la clase de la firma espectral más cercana de acuerdo con la siguiente función discriminante (adaptado de Richards and Jia, 2006):

$$x \in C_k \Leftrightarrow d(x, y_k) < d(x, y_j) \forall k \neq j$$

Donde:

- $C_k$  = clase de cobertura  $k$ ;
- $y_k$  = firma espectral de la clase  $k$ ;
- $y_j$  = firma espectral de la clase  $j$ .

## 4. Metodología de trabajo

Esta sección presenta los pasos a seguir para la obtención de imágenes satelitales, preprocesamiento y algoritmos utilizados para caracterizarlas mediante el software MATLAB R2020a.

Se utilizan batimetrías existentes para obtener curvas de Altura vs Reflexión y de esta forma generar un modelo inicial que se ajuste a ellas. Inicialmente, se disponía de una base de datos con alrededor de 1000 batimetrías de lagos estadounidenses con fecha en septiembre de 2013, por lo que se seleccionaron algunos de ellos en base a los siguientes criterios:

- Zona: Similar a los tranques de relave, estos lagos no presentaban mucha vegetación en sus alrededores.
- Condiciones de cambio: Mediante observación temporal no se presentaron cambios en la morfología de los lagos, para así validar la morfología de la batimetría.
- Profundidad: Similar a los tranques de relave se utilizaron lagos que su profundidad máxima se encontrara entre 2 a 5 metros.
- Área: Lagos que cubren grandes porciones de área.

Considerando lo anterior se seleccionaron 3 lagos, los cuales se presentan en la tabla, procediendo a analizar tanto su batimetría como las imágenes satelitales cercanas a la fecha de la batimetría. Para cada uno se consideraron tres fechas distintas con separación de tres a cuatro meses.

Posteriormente, se agregó una batimetría del tranque de relave Laguna Seca con fecha 8 de abril de 2020, ubicado en la región de Antofagasta, Chile, como se presenta en la Tabla 4-1. Para la cual se analiza la imagen satelital con fecha 3 de abril de 2020.

Tabla 4-1: Tabla que resume el nombre del sitio, la zona UTM, la fecha de la batimetría y la fecha de las imágenes satelitales.

Nombre	Zona UTM	Fecha batimetría	Fecha imágenes
120_Island Lake	13N	23-09-2013	24-03-2020
			17-06-2020
			15-09-2020
124_Smith Lake	13N	23-09-2013	24-03-2020
			17-06-2020
			15-09-2020
160_Crescent Lake	13N	23-09-2013	24-03-2020
			17-06-2020
			15-09-2020
Laguna Seca	19S	08-04-2020	03-04-2020

### 4.1. Extracción de imágenes (Preprocesamiento)

En este capítulo se utilizarán imágenes provenientes del lago 160\_Crescent Lake con fecha 15-09-2020 y del tranque de relave Laguna Seca con fecha 03-04-2020, para desarrollar las explicaciones de los algoritmos de procesamiento de imágenes.

### 4.1.1 Obtención de imágenes satelitales

Las imágenes Sentinel-2 Level-2A se descargaron del Centro de Datos Científicos de Sentinel (<https://scihub.copernicus.eu/>).

El filtro de búsqueda corresponde al tipo de satélite que se utilizará (S2A o S2B), el producto (L2A), la zona geográfica y la fecha, como se muestra en la Figura 4–1.

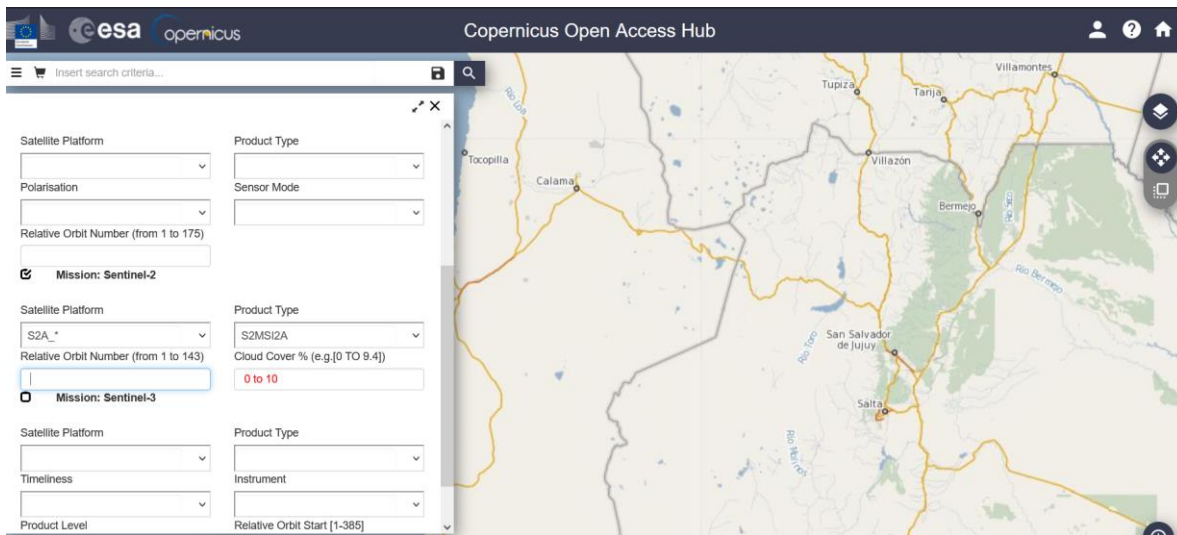


Figura 4–1: Interfaz gráfica de <https://scihub.copernicus.eu/> durante la descarga de imágenes Sentinel-2.

Dado lo anterior, se selecciona una zona que contenga el sitio a estudiar ya que puede haber traslape de imágenes.

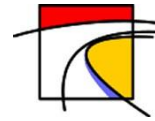
### 4.1.2 Preprocesamiento

Se analizan las carpetas descargadas y luego se abren los 12 archivos de imágenes en formato JP2, que corresponden a las 12 bandas del satélite. La lectura de las 12 imágenes se realiza como una matriz de tamaño  $(N_i, N_j)$  con valores de reflexión que se encuentran entre 0 y 1. Para efectos prácticos, la reflexión estudiada se trabaja con valores entre 0 y 10000, ya que ésta se encuentra normalizada. Las imágenes cubren un área cuadrada correspondiente a 109800 metros en X e Y.

En la Tabla 4-2 se presentan las bandas con sus respectivas resoluciones y cantidad de píxeles en cada dirección

Tabla 4-2: Clasificación de bandas según su resolución.

Bandas	Resolución [m]	$N_i$	$N_j$
B02, B03, B04, B08	10	10980	10980
B05, B06, B07, B8a, B11, B12	20	5490	5490
B01, B09	60	1830	1830



Una vez carga cada una de las bandas, se procede a dividir las imágenes de resolución 20 y 60 metros, de tal forma que el mallado quede cada 10 metros y coincida la cantidad de filas y columnas  $N_i$  y  $N_j$ . En el proceso se realiza una interpolación lineal al vecino más cercano para rellenar las nuevas posiciones generadas. Se guarda el resultado en una matriz de tamaño  $(N_i, N_j, N_{lam})$ . En paralelo se guardan las coordenadas de los píxeles iniciales y finales para tener la matriz georreferenciada.

Al analizar la extensión del lago, se seleccionan las coordenadas que determinarán un área de interés (Region of Interest). Luego se recorta la matriz para así poder trabajar de forma más localizada con una matriz de menor tamaño espacial. En paralelo se guardan las coordenadas de los píxeles iniciales y finales para georreferenciar la matriz más pequeña, tal como se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Sitio estudiado con su respectiva Resolución espacial y espectral, Zona y Coordenadas UTM.

Nombre	$N_i$	$N_j$	$N_{lam}$	Zona UTM	Coordenadas UTM			
					xi	yi	xf	yf
120_Island Lake	298	276	12	13N	715125	4625515	717875	4622545
124_Smith Lake	181	188	12	13N	708625	4698895	710495	4697095
160_Crescent Lake	483	310	12	13N	714265	4622345	717355	4617525
Laguna Seca	1201	1051	12	19S	481995	7305005	492495	7293005

## 4.2. Algoritmo de Clasificación

### 4.2.1 Puntos de entrenamiento

Según dependa del caso, se define una cantidad de grupos ( $N_g$ ) que corresponde a la cantidad de zonas o elementos que se quiere clasificar. Para cada uno de los cuales se seleccionan puntos característicos de este grupo, los cuales pueden ser reconocidos por un usuario con experiencia en la materia en estudio. Cada uno de estos puntos es almacenado en una base de datos, la cual contiene la posición del punto rescatado y sus reflexiones en las 12 bandas. En la Figura 4-2 (a) se clasificaron tres grupos

- agua profunda: puntos de color azul que indican agua en la zona más profunda según la batimetría.
- agua superficial: puntos de color naranja que indican agua las zonas más superficiales según la batimetría.
- otros: puntos de color amarillo que indican el terreno natural.

