

Caracterización óptica de aguas superficiales a partir de imágenes satelitales multi e hiperespectrales en la región de Gran Resistencia, Chaco

Por ***Mgtr. Víctor Hugo Gauto***

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES DE INFORMACIÓN ESPACIAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Noviembre, 2023

©IG-CONAE 2023

©FaMAF-UNC 2023

DIRECTORA

Dra. Anabella Ferral

Instituto Gulich, Córdoba, Argentina

CO-DIRECTOR

Mgtr. Alejandro Rubén Farías

UTN FRRe, Resistencia, Argentina

Titulares del Tribunal Especial:

Dra. Karina Quaini (MAyDS)

Dr. Matías Bonansea (UNRC)

Dr. Jorge Adrover (FAMAF - UNC)

Suplentes del Tribunal Especial:

Dra. Carolina B. Tauro (CONAE)

Dra. Maria Laura Nores (FAMAF - UNC)



Agradecimientos

A mi familia, por darme el espacio y el tiempo para que pueda concentrarme. Su constante apoyo, paciencia y amor son invaluableles.

A Anabella, mi directora, que con sus contribuciones y observaciones me permitieron crecer como profesional. Gracias a su entusiasmo todo este proceso fue una experiencia muy enriquecedora.

Al Instituto Gulich y plantel docente, que me abrieron las puertas a la teledetección, y con dedicación y esfuerzo lograron que yo, con absoluto desconocimiento del tema, aprenda y quede fascinado con las posibilidades de aplicación.

A Claudia, mi tutora en Milán, Mariano y a todo su equipo en CNR-IREA, que me brindaron total libertad y apoyo para poder enfocarme en esta tesis. Siempre recordaré mi tiempo en Milán con mucho aprecio, por todo lo aprendido y las bellas experiencias, tanto académicas como humanas.

A mis compañeros y compañeras de Maestría, con quienes compartí lindas experiencias de trabajo en equipo, muy profesionales y sobre todo, excelentes personas.

A quienes integran el GISTAQ, que confiaron en mí para postularme a esta Maestría, y me permiten desarrollarme como investigador, siempre aportando y construyendo. Soy muy afortunado de poder trabajar en un ambiente tan agradable y acogedor.



Resumen

Lograr la conservación del agua, a nivel mundial, requiere del estudio y monitoreo continuo de este recurso. En el Área Metropolitana del Gran Resistencia, provincia del Chaco, se encuentran ríos sinuosos y lagunas de meandro. Monitorear y analizar estas aguas superficiales es un gran desafío debido a la complejidad de este ecosistema, la dificultad en la logística de seguimiento y la elevada variabilidad espacial de las características del agua.

En este contexto, la teledetección mediante sensores montados en plataformas espaciales ofrece herramientas de utilidad. Particularmente, sensores hiperespectrales brindan datos con alta resolución espectral en cientos de bandas discretas. En el presente trabajo, se emplearon diferentes productos provenientes de la plataforma hiperespectral PRISMA (Agencia Espacial Italiana). La comparación entre ambos sensores no puede llevarse a cabo de manera directa, por las diferencias espectrales existentes. Por lo tanto, mediante convolución espectral se obtuvo una firma espectral sintética que combina la función de respuesta espectral de Sentinel-2 con la alta resolución de bandas de PRISMA. Para evaluar las desviaciones entre diferentes productos, se calcularon una serie de métricas de desempeño: error absoluto medio (MAE), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), medida del ángulo espectral (SAM), desviación (BIAS) y coeficiente de correlación (R^2). Se seleccionaron puntos muestrales correspondientes a tres clases de agua, de acuerdo a su composición: baja presencia de sedimentos, alta concentración de clorofila-a y elevada cantidad de sólidos en suspensión. Dada la importancia y cercanía del río Paraná a la región de interés, se ubicaron puntos muestrales equidistantes a lo largo de una transecta. En estos se llevó a cabo un análisis cromático para evaluar el cambio progresivo del color del agua entre orillas.

Los resultados muestran que el producto PRISMA, con corrección atmosférica automática, presenta la mejor correspondencia con los datos generados mediante convolución espectral de Sentinel-2. Las métricas RMSE, BIAS y MAE fueron $< 1\%$, $R^2 > 0,98$ y $SAM < 4^\circ$ para todas las clases de agua. PRISMA ofrece productos de calidad del cual puede extraerse información valiosa de la calidad del agua dada el gran nivel de detalle espectral. Las inferencias obtenidas a partir del estudio de las firmas espectrales PRISMA fueron confirmadas por estimaciones generadas a través de algoritmos presentes en ACOLITE. Los efectos de diferentes métodos de corrección atmosférica fueron analizados. El seguimiento del punto máximo de las firmas espectrales, a lo largo de la transecta en el río Paraná, mostró un corrimiento a menores longitudes de onda y reflectancias a medida que la turbidez del agua disminuye; la observación de este comportamiento solo es posible en el producto PRISMA.

Las técnicas de análisis cromático muestran el cambio progresivo del color del agua entre las orillas. El color del agua obtenido funciona como estimador de la turbidez presente.

La revisión bibliográfica demuestra que, en la región de interés, este es el primer trabajo en utilizar técnicas de teledetección satelital hiperespectral para el estudio de aguas interiores.

Palabras clave: aguas interiores, Sentinel-2, PRISMA, sensor hiperespectral, análisis cromático

Abstract

Achieve water conservation, worldwide, requires continuous study and monitoring of this resource. In the Gran Resistencia Metropolitan Area, province of Chaco, there are sinuous rivers and meandering lagoons. Monitoring and analyzing these surface waters is a great challenge due to the complexity of this ecosystem, difficulty in monitoring logistics, and the high spatial scarcity of water features.

In this context, remote sensing using sensors on board of space platforms offers useful tools. In particular, hyperspectral sensors provide data with high spectral resolution in hundreds of discrete bands. In the present work, different products from the hyperspectral platform PRISMA (Italian Space Agency) were used. They were compared with a multispectral image from the Sentinel-2 MSI mission. Using spectral convolution, a synthetic spectral signature was obtained that combines the spectral response function of Sentinel-2 with the high band resolution of PRISMA. To assess deviations between different products, a number of performance metrics were calculated: mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), spectral angle measure (SAM), deviation (BIAS), and correlation coefficient (R^2). Sample points corresponding to three water classes were selected, according to their composition: low presence of sediments, high concentration of chlorophyll-a and high amount of suspended solids. Given the importance and proximity of Paraná River to the region of interest, equidistant sample points were located along a transect. In these, a chromatic analysis was carried out to evaluate the progressive change in the water color between shores.

The results show that the PRISMA product, with automatic atmospheric correction, presents the best correspondence with the equivalent Sentinel-2 data. The RMSE, BIAS and MAE metrics were $< 1\%$, $R^2 > 0.98$ and $SAM < 4^\circ$ for all water classes. PRISMA offers quality products from which valuable information on water quality can be extracted given the high level of spectral detail. The inferences obtained from the study of the PRISMA spectral signatures were confirmed by estimates from algorithms present in ACOLITE. The effects of different atmospheric correction methods were analyzed. The monitoring of the maximum point of the spectral signatures, along the transect in the Paraná River, showed a shift to shorter wavelengths and reflectances as the turbidity of the water decreases; observing this behavior is only possible in the PRISMA product. Chromatic analysis techniques show the progressive change in the color of the water between the banks. The color of the water obtained works as a proxy of the turbidity present.

The literature review shows that, in the region of interest, this is the first work to use hypers-

pectral satellite remote sensing techniques for inland waters study.

Keywords: inland waters, Sentinel-2, PRISMA, hyperspectral sensor, chromatic analysis

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Marco Teórico	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Principios teóricos	5
3. Área de estudio	8
4. Materiales y Métodos	10
4.1. Materiales	10
4.1.1. Productos satelitales, reflectancia a nivel de superficie	10
4.1.2. Productos satelitales, a tope de atmósfera	11
4.1.3. Sitios muestrales	11
4.2. Métodos	13
4.2.1. Métodos de corrección atmosférica	13
4.2.2. Conversión de radiancia a reflectancia, tope de atmósfera	15
4.2.3. Convolución espectral	15
4.2.4. Métricas de desempeño	16
4.2.5. Análisis cromático	18
4.3. Software	18

5. Resultados y discusión	20
5.1. Imagen en composición de color real	20
5.2. Firmas espectrales	23
5.2.1. Firmas espectrales en reflectancia de superficie	24
5.2.2. Firma espectral Sentinel-2 simulada por convolución	27
5.2.3. Firmas espectrales en reflectancia a tope de atmósfera	30
5.3. Transecta sobre el río Paraná	31
5.3.1. Firmas espectrales en reflectancia de superficie	31
5.3.2. Análisis cromático y turbidez	33
5.4. Estimación de variables biogeofísicas	36
6. Conclusión	38
Anexos	49
A. Espectro solar extraterrestre	49
B. Diagrama cromático	50
C. Bandas espectrales VNIR PRISMA	51
D. Bandas espectrales Sentinel-2	53
E. Métricas de desempeño	54
F. Parámetros biogeofísicos estimados	55

Índice de figuras

2.1. Diagrama de la trayectoria de la radiación solar y su interacción con la atmósfera y los componentes presentes en el agua, y su captura por un sensor remoto	6
3.1. Ubicación de la región de estudio, ríos principales y cuerpos de agua presentes.	8
4.1. Arriba, localización de los sitios de muestreo para las tres clases de agua. Abajo, detalle de los puntos muestrales en la transecta a través del río Paraná.	12
4.2. Función de respuesta espectral del sensor MSI a bordo de Sentinel-2B, para todas las bandas espectrales.	16
5.1. Composición RGB de los productos PRISMA L2D y Sentinel-2 L2A. Los horarios de adquisición corresponden a la hora local.	21
5.2. Detalle de los sitios muestrales para cada producto utilizado.	22
5.3. El punto rojo indica la misma posición, las líneas de trazos sirven a modo de guía. (a) Sentinel-2 posee una georreferenciación correcta. (b) PRISMA muestra un corrimiento.	23
5.4. Firmas espectrales para las tres clases de agua, obtenidas por PRISMA L2D y S2 L2A.	24
5.5. Firmas espectrales para cada clase de agua y plataforma, de acuerdo al método de corrección atmosférica. En gris, reflectancia de superficie automática (BOA); en negro, reflectancia a tope de atmósfera (TOA) con posterior corrección vía ACOLITE.	25

