

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**MODELO DE DESAGREGACIÓN ESPACIAL PARA EL MONITOREO DE
RESIDUOS ANTROPOGÉNICOS MARINOS UTILIZANDO IMÁGENES
SATELITALES**

CHRISTOPHER ANDRÉS CAPOT VELOSO

Santiago, Chile
2019

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**MODELO DE DESAGREGACIÓN ESPACIAL PARA EL MONITOREO DE
RESIDUOS ANTROPOGÉNICOS MARINOS UTILIZANDO IMÁGENES
SATELITALES**

**DOWNSCALING MODEL TO MONITORING OF MARINE ANTHROPOGENIC
DEBRIS USING SATELLITE IMAGES**

CHRISTOPHER ANDRÉS CAPOT VELOSO

Santiago, Chile
2019

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**MODELO DE DESAGREGACIÓN ESPACIAL PARA EL MONITOREO DE
RESIDUOS ANTROPOGÉNICOS MARINOS UTILIZANDO IMÁGENES
SATELITALES**

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

CHRISTOPHER ANDRÉS CAPOT VELOSO

| | |
|---|----------------|
| Profesores Guías | Calificaciones |
| Sr. Cristian Mattar B. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, M.S.c., Ph.D. | 7,0 |
| Profesores Evaluadores | |
| Sr. Luis Morales S. Profesor de Ciencias Naturales y Física, Dr. | 7,0 |
| Sr. Rodrigo Fuster G. Ingeniero Agrónomo, M.S. Dr. | 7,0 |
| Colaborador | |
| Sr. Diego Uribe F. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables | |

Santiago, Chile
2019

AGRADECIMIENTOS

Eternas gracias a mis padres, abuelos, hermano y sobrina. El convivir en un lugar tan acogedor es un privilegio, y se debe ser consciente de aquello, no desperdiciando las oportunidades. 23 años a mi lado no es menor, sólo me queda seguir entregando cada día todo el cariño que me han brindado. Los amo mucho.

Muy agradecido de haber conocido a la Catita, todo lo que hemos vivido y el amor que nos hemos demostrado ha sido muy bacán, te amo.

Muy agradecido del Laboratorio para el Análisis de la Biósfera por la oportunidad de trabajar en él con todas sus garantías, caracterizado por lo desafiante y exigente de los proyectos, además de existir una calidad humana notable entre sus integrantes. Al director Cristian Mattar, por encabezar lo dicho anteriormente, siempre preocupado oportunamente de nuestra superación en este ámbito, y del potencial que todos tenemos.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| Objetivo general..... | 5 |
| Objetivos específicos | 5 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 6 |
| Área de Estudio..... | 6 |
| Materiales..... | 7 |
| Imágenes satelitales..... | 7 |
| Librería espectral y mapas de clasificación del proyecto PRED-RES..... | 8 |
| Métodos..... | 9 |
| Configuración del modelo de desagregación espacial para la identificación de RAM.. | 9 |
| Equivalencia espectral entre las bandas de Landsat 8, Sentinel-2 y WorldView-3 ... | 9 |
| Delimitación e interpolación de bandas | 10 |
| Regresiones entre bandas con equivalencia espectral..... | 10 |
| Reflectancia de RAM y Suelo en escena satelital 2017 | 11 |
| Funciones de ponderación y rangos de existencia de RAM | 11 |
| Calibración del modelo de desagregación espacial para la predicción de RAM | 13 |
| Evaluación de confiabilidad de los mapas de existencia de Mallil y Punta Apabón 2017..... | 13 |
| Validación del modelo para la predicción de RAM..... | 15 |
| Evaluación temporal de reflectancia de RAM y Suelo en la playa Mallil | 15 |
| Evaluación de confiabilidad del mapa de existencia de Punta Apabón 2018 | 15 |
| RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 17 |
| Configuración del modelo de desagregación espacial para la identificación de RAM. | 17 |
| Equivalencia espectral entre las bandas de Landsat 8, Sentinel-2 y WorldView-3 . | 17 |
| Delimitación e interpolación de bandas | 17 |
| Regresiones entre bandas con equivalencia espectral..... | 18 |
| Reflectancia de RAM y Suelo en escena satelital 2017 | 22 |

| | |
|---|----|
| Funciones de ponderación y rangos de existencia de RAM | 23 |
| Calibración del modelo de desagregación espacial para la predicción de RAM | 25 |
| Evaluación de confiabilidad de los mapas de existencia de Mallil y Punta Apabón 2017..... | 25 |
| Validación del modelo para la predicción de RAM..... | 28 |
| Evaluación temporal de reflectancia de RAM y Suelo en la playa Mallil..... | 28 |
| Evaluación de confiabilidad del mapa de existencia de Punta Apabón 2018..... | 31 |
| DISCUSIÓN | 33 |
| CONCLUSIÓN..... | 35 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 36 |
| APÉNDICES..... | 42 |
| Apéndice I. Valores de reflectancia de RAM y Suelo para librería espectral y escena de mayo 2017 de Sentinel-2..... | 42 |
| Apéndice II. Fotos de limpieza en Mallil agosto 2018. | 43 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Área de estudio, Playas Mallil y Punta Apabón, Chiloé, Chile..... | 6 |
| Figura 2. Bandas espectrales de Landsat 8, Sentinel-2 y WorldView-3. Los colores consideran el sector dentro del espectro electromagnético que representan. A la derecha, se especifican las resoluciones espaciales de cada conjunto de bandas. | 10 |
| Figura 3. Resumen de la metodología del modelo de desagregación espacial. | 16 |
| Figura 4. Delimitaciones de la escena WorldView-3 en playa Mallil interpolada a las resoluciones espaciales de a) 1,2 m, b) 10 m y c) 30 m..... | 18 |
| Figura 5. Gráficos de dispersión y densidad de reflectancia entre WorldView-3 y Sentinel-2. A la izquierda se encuentra la relación en el “downscaling” de 1,2 m (N = 24979 datos). A la derecha, se presenta la relación en el “upscaling” de 10 m (N = 519 datos). Color rojo indica mayor frecuencia y azul menor frecuencia. Se incluye la desviación estándar (σ), Bias, RMSE, R^2 y la ecuación de la regresión lineal (línea roja punteada). | 20 |
| Figura 6. Gráficos de dispersión y densidad de reflectancia entre WorldView-3 y Sentinel-2. A la izquierda se encuentra la relación en el “downscaling” de 1,2 m (N = 24979 datos). A la derecha, se presenta la relación en el “upscaling” de 10 m (N = 519 datos). Color rojo indica mayor frecuencia y azul menor frecuencia. Se incluye la desviación | |

| | |
|--|----|
| estándar (σ), Bias, RMSE, R^2 y la ecuación de la regresión lineal (línea roja punteada). | 21 |
| Figura 7. Promedio de la reflectancia para las clases RAM y Suelo en bandas de Sentinel-2. | 22 |
| Figura 8. Gráficos de dispersión de valores de reflectancia entre la librería espectral PRED-RES y Sentinel-2. A la izquierda se encuentra la regresión para la categoría RAM (N = 24 datos), mientras que el gráfico de la derecha representa la regresión de la categoría Suelo (N = 8 datos). | 23 |
| Figura 9. Comparación mapas de existencia de RAM mayo 2017 y mapas de clasificación PRED-RES 2017 en las playas de Mallil y Punta Apabón. A la izquierda, se aprecian los mapas de clasificación PRED-RES; a la derecha, los mapas de existencia resultantes. | 26 |
| Figura 10. Serie temporal de reflectancia de RAM y Suelo en la playa Mallil para las escenas del periodo 2016-2019 (N= 10 escenas). | 28 |
| Figura 11. Mapas de existencia de RAM. En a) julio de 2018 (previo a la limpieza), b) agosto de 2018 (después de la limpieza) y c) marzo de 2019 (acumulación). | 30 |
| Figura 12. Comparación mapa de clasificación PRED-RES 2018 con mapa de existencia de RAM abril 2018 en Punta Apabón. | 31 |
| Figura 13. Fotografías de la limpieza de la I. Municipalidad de Quinchao en agosto de 2018 en playa Mallil. | 43 |

Índice de cuadros

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Criterios de rangos de reflectancia para la existencia de RAM. | 12 |
| Cuadro 2. Valoración del índice kappa. | 14 |
| Cuadro 3. Bandas seleccionadas para cada satélite según su equivalencia espectral. | 17 |
| Cuadro 4. Tabla resumen de los coeficientes de determinación (R^2) entre bandas de WorldView-3/Landsat 8 y WorldView-3/Sentinel-2. | 19 |
| Cuadro 5. Resultado de rangos de existencia de RAM para playa Mallil y Punta Apabón. | 24 |
| Cuadro 6. Evaluación de confiabilidad mapas de existencias de Mallil y Punta Apabón. | 27 |
| Cuadro 7. Evaluación de confiabilidad del mapa de existencia de RAM de Punta Apabón 2018. | 32 |
| Cuadro 8. Valores de reflectancia de RAM y Suelo en la banda NIR de librería espectral PRED-RES y puntos de entrenamiento en banda NIR de Sentinel-2. | 42 |

RESUMEN

Los Residuos Antropogénicos Marinos (RAM) son objetos artificiales que se encuentran depositados y/o varados en el ambiente marino y costero, provocando constantes daños en los ecosistemas y su fauna marina. Recientemente, los métodos *in situ* de identificación de RAM han sido complementados mediante estudios de teledetección, los cuales tienen un alto costo económico, debido a la necesidad de imágenes de alta resolución espacial para su identificación. En la presente memoria, se desarrolló un modelo de desagregación espacial de imágenes satelitales para la obtención de existencia de RAM en las playas Mallil y Punta Apabón del Archipiélago de Chiloé, Región de los Lagos. La configuración del modelo se llevó a cabo para las imágenes satelitales de Sentinel-2, las cuales cuentan con una resolución espacial y temporal de 10 m y 5 días respectivamente. Asimismo, las herramientas dispuestas por el proyecto PRED-RES (librería espectral de RAM y mapas de clasificación de playas) permitieron la configuración, y posterior calibración y validación del modelo. Los resultados muestran que los mapas de existencia de RAM evaluados en la calibración del modelo tienen una precisión global mayor al 85%, y una valoración “Sustancial” según el índice kappa al considerar sólo las presencias “Alta” y “Media” de existencia de RAM. Por su parte, en la validación del modelo, la evaluación temporal percibe la limpieza de RAM llevada a cabo en Mallil, mientras que, en el mapa de existencia del año 2018 de Punta Apabón, la “Baja” existencia de RAM toma importancia para la exactitud de éste. Este trabajo presenta una oportunidad para el monitoreo de RAM en las playas. Para ello, se debe contar con una cartografía previa de éstas, de manera que se pueda evaluar continuamente la existencia de RAM, permitiendo obtener mapas de existencia de RAM según la disponibilidad de imágenes de Sentinel-2. La resolución temporal de las imágenes de Sentinel-2, y su adquisición gratuita, puede permitir que un monitoreo de RAM, en base al modelo propuesto, sirva como información base para la ejecución de planes y proyectos relacionados a la prevención y descontaminación de RAM en las playas.

Palabras clave: Residuos Antropogénicos Marinos (RAM), Teledetección, Sentinel-2, Chiloé, Monitoreo.

ABSTRACT

Marine Anthropogenic Debris (AMD) are artificial objects that are deposited and/or stranded in the marine and coastal environment, causing constant damage to ecosystems and marine fauna. Recently, in situ methods of identification of AMD have been complemented through remote sensing studies, which have a high economic cost due the need for high spatial resolution images for identification. In this document, a model of spatial disaggregation of satellite images was developed to obtain the existence of RAM in the beaches Mallil and Punta Apabón of the Archipelago of Chiloé Los Lagos Region. The model configuration was carried out for Sentinel-2 images, which has a spatial and temporal resolution of 10 m and 5 days respectively. Likewise, the tools provided by the PRED-RES project (AMD spectral library and beach classification maps) allowed the configuration, subsequent calibration and validation of the model. The results show that maps of AMD existence evaluated in the calibration has an overall accuracy greater than 85%, and valuation "Substantial" according to the kappa index by considering only "High" and "Medium" presences of existing AMD. On the other side, in the validation of the model, the temporary evaluation perceives the cleaning of AMD carried out in Mallil, while, in the Punta Apabón existence map of 2018 year, the "Low" existence of AMD takes importance for its accuracy. This work presents an opportunity for AMD monitoring on beaches. To do this, it is necessary to have a previous cartography of these, in this way the presence of AMD can be continuously assessed, allowing to obtain existence maps of AMD according to the availability of Sentinel-2 images. The temporary resolution of Sentinel -2 images and their free acquisition, can allow AMD monitoring, based on the proposed model to serve as baseline information for the execution of plans and projects related to the RAM prevention and decontamination of beaches.

Key words: Marine Anthropogenic Debris (AMD), Remote sensing, Sentinel-2, Chiloé, Monitoring.

INTRODUCCIÓN

La deposición y acumulación de desechos en ambientes acuáticos se ha esparcido en diversos lugares, incluso en los más profundos (Ramírez et al., 2011). Estos desechos se denominan Residuos Antropogénicos Marinos (RAM), correspondientes a todos los objetos generados de manera artificial, y que se encuentran depositados tanto en ambientes marinos como costeros (Galgani et al., 2010). Los RAM son clasificados, generalmente, por su tamaño: macrodesechos (>5 milímetros), microdesechos (1-5 milímetros) y nanodesechos (< 1 milímetro) (Barnes et al., 2009; Galgani et al., 2015).

El principal componente de los RAM es el plástico (Bergmann et al., 2017), elemento que ha perpetuado la presencia de los RAM en el ambiente, debido a su gran demanda, la que en su mayoría abarca la fabricación de envases y embalajes (PlasticsEurope, 2016). A nivel global, la producción de plásticos supera los 320 millones de toneladas anuales, con una tendencia de incremento de un 5% al año (Rochman et al., 2013; PlasticsEurope, 2016).

La presencia de estos objetos en el océano, especialmente los micro y nanodesechos plásticos, repercuten en la salud de los ecosistemas acuáticos, desde el crecimiento de bacterias hasta la megafauna marina. Esto ocurre principalmente por la ingesta accidental de estos elementos, propagándose a través de la red trófica, y llegando a afectar incluso a los seres humanos (Gall y Thompson, 2015; Rochman et al., 2016; Romera et al., 2018). Por otro lado, estos desechos se han tornado un problema socioeconómico, perjudicando actividades pesqueras y turísticas, además del costo que implica la limpieza de sectores públicos contaminados (UNEP, 2014).

Desde la década de 1970 se ha incursionado en la identificación y cuantificación de los RAM, aplicando una gran variedad de metodologías que carecen de una estandarización capaz de permitir la comparación de sus resultados (IMO, 1971; Löder y Gerds, 2015). Estos métodos se pueden sintetizar en 4 tipos de muestreo *in situ* –no excluyentes-, correspondientes a: reconocimiento en playas, reconocimiento a través de embarcaciones, buceo, y muestreo con redes de arrastres (Bravo et al., 2009; Hinojosa et al., 2011; Löder y Gerds, 2015; Chiba, 2018).

Por su parte, en Chile, estudios relacionados a la identificación y cuantificación de los RAM, han presentado metodologías similares, con resultados que no están ajenos a la tendencia mundial (Thiel et al., 2003; Astudillo, 2009; Bravo et al., 2009). Entre estos destaca la relación existente de la abundancia y composición de los RAM muestreados, con las actividades acuicultoras en el sur del país (Hinojosa y Thiel, 2009; Hidalgo-Ruz y Thiel, 2013; Kiessling et al., 2017).