En la Figura 4-2 (b) puede observar que la clasificación se realiza en 7 grupos:

- agua profunda: puntos de color azul que indican agua en la zona más profunda según la batimetría.
- agua superficial: puntos de color naranja que indican agua las zonas más superficiales según la batimetría.
- terreno natural: puntos de color amarillo que indican el terreno natural.
- relave seco: puntos de color morado que indican relave sin presencia de agua.
- relave consolidado: puntos de color verde que indican el relave consolidado con cierto grado de humedad.

- relave húmedo: puntos de color celeste que indican relave sin consolidar y cierto grado de humedad.
- otros: puntos de color rojo que indican otras zonas más alejadas del terreno natural.

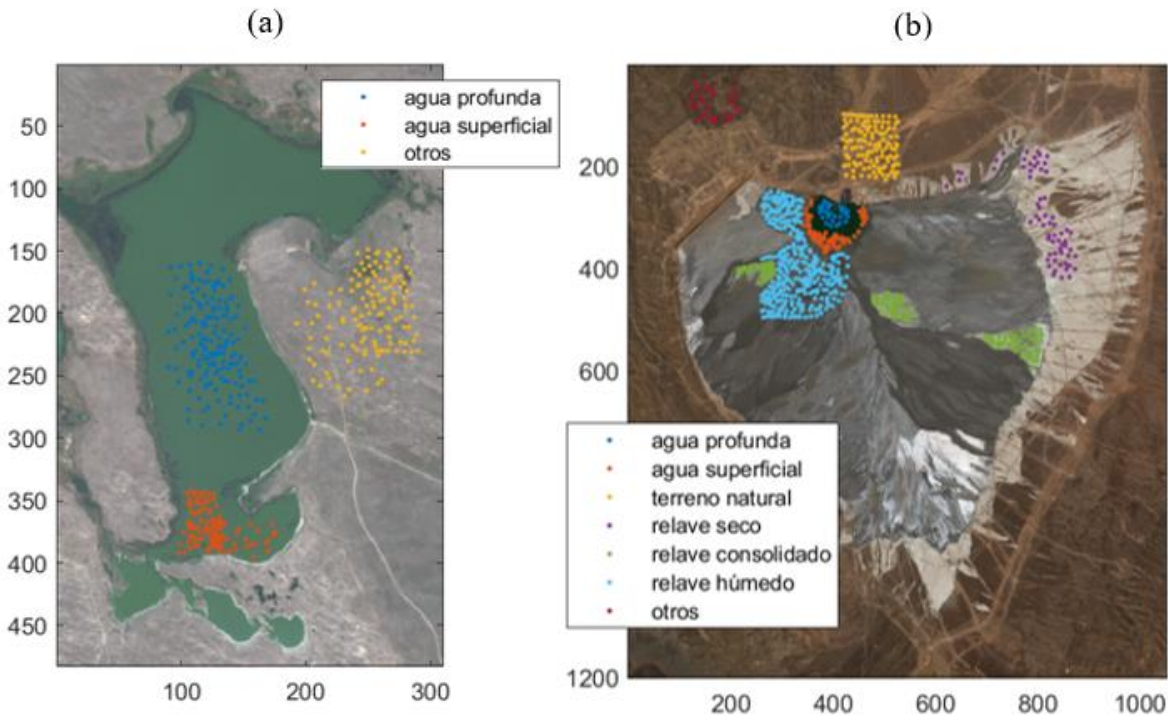


Figura 4-2: (a) Clasificación visual de los grupos del lago Crescent Lake: agua profunda, agua superficial y otros.; (b) Clasificación visual de los grupos del tranque de relaves Laguna Seca: agua profunda, agua superficial, terreno natural, relave seco, relave consolidado, relave húmedo y otros.

#### 4.2.2 Mapa de clasificación

Se toma cada punto del ROI, y mediante un algoritmo de clasificación espectral se calcula la distancia mínima espectral al grupo de la base de datos. De lo anterior se genera un mapa (matriz) de clasificación que contiene los grupos enumerados ( $N_g$ ).

#### 4.3. Máscaras binarias

Se utilizan máscaras binarias para extraer y clasificar selectivamente los datos almacenados en cada grupo. Estas máscaras binarias están georreferenciadas y corresponden a matrices con 1 en los píxeles de interés y 0 en los píxeles que no se utilizarán. De esta forma, se utilizan tres tipos de máscaras: Geométricas, de Clasificación Espectral y de Batimetría.

##### 4.3.1 Máscara geométrica

Mediante Google Earth se genera un polígono en que encierra el área de trabajo, el cual es exportado y procesado en MATLAB. Dicho polígono se transforma a una máscara binaria que contiene 1 en los píxeles de la zona encerrada por éste y 0 en el resto de los píxeles, tal como se puede ver en la Figura 4-3.

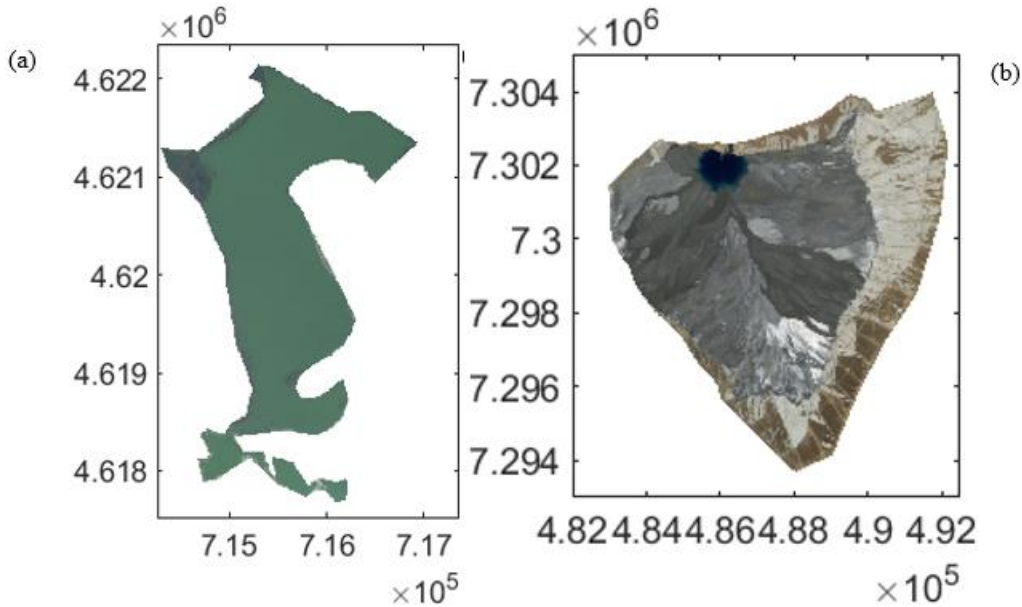


Figura 4-3: Máscara geométrica: (a) Polígono del lago Crescent Lake; (b) Polígono del tranque de relaves Laguna Seca

### 4.3.2 Máscara de clasificación espectral

Esta máscara binaria depende del mapa de clasificación, el cual asigna una máscara binaria a cada grupo Ng clasificado anteriormente. En la Figura 4-4 se pueden ver tres y siete grupos clasificados respectivamente, coincidentes con las clasificaciones mencionadas anteriormente.

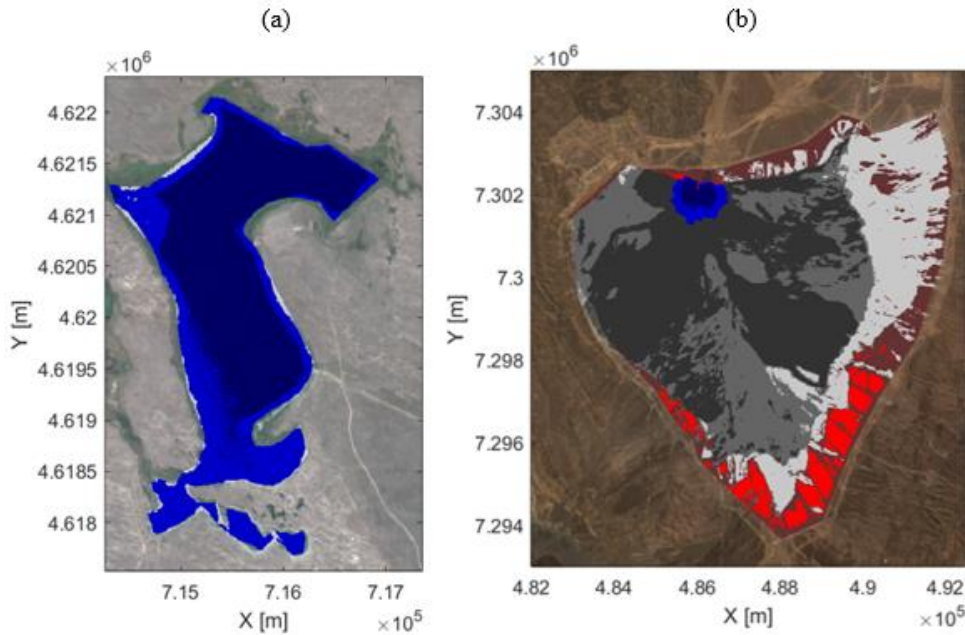


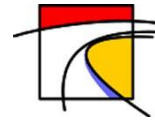
Figura 4-4: Resultado de la clasificación espectral mediante el entrenamiento. (a) Crescent Lake con los tres grupos clasificados; (b) Laguna Seca con los siete grupos clasificados.