5.6. Comparación de las firmas espectrales de las diferentes clases de agua, por producto analizado, respecto de la firma espectral sintética SIM S2. Valores de medición del ángulo espectral (SAM) se ubican en cada panel.	27
5.7. Comparación de las R_S de las diferentes clases de agua, por producto analizado, respecto de la R_S sintética SIM S2. Valores de coeficiente de correlación (R^2) se ubican en cada panel.	28
5.8. Métricas de desempeño por producto analizado, por clase de agua.	29
5.9. Firmas espectrales, por plataforma y clase de agua. En gris, R_S , reflectancias de superficie (BOA), con corrección atmosférica . En negro, R_t , reflectancias a tope de atmósfera (TOA), sin corrección atmosférica.	31
5.10. Firmas espectrales en R_S de los puntos ubicados en una transecta al Río Paraná. El círculo rojo señala el máximo de cada curva.	32
5.11. Reflectancia de superficie máxima ($R_{S,max}$) de cada sitio muestral en la transecta, con su correspondiente longitud de onda (λ).	33
5.12. Izquierda: plano cromático completo. A la derecha se muestra ampliado el recuadro en el centro de la figura. Derecha: distribución de puntos muestrales en la transecta al río Paraná.	34
5.13. Color real RGB de los píxeles de los puntos muestrales en la transecta al río Paraná y variación de la turbidez estimada.	35
5.14. Parámetros estimados mediante algoritmos presentes en ACOLITE, para las tres clases de agua.	36
A.1. Espectro solar extraterrestre, en irradiancia por longitud de onda.	49
B.1. Diagrama cromático CIE 1931.	50

Índice de tablas

4.1. Características del producto PRISMA L2D.	10
4.2. Características del producto Sentinel-2 L2A.	11
5.1. Centros y números de banda utilizados para la composición RGB de ambos productos.	20
5.2. Condiciones meteorológicas entre las fechas correspondientes a la adquisición de los productos Sentinel-2 y PRISMA.	22
5.3. Ángulos de tono del color (α) y longitud de onda dominante (λ_d) para cada punto muestral en la transecta al río Paraná.	35
C.1. Número, centro y FWHM de las 63 bandas VNIR de PRISMA L2D.	52
D.1. Características espectrales de las plataformas Sentinel-2 S2A y S2B.	53
E.1. Métricas de desempeño entre diferentes productos y S2 SIM.	54
F.1. Valores estimados para los distintos tipos de agua, obtenidos mediante ACO-LITE.	55

Acrónimos

ACOLITE	Atmospheric Correction for OLI “lite”
AMGR	Área Metropolitana del Gran Resistencia
ASI	Agencia Espacial Italiana
ATCOR	Atmospheric & Topographic Correction
BIAS	Tendencia
ESA	Agencia Espacial Europea
LR	La Ribera, sitio muestral
LT	La Toma, sitio muestral
MAE	Error medio absoluto
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmision
MSI	<i>Multi Spectral Instrument</i> , Instrumento Multiespectral
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PRISMA	Precursor hiperspectral de la misión de aplicación
R²	Coefficiente de correlación de Pearson, al cuadrado
RMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
SAM	Medida del ángulo espectral
VNIR	Visible e infrarrojo cercano, rango de longitud de onda

CAPÍTULO 1

Introducción

El estudio y monitoreo de las aguas superficiales es fundamental para la conservación de este recurso natural. La Organización de las Naciones Unidas (ONU), en su Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [1] establece en su sexto Objetivo garantizar el acceso universal y equitativo del agua potable, reducir la contaminación del recurso y mejorar la gestión y saneamiento, entre otros. Un indicador de utilidad para garantizar este Objetivo es la proporción de agua de buena calidad, la cual puede estimarse mediante técnicas de teledetección.

La teledetección mediante plataformas satelitales es una herramienta que ofrece datos de la superficie del planeta, de grandes extensiones de terreno, de manera regular en el tiempo, generando productos sistemáticamente. Específicamente, en relación al monitoreo satelital en cuerpos de agua, dentro de los parámetros que son posibles estimar aplicando esta tecnología se encuentran la concentración de sólidos totales suspendidos, profundidad de disco de Secchi, concentración de clorofila [2, 3, 4, 5], entre otros. Dadas las características multidisciplinarias de la teledetección, es posible acoplar técnicas de aprendizaje automático, dando resultados positivos [6]. Asimismo, se pueden complementar las múltiples plataformas satelitales existentes, combinando las bases de datos, tal que se completen los vacíos de información mejorando la precisión de los resultados [7]. En la actualidad, la teledetección resulta una tecnología indispensable para el entendimiento de los cuerpos de agua [8].

Los ecosistemas de agua dulce, lagunas, lagos, arroyos, ríos, humedales, pantanos, ciénagas, etc. están entre los más amenazados del planeta [9], principalmente por los cambios de uso del suelo y variabilidad climática. Estas aguas superficiales han representado un desafío para la teledetección debido a su tamaño reducido y elevada complejidad espacial. La forma tradicional de estudiarlos suele consistir en derivar parámetros biofísicos a partir de datos espectrales, requiriendo mediciones de campo para su validación [10, 11]. Estas suelen ser en sitios puntuales, que no representan correctamente la gran variabilidad espacial de estos sistemas dinámicos; asimismo, la logística, los costos y el tiempo asociados al trabajo de campo son limitantes. En este contexto, la teledetección es una herramienta fundamental para estimar variables de estudio de los cuerpos de agua.

Sensores multiespectrales poseen bandas espectrales en longitudes de onda específicas, sin cubrir completamente todo el rango espectral. Con esta tecnología se han logrado la esti-

mación de variables biofísicas de cuerpos de agua. Sin embargo, en la actualidad, misiones espaciales con sensores hiperspectrales proveen mediciones a lo largo de cientos de bandas discretas. Esto permite generar un espectro continuo, y con el procesamiento y análisis adecuado [12], producir información cualitativa y cuantitativa, superando otros sensores multiespectrales [13]. El estudio de aguas interiores, dada la complejidad de estos sistemas requiere de sensores hiperspectrales para un mejor análisis [9].

El Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR), provincia del Chaco, es atravesada por múltiples cursos de agua, siendo el río Negro el de mayor extensión. Las grandes lluvias, períodos de sequía e inundaciones modifican su recorrido. El cauce irregular del río por la planicie genera lagunas de meandro [14], en zonas cercanas a la población. Estimar las características de estos cuerpos de agua lénticos es de utilidad para conocer el impacto de la actividad humana, planificar medidas correctivas y evaluar su efecto.

Al Este del AMGR, se encuentra el río Paraná, el segundo río más extenso de América del Sur con 4.800 km. Inicia en la confluencia de los ríos Grande y Paranaíba, en Brasil, y desemboca en el Río de la Plata, Argentina. Es la fuente principal de agua potable del AMGR, con importancia en la industria pesquera, turismo, como vía de transporte de carga para embarcaciones y como esparcimiento para las comunidades cercanas. La economía de los barrios populares a la vera del río dependen en gran medida de las condiciones del Paraná.

La región de estudio de la presente Tesis de Maestría comprende el AMGR, algunos de sus cuerpos de agua y la porción del río Paraná adyacente a la Provincia del Chaco. Las referencias bibliográficas enfocadas en esta región, implementando teledetección como herramienta para el estudio de la superficie terrestre, es escasa o nula. Existen investigaciones que estudian los cambios en la cobertura del suelo [15] y el avance de la deforestación [16]. Sin embargo, para nuestro conocimiento luego de una búsqueda extensiva de referencias bibliográficas, son escasas las investigaciones específicas sobre cuerpos y cursos de agua. Sí existen trabajos generales a nivel país con uso de teledetección [17], pero no hay documentos científicos específicos en esta región. Las investigaciones en el río Paraná suelen abarcar la cuenca Norte (dentro de los límites de Brasil) o Sur (en cercanías a la ciudad de Santa Fe)[18, 19]. Respecto al uso de información hiperspectral para realizar estudios hídricos en estas cuencas, los antecedentes son nulos al momento de la redacción de esta Tesis de Maestría.

Los sensores hiperspectrales, en general, adquieren datos a cientos de longitudes de onda, desde el rango visible (VIS) hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), con una alta resolución espectral. Estas características permiten generar algoritmos específicos para estimar parámetros como clorofila-a, turbiedad, profundidad de disco de Secchi, fósforo total y sólidos suspendidos [20].

A finales de la década de 1990 diferentes agencias comenzaron a desarrollar plataformas espaciales con sensores hiperspectrales. Entre 2016 y 2019, se pusieron en órbita nueve plataformas, dentro de las cuales se encuentra el sensor satelital Precursor hiperspectral de la misión de aplicación (PRISMA), desarrollado por Agencia Espacial Italiana (ASI); y los desarrollados por la Agencia Espacial Europea (ESA), OLCI y CHRIS, y el recientemente lanzado EnMAP (2022), de la Agencia Espacial Alemana. Dentro de los lanzamientos previstos a futuro se encuentran: OCI (NASA) y FLORIS (ESA) en 2023, y CHIME (ESA) para 2029.

En este contexto, PRISMA es una misión pre-operativa, que apunta a calificar la tecnología presente. Pretende realizar contribuciones en la generación de productos de uso académico y científico para el estudio del ambiente y manejo de riesgos [21]. Se encuentra en órbita desde

marzo de 2019 [22], contiene montados dos espectrómetros en rango visible e infrarrojo, con una de resolución espacial de 30 m; y una banda pancromática (400-700 nm) de 5 m de resolución espacial.