Como complemento a los métodos tradicionales mencionados anteriormente, surge la percepción remota o teledetección, herramienta que obtiene información de objetos analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no se encuentra en contacto físico con dicho objeto (Chuvienco, 1996). La percepción remota, a diferencia de los anteriores métodos de observación directa, permite un análisis de mayor extensión espacial y resolución temporal, otorgando nuevas oportunidades tanto para la identificación como para la cuantificación de los RAM (Donohue y Foley, 2007; Lebreton et al., 2018).

Existe una amplia diversidad de misiones satélites, las cuales entregan imágenes que pueden ser adquiridas gratuitamente o con un costo comercial. No obstante, todas son capaces de cubrir las mismas escenas de la Tierra, distinguiéndose principalmente por sus resoluciones espaciales, espectrales, y temporales (Dörnhöfer y Oppelt, 2015). Pese a lo anterior, existen escasas experiencias de identificación de RAM mediante teledetección, siendo uno de los principales motivos el costo de las imágenes satelitales con resolución espacial apta para la visualización de RAM (Pichel et al., 2011; Mace 2011; Driedger et al., 2015). Una de las experiencias recientes fue el uso de un avión Hércules c-13 en el proyecto “The Ocean Cleanup”, el cual portaba sensores avanzados (Lidar y Swir Imager), más una cámara RGB (“Red-Green-Blue”), permitiendo barrer un área de 311 km² en el “Great Pacific Garbage Patch” (Lebreton et al., 2018).

En Chile sólo se cuenta con el estudio de Acuña-Ruz et al. (2018), enmarcado en el proyecto PRED-RES, y que corresponde a un modelo de localización geoespacial de RAM basado en información satelital, para una gestión integral de RAM en 3 playas de la provincia de Chiloé, Región de Los Lagos. En este proyecto, se utilizaron imágenes del satélite comercial Worldview-3, con resolución espacial de 1,2 m cada pixel, además de instrumentos de espectroradiometría para la obtención de firmas espectrales de distintos RAM. Cabe destacar que se utilizaron solamente 2 set de imágenes Worldview-3, debido al alto costo para su adquisición, siendo una variable limitante para el monitoreo continuo de los RAM, ya sea para el área de estudio antes mencionada, como para proyectos de similar índole en áreas más extensas (Morishige y McElwee, 2011).

Ante la limitante económica para la obtención de imágenes de alta resolución espacial a lo largo del tiempo, el método denominado desagregación espacial o “downscaling”, surge como una técnica que puede permitir resolver los problemas de monitoreo continuo de RAM con la resolución espacial adecuada (Wang et al., 2017). Se pueden encontrar distintos métodos de desagregación espacial, los cuales disminuyen el tamaño de los pixeles mediante algún tipo de interpolación (bilinear, cúbica, entre otras) complementándose en algunos casos mediante modelos geoestadísticos que utilizan la fusión de imágenes como herramienta de geoprocésamiento, combinando sinérgicamente la información proporcionada por varios sensores de diferentes resoluciones espaciales (Duveiller y Cescatti, 2016). Este proceso proporciona un set de imágenes con pixeles de menor tamaño, las cuales pueden ser utilizadas

para la creación de modelos, permitiendo trabajar con imágenes de misiones satelitales no comerciales. Estas últimas cuentan con una resolución temporal frecuente, potenciando las oportunidades para identificar y cuantificar RAM de manera continua y sin mayor costo.

Considerando la amplia diversidad de imágenes satelitales, ya sean pagadas o gratuitas, es necesario analizar la posibilidad de realizar un modelo de desagregación espacial entre ellas, con el fin de compatibilizar las diferentes escalas utilizadas por los sensores remotos para la identificación de RAM. Las playas de Chiloé han sido reconocidas como espacios afectados por presencia de RAM, específicamente, los sitios vecinos a las actividades de acuicultura (DIRECTEMAR, 2014; DIRECTEMAR, 2016; Acuña-Ruz et al., 2018). Por lo tanto, la presente memoria tiene por objetivo modelar la desagregación espacial de imágenes satelitales para el monitoreo de RAM en 2 playas de Chiloé, calibrando y validando este modelo mediante herramientas elaboradas por el proyecto PRED-RES de Acuña-Ruz et al. (2018) en la misma zona de estudio.

Objetivo general

Desarrollar un modelo de desagregación espacial para identificar la existencia de RAM en las playas de Chiloé, Chile.

Objetivos específicos

- Configurar un modelo de desagregación espacial para la identificación de RAM.
- Calibrar un modelo de desagregación espacial para la existencia de RAM.
- Validar un modelo de desagregación espacial para la existencia de RAM.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

En la Figura 1 es posible visualizar el área de estudio perteneciente a 2 playas situadas en la Provincia de Chiloé, Región de Los Lagos, Chile. La playa Punta Apabón pertenece a la delimitación administrativa de la comuna de Puqueldón, mientras que Mallil corresponde a la de Quinchao. Según la DIRECTEMAR (2014; 2016), Chiloé corresponde a un lugar de acumulación de residuos costeros, el cual está fuertemente influenciado por las actividades turísticas y pesqueras (Hinojosa y Thiel, 2009; Ivar do Sul y Costa, 2007). En un segundo plano, los asentamientos humanos en el archipiélago constan de poca accesibilidad y conectividad, aun así, se encuentran en constante expansión (Andrade et al., 2000), influyendo también en un porcentaje de los RAM acumulados (DIRECTEMAR, 2014; DIRECTEMAR, 2016).

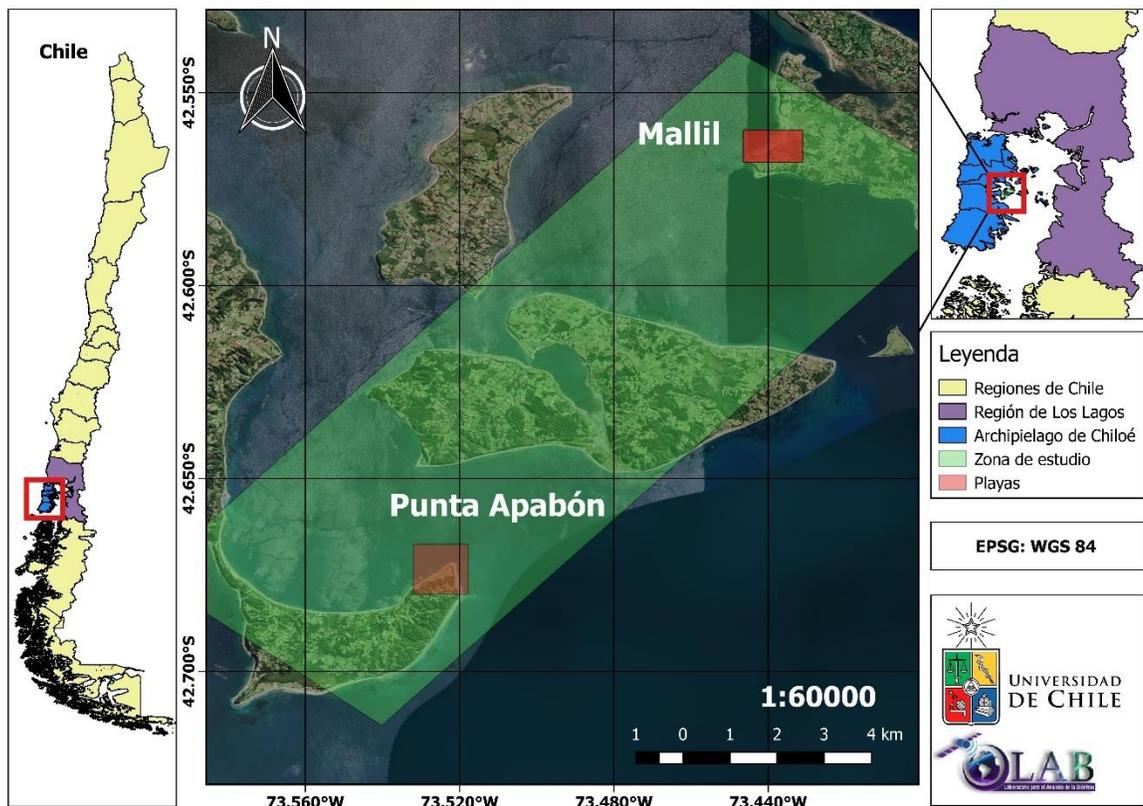


Figura 1. Área de estudio, Playas Mallil y Punta Apabón, Chiloé, Chile.

Según la clasificación de Di Castri y Hajek (1976), el área de estudio está ubicada en una zona de clima templado húmedo, con fuertes influencias oceánicas que caracterizan al Archipiélago de Chiloé (Smith-Ramirez, 1993). Consta de una precipitación media anual de 2073 mm aproximadamente, y oscilaciones de temperatura anual con mínimos de 4,3°C y máximos de 17,3°C. La época más lluviosa corresponde al invierno, influenciado por los vientos provenientes del sur, mientras que, en la estación más seca, confluyen los vientos estivales provenientes del norte (Santibáñez, 2016; Letelier, 2014; Di Castri y Hajek, 1976).

Materiales

Para el desarrollo del modelo de desagregación espacial, se utilizaron imágenes satelitales con diferentes resoluciones espaciales, provenientes de distintos sensores remotos de los satélites. Junto a estas imágenes, se utilizó la librería de firmas espectrales de RAM obtenidas por el proyecto PRED-RES, así como sus mapas de clasificación de RAM en las playas Mallil y Punta Apabón. Además de configurar el modelo de desagregación, estos materiales permitieron su calibración y validación, con el propósito de compatibilizar las resoluciones espaciales de distintas imágenes satelitales. Los materiales se detallan a continuación:

Imágenes satelitales

- **WorldView-3:** Corresponde a un satélite comercial perteneciente a DigitalGlobe, lanzado el 13 de agosto de 2014. Sus imágenes constan de 29 bandas, abarcando un rango espectral entre los 0,40 μm y los 2,37 μm . La resolución espacial y radiométrica de las bandas multiespectrales son de 1,24 m y 14 bits respectivamente, mientras que la banda pancromática tiene 0,31 m y 11 bits. Por su parte, la resolución temporal es de 4,5 días a 20° “off-nadir” o menos (Kruse et al., 2013).
- **Landsat 8 OLI/TIRS:** Satélite perteneciente a la “National Aeronautics and Space Administration” (NASA) y a la “United States Geological Survey” (USGS). Fue lanzado el 11 de febrero de 2013, transportando dos sensores remotos: el “Operational Land Imager” (OLI), que incluye 9 bandas espectrales desde los 0,44 μm a los 1,38 μm , y el “Thermal Infrared Sensor” (TIRS), con 2 bandas que registran entre los 10,60 μm y los 12,51 μm . La resolución espacial de sus imágenes es de 30 m, excepto por la banda pancromática (banda 8) de 15 m. Tiene una resolución temporal de 16 días, y una resolución radiométrica de 16 bits (Roy, 2014).
- **Sentinel-2:** Corresponde a dos satélites situados en orbitas opuestas, desarrollados por la “European Space Agency” (ESA). La misión constó de 2 lanzamientos: el 23

de junio de 2015 (Sentinel-2A), y el 7 de marzo de 2017 (Sentinel-2B) (Drusch, 2017). El rango espectral de las imágenes varía entre los 0,44 μm y los 2,19 μm , con resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m, dependiendo de la banda. Por su parte, la resolución temporal es de 5 días a nadir, mientras que la resolución radiométrica consta de 12 bits (Clevers et al., 2013).

Librería espectral y mapas de clasificación del proyecto PRED-RES

El estudio perteneciente a Acuña-Ruz et al. (2018) contiene una biblioteca de firmas espectrales de RAM obtenidas *in situ*, además de mapas de clasificación supervisados de RAM en la misma área de estudio presentada. Estos productos se obtuvieron a través de instrumentos de espectroradiometría, como también por la compra de 2 escenas satelitales de alta resolución espacial, correspondientes a WorldView-3. A continuación, se detallan los productos utilizados:

- **Librería espectral:** Este repositorio contiene las huellas espectrales únicas de los elementos muestreados por el proyecto PRED-RES, a través del espectroradiómetro Hylogger-3 con la función filtro de WorldView-3. Específicamente, recogieron la reflectancia del plumavit, elemento abundante que, una vez afectado por el ambiente, presenta diferencias en color, tonos, y formas. También contiene muestras de concha, suelo y basura.
- **Mapas de clasificación de RAM:** Clasificaciones supervisadas de escenas satelitales de WorldView-3 para las playas Mallil y Punta Apabón, con clases definidas correspondientes a las categorías de “Suelo”, “Plumavit” y “Basura”. Específicamente, se trabajaron con los mapas de clasificación PRED-RES de Mallil y Punta Apabón del 17 de febrero de 2017, además de un mapa de clasificación de Punta Apabón del 8 de marzo de 2018.

Métodos

Configuración del modelo de desagregación espacial para la identificación de RAM

Se obtuvieron imágenes satelitales de Landsat 8 y Sentinel-2 con fecha cercana al 17 de febrero de 2017, correspondiente a la fecha de obtención de la escena de WorldView-3 utilizada por el proyecto PRED-RES (Acuña-Ruz et al., 2018). Se procuró que las imágenes utilizadas contuvieran menos del 10% de nubes en la escena, adquiriéndolas con sus correcciones atmosféricas correspondientes desde la plataforma de la USGS.

Una vez obtenidas las imágenes de cada satélite, el primer paso para la configuración del modelo de desagregación espacial constó en la búsqueda de bandas equivalentes espectralmente entre los tres satélites considerados. Con esto, utilizando la playa Mallil como foco de análisis, se optó por las imágenes (de Landsat 8 o Sentinel-2) más aptas para la identificación de los RAM.

Equivalencia espectral entre las bandas de Landsat 8, Sentinel-2 y WorldView-3

Los 3 satélites contienen bandas que se posicionan de distinta manera en el espectro electromagnético. Por lo tanto, se evaluaron los rangos de longitud de onda de las bandas de Landsat 8, Sentinel-2 y WorldView-3. En el caso de Sentinel-2, este presenta bandas de distintas resoluciones espaciales, por lo que se consideraron solamente aquellas de mayor resolución espacial, correspondiente a las bandas de 10 m. Por su parte, en Landsat 8 se seleccionaron aquellas bandas que tuviesen equivalencia espectral con las bandas de WorldView-3.

En la Figura 2 se presentan las bandas disponibles para cada satélite considerado.