### 4.3.3 Máscara de clasificación por grupos de altura

Utilizando la batimetría se hace una clasificación por grupos de altura con un paso de 0.2 m, es decir, cada píxel de la batimetría que se encuentre entre los rangos de profundidad  $h_i$  y  $h_{i+1}$  se asigna a uno de los grupos y a su correspondiente mascarará binaria. De esta forma se completa la batimetría por rangos de profundidad como se presenta en la Figura 4-5.



Figura 4-5: Máscara binaria de clasificación por grupos de altura del tranque de relaves Laguna Seca.



#### 4.4. Curvas Altura vs Reflexión

En la investigación de Araya et al (2018) se pudo encontrar una relación entre el porcentaje de humedad y la reflexión normalizada, de tal forma que la curva se puede separar en dos partes siendo este límite la humedad de saturación (38% para el caso estudiado). La primera parte muestra un comportamiento parabólico, y la segunda parte muestra un peak al inicio y luego decae en cuanto avanza el eje de humedad, tal como se muestra en la Figura 4–6.

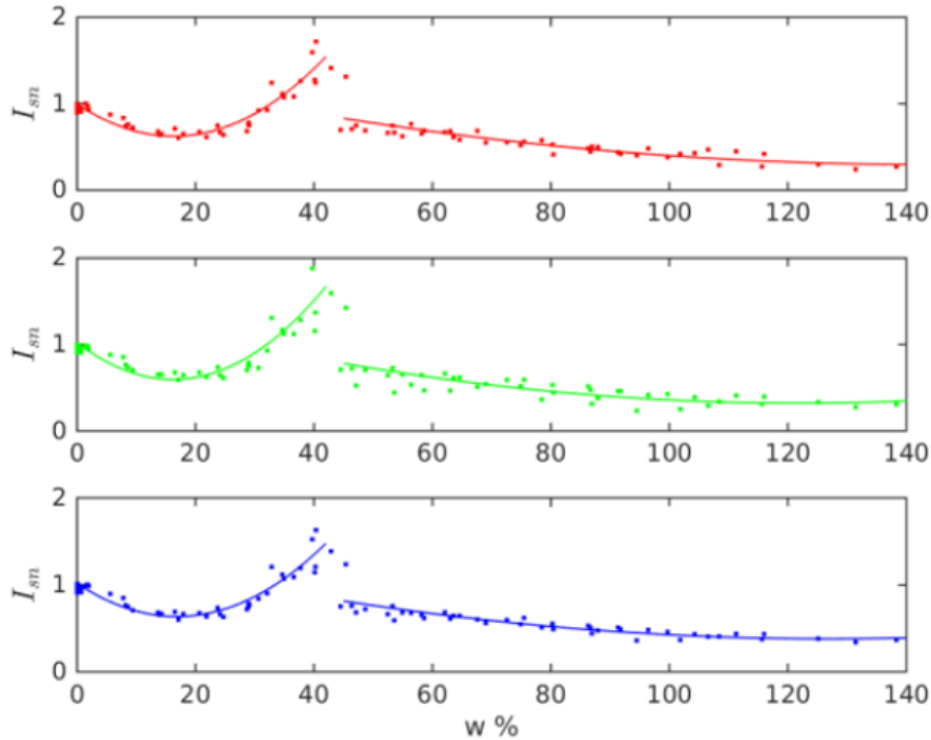


Figura 4–6: Índice normalizado de iluminación activa con láser 980 nm con cámara NIR.

En la presente memoria de título, el estudio y análisis se centra en la segunda parte de la curva, lo cual corresponde a una humedad por sobre la saturación que equivale a una capa de agua sobre la superficie del suelo. El aumento en la cantidad de agua o altura de la columna, provoca que la reflexión normalizada decaiga a medida que la humedad aumenta. Esta idea se extiende para encontrar una relación entre la reflexión de luz en las distintas bandas espectrales y la profundidad de la columna de agua.

Para el caso del tranque de relaves Laguna Seca, en la Figura 4–7 se puede ver que los gráficos de H vs R presentan un comportamiento similar a los de la Figura 4–6.

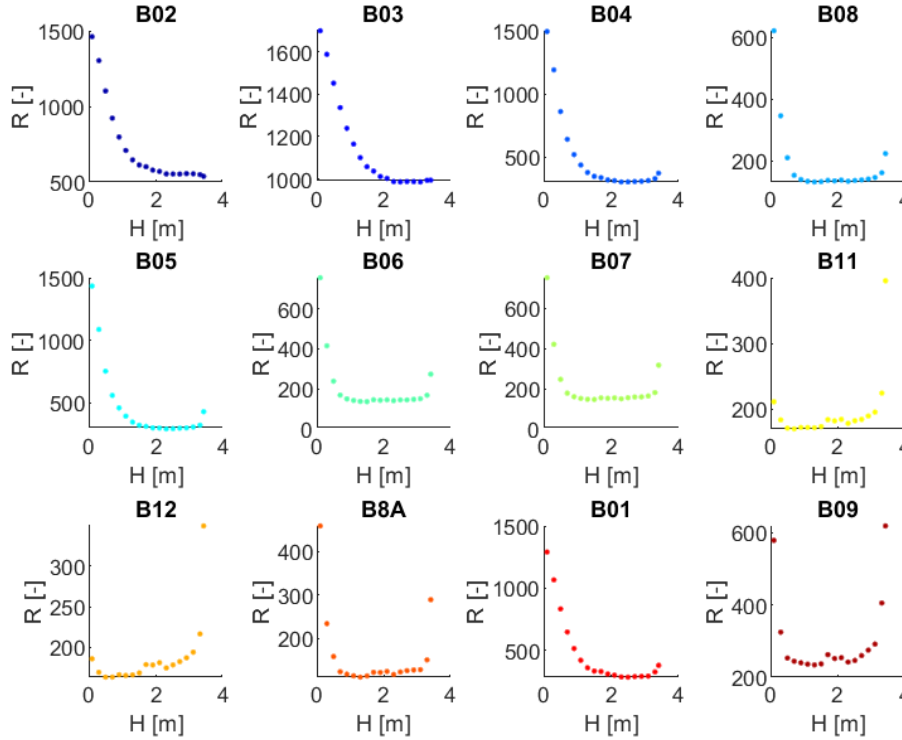


Figura 4-7: Curvas Altura vs Reflectancia para las 12 bandas del tranque de relaves Laguna Seca.

## 4.5. Algoritmo de inversión Altura vs Reflexión

Una vez analizado el comportamiento, se procede a buscar una relación matemática que permita obtener la batimetría a partir de la imagen. Para lo cual se comienza de los estudios analizados en la revisión bibliográfica.

### 4.5.1 Ajuste de curva a los datos

Uno de los autores encontrados es Lyzenga (2006), que propone que la Reflectancia de la subsuperficie para una profundidad de agua  $h$  está dada por la ecuación (4-1):

$$R(h) = \frac{\pi L^-}{E_i^-} = r_y + r_b^* e^{-\alpha h} \quad (4-1)$$

donde

- $E_i^-$ : irradiancia descendente
- $L^-$ : radiancia ascendente
- $r_y$ : reflectancia debido volumen de dispersión en la columna de agua para una profundidad de agua efectivamente infinita.
- $r_b^* = r_b - r_y$ , donde  $r_b$  es reflectancia del fondo
- $\alpha$ : la suma de los coeficientes de atenuación difusa para luz ascendente y descendente

Los parámetros en este modelo pueden ser relacionados a las propiedades inherentes de la óptica del agua y del fondo, pero para este caso, son derivaciones empíricas por comparación con las señales de profundidad medidas mediante teledetección. Utilizando el método de los mínimos cuadrados, se realiza un ajuste a la curva para obtener los parámetros  $r_b$  y  $\alpha$ . Por otro lado, el parámetro  $r_y$  se obtiene de manera directa con el valor mínimo observado en las curvas.