El **objetivo principal** de esta Tesis de Maestría es evaluar la viabilidad de uso del sensor hiperespectral PRISMA para estimar indicadores de calidad de aguas superficiales de la región de Gran Resistencia. Para ello se propusieron los siguientes **objetivos específicos**:

- Seleccionar aguas superficiales de diferente composición dentro de la región de estudio
- Obtener y procesar los productos multi e hiperespectrales, en reflectancia de superficie y reflectancia a tope de atmósfera
- Extraer las firmas espectrales de los puntos muestrales dentro de las aguas superficiales seleccionadas
- Evaluar el desempeño de diferentes algoritmos de corrección atmosférica y comparar las respuestas de sensores de diferente resolución espectral para la zona de estudio mediante métricas estadísticas.
- Estudiar la respuesta hiperespectral y cromática a lo largo de una transecta en el río Paraná
- Estimar parámetros de calidad del agua a partir de algoritmos

La presente Tesis de Maestría comprende el estudio de las características espectrales de aguas superficiales de diferente composición, en el Área Metropolitana del Gran Resistencia. Para ello se analizan por primera vez en la región datos hiperespectrales obtenidos por la plataforma PRISMA y se comparan con productos sintéticos generados a partir de convolución espectral del sensor multiespectral *Multi Spectral Instrument* (MSI), presente en Sentinel-2.

Se presenta en primer lugar el marco teórico con los principales antecedentes y características del sistema de estudio, capítulo 2; y el área de estudio en el capítulo 3. Luego, en el capítulo 4, se describen la fuente y las características de los datos utilizados, la metodología de procesamiento y análisis de la información multi e hiperespectral, y los diferentes métodos de corrección atmosférica, como así también las métricas de desempeño calculadas. El capítulo 5 presenta los resultados obtenidos referidos a los productos en color real, diferentes análisis de las firmas espectrales extraídas de los productos a tope de atmósfera y en reflectancia de superficie, las características espectrales y cromáticas del río Paraná a lo largo de una transecta; se comparan las diferencias entre los sensores (MSI y PRISMA) mediante métricas de desempeño, y los métodos de corrección atmosférica aplicadas, para cada tipo de agua analizado. Finalmente, se obtienen parámetros de la calidad del agua estimados mediante algoritmos. Por último, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones de este trabajo y perspectivas futuras.

2.1. Antecedentes

Para un monitoreo constante de la superficie del planeta, la teledetección espacial permite el seguimiento de extensas superficies, con una frecuencia temporal estable [23]. Con el sensor adecuado es posible trabajar con cuerpos de agua de menor tamaño, de acuerdo a la resolución espacial. La recolección constante de datos de la superficie terrestre permite la elaboración de series temporales, que dan cuenta de la evolución de una propiedad particular a lo largo del tiempo. Asimismo, el uso de diferentes sensores, ópticos y radar, como los presentes en las misiones Landsat-5, 7, 8 y 9, y Sentinel-1 y 2, han sido de utilidad para el análisis espacio-temporal de las características del agua en lagos [24]. Por ejemplo, el nivel de eutrofización en lagunas y su relación con la calidad de los cuerpos de agua ha sido estudiada gracias a las técnicas de teledetección [25]. Para la detección de cambios en las cuencas de ríos estrechos, particularmente aquellos que atraviesan zonas urbanas, el seguimiento puede llevarse a cabo con el uso de sensores de alta resolución espacial [26].

Las variables biofísicas, que son ópticamente activas en el rango VIS-NIR, pueden estimarse con la aplicación de técnicas de teledetección, tales como la concentración de clorofila-a para aguas costeras [27] y cuerpos de agua continentales [28, 29, 30]. Por otro lado, el análisis de series de tiempo permite entender los cambios espacio-temporales [31], ofreciendo información para dar soporte a la toma de decisiones. La combinación de sensores satelitales permite el acople de los datos, extendiendo el período de análisis [32]. Incluso es posible el seguimiento de más variables de interés debido a las relaciones entre las mismas, como ser el caso del uso de la concentración de clorofila-a como proxy para monitorear la evolución temporal y la distribución espacial de la biomasa algal [33, 34].

Existen diferentes indicadores que permiten realizar el seguimiento de la calidad de agua superficial, como la concentración de sólidos suspendidos y la turbidez. Específicamente, la dinámica de la turbidez puede estimarse a partir de múltiples parámetros, como ser los sólidos suspendidos [35]. En nuestro país, la aplicación de técnicas de teledetección permiten el estudio de la dinámica de la turbidez del Río de la Plata, mediante algoritmos generados a partir de productos satelitales [36].

El seguimiento de la turbidez es buena indicadora de la ocurrencia de sequías en las cuencas de estudio [37], dado que aumenta su valor en épocas de bajo caudal en los ríos o baja cota en embalses o lagos, la cual ha podido ser estimada a partir de monitoreo con sensores hiperespectrales [38]. Incluso efectos locales de fenómenos globales, como El Niño, pueden relacionarse con mediciones de turbidez [39].

La profundidad del disco de Secchi afecta considerablemente la variabilidad espacio-temporal de la transparencia del agua [30]. Las explosiones algales y la concentración de clorofila-a presentan, para aguas eutrofizadas, una alta correlación con la profundidad de disco de Secchi [40]. Esta medición se relaciona con la penetración de luz en el cuerpo de agua, y se determina con mediciones in-situ, sobre el cuerpo de agua [41].

La constelación satelital Sentinel-2, está compuesta por las plataformas 2A y 2B, en órbita desde junio de 2015 y marzo de 2017, respectivamente. Desarrollada por ESA en el marco del programa [Copernicus](#), ha demostrado su utilidad para la estimación de clorofila-a [42], profundidad de disco de Secchi [43] y sólidos suspendidos [5]. Asimismo, ha servido para determinar la superficie de cuerpos de agua [44, 45], indispensable para delimitar el área de estudio. Las imágenes capturadas por Sentinel-2 permiten el monitoreo de la cobertura del suelo, para cultivos, bosques, áreas urbanas y agua superficial. La máxima resolución espacial de 10 m, y resolución temporal de 5 días, junto con acceso libre y gratuito de su repositorio de imágenes, y gran precisión en los resultados [46] convierten a Sentinel-2 en una opción viable.

Por su parte, el sensor PRISMA, en órbita desde 2019 pertenece a ASI. Sus principales usos en investigación incluyen análisis de bosques, agricultura de precisión, cambio climático, estudios del ambiente y calidad del agua, como ser monitoreo de la concentración de clorofila-a o blooms algales [22]. PRISMA ofrece productos a tope-de-atmósfera con pocas diferencias respecto de aquellos dados por Sentinel-2 [47]. Al comparar PRISMA con Sentinel-2, la calidad del agua estimada mediante PRISMA se corresponde adecuadamente con los resultados esperables [48]. Incluso otras características del agua, como ser la concentración de ficocianina, puede obtenerse mediante los productos hiperespectrales PRISMA [49].

2.2. Principios teóricos

La interacción de la radiación electromagnética con la superficie del agua es el principio fundamental de la teledetección. Las partículas presentes en el agua están constituidas por múltiples sustancias de diferente naturaleza [50], con composición orgánica, inorgánica, suspendida, disuelta, etc. La radiación incidente proviene del Sol, y parte de la misma es reflejada. Los componentes del agua ópticamente activos son aquellos que interactúan con la radiación incidente mediante absorción, reflexión y dispersión. La figura 2.1 esquematiza la radiación electromagnética que abandona un cuerpo de agua [23, 51].

Las características espectrales de la luz reflejada son específicas de los componentes ópticamente activos presentes. La intensidad de la radiación reflejada se puede relacionar con la abundancia de dicho componente, permitiendo su identificación y cuantificación. Para cuerpos de agua continentales, los componentes de interés suelen ser clorofila-a, sólidos suspendidos, materia orgánica disuelta coloreada (CDOM), entre otros [23].

La porción de la radiación incidente que es reflejada (reflectancia) es capturada por sensores montados en plataformas espaciales que rodean la Tierra [52]. Dichos sensores poseen, a determinadas longitudes de onda (bandas discretas), filtros que permiten medir la intensidad

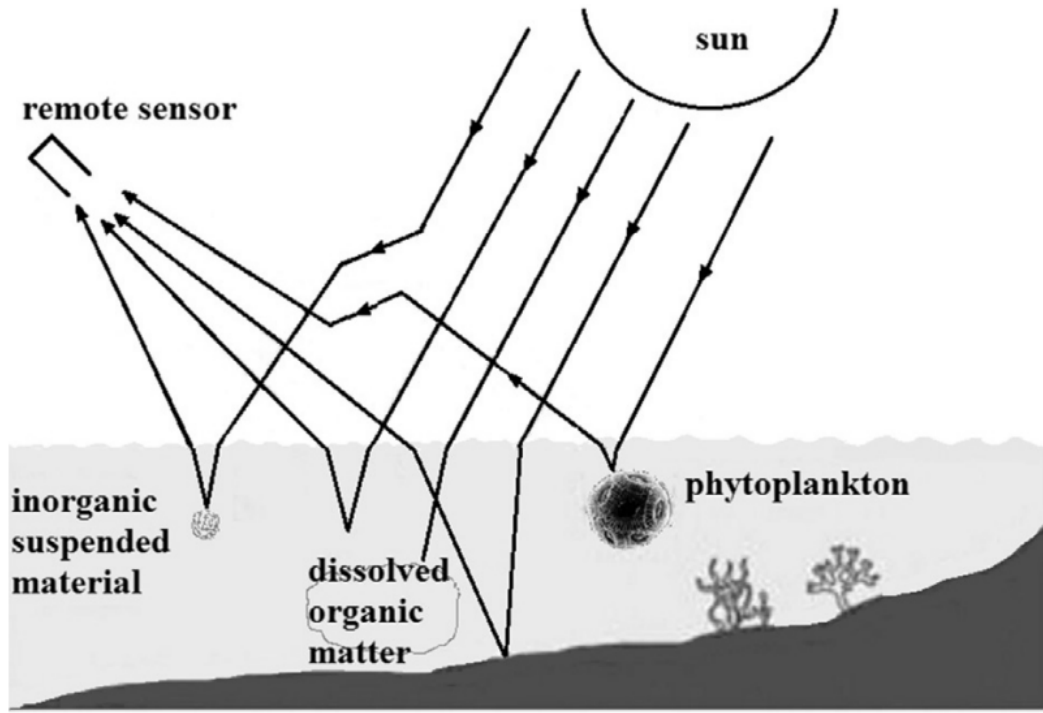


Figura 2.1: Diagrama de la trayectoria de la radiación solar y su interacción con la atmósfera y los componentes presentes en el agua, y su captura por un sensor remoto [23].

de la reflexión. Esto posibilita la generación de múltiples imágenes de una misma región, capturando la reflectancia a diferentes longitudes de onda. La información que esto brinda es de importancia, ya que permite el desarrollo de algoritmos de clasificación de uso y cobertura del suelo, como algoritmos semiempíricos que estiman propiedades biofísicas del agua, en conjunto con mediciones de campo.