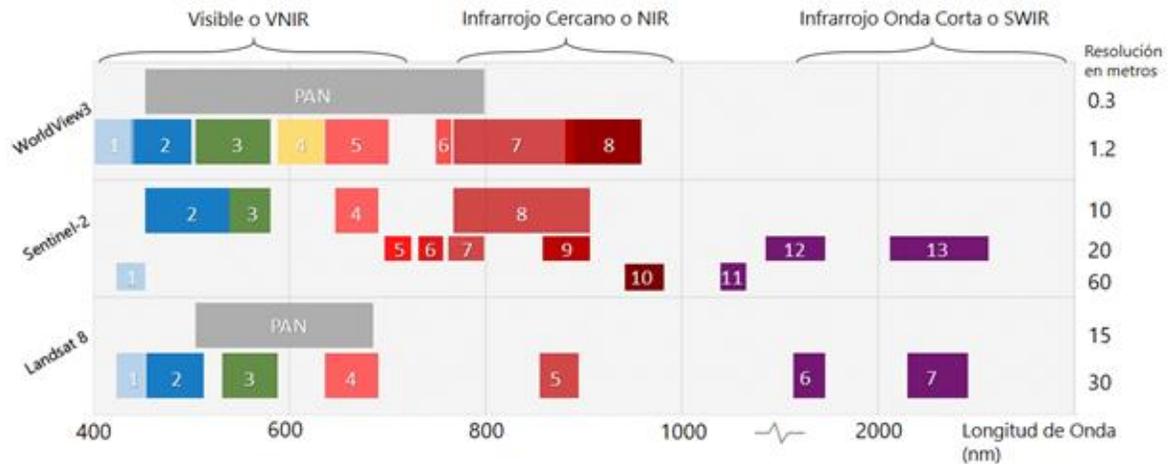


Figura 2. Bandas espectrales de Landsat 8, Sentinel-2 y WorldView-3. Los colores consideran el sector dentro del espectro electromagnético que representan. A la derecha, se especifican las resoluciones espaciales de cada conjunto de bandas.

Delimitación e interpolación de bandas

Con el mapa de clasificación PRED-RES de Mallil como referencia, se realizaron las delimitaciones e interpolaciones de las imágenes provenientes de Landsat 8, Sentinel-2 y WorldView-3 para tres resoluciones: 1,2, 10 y 30 m. Con esto, se evitó la influencia espectral de coberturas distintas a la playa, ya que el mapa de clasificación considera solamente la superficie de ésta, donde se presentan píxeles de “Suelo”, “Plumavit” y “Basura”, siendo estos dos últimos categorizados en esta memoria simplemente como “RAM”. Las interpolaciones para las tres resoluciones se realizaron a través del método bilineal, siendo en el caso de la disminución del tamaño de los píxeles una desagregación espacial o “downscaling”, y el aumento del tamaño de los píxeles una agregación espacial o “upscaling”.

Regresiones entre bandas con equivalencia espectral

Una vez que las imágenes provenientes de los satélites fueron delimitadas a la playa Mallil e interpoladas a las tres resoluciones, se realizaron análisis de regresión para WorldView-3/Landsat 8 y WorldView-3/Sentinel-2 entre las bandas equivalentes espectralmente entre sí. Este análisis estadístico determinó la relación existente de los valores de reflectancia de estas bandas en la zona de la playa, obteniendo el coeficiente de determinación (R^2) para las tres resoluciones antes mencionadas. En consecuencia, se generó una tabla comparativa de los valores de R^2 de las regresiones, con el fin de escoger el satélite que más se ajustara a los

valores de WorldView-3 y que, por ende, fuera útil para la elaboración del modelo de desagregación espacial.

Una vez escogido el satélite, se utilizaron las regresiones de éste con WorldView-3, adjuntando además los valores del Error Cuadrático Medio (RMSE), Desviación Estándar (σ), y Sesgo (Bias), con el fin de visualizar y verificar el ajuste del conjunto de datos existente entre ambos.

Posteriormente, se configuró el modelo de desagregación espacial utilizando las playas de Mallil y Punta Apabón como las zonas de estudio. Para esto, se utilizó la misma escena del satélite seleccionado, con fecha cercana al 17 de febrero de 2017, con el fin de poder comparar los resultados obtenidos del modelo con los mapas de clasificación del proyecto PRED-RES de ambas playas. Al igual que la playa Mallil, la escena del satélite escogido fue delimitada a la playa Punta Apabón e interpolada mediante el método bilineal a la resolución espacial de 1,2 m.

Reflectancia de RAM y Suelo en escena satelital 2017

Se definieron puntos de entrenamientos en aquellos pixeles categorizados como RAM y Suelo por los mapas de clasificación PRED-RES 2017. Con esto, se obtuvieron los promedios de reflectancia para las dos categorías en cada playa. Posteriormente, se analizó la variabilidad de la reflectancia en cada una de las bandas de la escena satelital, escogiendo aquella banda capaz de diferenciar los pixeles de RAM y Suelo.

Funciones de ponderación y rangos de existencia de RAM

Se compararon los valores de las firmas de la librería espectral PRED-RES con los valores de reflectancia de los puntos de entrenamiento de RAM y Suelo en ambas playas de la escena. La comparación se realizó mediante un análisis de regresión para cada categoría, obteniendo dos ecuaciones de regresión lineal, las cuales determinaron las funciones de ponderación para cada categoría.

Las funciones de ponderación obtenidas se utilizaron para acentuar la diferencia de los valores de reflectancia de los pixeles de RAM y Suelo en la escena del satélite seleccionado, funcionando como una ponderación capaz de modificar sus pesos espectrales.

En definitiva, las funciones de ponderación operan, según sea el caso, aplicando la Ecuación 1 para pixeles de RAM, y la Ecuación 2 para pixeles de Suelo. Aquella información la

proporcionó la clasificación previa existente en la playa, que en este caso corresponde a los mapas de clasificación PRED-RES del año 2017.

$$\rho_{ramF} = \rho_{ram} * \alpha + \beta \quad (1)$$

Donde,

ρ_{ramF} : Valor ponderado de la reflectancia en pixel de RAM de la escena satelital [%].

ρ_{ram} : Valor de la reflectancia en pixel de RAM de la escena satelital [%].

α y β : Coeficientes de regresión.

$$\rho_{sueloF} = \rho_{suelo} * \varphi + \theta \quad (2)$$

Donde,

ρ_{sueloF} : Valor ponderado de la reflectancia en pixel de Suelo de la escena satelital [%].

ρ_{suelo} : Valor de la reflectancia en pixel de Suelo de la escena satelital [%].

φ y θ : Coeficientes de regresión.

Una vez aplicada estas funciones de ponderación, se elaboraron criterios de valores de reflectancia para la asignación de los rangos de existencia de RAM. Para ello, se definieron puntos de entrenamiento en los pixeles considerados como RAM, obteniéndose el promedio de sus valores de reflectancia, junto a la desviación estándar de estos valores en la escena satelital de ambas playas.

La existencia de RAM se categorizó en 4 grupos: “No RAM”, “Baja”, “Media” y “Alta”. El criterio utilizado para los rangos se presenta en el Cuadro 1, considerándose el valor promedio de reflectancia de RAM (\bar{x}_{ram}), la desviación estándar (σ), y la reflectancia (ρ).

Cuadro 1. Criterios de rangos de reflectancia para la existencia de RAM.

| Existencia de RAM | Criterio para rangos de reflectancia (ρ) [%] |
|-------------------|--|
| No RAM | $\rho \leq \bar{x}_{ram} - \sigma$ |
| Baja | $\bar{x}_{ram} - \sigma < \rho \leq \bar{x}_{ram} - \frac{3\sigma}{4}$ |
| Media | $\bar{x}_{ram} - \frac{3\sigma}{4} < \rho \leq \bar{x}_{ram} - \frac{\sigma}{2}$ |
| Alta | $\bar{x}_{ram} - \frac{\sigma}{2} < \rho$ |

Cabe destacar que los valores de estos rangos varían para cada lugar de estudio, por lo tanto, se requieren aplicar las funciones de ponderación de RAM y Suelo según una clasificación

previa (como la predispuesta por el proyecto PRED-RES u otra) para luego definir los valores de los rangos de existencia de RAM utilizando el criterio mencionado.

Una vez aplicadas las funciones de ponderación, y definido los rangos de existencia de RAM, se obtuvieron los mapas de existencia de RAM para las playas de Mallil y Punta Apabón, ambos utilizados para la calibración del modelo. Finalmente, para la validación del modelo, se utilizaron nuevas escenas, las cuales se delimitaron según la playa correspondiente, e interpolaron mediante el método bilineal, aplicando luego las funciones de ponderación y los rangos de reflectancia de existencia de RAM.

Calibración del modelo de desagregación espacial para la predicción de RAM

Para la calibración del modelo de desagregación espacial se realizó una evaluación de confiabilidad estadística de los mapas de existencia resultantes, utilizando como referencia los mapas de clasificación PRED-RES 2017, correspondiente a las playas de Mallil y Punta Apabón. Esta evaluación se llevó a cabo mediante el análisis numérico de la matriz de confusión e índice kappa, confrontando la información de una clasificación muy confiable, con aquella información que se pretende evaluar, determinando entonces la exactitud de esta última.

Evaluación de confiabilidad de los mapas de existencia de Mallil y Punta Apabón 2017

En la matriz de confusión, las filas representan las clases de referencia, y las columnas las clases del mapa a evaluar. La diagonal de la matriz corresponde al número de sitios de verificación para los cuales hay concordancia entre el mapa evaluado y los datos de referencia, mientras que los marginales indican errores de asignación. La matriz de confusión determina la precisión global de la clasificación, siendo ésta el número de clasificaciones correctas sobre el total de puntos evaluados por categoría. Según Foody (2002), los mapas que no alcanzan un 85% de precisión global, requieren ser reclasificados. Se incluyeron además los errores de comisión (clasificación errónea), y los errores de omisión (no clasificados) (Aronoff, 1982; Chuvieco, 1996).

También se utilizó el índice kappa (K), determinado por la Ecuación 3. Este coeficiente otorga la coincidencia entre el mapa a evaluar (mapa de existencia de RAM) y el mapa de referencia (mapa de clasificación PRED-RES 2017) utilizado (Renza et al., 2017).

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r (x_{ii}) - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad (3)$$

Donde,

K : Índice kappa.

N : Número total de pixeles de referencia.

X_{ii} : Número de observaciones en la fila i, columna i.

X_{i+} : Total de marginales de la fila i.

X_{+i} : Total de marginales de la columna i.

r : Número de filas en la matriz.

Los máximos y mínimos valores del índice kappa dependen de todos los pixeles de la matriz de confusión; de modo que, si todos los valores que se encuentran fuera de la diagonal principal fueran iguales a cero, existiría concordancia completa, $k = 1$. En cambio, si todos los valores de la diagonal principal fueran nulos, existiría total discordancia, $k = -1$ (Hudson y Ram, 1987; Congalton 1991). Según Landis y Kock (1977), si el índice kappa es superior a 0,8, es poco probable que la clasificación dada haya sido al azar (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valoración del índice kappa.

| Grado de Acuerdo | Kappa (K) |
|------------------|--------------------|
| Sin acuerdo | $K < 0,0$ |
| Insignificante | $0,0 < K \leq 0,2$ |
| Mediano | $0,2 < K \leq 0,4$ |
| Moderado | $0,4 < K \leq 0,6$ |
| Sustancial | $0,6 < K \leq 0,8$ |
| Casi perfecto | $0,8 < K \leq 1,0$ |

Fuente: Landis y Kock, 1997

Una vez obtenidos los valores de la matriz de confusión e índice kappa, se presentó un cuadro resumen con los valores de éstos, realizando la evaluación de confiabilidad de los mapas de existencia resultantes.

Validación del modelo para la predicción de RAM

Para la validación del modelo se consideraron 2 evaluaciones:

- 1) Evaluación temporal de valores de reflectancia de RAM y Suelo en la playa Mallil. Con motivo de la limpieza realizada en la misma playa en agosto de 2018¹, se compararon 3 mapas de existencia: uno previo a la limpieza de playa, otro posterior a la limpieza, y un último de una escena reciente.
- 2) Evaluación de confiabilidad de un mapa de existencia de Punta Apabón con fecha cercana al 18 de marzo de 2018, utilizando como referencia el mapa de clasificación PRED-RES 2018 de Punta Apabón.

Evaluación temporal de reflectancia de RAM y Suelo en la playa Mallil

Se realizó una evaluación temporal del valor de reflectancia de los píxeles pertenecientes a RAM y Suelo en imágenes satelitales disponibles para el periodo 2016-2019. Al igual que la primera escena utilizada del satélite seleccionado, se obtuvieron imágenes corregidas atmosféricamente, delimitándolas e interpolándolas a la resolución espacial de 1,2 m. Finalmente, se definieron puntos de entrenamiento en píxeles correspondientes a RAM y Suelo en la serie de imágenes satelitales disponibles. La evaluación se dispuso mediante una serie temporal.

Considerando la limpieza llevada a cabo en agosto de 2018 en la playa Mallil, se aplicaron las funciones de ponderación y los rangos de existencia definidos por el modelo en 3 escenas diferentes. La primera, corresponde a una escena obtenida previa a la limpieza realizada por la Municipalidad de Quinchao; la segunda, corresponde a una fecha posterior a la limpieza. Por último, se obtuvo el mapa de existencia de RAM para una escena disponible del año 2019. Finalmente, se cuantificó la superficie ocupada por ambas categorías en cada una de estas tres escenas.

Evaluación de confiabilidad del mapa de existencia de Punta Apabón 2018

La segunda parte de la validación del modelo consistió en la evaluación de confiabilidad de un mapa de existencia de Punta Apabón 2018, utilizando como referencia el mapa de clasificación PRED-RES 2018 de la misma playa. Una vez delimitada e interpolada la nueva escena, se aplicaron las funciones de ponderación y rangos de existencia definidos por el

¹ Patricio Fuentes, I. Municipalidad de Quinchao, oficina del medio ambiente, 2019 (comunicación personal).

modelo de desagregación espacial para la playa Punta Apabón. Con ello, se realizó un análisis de los datos de confiabilidad obtenidos por la matriz de confusión y el índice kappa.

En la Figura 3 se encuentra el diagrama resumen para la metodología explicada anteriormente.