En la Figura 4–8 se presentan las distintas bandas con la curva ajustada, mientras que en la Tabla 4-4 se presentan los parámetros del modelo correspondiente.

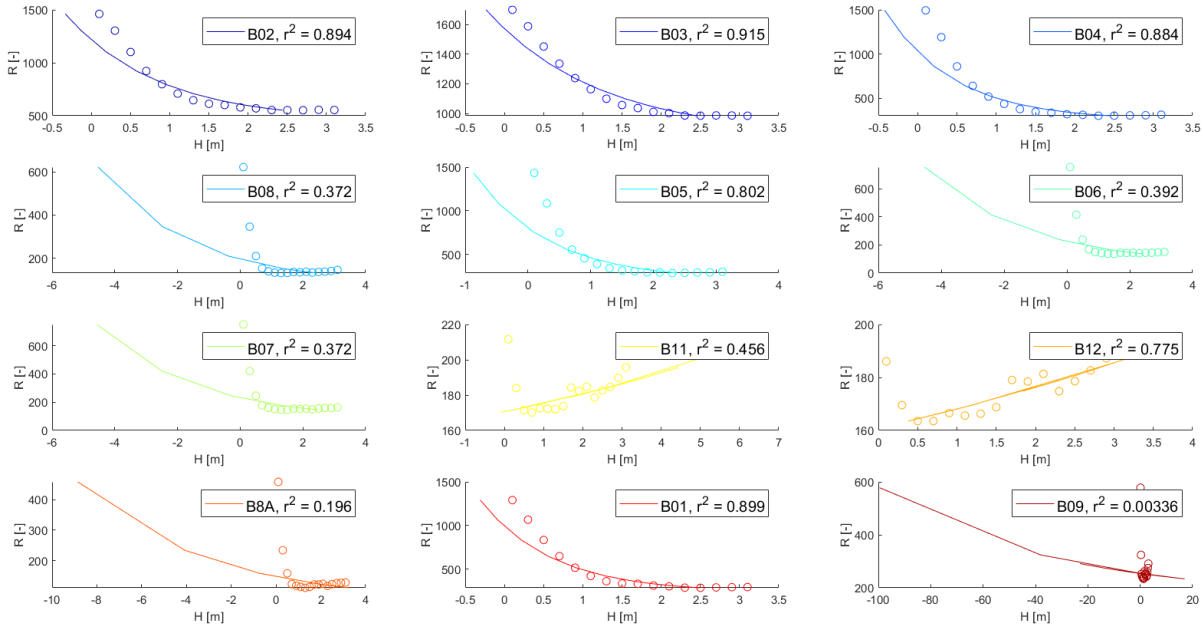
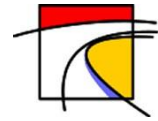
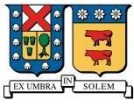


Figura 4–8: Ajuste de curva para cada banda del tranque de relaves Laguna Seca.

En la Tabla 4-4 se muestran los valores de los parámetros de las curvas ajustadas para las bandas.

Tabla 4-4: Valores de los parámetros de las curvas ajustadas asociado a cada banda.

Banda	$\alpha$	$r_b$	$r_y$	$r^2$
B02	-0,847	758,910	456	0,8945
B03	-0,701	713,793	857	0,9148
B04	-1,141	766,181	257	0,8842
B08	-0,350	110,010	84	0,3716
B05	-0,844	588,446	210	0,8015
B06	-0,315	166,556	59	0,3925
B07	-0,325	152,555	78	0,3725
B11	0,095	47,618	123	0,4561
B12	0,133	49,940	111	0,7754
B8A	-0,177	81,887	66	0,1961
B01	-1,088	754,747	235	0,8988
B09	-0,016	85,921	168	0,0034



#### 4.5.2 Estimación de la profundidad del agua

Una vez ajustados los parámetros, se estima la profundidad de la columna de agua mediante la ecuación (4-2), la cual se obtiene despejando  $h$  desde la ecuación (4-1). Esta expresión considera que todas las propiedades físicas y químicas del fondo permanecen constantes y se consideran homogéneas.

$$\hat{h} = \frac{1}{-\alpha} \ln(r_b) - \frac{1}{-\alpha} \ln(r - r_y) \quad (4-2)$$

## 5. Resultados

En esta sección se aplica la metodología y algoritmos del capítulo anterior y se presentan los resultados obtenidos, los cuales contienen imágenes de la banda utilizada y la batimetría estimada. Se utiliza la ecuación (4-2) a la banda 2 (B02) del lago y las distintas bandas del tranque de relave. Además, se presenta una discusión de los resultados.

A continuación, se muestra la curva H vs R en las bandas 2 (B02 o azul) y NIR (B08) obtenida tanto en el lago Crescent Lake como en el tranque de relaves Laguna Seca, según la Figura 5-1.

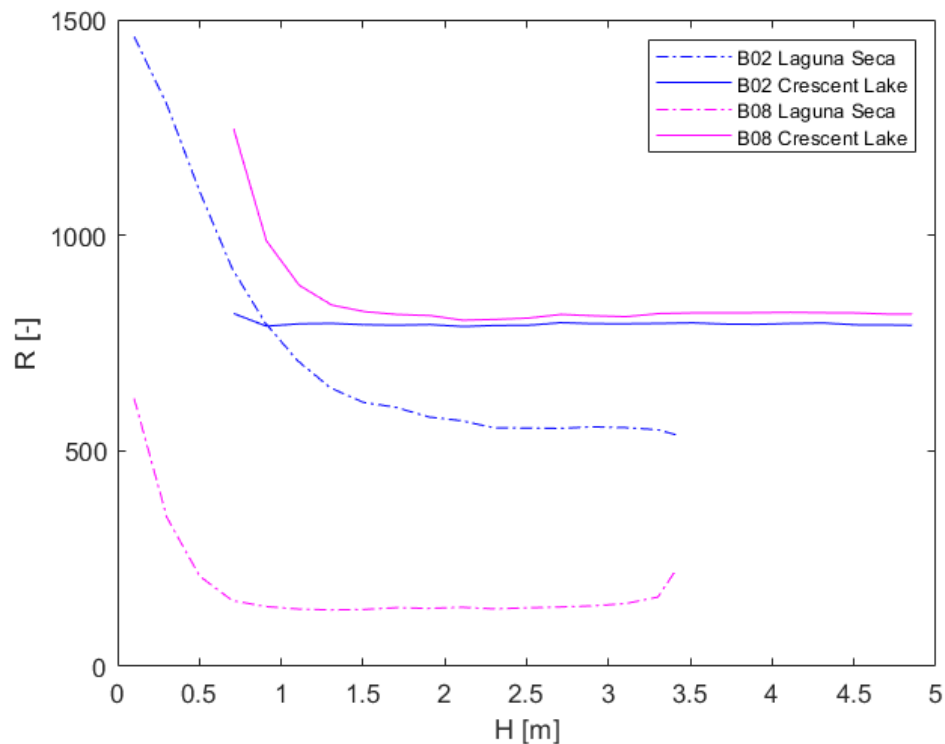


Figura 5-1: Comparación de Curvas de Altura vs Reflexión entre lago estadounidense Crescent Lake (línea continua) y tranque de relave Laguna Seca (línea segmentada). Se muestran las bandas 2 y 8 (azul y magenta respectivamente).

En la Figura 5-1 se puede ver una similitud en tendencia entre las curvas del lago (línea continua) y las curvas del tranque de relaves (línea segmentada), pero están desplazadas tanto en los niveles de reflexión como en las alturas donde comienza la curva con mayor pendiente. Dado lo anterior, se intenta realizar una estimación de la batimetría del lago a partir de los parámetros de ajuste a los datos obtenidos del tranque de relaves como primera aproximación. En la Figura 5-2 se muestran las curvas del tranque de relaves Laguna Seca con línea segmentada de la figura anterior, pero con todas las bandas en conjunto. En este caso, las bandas se destacan con un mayor grosor de líneas.