La reflectancia total medida por el sensor satelital ρ_t , a una longitud de onda λ específica a tope de atmósfera se define como [53]:

$$\rho_t(\lambda) = \rho_r(\lambda) + \rho_a(\lambda) + \rho_{ra}(\lambda) + \rho_g(\lambda) + t\rho_w(\lambda), \quad (2.1)$$

donde ρ_r es la reflectancia generada por múltiples dispersiones por las moléculas del aire (dispersión de Rayleigh), en ausencia de aerosoles; ρ_a es la reflectancia resultante de la dispersión debido exclusivamente a aerosoles, sin considerar el aire; ρ_{ra} consiste en la interacción entre la dispersión dada las moléculas de aire y los aerosoles; ρ_g es la reflectancia de la radiación solar directa, es decir, fotones que reflejan especularmente sobre la superficie; ρ_w consiste de la reflectancia que abandona el agua; y t es la transmitancia de la atmósfera. ρ_t es detectada por los sensores espaciales a tope de atmósfera, siendo ρ_w la reflectancia objetivo, ya que es propiedad de las características del agua. Las reflectancias ρ_r , ρ_a y ρ_{ra} se obtienen a partir de la concentración y propiedades ópticas de los aerosoles en la superficie de interés. Los métodos de corrección atmosférica permiten obtener ρ_w a partir de la ecuación 2.1 mediante modelos de transferencia radiativa [10].

La radiación electromagnética, en su recorrido desde la superficie del planeta hasta su llegada al sensor, atraviesa todo el espesor de la atmósfera, interactuando con las partículas presentes en la misma [10]. Por lo tanto, la imagen generada consiste en la reflectancia a tope-de-atmósfera, donde se combinan los efectos de la interacción de la luz con los elementos presentes en el cuerpo de agua y con las partículas del aire. Es necesario que en

una etapa posterior se estimen los parámetros de la atmósfera, corrigiendo su presencia, y obtener así la reflectancia a nivel de la superficie terrestre [54]. Los organismos (por ejemplo, agencias espaciales) a cargo de los productos satelitales son los encargados de llevar a cabo la corrección atmosférica, automatizada, con algoritmos especializados de modelado atmosférico. Por ejemplo, Sentinel-2 emplea el procesador Sen2Cor [55]. Asimismo, existen una variedad de software que permiten realizar esta corrección con la posibilidad de un ajuste fino de las variables, como ser Acolite, ATCOR, DOS (Dark Object Substraction), 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum), entre otros.

La teledetección permite la estimación de variables biofísicas a partir de la información espectral correspondiente. Para ello, se asume la existencia de una ecuación algebraica que combina las mediciones de diferentes bandas espectrales con información de utilidad de la superficie de estudio [10]. Algoritmos semiempíricos pueden desarrollarse para relacionar valores obtenidos por sensado remoto con trabajo de campo y en laboratorio; o el uso de índices espectrales, que se asocian con parámetros de interés, tal como el NDCI (índice normalizado de diferencia de clorofila) puede relacionarse con la concentración de clorofila-a [56]. Dichos algoritmos deben someterse a análisis estadísticos para definir su significancia, evaluar errores y validarlos con datos de campo destinados para tal fin.

CAPÍTULO 3

Área de estudio

La figura 3.1 muestra la región de estudio, al noreste del país en la provincia del Chaco, marcado como una estrella en el mapa de Argentina. Comprende el AMGR (línea en rosa), las lagunas presentes (en naranja), los ríos principales (en celeste) y el río Paraná (en azul).

En la figura puede apreciarse el recorrido del Río Negro atravesando el AMGR. Al este, la costa del Río Paraná, que limita con la Provincia de Corrientes, y un brazo de éste, el riacho Barranqueras. El AMGR está comprendido por cuatro localidades: Resistencia, ciudad capital de la Provincia del Chaco; Barranqueras, Puerto Vilelas y Fontana. El agua superficial de la figura 3.1 es una representación general. La cantidad, tamaño y distribución de las lagunas

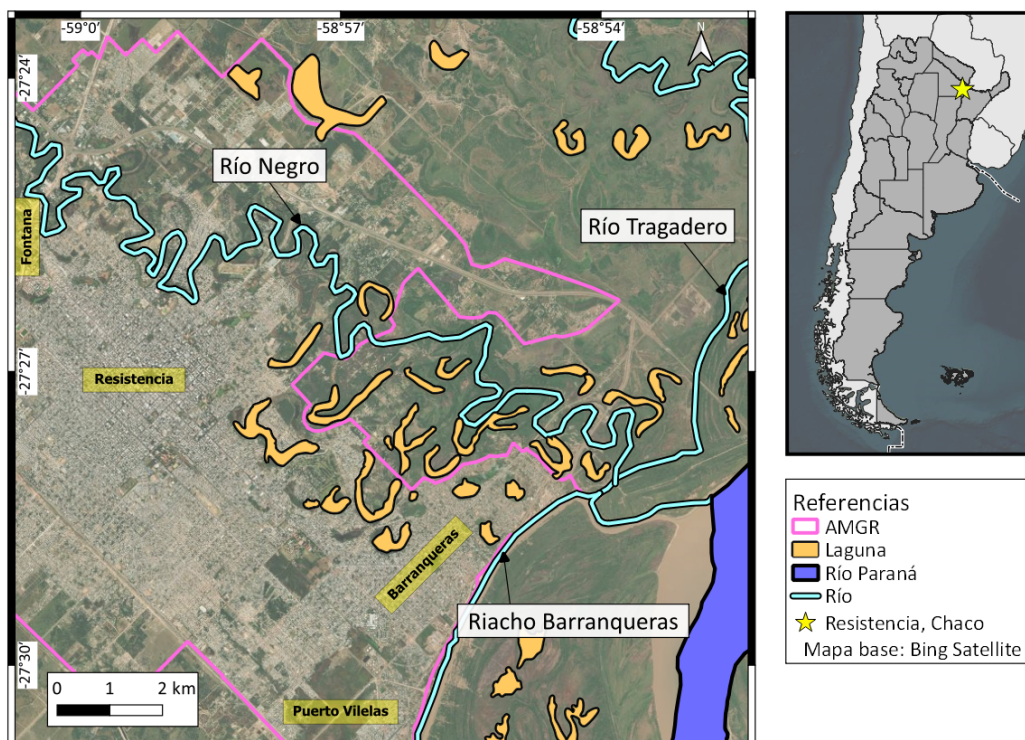


Figura 3.1: Ubicación de la región de estudio, ríos principales y cuerpos de agua presentes.

varía de acuerdo con la intensidad de las lluvias, períodos de sequía, cambios en el caudal del Río Negro, inundaciones, etc.

El AMGR está emplazado en el valle de inundación del río Paraná. Se desarrolla principalmente en el interfluvio del río Negro y el riacho Arazá, sobre un territorio de muy suave pendiente noroeste-suroeste; esto da lugar a un drenaje indeciso de esos cursos, con frecuentes desvíos en su recorrido, dejando cauces abandonados, restos de antiguos meandros casi siempre cubiertos de vegetación [57]. Este espacio, que en el pasado contenía 80 lagunas las cuales fueron rellenadas por la urbanización, actualmente sólo quedan 29. El AMGR posee un sistema de defensas, desagües pluviales y estaciones de bombeo que garantizan la seguridad hídrica del territorio [58].

El río Negro tiene su inicio en el Riacho Nogueira, un cauce inactivo que se extiende en rumbo noroeste-sureste. Su curso definido comienza al sur del Estero del Río Negro, hasta su desembocadura en el río Tragadero, al que se une para desaguar en el riacho Barranqueiras y finalmente en la margen derecha del río Paraná [14]. El río Negro, al igual que el río Tragadero, desborda al aumentar el caudal por el avance del Paraná sobre su cauce y, conjuntamente el sistema de lagunas laterales eleva su nivel por saturación de las napas subterráneas [59]. Este caudal está influenciado también por las precipitaciones, 1.300 mm anuales, del cual el 80 % se concentra en los meses de verano y otoño.

El clima del Chaco es tropical-semiárido a tropical-húmedo. Está caracterizado por un intercambio permanente de masas de aire tropical y austral. Durante períodos de viento norte, la temperatura puede subir a 40°C o más en una hora, incluso durante los meses frescos de agosto y septiembre. Las lluvias son generalmente intensas y pertenecen a dos tipos de precipitación: frontal, producida por el avance de masas de aire frío del sur o caliente del norte; y de convección, originadas en procesos convectivos locales dentro de una masa de aire tropical húmeda estacionada sobre la región, particularmente en verano [60].

Materiales y Métodos

4.1. Materiales

En el presente capítulo se describen las características de las imágenes hiperespectral y multiespectral, con y sin corrección atmosférica, junto con los sitios muestrales.

4.1.1. Productos satelitales, reflectancia a nivel de superficie

La imagen hiperespectral PRISMA utilizada fue adquirida el 11 de junio de 2021. El nivel de procesamiento es 2D, cuenta con corrección atmosférica, se encuentra en unidades de reflectancia superficial y está geolocalizada. Los valores de píxel se encuentran en su forma final, entre 0 y 1. Tiene una resolución espacial de 30 m y 63 bandas espectrales que abarcan desde 402 nm a 973 nm en el rango VNIR. El swath es de 30km. La tabla 4.1 muestra las principales características de esta imagen y el nombre específico del producto. Por simplificación, este producto será nombrado como **PRISMA L2D**.

PRS_L2D_STD_20210611141047_20210611141051_0001.he5					
Fecha	# de bandas	Resolución (m)	Swath (km)	Nivel	Rango (nm)
2021-06-11	63	30	30	2D	402-2497

Tabla 4.1: Características del producto PRISMA L2D.