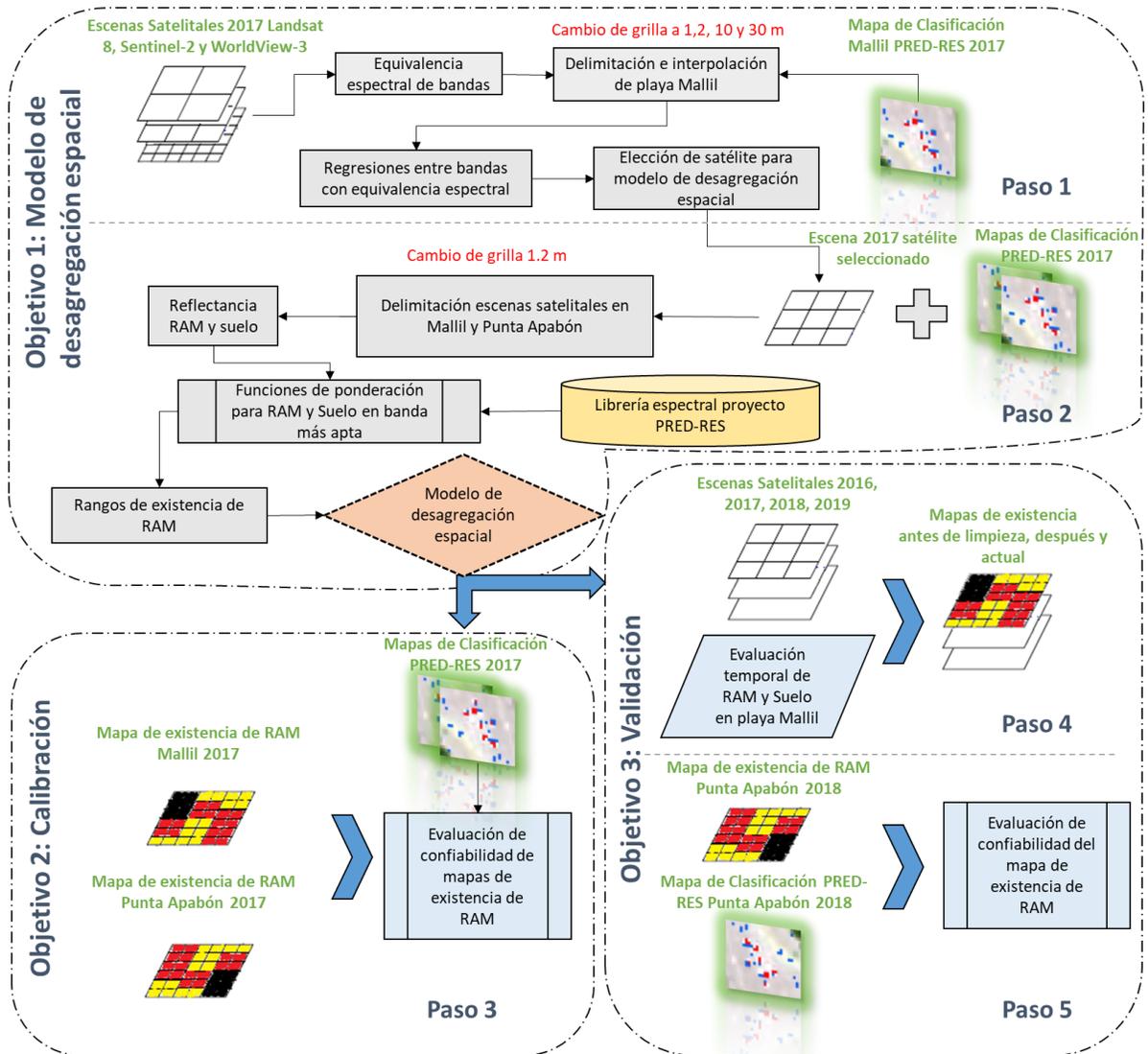


Figura 3. Resumen de la metodología del modelo de desagregación espacial.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Configuración del modelo de desagregación espacial para la identificación de RAM.

Se adquirieron las imágenes de Landsat 8 y Sentinel-2 correspondientes al 20 de marzo y 9 de mayo de 2017 respectivamente, siendo estas las escenas libres de nubosidades más próximas a la fecha requerida.

Equivalencia espectral entre las bandas de Landsat 8, Sentinel-2 y WorldView-3

En el Cuadro 3 se presenta la selección de bandas ordenadas por su posición en el espectro electromagnético, según la longitud de onda central de cada una. Las bandas consideradas para cada satélite abarcan un sector similar en el espectro electromagnético, por lo que se consideraron pertinentes para su comparación y evaluación de valores de reflectancia.

Cuadro 3. Bandas seleccionadas para cada satélite según su equivalencia espectral.

| Satélite | Longitud de onda central de las bandas [μm] | | | | |
|-------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| | Aerosol costero | Azul | Verde | Roja | Infrarrojo cercano (NIR) |
| Landsat 8 | 0,443 (Banda 1) | 0,482 (Banda 2) | 0,562 (Banda 3) | 0,655 (Banda 4) | 0,865 (Banda 5) |
| Sentinel-2 | No considerada | 0,490 (Banda 2) | 0,560 (Banda 3) | 0,665 (Banda 4) | 0,842 (Banda 8) |
| WorldView-3 | 0,425 (Banda 1) | 0,480 (Banda 2) | 0,545 (Banda 3) | 0,660 (Banda 5) | 0,833 (Banda 7) |

Delimitación e interpolación de bandas

En la Figura 4 es posible observar la delimitación de la playa Mallil para cada una de las resoluciones interpoladas, por medio de una composición RGB de WorldView-3 (bandas 5-3-2).

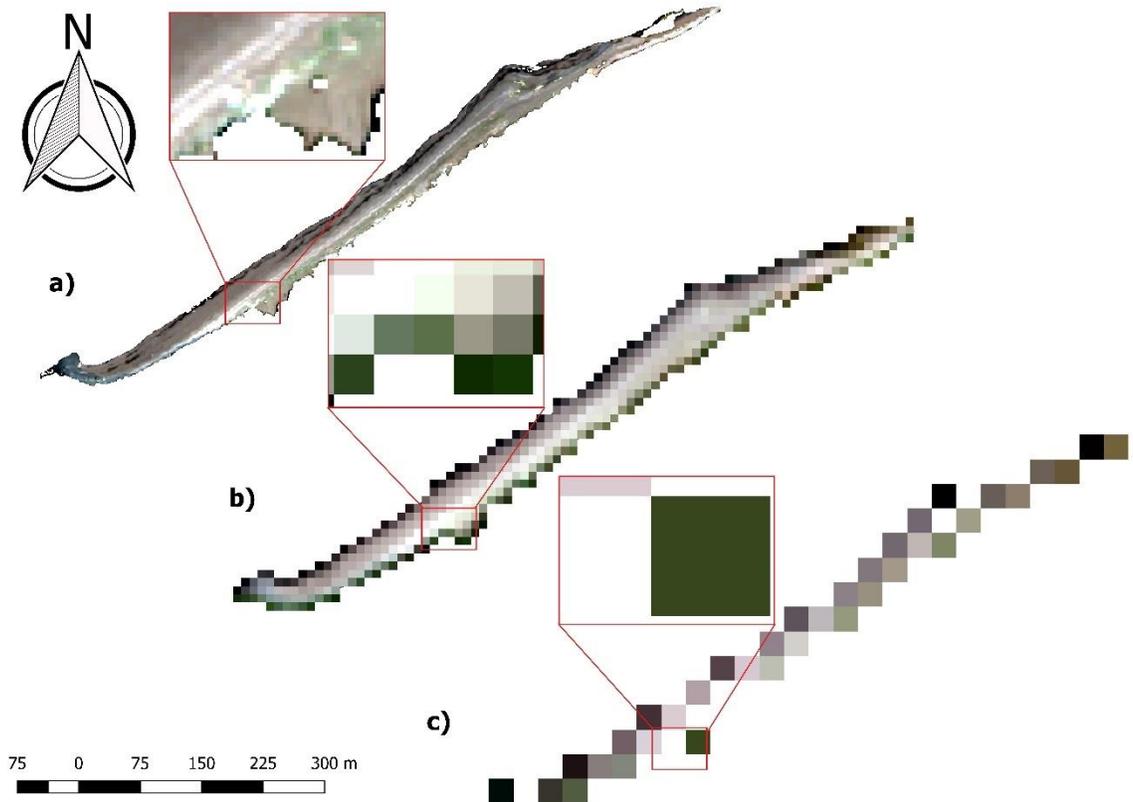


Figura 4. Delimitaciones de la escena WorldView-3 en playa Mallil interpolada a las resoluciones espaciales de a) 1,2 m, b) 10 m y c) 30 m.

Regresiones entre bandas con equivalencia espectral

En el Cuadro 4 se presenta el resumen de R^2 entre los valores de reflectancia de las bandas equivalentes de WorldView-3/Landsat 8 y WorldView-3/Sentinel-2, tanto para los “downscaling” como para los “upscaling” realizados.

En el caso de WorldView-3/Landsat 8 interpolado a 1,2 m, los valores de R^2 van desde los 0,05 para las bandas de aerosol costero (banda 1 en ambos casos), hasta un máximo de 0,45 en la banda del NIR (bandas 5 y 7 respectivamente). Similar resultado fue estimado para las interpolaciones a 10 y 30 m, arrojando un R^2 que va desde los 0,06 para la banda verde en 10 m (banda 3 en ambos casos) y 0,03 para la banda roja en 30 m (bandas 4 y 5 respectivamente), hasta el máximo presentado en ambas resoluciones en la banda del NIR (bandas 5 y 7), con valores de 0,75 y 0,88 respectivamente.

Para WorldView-3/Sentinel-2 el R^2 sube consistentemente, con valores para la resolución a 1,2 m desde los 0,05 en la banda verde (banda 2 de ambos) a 0,53 en la banda del NIR (bandas

7 y 8 respectivamente). En cambio, en las interpolaciones a 10 y 30 m, estos valores van desde los 0,66 y 0,64 en la banda verde, hasta los 0,88 y 0,94 en la banda del NIR.

A diferencia del ajuste con Landsat 8, las regresiones con Sentinel-2 son ajustes fiables para todas las bandas en las resoluciones de 10 y 30 m, especialmente en la banda del NIR. Además, la resolución de 10 m es un tamaño de pixel capaz de visibilizar la variabilidad de reflectancia en el borde costero de las playas. Por lo tanto, para la configuración del modelo de desagregación espacial, se escogieron las imágenes del satélite Sentinel-2.

Cuadro 4. Tabla resumen de los coeficientes de determinación (R^2) entre bandas de WorldView-3/Landsat 8 y WorldView-3/Sentinel-2.

| Satélite | Banda | Coeficiente de Determinación (R^2) | | |
|------------------------|-------------------|--|------|------|
| | | 1,2 m | 10 m | 30 m |
| WorldView-3/Landsat 8 | Banda 1 / Banda 1 | 0,05 | 0,09 | 0,09 |
| | Banda 2 / Banda 2 | 0,08 | 0,07 | 0,08 |
| | Banda 3 / Banda 3 | 0,06 | 0,06 | 0,04 |
| | Banda 5 / Banda 4 | 0,08 | 0,07 | 0,03 |
| | Banda 7 / Banda 5 | 0,45 | 0,75 | 0,88 |
| WorldView-3/Sentinel-2 | Banda 2 / Banda 2 | 0,05 | 0,66 | 0,64 |
| | Banda 3 / Banda 3 | 0,13 | 0,71 | 0,71 |
| | Banda 5 / Banda 4 | 0,07 | 0,69 | 0,67 |
| | Banda 7 / Banda 8 | 0,53 | 0,88 | 0,94 |

En las figuras 5 y 6 se presentan los gráficos de dispersión correspondientes a las regresiones entre WorldView-3 y Sentinel-2, tanto para el “downscaling” a 1,2 m, como para el “upscaling” a 10 m. En general, se observa una mayor dispersión en las regresiones realizadas a 1,2 m, mientras que a 10 m se ve un mayor ajuste entre los datos, tal y como lo determina el R^2 antes mencionado.

Junto al R^2 , se presentan la desviación estándar (σ), Bias y el RMSE para cada regresión. En términos de desviación estándar, la diferencia más grande se encuentra en la comparación de las bandas del NIR, siendo en esta banda donde se acumula el mayor nivel de diferencia de valores de reflectancia en ambas resoluciones. En el caso del Bias, los valores menores se encuentran en las bandas rojas, verdes y azules, siendo el menor -3,79 para la comparación de banda azul a 1,2 m, y 1,31 en la banda roja a 10 m. Estos valores negativos del Bias significan que las reflectancias de Sentinel-2 están subestimadas en comparación con las magnitudes de las reflectancias de WorldView-3. Finalmente, los valores del RMSE en las regresiones, indican una mayor diferencia en el conjunto de valores para el caso del “downscaling”, mientras que en el “upscaling” los valores de reflectancia de los conjuntos de datos son más cercanos. Específicamente, los valores mínimos de RMSE se encuentran

en la banda roja, con 2,25 y 1,41 para cada resolución espacial (1,2 y 10 m respectivamente), mientras que los valores máximos están en la banda del NIR, siendo 6,48 y 3,56 para 1,2 y 10 m respectivamente, coincidiendo con la interpretación de los valores de σ .

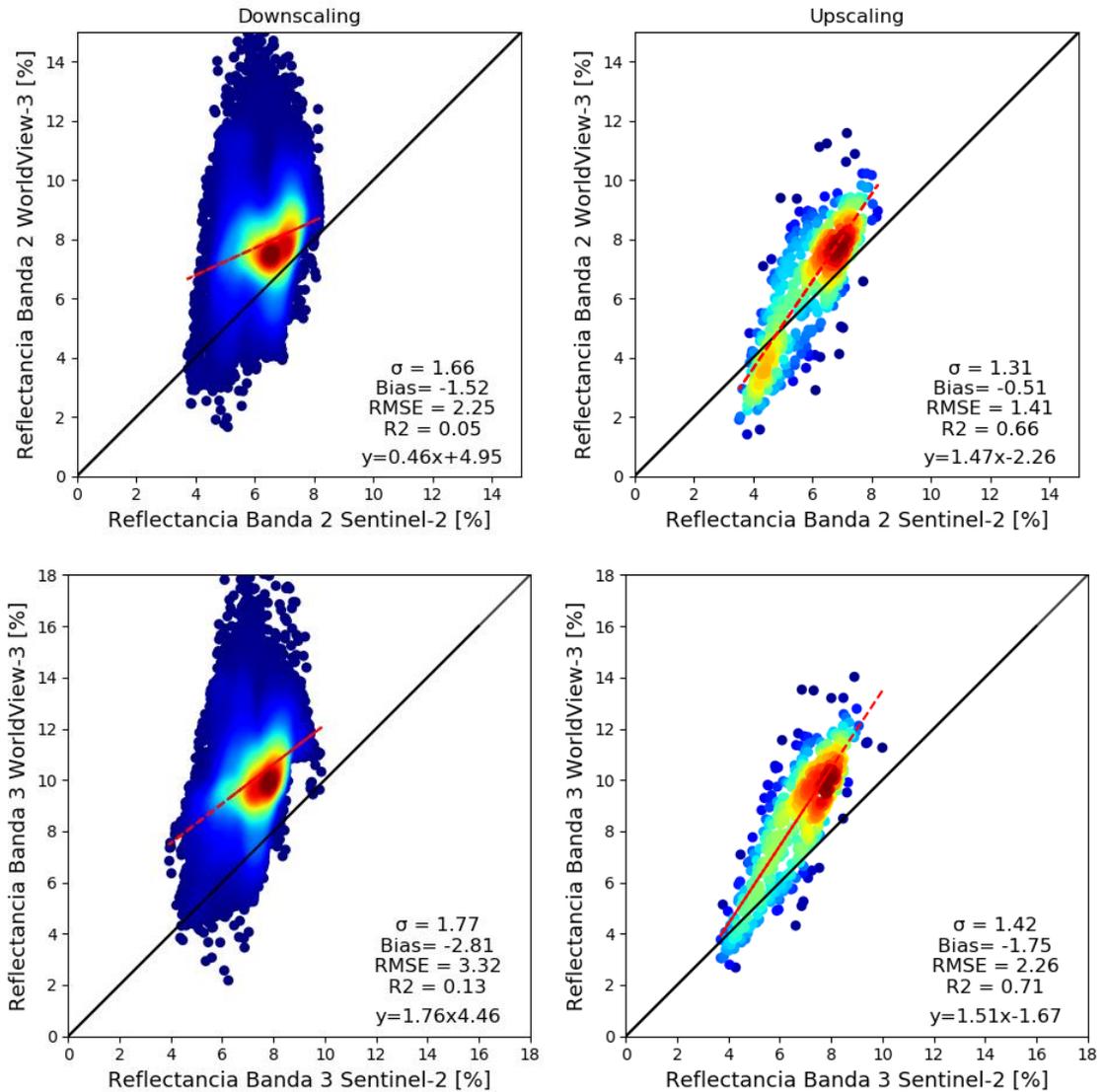


Figura 5. Gráficos de dispersión y densidad de reflectancia entre WorldView-3 y Sentinel-2. A la izquierda se encuentra la relación en el “downscaling” de 1,2 m (N = 24979 datos). A la derecha, se presenta la relación en el “upscaling” de 10 m (N = 519 datos). Color rojo indica mayor frecuencia y azul menor frecuencia. Se incluye la desviación estándar (σ), Bias, RMSE, R² y la ecuación de la regresión lineal (línea roja punteada).