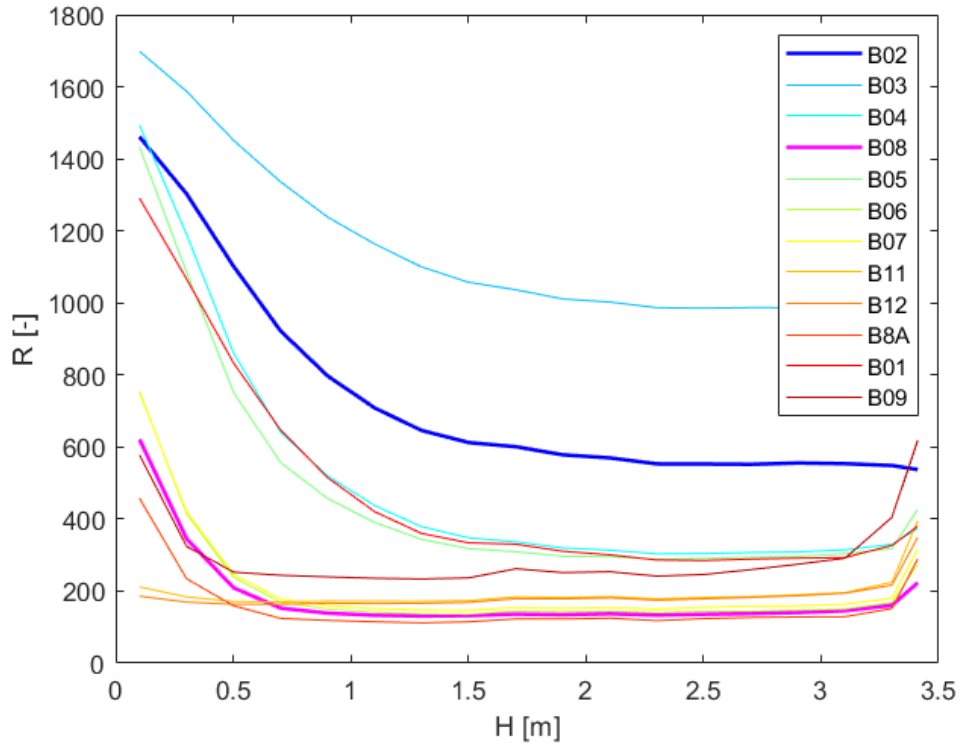
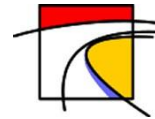


Figura 5-2: Curvas H vs R de las 12 bandas en conjunto del tranque de relaves Laguna Seca

Se observa en esta imagen que la zona curva para cada una de las bandas ocurre a distintas profundidades, lo cual puede estar asociado a la dimensión relativa de la longitud de onda diferente y la profundidad de la columna de agua

## 5.1. Aplicación en Lagos

En la Figura 5–3 a) se presenta la batimetría real del lago Crescent Lake obtenida de la base de datos de lagos estadounidenses del 2013 con una resolución espacial de 1m, siendo esta una de las utilizadas para la generación de los códigos de los algoritmos. Mientras que en la Figura 5–3 b) se presenta la imagen satelital del mismo lago, correspondiente a la fecha 15 de septiembre de 2020.

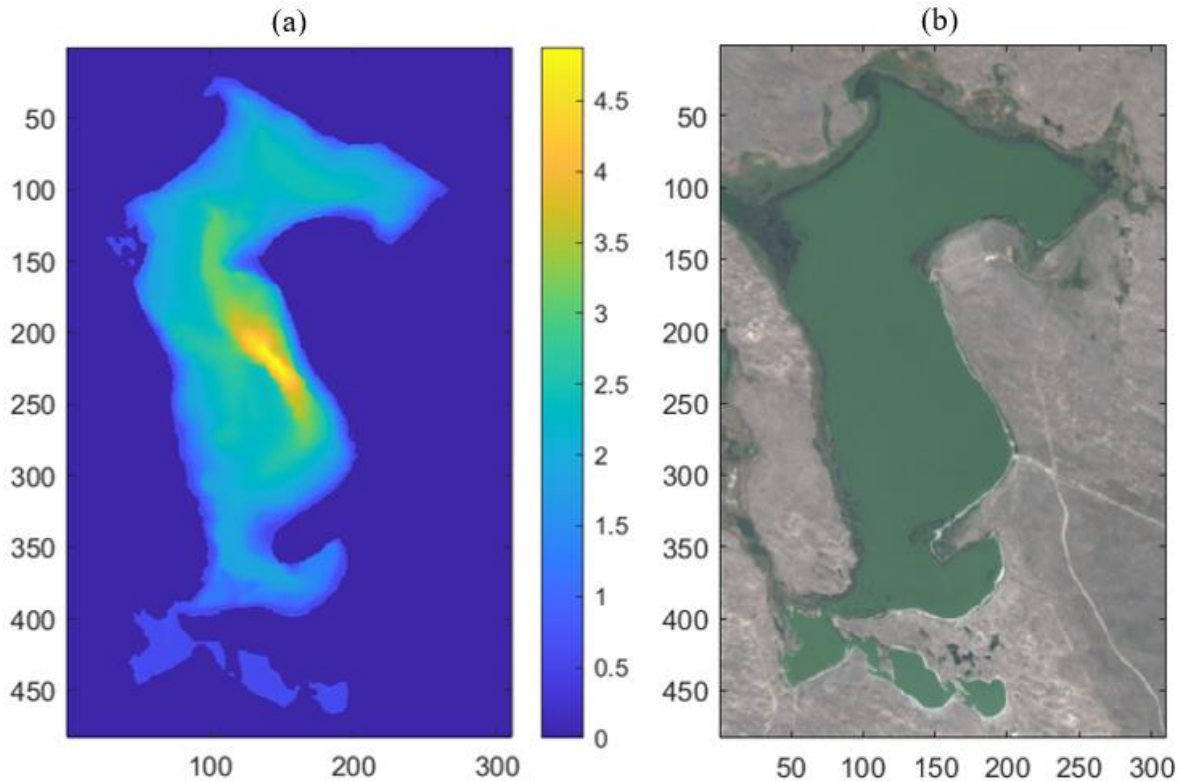


Figura 5–3:(a) Batimetría real del lago Crescent Lake obtenida de base de datos de lagos estadounidenses. Septiembre de 2013; (b) Imagen satelital con canales visibles (RGB) del lago Crescent Lake. Septiembre de 2020.

En la Figura 5–4 se muestra la banda 2 (B02) del lago la cual será utilizada para realizar la estimación de la batimetría. Considerando la Tabla 4-4 asociada al ajuste de parámetros del tranque de relave, se utilizan los parámetros de la banda 2 (B02) para estimar la batimetría del lago mediante la ecuación (2), tal como se muestra en la Figura 5–5:

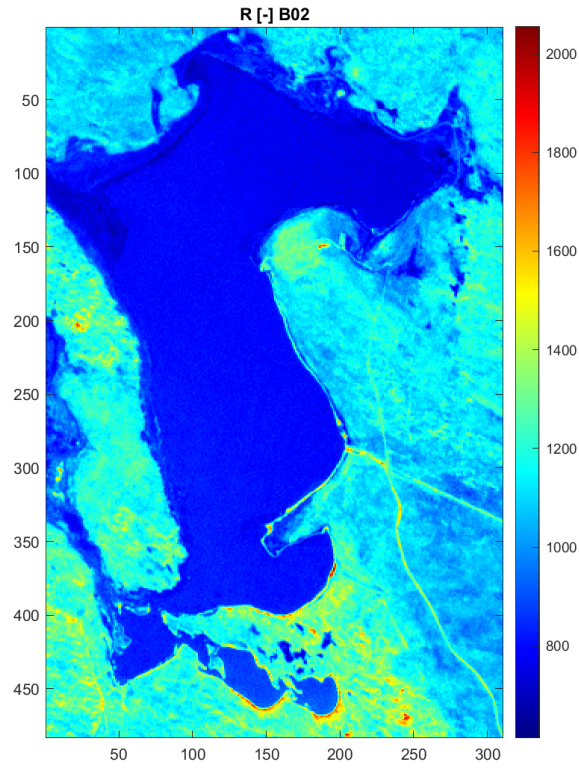


Figura 5-4: Imagen satelital que muestra la reflectancia en la banda 2 del lago Crescent Lake. Imagen obtenida con fecha de septiembre 2020.

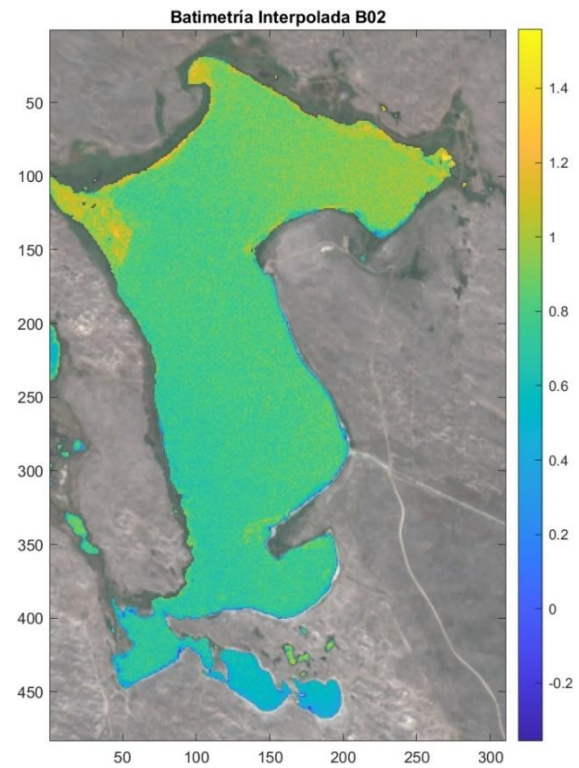


Figura 5-5: Estimación de batimetría del lago Crescent Lake mediante modelo matemático utilizando parámetros de ajuste de la banda 2 del tranque de relave Laguna Seca.