La imagen multiespectral Sentinel-2, del sensor MSI, corresponde a la fecha 10 de junio de 2021, un día previo de la adquisición de PRISMA L2D, capturada por la plataforma 2B. La resolución espacial de las imágenes depende de la banda espectral, pudiendo ser de 10 m, 20 m o 60 m. El nivel de procesamiento es L2A, se encuentra corregida atmosféricamente, en reflectancia de superficie. Los valores de píxel deben transformarse mediante el factor de escala 0,0001. El producto cuenta con 13 bandas espectrales. En este trabajo sólo se consideran las primeras nueve bandas discretas, de B02 a B8A, con rango espectral 442-864 nm, aproximadamente similar al rango VNIR de PRISMA. El swath es de 110 km. La

S2B_MSIL2A_20210610T140059_N0300_R067_T21JUK_20210610T180708.SAFE					
Fecha	# de bandas	Resolución (m)	Swath (km)	Nivel	Rango (nm)
2021-06-10	9	10-20	100	2A	442-865

Tabla 4.2: Características del producto Sentinel-2 L2A.

tabla 4.2 resume las principales características junto al nombre que identifica al producto. Se refiere a este producto multiespectral como **S2 L2A**.

Las bandas B09 (943 nm) y B10 (1.376 nm) se descartaron ya que las mismas son de utilidad para la detección de vapor de agua y la presencia de nubes cirrus, respectivamente.

4.1.2. Productos satelitales, a tope de atmósfera

Para comparar el efecto de los métodos de corrección atmosférica, diferentes para ambas productos, se obtuvieron las imágenes sin corrección a tope de atmósfera.

La imagen multiespectral Sentinel-2, con nivel de procesamiento L1C, posee 30 m de resolución espacial, 110 km de swath e igual cantidad de bandas espectrales que el producto L2A. Las unidades son en reflectancia a tope de atmósfera, adimensional, con un factor de escala de 0,0001. Se refiere a este producto particular como **S2 L1C**.

La imagen hiperespectral PRISMA, nivel de procesamiento L1, posee valores de píxel en unidades físicas de radiancia ($W/m^2\text{-sr}\cdot\mu\text{m}$) a tope de atmósfera, corregida radiométricamente y calibrada. En la sección 4.2.2 se describe la transformación necesaria para convertir de radiancia a reflectancia aplicada sobre la imagen PRISMA. Este producto se denomina en la presente como **PRISMA L1**.

4.1.3. Sitios muestrales

La selección de los puntos muestrales se dividió en dos grandes grupos: por tipo de agua, donde se evaluaron las firmas espectrales de los productos seleccionados, y se hacen inferencias sobre las características biofísicas del agua; y una transecta a través del Río Paraná, para estudiar el cambio de las propiedades del agua entre ambas orillas. La figura 4.1 muestra la distribución de estos sitios.

Tipos de agua: se consideraron tres clases de agua, de acuerdo a sus características visuales y de composición. Los tipos de agua se dividieron entonces en:

Agua clase A: Representa cuerpos de agua lénticos, ubicados en lagunas dentro del AMGR. Se tomaron tres puntos muestrales (sitios 1, 2 y 3, figura 4.1), ubicados en diferentes cuerpos. Se encuentran inmersos en la región urbanizada y no suelen presentar problemas de eutrofización.

Agua clase B: Cuenta con un único punto de muestreo (sitio 4 en la figura 4.1) localizado en el centro de la laguna La Ribera (LR), de 250 m de largo, al norte del AMGR. Encontrándose rodeada en una zona poblada, presenta características de aguas eutróficas. Su estudio es de interés para monitorear sus características y evolución temporal.

Agua clase C: Se ubicaron tres sitios muestrales representantes de agua lótica, distribuidos en el margen oeste del río Paraná y un brazo del mismo (sitios 5, 6 y 7, figura 4.1), el Riacho Barranqueras. El sitio 5 es de especial interés, ya que allí se encuentra La Toma (LT), lugar

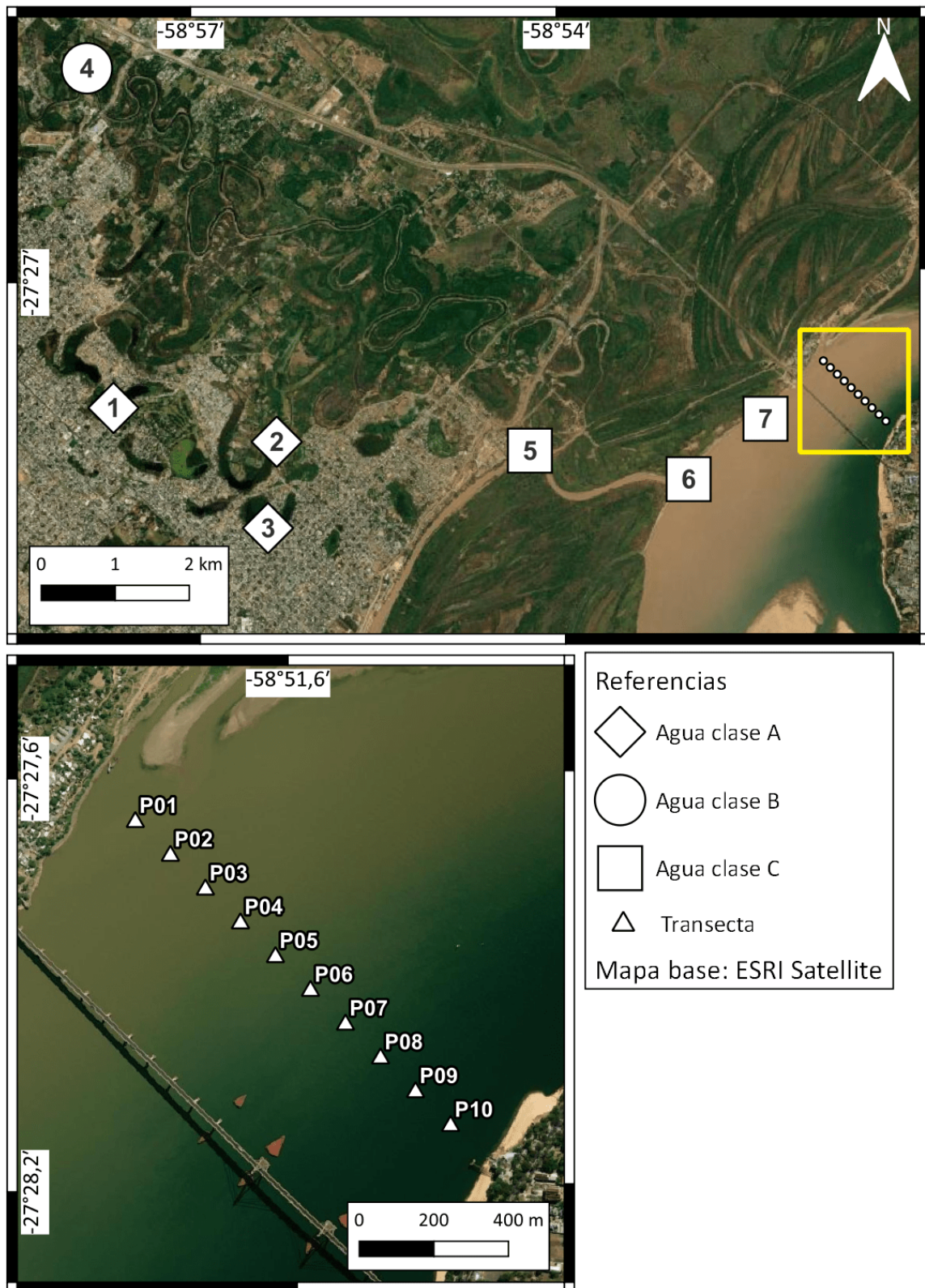


Figura 4.1: Arriba, localización de los sitios de muestreo para las tres clases de agua. Abajo, detalle de los puntos muestrales en la transecta a través del río Paraná.

desde donde se abastece de agua cruda la empresa potabilizadora del AMGR.

Debido al conocimiento de la zona de estudio, las características generales de los tipos de agua son:

- Agua clase A, concentración moderada de sedimentos, baja presencia de algas y visualmente de apariencia oscura.
- Agua clase B, posee altas concentraciones de clorofila-a, dando un característico color verdoso usual en el agua.
- Agua clase C, con altas concentraciones de sólidos en suspensión, dadas las características del Paraná en su costa Oeste.

Transecta en el río Paraná: Se trazó una línea perpendicular a la dirección de flujo del río Paraná, con diez puntos muestrales equidistantes, en dirección noroeste-sureste, paralelos a la dirección del puente que conecta ambas orillas. Se extrajeron las firmas espectrales a partir de la imagen hiperespectral, a fin de evaluar el cambio en la reflectancia del agua (forma de la firma espectral, valores de reflectancia, máximos) que pasa de altos contenidos de sedimentos (costa oeste) a aguas más claras (costa este).

La figura 4.1 muestra ambos conjuntos de puntos sobre el área de estudio. La imagen superior contiene la vista general con los sitios muestrales de las tres clases de agua. El recuadro amarillo, al este, se muestra detallado en la imagen inferior con los diez puntos en la transecta sobre el río Paraná.

4.2. Métodos

En esta sección se presenta una breve descripción de los métodos de corrección atmosférica seleccionados; conversión de radiancia a reflectancia, a tope de atmósfera; aplicación de convolución espectral, para comparar los resultados obtenidos entre diferentes sensores; métricas de desempeño, que permiten evaluar diferencias; análisis cromático, que estima el color del agua; software utilizado para la extracción y procesamiento de datos.

4.2.1. Métodos de corrección atmosférica

A continuación, se describen las características principales de los métodos de corrección atmosférica empleados por Sentinel-2, PRISMA y el procesador ACOLITE.

La corrección atmosférica de las imágenes Sentinel-2 se llevó a cabo mediante el procesador Sen2Cor [61]. Este algoritmo convierte los productos L1C (tope de atmósfera), corrigiendo la presencia de la atmósfera, a productos L2A (nivel de superficie). Sen2Cor genera mapas de espesor óptico de aerosoles, vapor de agua y clasificación de la escena. Además, cuenta con indicadores de calidad de nubes y nieve.