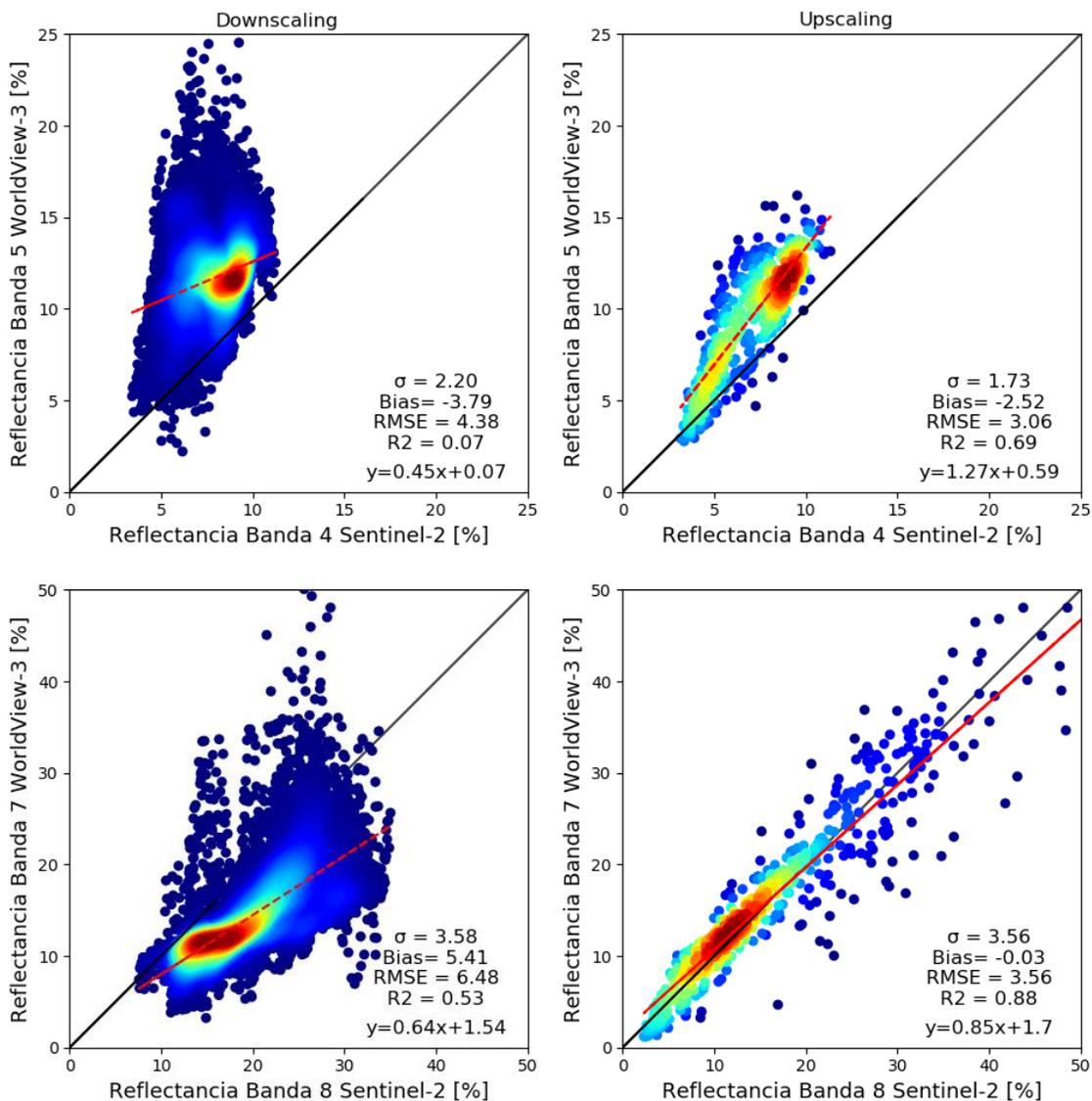


Figura 6. Gráficos de dispersión y densidad de reflectancia entre WorldView-3 y Sentinel-2. A la izquierda se encuentra la relación en el “downscaling” de 1,2 m (N = 24979 datos). A la derecha, se presenta la relación en el “upscaling” de 10 m (N = 519 datos). Color rojo indica mayor frecuencia y azul menor frecuencia. Se incluye la desviación estándar (σ), Bias, RMSE, R^2 y la ecuación de la regresión lineal (línea roja punteada).

Reflectancia de RAM y Suelo en escena satelital 2017

En la Figura 7 se presenta el promedio de los valores de reflectancia obtenidos en las playas Mallil y Punta Apabón para cada una de las bandas de la escena de Sentinel-2, considerando las categorías RAM y Suelo.

En la figura se puede apreciar que la reflectancia de los RAM en la banda del NIR, a comparación con las demás bandas del espectro, aumenta en un 15 y un 8% aproximadamente en las playas Mallil y Punta Apabón respectivamente. Específicamente, en las bandas azul, verde y roja, no se supera el 10% de reflectividad, en cambio, en la región del NIR, la reflectancia alcanza un 25% en Mallil, y un 17% en Punta Apabón. Por su parte, la firma espectral del Suelo tiene un comportamiento similar en ambas playas, destacando por sus bajos valores de reflectancia, oscilando entre el 7 y el 12% a lo largo del espectro; teniendo su valor más alto en la región del NIR. La diferencia de la reflectancia en la banda del NIR para RAM y Suelo varía en un 13 y un 7% aproximadamente en las playas Mallil y Punta Apabón respectivamente.

Debido a que los pixeles de RAM pueden diferenciarse de los pixeles de Suelo en la banda del NIR de las imágenes desagregadas de Sentinel-2, se seleccionó esta banda para la elaboración de las funciones de ponderación del modelo, y su posterior calibración y validación.

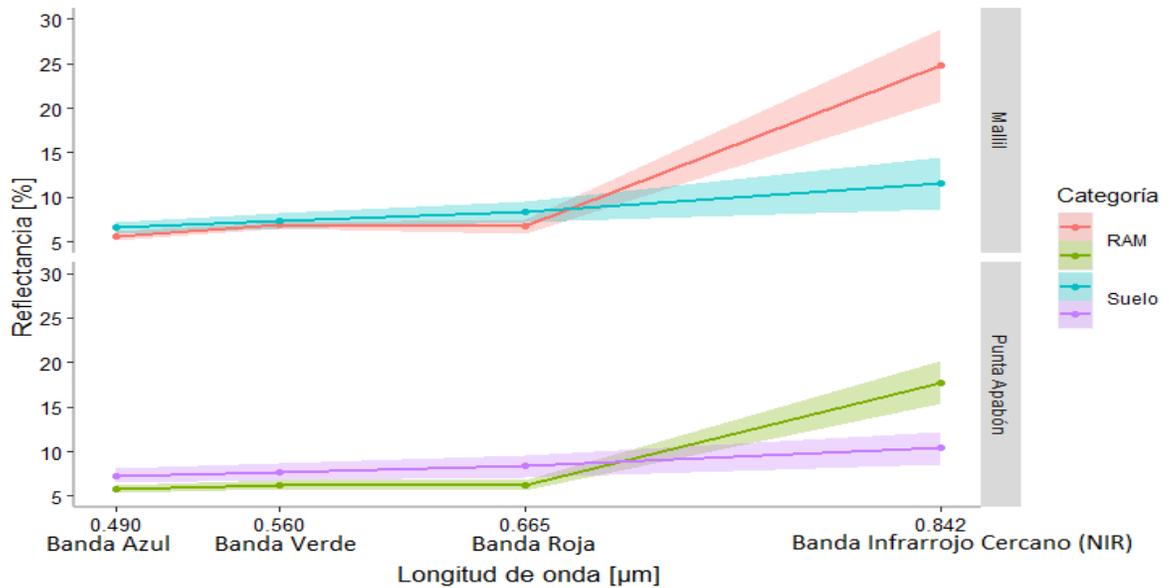


Figura 7. Promedio de la reflectancia para las clases RAM y Suelo en bandas de Sentinel-2.

Funciones de ponderación y rangos de existencia de RAM

Para las funciones de ponderación se utilizaron las firmas espectrales de la librería del proyecto PRED-RES, así como también los valores de reflectancia de la escena de Sentinel-2. La librería contiene la firma de 24 elementos de RAM, por lo que se definieron 24 puntos de entrenamientos diferentes en la escena de Sentinel-2. En cambio, la librería recoge la firma de 8 elementos categorizados como Suelo, definiéndose entonces 8 puntos de entrenamientos para el Suelo en la escena de Sentinel-2 (Apéndice 1).

Las regresiones para RAM y Suelo se presentan en la Figura 8, resultando ecuaciones de regresión con un R^2 alto (mayor a 0,6), demostrando un ajuste de los valores de reflectancia entre la librería y la escena de Sentinel-2. Se destaca que, para la regresión de Suelo, los valores de reflectancia de Sentinel-2 coinciden en magnitud con los de la librería espectral, comprobándose por los bajos valores de desviación estándar ($\sigma = 1,07$), Bias (1,43) y RMSE (1,78). En la regresión de los RAM, pese a existir un ajuste de 0,61 según el R^2 , la σ y el RMSE arrojan valores altos (18,69 y 35,84 respectivamente), demostrando una acumulación de mayor nivel de diferencia de valores de reflectancia entre los conjuntos de datos, y que consisten, según el valor negativo del Bias, en una subestimación de la magnitud de las reflectancias de Sentinel-2 en comparación con las existentes en la librería espectral.

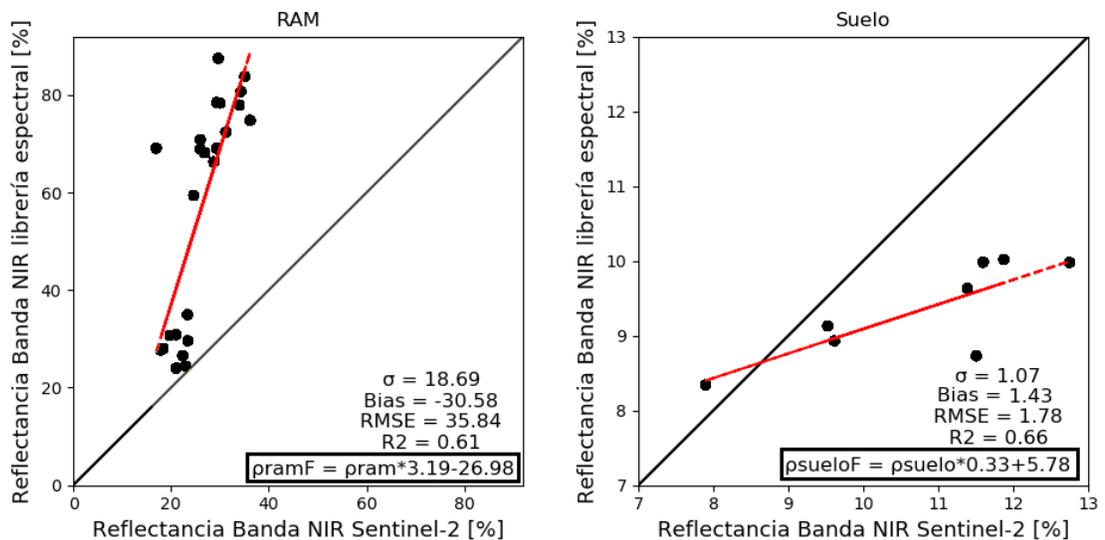


Figura 8. Gráficos de dispersión de valores de reflectancia entre la librería espectral PRED-RES y Sentinel-2. A la izquierda se encuentra la regresión para la categoría RAM (N = 24 datos), mientras que el gráfico de la derecha representa la regresión de la categoría Suelo (N = 8 datos).

Aplicadas las funciones de ponderación, el valor promedio de reflectancia de RAM en la playa Mallil es de un 45,15%, mientras que su desviación estándar es de 17,31. En cambio, para la playa Punta Apabón, el valor promedio de reflectancia de RAM determinado es de 19,73%, con una desviación estándar de 9,82. En consecuencia, los rangos de existencia de RAM para la playa Mallil y Punta Apabón quedaron de la siguiente manera (Cuadro 5).

Cuadro 5. Resultado de rangos de existencia de RAM para playa Mallil y Punta Apabón.

| Playa | Existencia de RAM | Criterios |
|--------------|-------------------|---------------------------------------|
| | | Rangos de reflectancia (ρ) [%] |
| Mallil | No RAM | $\rho \leq 27,83$ |
| | Baja | $27,83 < \rho \leq 32,17$ |
| | Media | $31,17 < \rho \leq 36,49$ |
| | Alta | $36,49 < \rho$ |
| Punta Apabón | No RAM | $\rho \leq 9,91$ |
| | Baja | $9,91 < \rho \leq 12,36$ |
| | Media | $12,36 < \rho \leq 14,82$ |
| | Alta | $14,82 < \rho$ |

Calibración del modelo de desagregación espacial para la predicción de RAM

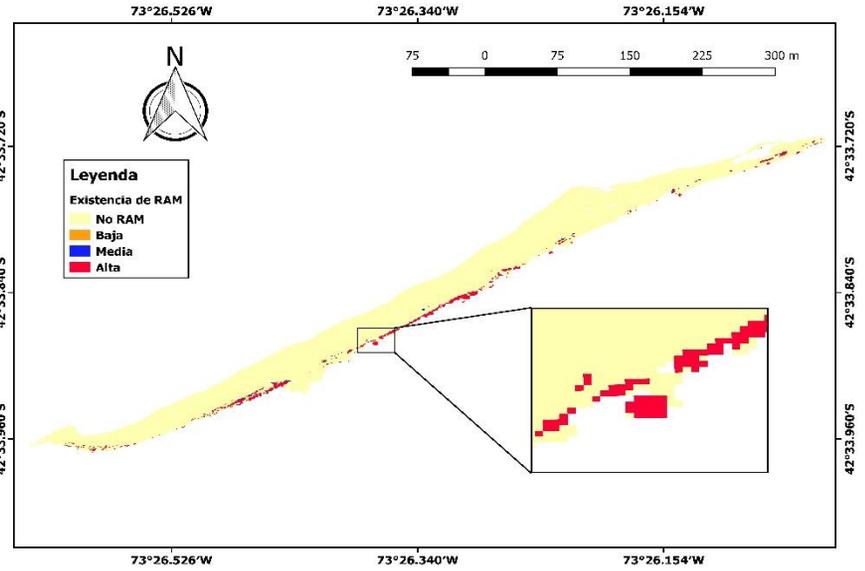
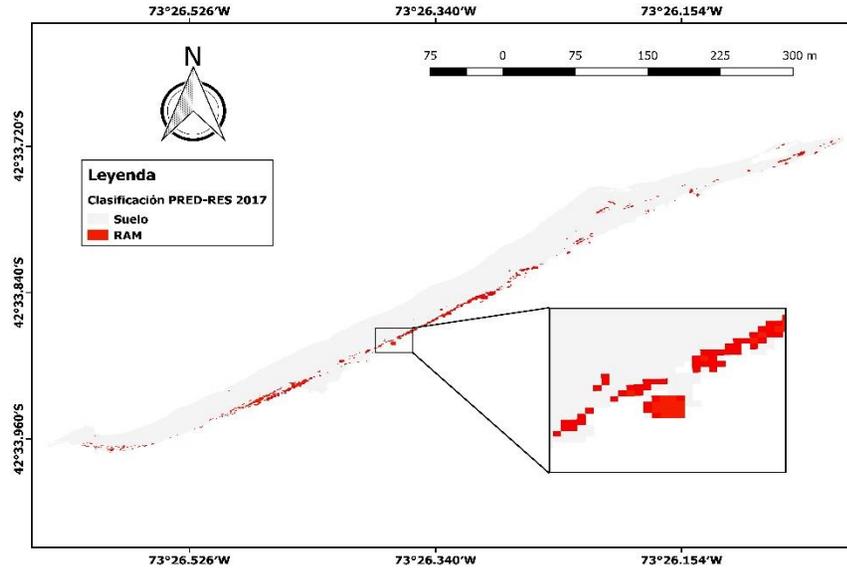
Evaluación de confiabilidad de los mapas de existencia de Mallil y Punta Apabón 2017

En la Figura 9, se presentan los mapas de existencia de RAM 2017 para ambas playas, junto a los mapas de clasificación PRED-RES 2017 de referencia.