## 5.2. Aplicación en Tranque de relave

En la Figura 5–6 (a) se presenta la batimetría real del tranque de relaves Laguna Seca con fecha de abril de 2020, la cual fue obtenida con una resolución espacial de 1 m. Por otro lado, en la Figura 5–6 (b) se muestra la imagen visible del mismo tranque, con fecha de abril de 2020.

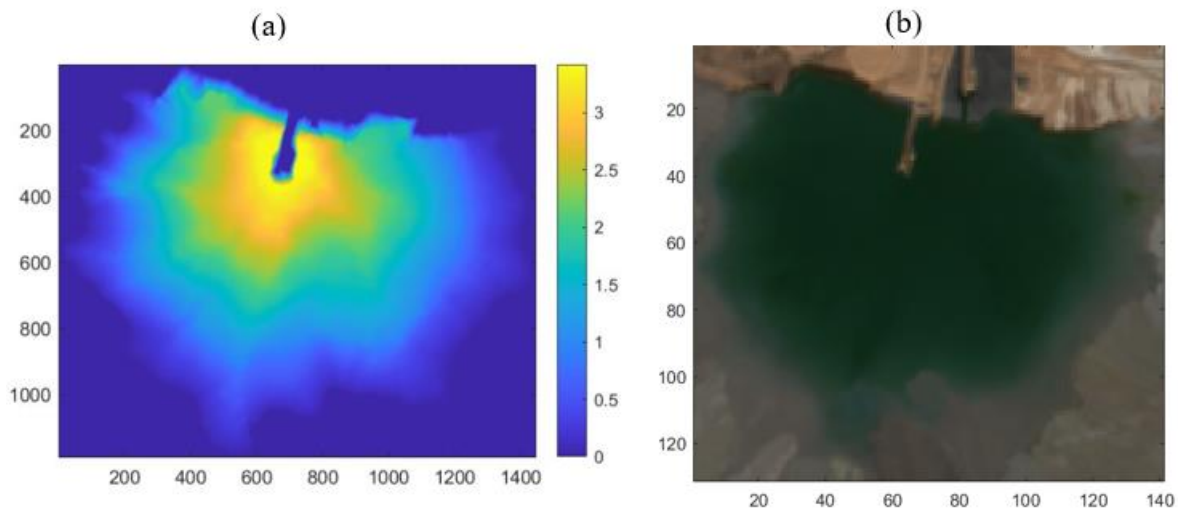


Figura 5–6:(a) Batimetría real del tranque de relaves Laguna Seca obtenida mediante un DEM. Abril de 2020; (b) Imagen satelital con canales visibles (RGB) del tranque de relaves Laguna Seca. Abril de 2020.

Con respecto a la Tabla 4-4, se ha utilizado un 90% de  $r_y$  para que el ajuste vertical se aproxime de mejor manera a los datos. A continuación, se utilizan las bandas 2 y 3 (B02 y B03) para realizar la estimación de la batimetría ya que estas fueron las que mejor correlación (mayor  $r^2$ ) presentaron en el ajuste de parámetros.

En la Figura 5–7 se puede ver las imágenes satelitales indicando la reflectancia según la banda, a las cuales se les aplicó el modelo matemático. En consecuencia, en la Figura 5–8 se muestra la estimación de la batimetría del tranque de relaves de Laguna Seca utilizando los parámetros de la bandas 2 y 3 (B02 y B03) obtenida en el capítulo anterior.

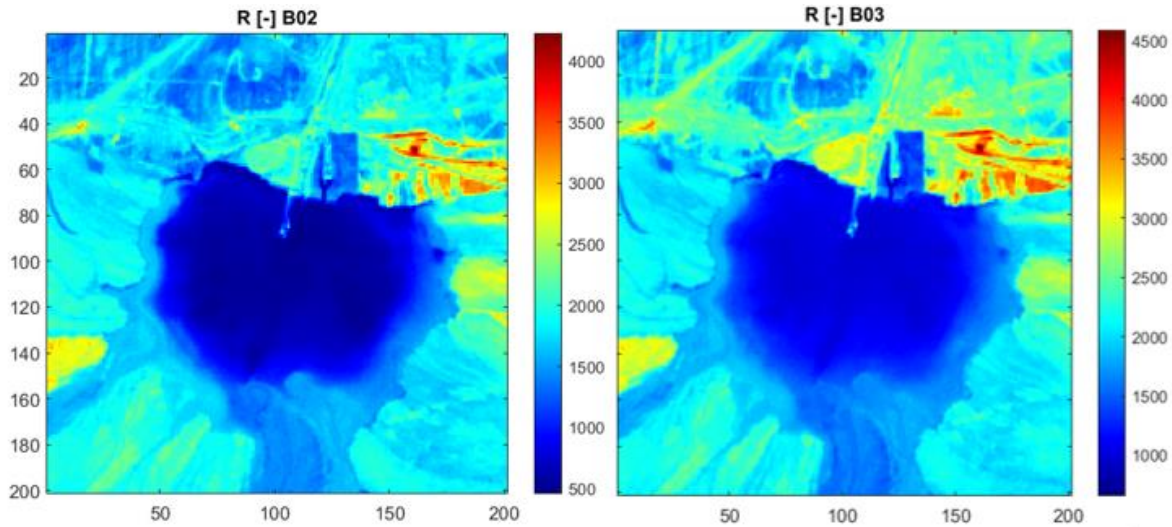
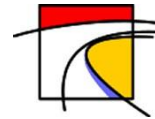


Figura 5–7: Imagen satelital del tranque de relaves Laguna Seca. Imagen izquierda muestra la reflectancia de la banda 2 y la derecha muestra la reflectancia de la banda 3. Imagen obtenida con fecha abril de 2020.

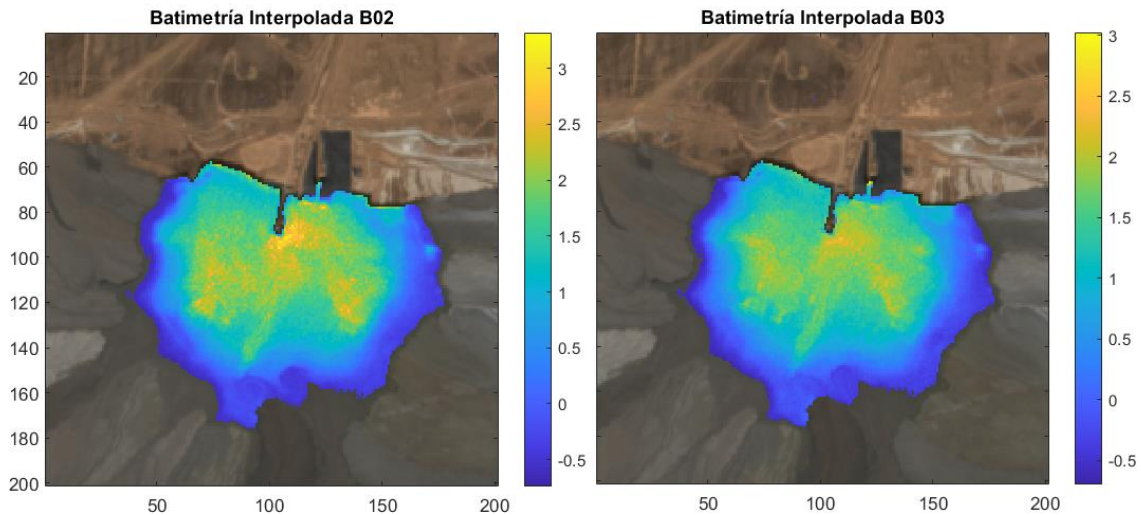
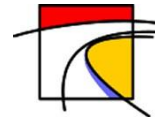


Figura 5–8: Estimación de batimetría del tranque de relaves Laguna Seca mediante modelo matemático. Imagen a la izquierda se utilizó parámetros de ajuste de la banda 2 y a la derecha se utilizó de la banda 3.