El módulo de corrección atmosférica en Sen2Cor es una modificación de Atmospheric & Topographic Correction (ATCOR) [61], en lenguaje de programación Python. Comprende la corrección a partir del espesor óptico de aerosoles, que mide la transparencia de la atmósfera a 550 nm, aplicando el algoritmo Dark Dense Vegetation [62]. La corrección debido al vapor de agua se logra mediante el algoritmo Atmospheric Pre-corrected Differential Absorption [63]. Sen2Cor emplea tablas de búsqueda a partir de un modelo de transferencia radiativa desarrollado en el paquete de software libRadtran [64, 65], que permiten un procesamiento rápido de la escena.

Sen2Cor incluye correcciones adicionales, como ser corrección por terreno, adyacencia, presencia de nubes cirrus, etc. El módulo Sen2Cor fue desarrollado para la superficie terrestre,

pero puede usarse para aplicaciones sobre aguas superficiales estimando el espesor óptico de aerosoles [61]. Sin embargo, no considera efectos propios de la superficie del agua, como el brillo proveniente la reflexión especular del Sol (*glint*).

Por otro lado, la corrección atmosférica de las imágenes PRISMA tienen la finalidad de remover los efectos de los componentes atmosféricos, como las moléculas y aerosoles de dispersión y los gases de absorción. Para la corrección se toman dos parámetros principales: tipo y espesor óptico de aerosoles, y columna de agua. Para una escena dada, se emplea un espesor óptico promedio, considerando la extensión de la imagen PRISMA [66]. El vapor de agua es estimado píxel a píxel, a $1,13\mu\text{m}$. Con esta información, se resuelven las ecuaciones de transferencia radiativa mediante iteración, minimizando una función costo, entre la diferencia del espectro simulado por las ecuaciones de transferencia radiativa (radiancia simulada a tope de atmósfera) y la medida por el instrumento (radiancia capturada a tope de atmósfera). Para disminuir el tiempo de procesamiento se emplean tablas de búsqueda, creadas en el software MODerate resolution atmospheric TRANsmision (MODTRAN) [66].

Una alternativa a Sen2Cor y PRISMA, es el procesador Atmospheric Correction for OLI “lite” (ACOLITE), desarrollado por Royal Belgian Institute of Natural Sciences (RBINS) para aplicaciones acuáticas a partir de datos satelitales de Landsat 5/7/8, Sentinel-2 A/B, Pléiades, PlanetScope, entre otros [67]. ACOLITE está particularmente adaptado para aguas turbias y pequeños cuerpos de agua. Tiene la capacidad de corregir imágenes atmosféricamente y de calcular diversos parámetros a partir de la reflectancia del agua, ya que cuenta con diversos algoritmos incorporados.

ACOLITE emplea Ajuste del Espectro Oscuro (Dark Spectrum Fitting, [68, 69]), que se basa en una atmósfera homogénea sobre la escena y la suposición de píxel negro. Algunos de los parámetros necesarios son transmitancia del vapor de agua, espesor óptico de Rayleigh y reflectancia en la trayectoria atmosférica, obtenidos a partir de tablas de búsqueda generadas por el modelo de transferencia radiativa 6SV [70]. La estimación de la reflectancia de superficie se realiza a partir de la reflectancia a tope de atmósfera; la transmitancia de los gases de la atmósfera, obtenida a partir del vapor de agua y ozono; y la reflectancia difusa del cielo [71].

Para la corrección atmosférica manual de ambos productos (PRISMA L1 y S2 L1C) se emplea ACOLITE. La corrección de la imagen PRISMA requiere del producto con nivel de procesamiento L1 (PRS_L1_STD_OFFL), para la corrección de los valores de píxel; y el producto nivel L2C (PRS_L2C_STD), ya que esta posee información de la geometría de la adquisición. ACOLITE, para la imagen multispectral Sentinel-2, requiere el producto con nivel de procesamiento L1C, a tope de atmósfera. Los productos generados de aplicar ACOLITE a las imágenes multi (S2 L1C) e hiperespectrales (PRISMA L1) son **S2 L1C + ACOLITE** y **PRISMA L1 + ACOLITE**, respectivamente.

Resumiendo, se establece la siguiente convención de nombres para identificar firmas espectrales, productos e imágenes:

S2 L2A: Sentinel-2 nivel de procesamiento L2A, corregida por atmósfera automáticamente con Sen2Cor, en reflectancia de superficie.

S2 L1C: Sentinel-2 nivel de procesamiento L1C, en reflectancia a tope de atmósfera, sin corrección atmosférica.

S2 L1C + ACOLITE: Sentinel-2 nivel de procesamiento L1C, corregida por atmósfera manualmente con ACOLITE, en reflectancia de superficie.

PRISMA L2D: PRISMA nivel de procesamiento 2D, corregida por atmósfera automática-

mente, en reflectancia de superficie.

PRISMA L1: PRISMA nivel de procesamiento 1, en reflectancia a tope de atmósfera, sin corrección atmosférica.

PRISMA L1 + ACOLITE: PRISMA nivel de procesamiento 1, corregida por atmósfera manualmente con ACOLITE, en reflectancia de superficie.

4.2.2. Conversión de radiancia a reflectancia, tope de atmósfera

Específicamente para el producto PRISMA L1, sin corrección atmosférica, los valores de píxel se dan en radiancia a tope de atmósfera, en unidades físicas ($W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$). Para comparar correctamente con el producto S2 L1C, se debe convertir a reflectancia empleando la siguiente ecuación [72]:

$$R_{toa,i} = \frac{L_i \cdot \pi}{E_{0,i} \cdot k \cdot \cos(SZ)}, \quad (4.1)$$

siendo $R_{toa,i}$ la reflectancia a tope de atmósfera (top-of-atmosphere). L_i es la radiancia presente en el producto PRISMA L1. $E_{0,i}$ es la irradiancia del espectro solar extraterrestre (ver Anexo A). k es dependiente del día del año: $k = 1 + 0,0167 \cdot \cos[2\pi \cdot (\text{día juliano} - 3)/365]^2$, donde se considera la excentricidad de la órbita terrestre 0,0167 [73], y la distancia entre el Sol y la Tierra [74]. SZ es el ángulo de la dirección solar entrante, dada por el ángulo zenit solar, obtenido a partir de los metadatos de PRISMA. La ecuación 4.1 se calcula considerando cada banda espectral i .

4.2.3. Convolución espectral

Los valores de reflectancia de superficie dados por PRISMA y Sentinel-2 MSI no son comparables de manera directa, debido a las diferencias en las características espectrales de los sensores. La resolución espectral para PRISMA ronda aproximadamente los 11 nm, para todas las bandas del VNIR. Sin embargo, Sentinel-2 posee bandas con 15 nm de ancho (B05 y B06) hasta los 106 nm (B08). Asimismo, los centros de banda no son coincidentes.

Para llevar a cabo una comparación adecuada a nivel reflectancia de superficie, es necesario transformar los valores de Sentinel-2 como si hubiesen sido adquiridos por el sensor montado en PRISMA. Esta transformación permite que los valores de reflectancia obtenidos sean equiparables. Este producto sintetizado se denomina **S2 SIM**, que consiste en una firma espectral por clase de agua, equivalente a S2 L2A, generada con las características espectrales de PRISMA L2D.

Una buena correlación entre S2 SIM y PRISMA L2D es indicador de la buena calidad en la medición hecha por el sensor hiperespectral, ya que el sensor MSI posee baja incertidumbre en la calibración radiométrica, ofreciendo resultados y validaciones confiables [46].

La comparación entre los sensores PRISMA y Sentinel-2 se llevó a cabo mediante convolución espectral, aplicando la siguiente ecuación general [75]:

$$\hat{I}(\lambda_i) = \frac{\int_k I(\lambda_i) \cdot SRF_i(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_k SRF_i(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (4.2)$$

donde, para la banda espectral i , $\hat{I}(\lambda_i)$ es la reflectancia simulada del sensor multispectral, con un ancho de banda k , centrada en λ_i ; $I(\lambda_i)$ es la reflectancia correspondiente dada por el sensor hiperespectral. $SRF_i(\lambda)$ es la función de respuesta espectral (Spectral Response Function) de MSI, correspondiente a la banda i , específicamente de la plataforma 2B de Sentinel. La misma puede obtenerse de la web de [Sentinel-2](#). La implementación de la ecuación 4.2 genera la firma espectral sintética S2 SIM. La figura 4.2 muestra las curvas de SRF usadas, normalizadas a la unidad, para las 13 bandas espectrales disponibles.

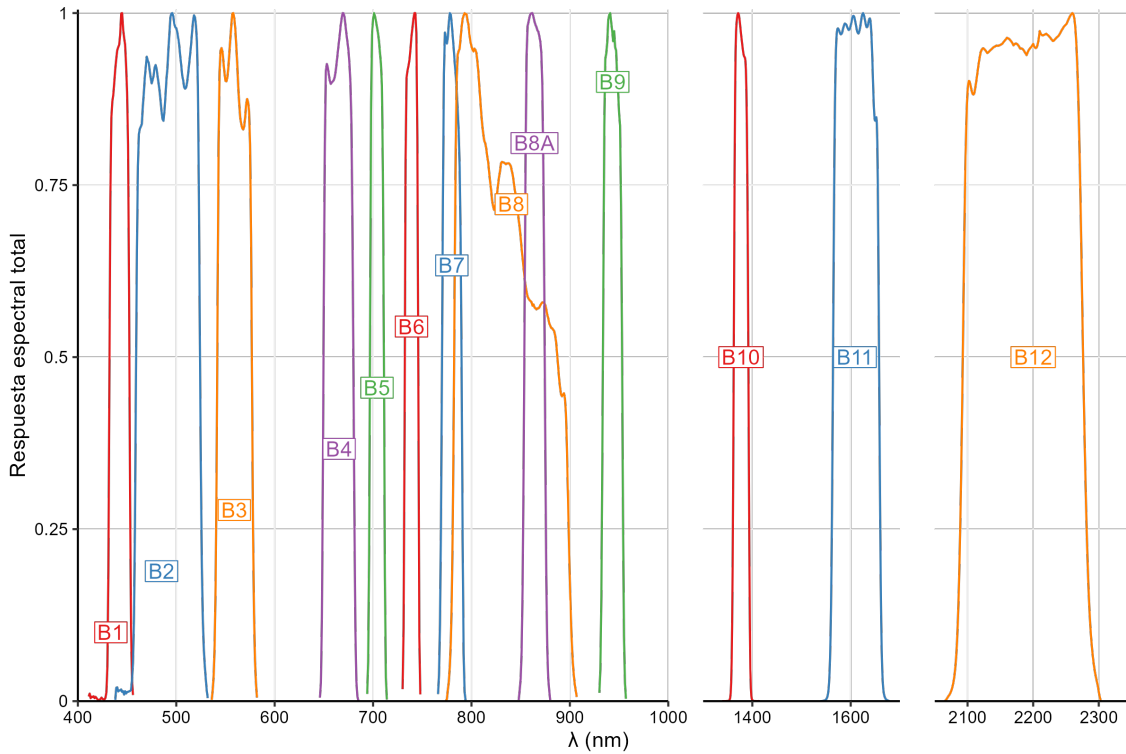


Figura 4.2: Función de respuesta espectral del sensor MSI a bordo de Sentinel-2B, para todas las bandas espectrales.