El mapa de clasificación PRED-RES de Mallil 2017 consta de una clasificación supervisada con un total de 3,59 ha, siendo 0,15 ha RAM, y 3,45 ha Suelo. Asimismo, el mapa resultante del modelo de desagregación para la playa Mallil, considerando Alta, Media y Baja existencia, consta de 0,14 ha de RAM, y 3,46 ha de Suelo, misma superficie cubierta al considerar solamente la Alta y Media existencia.

Para el mapa de clasificación PRED-RES de Punta Apabón 2017 se cuantificaron, de un total de 2,12 ha, 0,22 ha de RAM, y 1,90 ha de Suelo. En cambio, el mapa de existencia resultante de Punta Apabón, tomando en cuenta las tres existencias, tiene un total de 0,44 ha de RAM, y 1,68 ha de Suelo. No obstante, considerando sólo Alta y Media existencia de RAM, se encontraron 0,23 ha de RAM, y 1,89 ha de Suelo.

Mallil



Punta Apabón

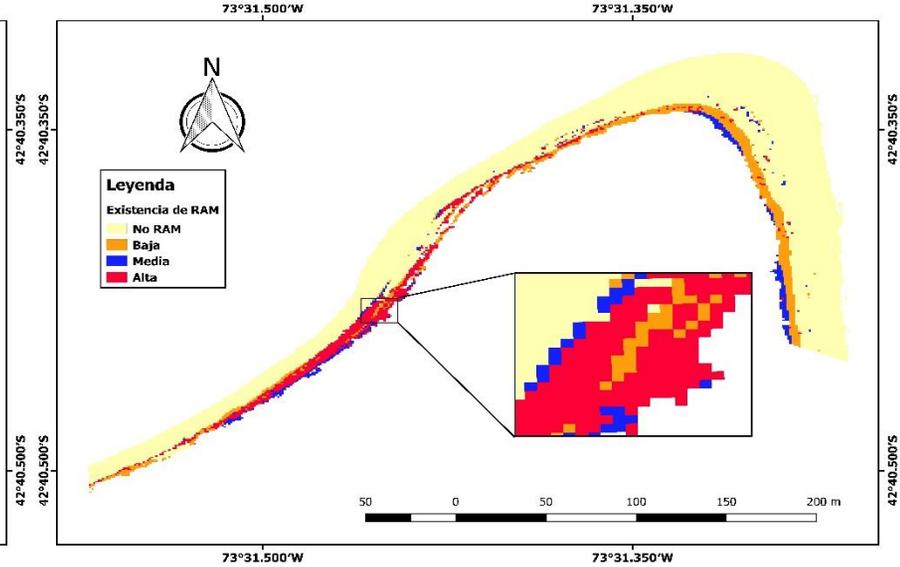
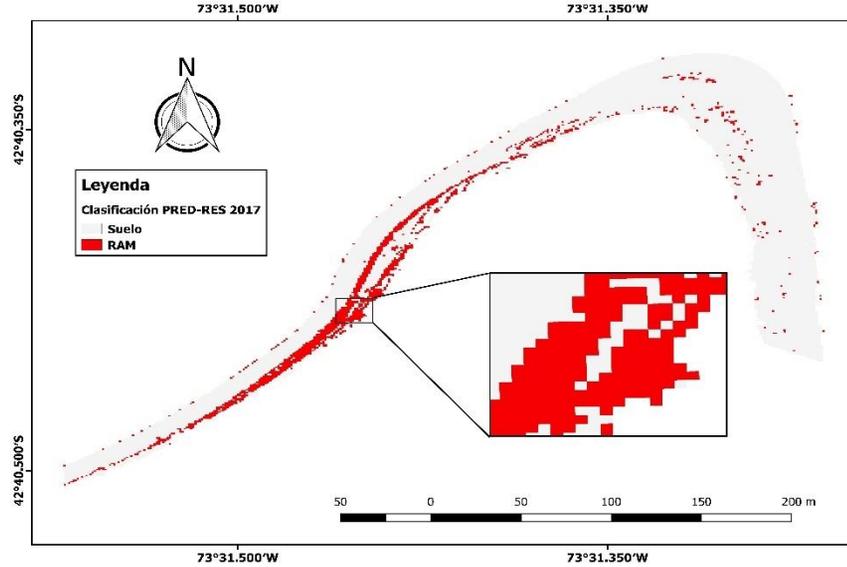


Figura 9. Comparación mapas de existencia de RAM mayo 2017 y mapas de clasificación PRED-RES 2017 en las playas de Mallil y Punta Apabón. A la izquierda, se aprecian los mapas de clasificación PRED-RES; a la derecha, los mapas de existencia resultantes.

En el Cuadro 6 se presenta el resumen de la matriz de confusión, junto al índice kappa de cada comparación. Además, se incluye el área representativa de los píxeles de RAM y Suelo correspondiente a cada mapa de existencia.

Para el caso de la playa Mallil, el mapa de existencia se cataloga como “Casi perfecto” según la valoración del índice kappa, considerando tanto las tres existencias, como solamente la existencia Alta y Media. Además, la precisión global es cercana al 100%, con una omisión de píxeles de RAM en ambos casos, de un 7,43 y 10,58% respectivamente. Estos porcentajes también se ven reflejados en un 0,32 y 0,46% de comisión de Suelo.

Por otro lado, en la playa Punta Apabón, existe una sobreestimación de píxeles de RAM al considerar las tres existencias, con una valoración del índice kappa “Moderado” (0,46), arrojando una precisión global de 85,47%, ajustándose al valor mínimo estandarizado y aceptado para la clasificación de un mapa. También hubo un porcentaje importante de omisión de RAM y Suelo (19,71 y 13,93%). Sin embargo, considerando sólo las existencias Alta y Media del mapa, la exactitud de la clasificación aumenta considerablemente, con una valoración del índice kappa “Sustancial” (0,73), y una precisión global de 94,96%. La precisión de esta clasificación se refleja en porcentajes bajos de omisión y comisión para Suelo, y un porcentaje de omisión de RAM que se complementa con la comisión de la misma categoría (22,38 y 25,12%, respectivamente).

Cuadro 6. Evaluación de confiabilidad mapas de existencias de Mallil y Punta Apabón.

| Playa | con/sin Baja exist. | Área RAM | Área Suelo | Matriz de confusión con clasificación PRED-RES | | | | | |
|-----------------|---------------------------|-------------|---------------|--|---------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|
| | | | | K | Precisión Global | Omisión RAM | Omisión Suelo | Comisión RAM | Comisión Suelo |
| | | [ha] | | [%] | | | | | |
| Mallil | con | 0,14 | 3,46 | 0,96 | 99,68 | 7,43 | 0,00 | 0,00 | 0,32 |
| | sin | 0,14 | 3,46 | 0,94 | 99,55 | 10,58 | 0,00 | 0,00 | 0,46 |
| Punta Apabón | con | 0,44 | 1,68 | 0,46 | 85,47 | 19,71 | 13,93 | 59,93 | 2,59 |
| | sin | 0,23 | 1,89 | 0,73 | 94,96 | 22,38 | 3,02 | 25,12 | 2,61 |

Validación del modelo para la predicción de RAM

Evaluación temporal de reflectancia de RAM y Suelo en la playa Mallil

La primera parte de la validación del modelo se presenta en la Figura 10, correspondiente a la serie temporal de la reflectancia de RAM y Suelo de Mallil en 10 escenas (entre 2016 y 2019). En ésta, se visualiza que la reflectancia para el rango de escenas entre noviembre de 2016 y julio de 2018 tiene poca variabilidad, manteniéndose sobre el 20%. Para la fecha de agosto de 2018, el valor de la reflectancia baja abruptamente, colocándose bajo el 18%. Esto coincide con la limpieza realizada por la municipalidad, por lo que el bajo valor de la reflectancia en las zonas de RAM se condice específicamente por ese acontecimiento.

Luego, en las siguientes fechas, se ve un progresivo aumento de la reflectancia en la zona categorizada originalmente como RAM, registrándose, en la escena de marzo de 2019, valores de reflectancia similares a las de mayo de 2017. Por su parte, en la serie temporal del Suelo, no existen indicios de presencia de nuevos RAM, ya que su variabilidad es mínima, fluctuando entre el 10 y 13% aproximadamente.

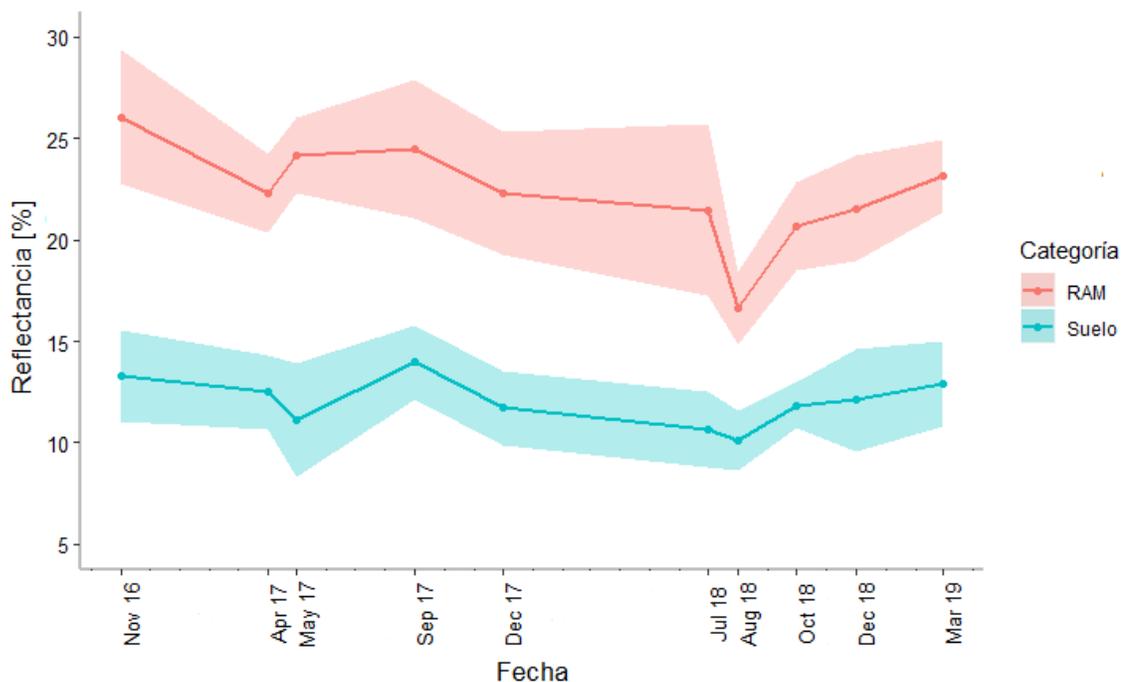


Figura 10. Serie temporal de reflectancia de RAM y Suelo en la playa Mallil para las escenas del periodo 2016-2019 (N= 10 escenas).

En la Figura 11 se presentan los mapas de existencia de RAM para julio de 2018 (previo a la limpieza), agosto de 2018 (posterior a la limpieza) y marzo de 2019 (acumulación).

El mapa de existencia de julio de 2018 tiene resultados similares al mapa de clasificación PRED-RES 2017 de Mallil. Puesto que, considerando las tres existencias, la superficie ocupada por los RAM es de 0,13 ha, y la de Suelo 3,47 ha. Asimismo, al cuantificar solamente las existencias Alta y Media, la superficie de RAM abarca un total de 0,12 ha, mientras que la superficie de Suelo 3,48 ha.

Tal y como se puede apreciar en la serie temporal, se cuantifica una baja importante de la cantidad de RAM para el mapa de existencia de agosto, ya que, considerando todas las existencias, este arroja un total de 0,10 ha de RAM, y 3,50 ha de Suelo. Sin embargo, se acentúa y confirma la limpieza al considerarse solamente las existencias Alta y Media, con un total 0,04 ha de RAM, y 3,56 ha de Suelo. Esta baja es equivalente a un 71% menos de los pixeles clasificados con existencia Alta y Media de RAM en julio de 2018 (previo a la limpieza).

Finalmente, en la última escena de marzo de 2019, la superficie ocupada por RAM vuelve a repetirse, resultando de una progresiva acumulación desde agosto de 2018 (como se pudo ver en la serie temporal). Precisamente, para las tres existencias de RAM, se cuantifican 0,14 ha de RAM, y 3,46 ha de Suelo. De igual modo, considerando solamente las existencias Alta y Media, la superficie abarcada se repite.