### 5.3. Discusión

En la Figura 5–1 (comparación de altura vs reflectancia) se pueden apreciar dos características importantes en las curvas de línea continua y segmentada:

- La primera característica es la forma que estas poseen son similares en ambas bandas (B02 y B08), es decir, valores más altos de reflectancia en las zonas iniciales de altura y un decaimiento exponencial con asíntota. Esta característica se atribuye a que el nivel de absorción de radiación depende del volumen de agua en la columna de agua correspondiente.
- La segunda característica es que estas se encuentran desplazadas tanto en eje X como en Y. Esto podría deberse a la diferencia de composición física y química entre el lago y el tranque de relave, considerando que en el lago es más probable encontrar



material orgánico y agentes bióticos tanto en el agua como en el fondo, los cuales aportan a la turbiedad. Por otro lado, el tranque de relave sólo posee minerales pesados, los cuales decantan con el tiempo y se consolidan al fondo, dejando que el agua se libere, formando la llamada laguna de aguas claras.

En la Figura 5–3 (batimetría real del Lago) se puede ver que existe una zona profunda (zona amarilla) la cual llega hasta valores cercanos a 4.5 [m] de profundidad. Teniendo en cuenta lo anterior, en la figura (B02 del lago) esta zona profunda no se aprecia lo cual puede deberse a los años de diferencia entre la batimetría y la imagen satelital. Por consecuencia, en la aplicación del modelo matemático tampoco se aprecia la zona profunda, tal como se ve en la Figura 5–5 (batimetría estimada). Por otro lado, se observa la tendencia al aumento de profundidad desde la orilla del lago en la zona sur, lo cual es consistente con la batimetría real, pero desplazada en las alturas en este caso.

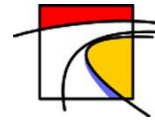
En la Figura 5–6 (batimetría real del tranque) se puede ver que existe una pequeña península donde la pendiente es muy alta en sus bordes (gran cambio de altura en poca distancia horizontal). Debido a que la resolución espacial es de 1 [m], esta debe ser reconstruida en una resolución espacial de 10 [m] para que sea compatible con la resolución de las imágenes satelitales. Al realizar este proceso se pierde precisión de los datos intermedios, lo cual puede conducir a errores y menor precisión en la estimación de la batimetría.

En la Figura 5–7 (imagen satelital que muestra la reflectancia del tranque) se puede apreciar que la variación en la reflectancia se asemeja a la batimetría, siendo más clara (mayor reflectancia o menos absorción) en las cercanías del borde de la laguna y más oscura en las zonas profundas del laguna (menor reflectancia o mayor absorción).

En la Figura 5–8 (Mapa de altura en base a modelo) se observa que al utilizar una expresión que posee términos exponenciales, el rango inicial el cual opera la curva se vuelve sensible a las pequeñas variaciones de reflectancia. Por este motivo, es que existen valores negativos en el mapa batimétrico los cuales carecen de sentido físico. Esto indica que se debe utilizar algún normalizador, por ejemplo: en los casos de humedad se utilizaba la reflexión de suelo seco (Araya et al. 2018).

Además, hay otras bandas donde el comportamiento de la curva es mejor tanto en rangos iniciales como finales, por lo que es posible analizar la opción de realizar la estimación con combinaciones lineales de las bandas. Para lo anterior, es de mucha ayuda contar con máscaras binarias tanto de clasificación de grupos de altura como geométricas.

Finalmente, se puede decir que algunos errores fueron causados por los supuestos o fórmulas inherentes al método utilizado. También se pueden atribuir errores a la medición misma de los satélites y a los métodos de medición, considerando que los datos obtenidos en BOA son valores provenientes de una formulación matemática de corrección atmosférica que intenta asociar todas las variables de un fenómeno muy complejo.



## 6. Conclusiones

Las curvas presentan un peak al inicio y luego decaen tal como se evidenció en el paper de Araya (2018), lo cual está asociado a que físicamente existe una columna de agua sobre el fondo que se difumina exponencialmente la reflectancia a medida que la columna de agua crece.

La clasificación espectral funciona bien hasta el momento, ya que la base está entrenada por un usuario con experiencia. Pero, a futuro se debe lograr identificar automáticamente mediante inteligencia artificial. Puede haber errores por clasificación espectral en caso de tener una base de datos poco representativa.

En varias bandas se puede ver la tendencia, por lo que es posible pensar en un futuro que éstas correspondan a una curva maestra que responda a varios parámetros o que cada banda pueda ser más representativa en un rango de profundidades determinado.

Hay bandas que son iguales incluso siendo lagos y tranque independientes entre ellos (B02 y B08). Por otro lado, existen bandas diferentes al comienzo de la curva, mostrándose más planas después de una profundidad de 0.5 m (B07, B08, B8A, B09), algunas más empinadas (B01, B04, B05) y otras de similar forma desplazadas en el eje profundidad (B02 y B03). Es posible decir que hay bandas que no representan el fenómeno físico estudiado (B11 y B12).

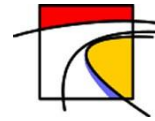
Hay errores de mediciones o de procesamientos secundarios asociadas a las correcciones atmosféricas. El fenómeno físico que ocurre en la atmósfera es muy difícil de predecir y de cuantificar, por lo que las serie de formulaciones matemáticas que intentan replicarlo dependen del nivel computacional

Cabe destacar que la calibración de los lagos estadounidenses tiene una batimetría que puede considerarse desactualizada, pero aun así sirvió para ejecutar los códigos siendo ésta una de las primeras aproximaciones.

La curva de Laguna seca da bastante limpia, se debe a la homogeneidad de la composición del fondo. Se puede decir que, dadas las dimensiones de la laguna, no afecta mucho que la resolución espacial sea de 10 m. Por otro lado, puede haber errores por resolución espacial, considerando que la batimetría que se utilizó como datos inicial tenía una resolución espacial de 1 m, las cuales debían reestructurarse de manera representativa a una malla de 10 m. Una solución para lo anterior sería investigar la aplicación de filtro espacial (mediana 3x3), tanto en la batimetría como en las bandas de la imagen satelital, con el objetivo de eliminar ruido entre pixeles (suavización del pixelado).

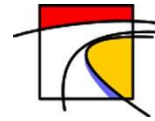
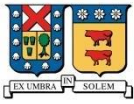
De la revisión bibliográfica se identifican otros índices como NDWI, el cual corresponde a un índice que se utiliza para análisis de masas de agua. Este índice se utiliza en las bandas verdes e infrarrojas o infrarrojo lejano y cercano. En otros campos de aplicación, por ejemplo, en agricultura se utiliza para analizar el estrés de la vegetación por sequía tanto en mapas como en gráficos. Para este caso, podrían ayudar a que el gráfico de la curva de altura vs reflectancia se pueda parametrizar de mejor manera y poder hacer un análisis en el tiempo.

Combinaciones de bandas para la obtención de un estimador más robusto, quedan como trabajo futuro. De esta forma, se podría obtener un modelo matemático más preciso y con la capacidad de ajustarse a mayores escenarios o a diferentes depósitos de relaves.



## 7. Referencias

- Araya, V., Suazo, G., Villavicencio, G., & Silva, M. (2019). Monitoreo de la humedad en depósitos de relave a partir de mediciones de reflexión de luz. *Obras y Proyectos*, 25, 35–41.
- Ariza, A., Ramírez, H. (2014). Modelo Batimétrico derivado de imágenes Landsat ETM+ en zonas de arrecifes tropicales. *Revista Cartográfica*, 90, 43-58.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel ciencia, 2008.
- Chuvieco, E. (2015). Introduction to Optical/Thermal Remote Sensing. 6th ESA advanced training course on land remote sensing, Bucharest, Romania, 2015,9.
- COCHILCO (2019). Mejores prácticas de gobernanza en materia de relaves. Dirección de Estudios y Políticas Públicas 01/2019.
- Defu C., Aiman L., Xuexin L., Baodong M. (2018). Remote Sensing Assessment of Safety Risk of Iron Tailings Pond Based on Runoff Coefficient. *Sensors* 2018, 18, 4373.
- European Spatial Agency (2017). “Sentinel 2 Products Specification Document”
- European Spatial Agency (2015). “Sentinel 2 User handbook”
- Gao, J. (2009). “Bathymetric mapping by means of remote sensing: Methods, accuracy and limitations”. *Progress in Physical Geography*, 33 (1): 103-116.
- Gastellu-Etchegorry, J. (2015). Advanced Optical. 6th ESA advanced training course on land remote sensing, Bucharest, Romania, 2015,9.
- Gastellu-Etchegorry, J. (2015). Atmospheric corrections - Fundamentals. 6th ESA advanced training course on land remote sensing, Bucharest, Romania, 2015,9.
- Gomez, O. (2013). “Análisis de métodos e instrumentación utilizada en batimetría”. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- J. Louis, A. Charantonis & B. Berthelot (2010). "Cloud Detection for Sentinel-2", Proceedings of ESA Living Planet Symposium.
- Kaufman, Y., Sendra (1988). C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Volume 9, Issue 8, 1357-1381.
- Lafon, V., Froidefond, J.M., Castaing, P. (1997). “Bathymetric mapping by SPOT images to quantify sand movements in the tidal inlet of Arcachon (France)”. *Earth Surface Sensing. Proc. SPIE conference*, London, 456-66.
- Louis, J., A. Charantonis, A. and Berthelot, B. (2010). Cloud Detection for Sentinel-2. Proceedings of ESA Living Planet Symposium.
- Lyzenga, D., Malinas, N., & Tanis, F. (2006). Multispectral Bathymetry Using a Simple Physically Based Algorithm. *IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing*, Vol. 44, N°8, 2251-2259.