4.2.4. Métricas de desempeño

Para evaluar la cercanía de los valores de reflectancia de superficie para cada longitud de onda, en los diferentes sensores y métodos de corrección se seleccionaron una serie de métricas de desempeño.

Se toma como valor de referencia a las reflectancias de superficie sintéticas, generadas por la convolución espectral, S2 SIM. Esta transformación permite combinar las mediciones de MSI, un sensor validado y reconocido por sus resultados de calidad en múltiples investigaciones, con la alta resolución espectral de PRISMA, como se menciona en la sección previa.

Las métricas de desempeño comparan dos conjuntos de datos: S2 SIM siempre se mantiene, y las demás fuentes de datos, como ser las firmas espectrales de las imágenes proporcionadas por la agencia espacial (S2 L2A, PRISMA L2D) y las corregidas manualmente (S2 L1C + ACOLITE, PRISMA L1 + ACOLITE). Estas métricas se calculan para las tres clases de agua considerada.

Se describen a continuación las métricas de desempeño calculadas y sus ecuaciones. En todos los casos se consideró los valores de S2 SIM como y , y los valores contra los que se

comparaba como x , para n sitios.

MAE, error medio absoluto. MAE es una métrica para evaluar la precisión, en las unidades del parámetro considerado. Tiene la ventaja de no amplificar el efecto de los valores extremos y refleja de forma coherente la magnitud del error [76]. La fórmula de MAE es:

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n}; \quad (4.3)$$

RMSE, raíz cuadrada del error cuadrático medio. Las unidades de RMSE son las mismas del parámetro al que se aplica. Es una métrica sensible a la distribución de los datos, empleada para evaluar la precisión entre los datos comparados [76]. Actualmente se recomienda emplear el error absoluto medio (MAE) como medida de la magnitud del error [77]. RMSE tiene la siguiente expresión:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}; \quad (4.4)$$

SAM, medida del ángulo espectral. SAM considera a las firmas espectrales como vectores en un espacio j -dimensional, siendo j el número de bandas espectrales [78]. SAM, expresado en grados, se calcula utilizando geometría analítica, siendo el arco coseno del producto escalar entre vectores. La ecuación es:

$$\text{SAM} = \arccos \left(\frac{\vec{y} \cdot \vec{x}}{\|\vec{y}\| \cdot \|\vec{x}\|} \right) = \arccos \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \right), \quad (4.5)$$

con \vec{y} como la forma vectorial de y , cuyo módulo es $\|\vec{y}\|$.

BIAS, tendencia. Mide la diferencia media entre ambos conjuntos de datos y estima el error sistemático. BIAS puede ser positivo o negativo, de acuerdo a si existe una sobrestimación o subestimación en la comparación, respectivamente. La ecuación de BIAS es similar a fórmula 4.3 excluyendo el valor absoluto.

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - x_i}{n}; \quad (4.6)$$

R², coeficiente de determinación. Un modelo lineal simple con R² cercano a la unidad explica exitosamente la variabilidad de y [79]. Es sensible a valores extremos, puede variar de acuerdo con el rango de datos y sobrestimar la relación entre variables [76]. La expresión general de R² es:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (4.7)$$

donde \bar{y} es el valor promedio de y . \hat{y}_i es el valor estimado a partir de un modelo lineal simple: $\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i$, siendo β_0 y β_1 la ordenada al origen y la pendiente, respectivamente [79]. El cociente en la ecuación 4.7 representa la variabilidad total que no puede ser explicada por el modelo.

Con estas métricas de desempeño se busca encontrar las diferencias existentes en las firmas espectrales para los diferentes tipos de agua, qué sensores y métodos de corrección de imágenes se acercan a los valores de referencia (S2 SIM). Una única métrica no es suficiente, sino que su combinación permitió una buena interpretación de resultados.

4.2.5. Análisis cromático

El color de un objeto puede definirse matemáticamente mediante la ponderación de los espectros de reflectancia con curvas cromáticas, las cuales especifican la sensibilidad del ojo humano a los tres colores primarios [80]. En este sentido, existen algoritmos desarrollados para obtener las coordenadas cromáticas a partir de mediciones de sensores espaciales. Con las coordenadas cromáticas (x, y, z) es posible ubicar el color del agua superficial en el plano cromático $(x$ vs $y)$, considerando que:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}, \quad (4.8)$$

donde X, Y, Z representan los valores triestímulo, que indican el estímulo de los colores primarios al ojo humano. Particularmente para el sensor MSI presente en la plataforma Sentinel-2, estos parámetros se calculan a partir de las siguientes ecuaciones [81]:

$$\begin{aligned} X &= 8,356 \cdot R_{B01} + 12,040 \cdot R_{B02} + 53,696 \cdot R_{B03} + 32,087 \cdot R_{B04} + 0,487 \cdot R_{B05} \\ Y &= 0,993 \cdot R_{B01} + 23,122 \cdot R_{B02} + 65,702 \cdot R_{B03} + 16,830 \cdot R_{B04} + 0,177 \cdot R_{B05} \\ Z &= 43,487 \cdot R_{B01} + 61,055 \cdot R_{B02} + 1,778 \cdot R_{B03} + 0,015 \cdot R_{B04} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Donde cada término está compuesto por una constante y el valor de reflectancia para las bandas espectrales dadas, desde B01 a B05.

El color del agua puede representarse mediante el ángulo del tono de color (α) [82], que es aquel comprendido entre el centro del plano cromático $(y_m = x_m = 1/3)$ y el punto de color de la muestra $(x - 1/3; y - 1/3)$, con el eje horizontal $(y - 1/3 = 0)$. La expresión de α está dada por la ecuación siguiente [83]:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{y - 1/3}{x - 1/3} \right) \frac{180}{\pi} \quad (4.10)$$

El análisis cromático permite conocer el color del agua en los puntos muestrales.

A cada punto dentro del plano cromático le corresponde una longitud de onda dominante λ_d . La misma se obtiene en la intersección del contorno del diagrama cromático, y una recta que comienza en el centro del plano y atraviesa el punto muestral $(x; y)$ [84]. En el Anexo B se muestra un plano cromático detallado.

4.3. Software

La firma espectral obtenida de la imagen PRISMA fue conseguida a partir del software EarthBit (versión 1.14.5) que permite leer, sin transformaciones previas, el producto hiperespec-

tral. EarthBit exporta en formato de números separados por coma los valores de reflectancia, facilitando el posterior procesamiento de datos.

La corrección atmosférica de ambos productos multi e hiperespectral se realizaron con el procesador ACOLITE (versión 20210802.0) [85]. Este programa toma las imágenes a nivel tope de atmósfera y aplica el método de corrección Dark Spectrum Fitting (DSF) [68, 69, 86], obteniéndose todas las bandas corregidas.

El análisis cromático se realizó empleando `colour` (versión 0.4.2) [87], paquete desarrollado en Python que comprende un extensa cantidad de algoritmos y bases de datos utilizados en la ciencia del color.

Los mapas fueron confeccionados en QGIS (versión 3.22.11-Białowieża) [88], sobre lenguaje de programación Python (versión 3.9.5).

El procesamiento de datos se hizo en el lenguaje de programación R [89] (versión 4.2.1), siendo el entorno de edición RStudio [90] (versión 2022.07.2 Build 576). Los paquetes principales que se emplearon se listan a continuación:

- `prismaread` [91], lectura y conversión de productos hiperespectrales PRISMA.
- `raster` [92], v1.0.0, procesamiento y extracción de información geográfica.
- `rgdal` [93], v1.5-32, transformación y lectura de vectores e información geoespacial.
- `Metrics` [94], v0.1.4, cálculo de métricas de desempeño.
- `colorscience` [95], v1.0.8, diagramas cromáticos, métodos y datos para ciencia del color.
- `tidyverse` [96], v1.3.2, manipulación de bases de datos y visualización de resultados.

Resultados y discusión

5.1. Imagen en composición de color real

La región VNIR del producto PRISMA L2D fue convertida a un cubo de datos compuesto de 63 bandas apiladas. El rango de longitudes de onda abarca de 402 nm a 972 nm. En el Anexo C se listan todas las bandas VNIR, la longitud de onda central y el ancho a altura media (FWHM), obtenida a partir de los metadatos.