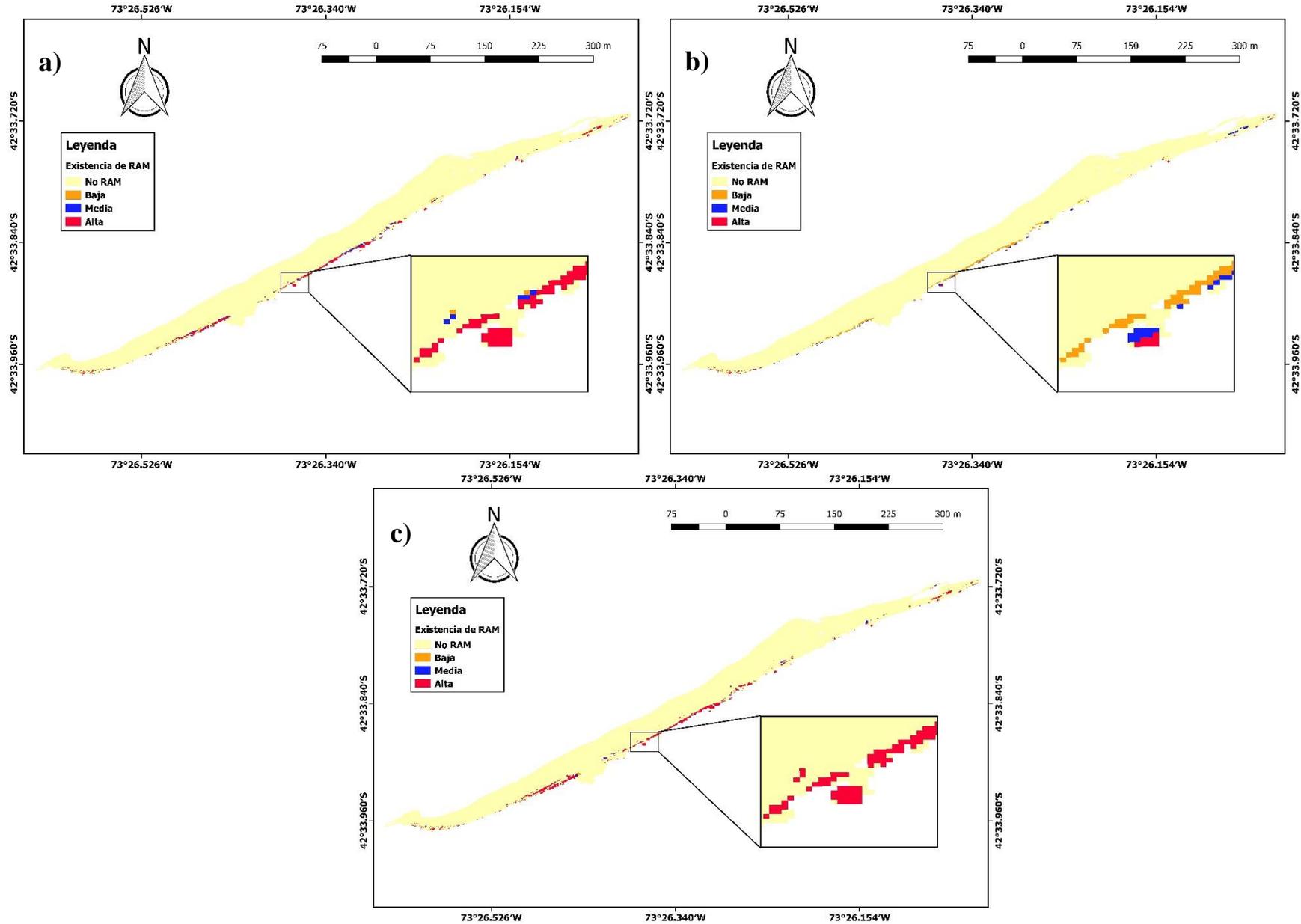


Figura 11. Mapas de existencia de RAM. En a) julio de 2018 (previo a la limpieza), b) agosto de 2018 (después de la limpieza) y c) marzo de 2019 (acumulación).

Evaluación de confiabilidad del mapa de existencia de Punta Apabón 2018

En la segunda parte de la validación se utilizó una escena de Sentinel-2 del 24 de abril de 2018, aplicando el modelo de desagregación elaborado. En la Figura 12 se aprecian las cartografías del mapa de clasificación PRED-RES y el mapa de existencia resultante para determinada fecha.

El mapa de clasificación PRED-RES tiene un total de 1,94 ha, con 0,38 ha de RAM, y 1,56 ha de Suelo. En cambio, en el mapa de existencia resultante, considerando las tres existencias, se cuantifican 0,42 ha de RAM, y 1,52 ha de Suelo. Mientras que, al considerar sólo las existencias Alta y Media, la superficie de RAM baja a 0,19 ha, y la de Suelo aumenta a 1,74 ha.

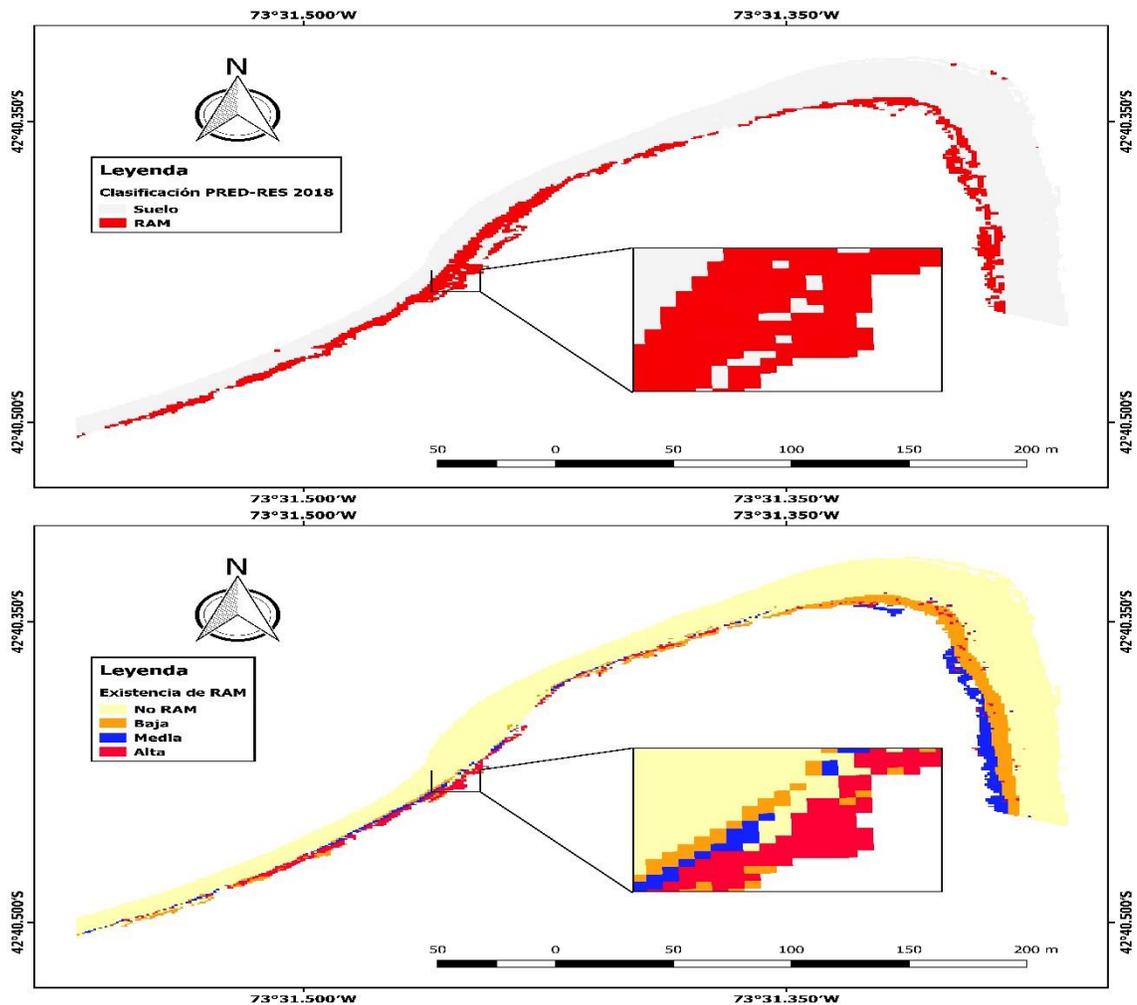


Figura 12. Comparación mapa de clasificación PRED-RES 2018 con mapa de existencia de RAM abril 2018 en Punta Apabón.

Finalmente, en el Cuadro 7, se agregan los valores de la matriz de confusión e índice kappa. Considerando las tres existencias, la valorización del índice kappa arroja un resultado “Moderado” de 0,57, con una precisión global que indica el éxito de la clasificación (85,94%). Se destaca un porcentaje considerable de omisión de RAM, pero que se complementa con la comisión de RAM involucrada en el mapa (30,96 y 36,91% respectivamente). En cambio, al considerar las existencias Alta y Media, la exactitud de la clasificación disminuye, con un índice kappa “Moderado” (0,44), y una precisión global de 85,74%, la cual se refleja en una omisión importante de RAM (60,84%).

Cuadro 7. Evaluación de confiabilidad del mapa de existencia de RAM de Punta Apabón 2018.

| con/ sin Baja exist. | Área RAM [ha] | Área Suelo | Matriz de confusión con clasificación PRED-RES 2018 de Punta Apabón | | | | | |
|----------------------------|---------------------|---------------|---|---------------------|----------------|-------------------------|-----------------|-------------------|
| | | | K | Precisión Global | Omisión RAM | Omisión Suelo [%] | Comisión RAM | Comisión Suelo |
| con | 0,42 | 1,52 | 0,57 | 85,94 | 30,96 | 9,90 | 36,91 | 7,77 |
| sin | 1,20 | 1,74 | 0,44 | 85,74 | 60,84 | 2,82 | 22,74 | 13,31 |

Este mapa de existencia de RAM muestra que, una vez transcurrido el tiempo, la Baja existencia de RAM toma relevancia para su exactitud. Igualmente, es importante destacar que gran parte de los píxeles categorizados con Baja existencia consisten en píxeles de Suelo transformados en píxeles de RAM (comisión de Suelo), por lo que sus valores de reflectancia están condicionados por la función de ponderación de Suelo, algoritmo que no permite la acentuación de los valores de reflectancia tal cual como lo hace la función de RAM.

DISCUSIÓN

Según Acuña-Ruz et al. (2018) la obtención de escenas satelitales de alta resolución espacial (entre 1 y 5 m), tienen costos que van desde los 1,28 a 29 USD/km², con un pedido mínimo exigido por los proveedores RapidEye y WorldView-3, de 3500 y 100 km² respectivamente. Estas imágenes permiten cuantificar de manera precisa la extensión de RAM, sin embargo, los costos económicos limitan la posibilidad de un monitoreo continuo de las playas, necesitando como mínimo 2900 USD para cada adquisición. No obstante, En esta memoria se demuestra que con simplemente una imagen de alta resolución como cartografía previa, se puede obtener la existencia de RAM de manera continua en el tiempo en la playa de estudio, obteniéndose mediante imágenes satelitales con 10 m de resolución espacial (Sentinel-2).

Los mapas de existencia de RAM resultantes demuestran consistencia según los valores de la evaluación de confiabilidad. Precisamente, en la calibración del modelo, el mapa de Mallil constó con una exactitud mayor que Punta Apabón al compararlo con los mapas de clasificación PRED-RES 2017 de referencia. Mallil tuvo una precisión global mayor al 99%, y una valoración “Casi Perfecta” según el índice kappa, mientras que en Punta Apabón, sólo al considerar Alta y Media existencia de RAM, la exactitud fue consistente. Para la validación del modelo en Punta Apabón, fue distinto, esta vez la Baja existencia aumentó la exactitud del mapa, aumentando por ende la confiabilidad de la clasificación realizada en términos de precisión e índice kappa. Por su parte, la evaluación temporal de la playa Mallil en el periodo 2016-2019, determinó una baja consistente en el valor de reflectancia para agosto de 2018, fecha en la cual efectivamente se realizó una limpieza en la playa por parte de la Municipalidad de Quinchao. Con ello, se elaboraron los mapas de existencia para el antes y después de esta limpieza, así como también para una escena reciente, la cual estima una acumulación de RAM similar a la que existía previa a la limpieza realizada.

Actualmente la capacidad de este modelo puede permitir el monitoreo continuo de las playas Mallil y Punta Apabón, así como también en cualquier otra playa existente. Junto a los estudios realizados por Bravo et al (2009); Gall y Thompson (2015); Lebreton et al. (2018); Chiba et al. (2018); Acuña-Ruz et al. (2018), todos autores relacionados a los efectos de los RAM depositados en los distintos ecosistemas, se podría determinar el impacto real de éstos, y sus posibles causantes. Esto ayudaría a que las comunidades y las instituciones puedan afrontar el problema que ha transformado el paisaje de las playas, y que ha ido generando externalidades negativas aún desconocidas en torno al ámbito económico, social y ambiental (Stefatos et al., 1999; Mouat et al., 2009; Lebreton et al., 2018).

Para fortalecer el modelo de desagregación espacial se puede incorporar una compensación de las imágenes desagregadas. Esta compensación se puede llevar a cabo a través de una fusión de imágenes, y tendría como fin lograr la identificación de RAM sin la necesidad de tener una cartografía previa de ésta. En consecuencia, los costos económicos se reducirían al mínimo, ya que las imágenes de Sentinel-2 se obtienen de manera gratuita.

Finalmente, pese a que el modelo se elaboró sólo para imágenes de Sentinel-2, no se descarta la posibilidad de que Landsat 8 pueda ser útil para la generación de un modelo de desagregación espacial en playas de mayor ancho. Esto debido a que las playas monitoreadas en este estudio corresponden a una franja costera pequeña (menores a 40 metros de ancho), por lo que un pixel de Landsat 8 con resolución espacial de 30 m es capaz de abarcar el ancho de la playa casi completa (desde el límite de la vegetación hasta el agua). Por ende, las imágenes con esa resolución espacial no perciben los distintos elementos presentes en la playa.

CONCLUSIÓN

En esta memoria de título se elaboró un modelo de desagregación espacial o “downscaling” para la predicción de Residuos Antropogénicos Marinos (RAM) en las playas Mallil y Punta Apabón, Chiloé. Este modelo fue generado para Sentinel-2, el cual consta de una resolución espacial de 10 m, y una temporalidad de 5 días. Para la calibración y validación de este modelo, se utilizaron las herramientas del proyecto PRED-RES como referencia, permitiendo compatibilizar las diferentes escalas utilizadas por los sensores remotos de Sentinel-2 y WorldView-3 en la predicción de RAM.

Los resultados expuestos del modelo de desagregación espacial, como son los mapas de existencia de RAM, contienen una exactitud adecuada según los valores expuestos por la matriz de confusión e índice kappa. Específicamente, los mapas de existencia resultantes arrojan una precisión global mayor al 85%, así como un grado de acuerdo mayor a “Moderado” según la valoración del índice kappa ($K > 0,4$). Además, mediante la evaluación temporal realizada, se logra percibir la limpieza realizada en la playa Mallil en agosto de 2018, obteniendo los mapas de existencia de RAM del antes y después de la limpieza, advirtiendo además la reciente y progresiva acumulación de RAM en la zona para marzo de 2019.

Este modelo presenta una oportunidad para el monitoreo continuo de RAM en cualquier playa existente. La constante amenaza de los RAM ha generado repercusiones en el ámbito económico, social y, especialmente, en el ambiental. Por ello, la predicción de RAM debiese ser el primer paso por realizar en las playas afectadas, permitiendo dimensionar la problemática, para luego monitorear su avance y utilizar la información obtenida en la ejecución de planes y proyectos relacionados a la prevención y descontaminación de las playas.

BIBLIOGRAFÍA

Acuña-Ruz, T.; D. Uribe; R. Taylor; L. Amézquita; M.C. Guzmán; J. Merrill et al. 2018, Nov. Anthropogenic marine debris over beaches: Spectral characterization for remote sensing applications. *Remote Sensing of Environment*, 217(62): 309-322.

Andrade, B.; F. Arenas y J. Quense. 2000. Caracterización ambiental aplicada y ordenamiento del territorio: la costa oriental de la Isla Grande de Chiloé. [en línea]. *Revista de Geografía Norte Grande*, 27(1): 123-132. Recuperado en: <<https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/10439/000313818.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Consultado el: 02 de junio de 2018.

Aronoff, S. 1982, Jan. Classification accuracy: a user approach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(8): 1299-1307.

Astudillo, J.; M. Bravo; C. Dumont and M. Thiel. 2009, May. Detached aquaculture buoys in the SE Pacific: potential dispersal vehicles for associated organisms. [en línea]. *Aquatic Biology*, 5(3): 219-231. Recuperado en: <<http://www.bedim.cl/publications/AstudilloetalQUABIOL2009.pdf>> Consultado el: 10 de mayo de 2018.