- Lyzenga, D.R. (1978). "Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth Anda Bottom Features", *Applied Optics*, vol. 17, pp. 379-383.
- Mayer, B. and Kylling, A. (2005). Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1855–1877.
- NASA, (2013). "Landsat 7 Science Data User's Handbook".
- Richards, J. A. and Jia, X. (2006). "Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction". Berlin, Germany: Springer.
- Richter, R., Wang, X., Bachmann, M., and Schlaepfer, D. (2011). "Correction of cirrus effects in Sentinel-2 type of imagery", *Int. J. Remote Sensing*, Vol.32, 2931-2941.
- Sánchez, M., Suazo, G., Araya, V. (2020). Monitoring of Moisture Content in Paste Tailings using Hyperspectral Cameras. 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, Santiago, Chile, 2020,6.
- Sánchez – Carnero, N. et al. (2012). "Fast and low-cost Method for VBES Bathymetry Generation in Coastal Areas" *Estuarine Coastal and Shelf Science* 114: 175-182.
- Schläpfer, D. et al. (1998). "Atmospheric precorrected differential absorption technique to retrieve columnar water vapour", *Remote Sens. Environ.*, Vol. 65, 353366.
- Spitzer, D., Dirks, R.W.J., (1986). "Classification of bottom composition and bathymetry of shallow waters by passive remote sensing. Remote sensing for resources development and environmental management". In *Proceedings of the 7<sup>th</sup> ISPRS Commission VII Symposium*, Enshede, volume 2, 755-77.
- Wang, C.K., Philpot, W.D. (2007). "Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters". *Remote Sensing of Environment* 106, 123-35.

## 8. Anexos

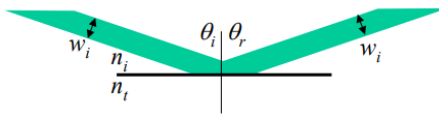
### 8.1. Marco Teórico

#### 8.1.1 Terminología

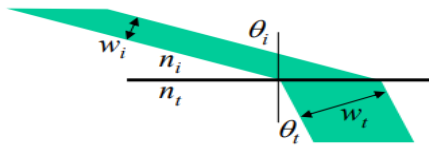
Se introducen los siguientes términos para abordar los conceptos fundamentales de esta memoria de título:

- Reflectancia ( $\rho$ ): es la parte de la irradiancia que refleja la superficie receptora, se mide en tantos por uno y se considera por tanto adimensional, es diferente para cada superficie receptora y para cada cuerpo. La medida de la reflectancia puede hacerse teniendo en cuenta toda la semiesfera superior de una determinada superficie

$$\rho(\Omega) = \frac{\pi L(\Omega)}{E}$$

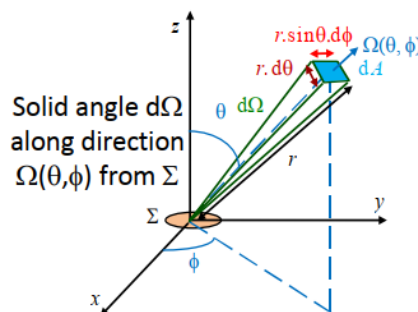


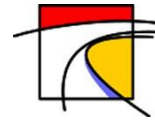
- Absortancia:  $\alpha$  es la parte de la irradiancia que absorbe la superficie receptora, se mide en tantos por uno.
- Transmitancia:  $\tau$  es la parte de la irradiancia que transmite la superficie receptora, se mide en tantos por uno.



- Ecuación de continuidad: Todo flujo incidente normalizado por sí mismo, debe ser igual a la sumatoria de la reflectancia, transmitancia y flujo absorbido, tal que exista continuidad de flujo ( $\rho + \alpha + \tau = 1$ ).
- Ángulo sólido ( $\Omega$ ): Ángulo tridimensional formado en el vértice de un cono. La unidad del ángulo sólido es el estereorradián (sr) y se define como el ángulo sólido para el que la superficie A es igual a  $r^2$  donde r es el radio de la esfera.

$$d\Omega = \sin(\theta) \cos(\phi) d\theta d\phi$$





- Energía radiante (Q): Total de energía radiada por un cuerpo en todas direcciones, se mide en J
- Flujo radiante: Energía radiante transferida por radiación de una superficie a otra por unidad de tiempo y se mide en  $\text{Js}^{-1}=\text{W}$

$$\phi = \frac{Q}{t}$$

- Radiancia (L): Flujo radiante ( $\phi$ ) que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular. Las unidades en que se mide son  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ . Su importancia reside en que es la magnitud que detecta el sensor. Cuando la radiancia se refiere a una porción concreta del espectro electromagnético se le denomina radiancia espectral ( $L_\lambda$ )

$$L(\Omega) = \frac{\phi}{\Omega \cos(\theta) A}$$

- Emitancia (M): Energía emitida por radiación desde una superficie por unidad de tiempo y de superficie (cantidad de energía que se transmite cada segundo por cada metro cuadrado de la superficie emisora, se mide en  $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2} = \text{Wm}^{-2}$ . A veces se habla de la emitancia espectral  $M_\lambda$  para hacer referencia a la emitancia en una longitud de onda concreta, en cuyo caso las unidades son  $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\mu^{-1} = \text{Wm}^{-2}\mu^{-1}$

$$M(\Omega) = \int_{2\pi^+} L(\Omega) |\cos(\theta)| d\Omega$$

- Irradiancia (E): Energía que llega a un cuerpo a través del espacio procedente de otro (que la ha emitido). Tiene las mismas unidades que la emitancia, análogamente puede hablarse también de irradiancia espectral  $E_\lambda$

$$E(\Omega) = \int_{2\pi^-} L(\Omega) |\cos(\theta)| d\Omega$$

Además, se representa esquemáticamente la irradiancia, emitancia y reflectancia tal como se muestra en la Figura 8-1.

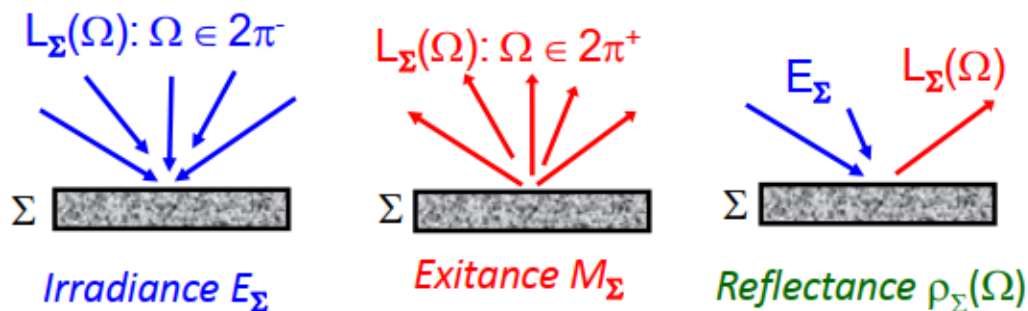
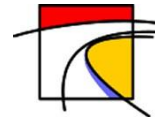


Figura 8-1: Irradiancia, emitancia y reflectancia. Fuente: Gastellu-Etchegorry (2015).



### 8.1.2 Conversión de la imagen a radiancia – Radiancia en el sensor

El sensor mide radiancia y depende en cierta medida de la reflectancia (NASA, 2013). Imágenes como las de Landsat o Sentinel-2 están compuestas de diferentes bandas y un archivo de metadatos que contiene información requerida para la reflectancia. Las imágenes de Landsat son provistas en radiancia, escaladas previamente al resultado, por lo que la radiancia espectral  $L_\lambda$  en el sensor está dada por:

$$L_\lambda = M_\lambda * Q_{cal} + A_L$$

Donde:

- $M_\lambda$  = Factor multiplicativo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de metadatos (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de banda)
- $A_L$  = Factor aditivo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de metadatos (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de banda)
- $Q_{cal}$  = Valores de píxel discretizados y calibrados del producto estándar (valores digitales DN).

Las imágenes Sentinel-2 (Level-1C) se proveen directamente de la reflectancia en TOA (Top of Atmosphere), escaladas previamente al resultado (ESA, 2017).