Barnes, K.; F. Galgani; R. Thompson y M. Barlaz. 2009, Jul. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. [en línea]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 364(1526): 1985-1998. Recuperado en: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstb.2008.0205>> Consultado el: 10 de mayo de 2018.

Bergmann, M.; M. B. Tekman and L. Gutow. 2017, Apr. Marine litter: Sea change for plastic pollution. [en línea]. *Nature*. 544(7650): 297. Recuperado en: <https://www.nature.com/articles/544297a.epdf?shared_access_token=sk-NqZWsrVxlChci0B-dRgN0jAjWel9jnR3ZoTv0Mp31uwdehnXBHEJHWTMyhlp-NBSL-guJG5g8Ez9kXDdRDYq6UU3vVWkDff2--fprzIB9YKDr8yYsoMhXk6ffXay> Consultado el: 10 de mayo de 2018.

Bravo, M.; M. Gallardo; G. Luna-Jorquera; P. Núñez, N; Vásquez and M. Thiel. 2009, Nov. Anthropogenic debris on beaches in the SE Pacific (Chile): Results from a national survey supported by volunteers. *Marine Pollution Bulletin*, 58(11): 1718-1726.

Chiba, S.; H. Saito; R. Fletcher; T. Yogi; M. Kayo; S. Miyagid et al. 2018, Oct. Human footprint in the abyss: 30 year records of Deepsea plastic debris. [en línea]. *Marine Policy*, 96

(1): 204-212. Recuperado en: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0308597X17305195?token=F36D34BAFE12A52B26F284F6AF2ED05398714799FF228D5116A25C30B2F5B419FD24A8E4CF74B44777C97E53CE65D7AE>> Consultado el: 11 de mayo de 2018.

Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. 2da. ed. Madrid, España: Rialp, S.A. 224p.

Clevers, J. G. and A. Gitelson. 2013, Aug. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(1): 344-351.

Congalton, R.G. 1991, Jul. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1): 35-46.

Di Castri, F. y E. Hajek. 1976. Bioclimatología de Chile. [en línea]. Santiago, Chile: Universidad Católica de Chile. 163p. Recuperado en: <https://www.grn.cl/bioclimatologia_de_chile.pdf> Consultado el: 13 de mayo de 2018.

DIRECTEMAR (Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante), Chile. 2014. Desechos marinos en playas de jurisdicción de la gobernación marítima de castro. (Inf. téc. N°2). Chiloé, Chile: DIRECTEMAR. 42p.

DIRECTEMAR (Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante), Chile. 2016. Desechos marinos en playas de jurisdicción de la gobernación marítima de castro: condición octubre 2016. (Inf. téc. N°2). Chiloé, Chile: DIRECTEMAR. 5p.

Donohue, M. and D.G Foley. 2007, Mar. Remote sensing reveals links among the endange red Hawaiian monk seal, marine debris, and El Nino. *Marine Mammal Science*, 23(2): 468-473.

Dörnhöfer, K. and N. Oppelt. 2016, May. Remote sensing for lake research and monitoring-Recent advances. [en línea]. *Ecological Indicators*, 64(1): 105-122. Recuperado en: <http://www.jlakes.org/config/hpkx/news_category/2017-05-27/1-s2.0-S1470160X15007141-main.pdf> Consultado el: 15 de mayo de 2018.

Driedger, A.; H. Dürr; K. Mitchell and P. Van Capellen. 2015, Mar. Plastic debris in the Laurentian Great Lakes: A review. [en línea]. *Journal of Great Lakes Research*, 41(1): 9-19. Recuperado en: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0380133015000064?token=DFB785F9E0EAC20C33AF0462FDC9079F33A9CAD1E8C7B4F854CECB2ECBF1168C93B550360191E479716029757BB6729E>> Consultado el 20 de junio de 2018.

Drusch, M., U. Del Bello, S. Carlier, O. Colin, V. Fernandez, F. Gascon et al. 2012, May. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120(1): 25-36.

Duveiller, G. and Cescatti, A. 2016, Sep. Spatially downscaling sun-induced chlorophyll fluorescence leads to an improved temporal correlation with gross primary productivity. [en línea]. *Remote Sensing of Environment*, 182(1): 72-89. Recuperado en <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0034425716301936?token=85204EF762B395FED4ADE024427FAB5BC2A378E9C635ADD0FBCC068F3C18B17E5EC5A47412D0B34BA31E653124AD0F92>> Consultado el 15 de junio de 2018.

Foody, G. 2002, Jul. Status of Land Cover Classification Accuracy Assessment. [en línea]. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 185-201. Recuperado en <<http://www2.geog.ucl.ac.uk/~mdisney/teaching/teachingNEW/GEOGG141/papers/foody.pdf>> Consultado el 21 de marzo de 2019.

Galgani, F.; D. Fleet; J. Van Franeker; S. Katsanevakis; T. Maes; J. Mouat et al. 2010. Marine Strategy Framework directive-Task Group 10 Report marine litter. [en línea]. Luxembourg: Joint Research Centre European Commission. 57p. Recuperado en: <<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/174619>> Consultado el 28 de mayo de 2018.

Galgani, F.; G. Hanke and T. Maes. 2015. Global Distribution, Composition and Abundance of Marine Litter. (cap. 2, pp.29-56). In: Bergmann, M., L. Gutow and M. Klages (Eds.). Marine Anthropogenic Litter. Alemania: Springer Open. 447p.

Gall, S. and R. Thompson. 2015, Mar. The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1-2): 170-179.

Hidalgo-Ruz, V. and M. Thiel. 2013, Jun. Distribution and abundance of small plastic debris on beaches in the SE Pacific (Chile): A study supported by a citizen science project. *Marine Environmental Research*, 87(1): 12-18.

Hinojosa, I. and M. Thiel. 2009, Aug. Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 58(3): 341-350.

Hinojosa, I.; M. Rivadeneira y M. Thiel. 2011, Mar. Temporal and spatial distribution of floating objects in coastal waters of central-southern Chile and Patagonian fjords. *Continental Shelf Research*, 31(3-4): 172 – 186.

Hudson, W.D & C.W Ramm. 1987, Jan. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. [en línea]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(53): 421-

422. Recuperado en: <https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1987journal/apr/1987_apr_421-422.pdf> Consultado el: 24 de abril de 2019.

IMO (International Maritime Organization). 1972. Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter. (Doc. Téc.). London, United Kingdom: IMO. 63p.

Ivar do Sul, J. and M. Costa. 2007, Aug. Marine debris review for Latin America and the Wider Caribbean Region: From the 1970s until now, and where do we go from here? *Marine Pollution Bulletin*, 54(8): 1087-1104.

Kiessling, T.; S. Salas; K. Mutaoglu and M. Thiel. 2017, Mar. Who cares about dirty beaches? Evaluating environmental awareness and action on coastal litter in Chile. *Ocean & Coastal Management*, 137(1): 82-95.

Kruse, F. A. and S. L. Perry. 2013, May. Mineral mapping using simulated Worldview-3 short-wave-infrared imagery. *Remote Sensing*. 5(6): 2688-2703.

Landis, J.R and G.G Kock. 1977, Apr. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1): 159-174

Lebreton, L.; B. Slat; F. Ferrari; B. Sainte-Rose; J. Aitken; R. Marthouse et al. 2018, Mar. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. [en línea] *Scientific Reports*, 8(1): 4666. Recuperado en: <<https://www.nature.com/articles/s41598-018-22939-w.pdf>> Consultado el: 14 de agosto de 2018.

Letelier, J.; L. Soto-Mardones; S. Salinas; P. Osuna; D. López; H. Sepúlveda et al. 2014. Variability of wind, waves and currents in the 75 northern region of the Chilean Patagonian fjords. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 46(3): 363-377.

Löder, M. G. and G. Gerdts. 2015. Methodology used for the detection and identification of microplastics-A critical appraisal (cap. 8, pp.201-227). In: Bergmann, M., L. Gutow and M. Klages (Eds.). *Marine Anthropogenic Litter*. Alemania: Springer Open. 447p.

Mace, T. 2011, Sep. At-sea detection of marine debris: Overview of technologies, processes, issues, and options. *Marine Pollution Bulletin*, 65(1-3): 23-27.

Morishige, C. and K. McElwee. 2011, Jun. At-sea detection of derelict fishing gear in the North Pacific: An overview. *Marine Pollution Bulletin*, 65(1-3): 1-6.

Mouat, J., R. Lopez and H. Bateson. 2009, sept. Economic Impacts of Marine Litter. (Doc. Téc.), Kommuniernes Internationale Miljøorganisation (KIMO). [en línea]. Escocia: KIMO. 117p. Recuperado en: < http://www.kimointernational.org/wp/wp-content/uploads/2017/09/KIMO_Economic-Impacts-of-Marine-Litter.pdf> Consultado el 23 de mayo de 2019.

Pichel, W.; T. Veenstra; J. Churnside; E. Arabini; K. Friedman; D. Foley et al. 2011, Nov. GhostNet marine debris survey in the Gulf of Alaska-Satellite guidance and aircraft observations. *Marine Pollution Bulletin*, 65(1-3): 28-41.

PlasticsEurope. 2016. Plastics the Facts 2016: An analysis of European plastics production, demand and waste data. Bruselas, Bélgica: PlasticsEurope. 30p.

Ramírez, E., Tyler, P., Baker, M., Bergstad, O., Clark, M., Escobar, E. and Van Dover, C. 2011, Aug. Man and the last great wilderness: human impact on the deep sea. *PLoS One*, 6(8): 22588. Recuperado en: < <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0022588>> Consultado el: 25 de junio de 2018.

Renza, D., E. Martinez, I. Molina and D. Ballesteros. 2017, Apr. Unsupervised change detection in a particular vegetation land cover type using spectral angle mapper. *Advances in Space Research*, 59(8): 2019-2031.

Rochman, C. M; M. A. Browne; A. J. Underwood; J.A. Van Franeker; R. C. Thompson and L. A. Amaral-Zettler. 2016, mar. The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived. *Ecology*, 97(2) 302-312.

Rochman, C.M; M.A. Browne; B.S. Halpern; B.T. Hentschel; E. Hoh; H.K. Karapanagioti et al. 2013, Feb. Policy: classify plastic waste as hazardous. *Nature*, 494(7436): 169-171. Recuperado en: < <https://www.nature.com/articles/494169a.pdf>> Consultado el: 10 de junio de 2018.

Romera-Castillo, C.; M. Pinto; T.M. Langer; X.A. Álvarez-Salgado y G. J. Herndl. 2018, Apr. Dissolved organic carbon leaching from plastics stimulates microbial activity in the ocean. *Nature communications*, 9(1): 1430. Recuperado en: < <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03798-5.pdf>> Consultado el: 10 de junio de 2018.

Roy, D. P.; M.A. Wulder; T.R. Loveland; C.E. Woodcock; R. G. Allen; M.C. Anderson et al. 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, 145(1): 154-172. Recuperado en: < <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S003442571400042X?token=0002BF1B6810CA83A4AEEBAFDE02ACA0FC2234B1DF4F5B94BE952A59A1ADEF61318330287CC95B475DE34C28F0F5F7A>> Consultado el 15 de junio de 2018.

Santibáñez, F.; P. Santibáñez y P. González. 2016, jul. Elaboración de una base digital del clima comunal de Chile: línea base (1980-2010) y proyección al año 2050. (Inf. Téc.), Información para el Desarrollo Productivo Ltda. (INFODEP). [en línea]. Santiago, Chile: INFODEP. 99p. Recuperado en: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Clima-Comunal_Informe_Final_29_08_2016-web.pdf> Consultado el 10 de junio de 2018.

Shodlok, M.P; D. Menemenlis; E.J. Rignot. 2016, Feb. Ice shelf basal melt rates around Antarctica from simulations and observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(2): 1085-1109.

Smith-Ramírez, C. 1993, ene. Los picaflores y su recurso floral en el bosque templado de la isla de Chiloé, Chile. [en línea]. *Revista chilena de historia natural*, 66(1): 65-73. Recuperado en: <http://rchn.biologiachile.cl/pdfs/1993/1/Smith-Ramirez_1993.pdf> Consultado el 25 de junio de 2018.

Stefatos, A.; M. Charalampakis; G. Papatheodorou; G. Ferentinos. 1999, May. Marine Debris on the Seafloor of the Mediterranean Sea: Examples from Two Enclosed Gulfs in Western Greece. *Marine Pollution Bulletin*, 38(5): 389-393.

Thiel, M.; I. Hinojosa; N. Vásquez and E. Macaya. 2003, Feb. Floating marine debris in coastal waters of the SE-Pacific (Chile). *Marine Pollution Bulletin*, 46(2): 224-231.

United Nations Environment Programme (UNEP). 2014. Valuing Plastics: The Business Case for Measuring, Managing and Disclosing Plastic Use in the Consumer Goods Industry. (Doc.Téc.). Nairobi, Kenya: UNEP. 116p.

Wang, Q.; G.A. Blackburn; A.O. Onojeghuo; J. Dash; L. Zhou; Y. Zhang and P.M Atkinson. 2017, Apr. Fusion of Landsat 8 OLI and Sentinel-2 MSI data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(7): 3885-3899.

APÉNDICES

Apéndice I. Valores de reflectancia de RAM y Suelo para librería espectral y escena de mayo 2017 de Sentinel-2.

Cuadro 8. Valores de reflectancia de RAM y Suelo en la banda NIR de librería espectral PRED-RES y puntos de entrenamiento en banda NIR de Sentinel-2.

| Categoría | Reflectancia [%] | |
|-----------|--------------------|------------|
| | Librería Espectral | Sentinel-2 |
| RAM | 68.96 | 26.01 |
| RAM | 78.38 | 30.02 |
| RAM | 74.85 | 36.21 |
| RAM | 87.53 | 29.68 |
| RAM | 69.09 | 17.00 |
| RAM | 66.29 | 28.80 |
| RAM | 72.42 | 31.23 |
| RAM | 77.96 | 33.98 |
| RAM | 68.18 | 26.90 |
| RAM | 69.08 | 29.36 |
| RAM | 70.83 | 26.02 |
| RAM | 80.77 | 34.31 |
| RAM | 83.85 | 35.09 |
| RAM | 78.47 | 29.38 |
| RAM | 59.41 | 24.66 |
| RAM | 24.00 | 21.09 |
| RAM | 27.71 | 17.81 |
| RAM | 30.90 | 21.04 |
| RAM | 24.39 | 23.00 |
| RAM | 28.02 | 18.36 |
| RAM | 26.54 | 22.41 |
| RAM | 29.61 | 23.46 |
| RAM | 34.96 | 23.40 |
| RAM | 30.69 | 19.73 |
| Suelo | 9.983 | 11.60 |
| Suelo | 9.98 | 12.75 |
| Suelo | 8.34 | 7.90 |
| Suelo | 10.02 | 11.88 |
| Suelo | 9.63 | 11.39 |
| Suelo | 8.73 | 11.51 |
| Suelo | 9.13 | 9.52 |
| Suelo | 8.93 | 9.62 |

Apéndice II. Fotos de limpieza en Mallil agosto 2018.

Figura 13. Fotografías de la limpieza de la I. Municipalidad de Quinchao en agosto de 2018 en playa Mallil.