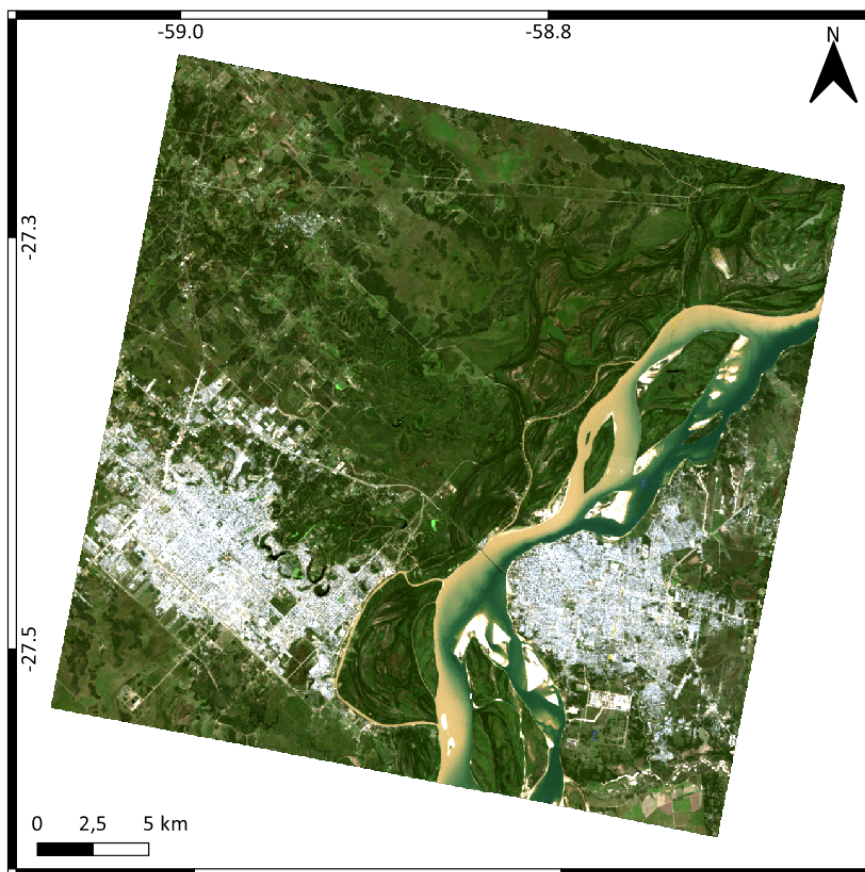
La imagen en color real RGB PRISMA fue compuesta al elegir aquellas bandas que más se aproximen a las longitudes de onda del rojo, verde y azul de Sentinel-2, específicamente de la plataforma 2B, la cual capturó la imagen multiespectral de estudio. La tabla 5.1 muestra las bandas espectrales que se usaron para la composición en color real, el nombre de las mismas y el centro de banda. En el Anexo D se lista una tabla con la longitud central de cada banda espectral y el FWHM para la plataforma S2A y S2B de Sentinel-2.

La figura 5.1 muestra las imágenes en RGB correspondientes a PRISMA L2D y S2 L2A. La figura 5.1a es la escena completa PRISMA, con un swath de 30 km. La imagen Sentinel-2, con 110 km de swath, fue recortada para la misma región, manteniendo la escala.

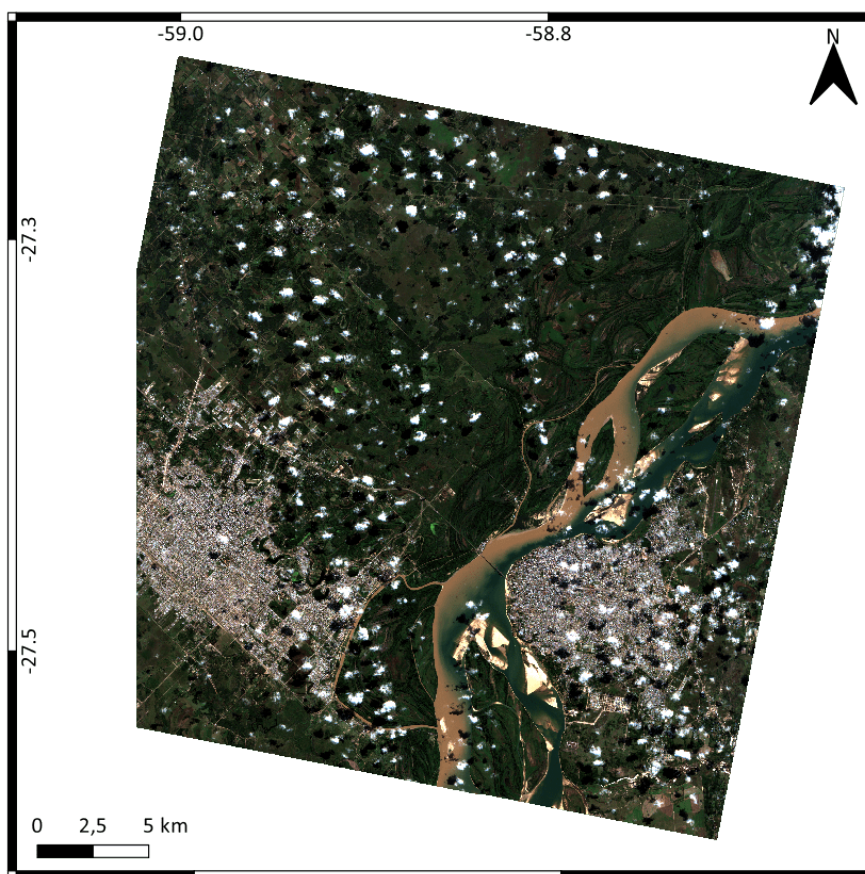
Es notable la presencia de pequeñas nubes esparcidas en la imagen multiespectral 5.1b. La figura 5.1a, correspondiente a PRISMA, se muestra ausente de nubes. De acuerdo a los metadatos proporcionados junto a ambos productos, en toda la extensión de Sentinel-2, el 21,6% se encuentra cubierto de nubes; para PRISMA es el 0,2%.

	Sentinel-2 L2A		PRISMA L2D	
	Centro de banda (nm)	Banda	Centro de banda (nm)	Banda
R	664,9	B04	669,8	B37
G	559,0	B03	562,7	B25
B	492,1	B02	492,7	B16

Tabla 5.1: Centros y números de banda utilizados para la composición RGB de ambos productos.



(a) PRISMA L2D, 2021-06-11, 11:14.



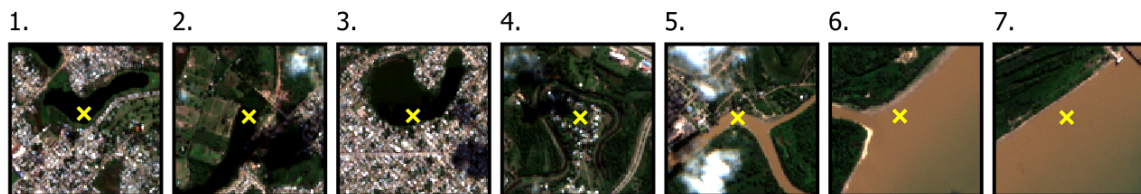
(b) Sentinel-2 L2A, 2021-06-10, 11:00.

Figura 5.1: Composición RGB de los productos PRISMA L2D y Sentinel-2 L2A. Los horarios de adquisición corresponden a la hora local.

Para ambas imágenes RGB se utilizó la misma configuración de simbología en QGIS, removiendo los valores de píxel extremos, quedando el rango del 2% al 98%. Brillo, gamma y contraste se mantuvieron en automático en ambos casos.

A simple vista se aprecian diferencias en los colores. La vegetación, presente en la mayor parte de la escena es de color verde más vibrante en PRISMA L2D, y con un tono más apagado en S2 L2A. El río Paraná, en la costa Oeste presenta una tonalidad amarillenta en la imagen hiperespectral, con la zona urbana en tonos blancos. La imagen multiespectral muestra el río Paraná en colores marrones, y las ciudades en gris. Estas diferencias visuales entre las imágenes se deben a que la resolución espectral de ambos sensores difiere. El sensor presente en Sentinel-2, MSI, posee un ancho de banda mucho mayor que PRISMA; otra consideración es que los centros de banda usados en la composición de color real no son exactos (ver tabla 5.1). Existe una diferencia de un día entre la adquisición de las imágenes, pudiendo generar potenciales modificaciones en la composición de la atmósfera, que es corregida por métodos distintos, lo que da valores de reflectancia de superficie diferentes.

Sentinel-2 L2A:



PRISMA L2D:

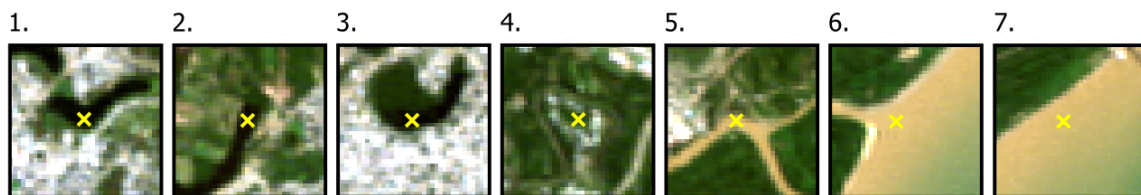


Figura 5.2: Detalle de los sitios muestrales para cada producto utilizado.

La figura 5.2 muestra con mayor detalle los puntos muestrales (cruz en amarillo) para ambos productos. Los números sobre los paneles representan los sitios de referencia, de acuerdo con la numeración empleada en la figura 4.1: puntos 1, 2, 3 representan agua clase A; punto 4 agua clase B; 5, 6 y 7 agua clase C.

A pesar de la existencia de nubes en la imagen con fecha 2021-06-10 de Sentinel-2 (5.1b), con sus correspondientes sombras, se elige este producto por ser el de menor diferencia temporal con la imagen PRISMA, del 2021-06-11. Las condiciones atmosféricas de ambos días se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional, del [portal de descarga](#) de datos diarios. La tabla 5.2 lista los parámetros atmosféricos principales, donde no se observan grandes alteraciones entre ambas fechas.

Sensor	Fecha	Horario	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (hPa)
Sentinel-2	2021-06-10	11:00	21,1	71	1019,0
PRISMA	2021-06-11	11:00	17,9	77	1024,3

Tabla 5.2: Condiciones meteorológicas entre las fechas correspondientes a la adquisición de los productos Sentinel-2 y PRISMA.

Ambas imágenes no coinciden geográficamente, existiendo una distorsión en la geolocali-

zación. Al compararlas con otra fuente de datos, como ser Google Stellite, se evidencia que es la imagen PRISMA la que se encuentra desplazada. La figura 5.3 muestra este desplazamiento. El punto rojo corresponde al centro de la plaza principal de la Ciudad de Resistencia ($27^{\circ} 27' 4,2''$ S; $58^{\circ} 59' 11,4''$ O), que se tomó como sitio de referencia. Se marcan líneas de trazos como guía, para ayudar en la visualización. En la figura 5.3b se observa el desplazamiento del centro de la plaza de 50 m aproximadamente, en dirección noreste. Este valor está en concordancia con los reportes de caracterización de PRISMA [97]. Para 2022 se espera la implementación de un sistema global de puntos de control terrestre que mejore la precisión a 15 m. Debido esto, los vectores empleados para la extracción de las firmas espectrales fueron corregidos, desplazándolos en la dirección opuesta, para representar la misma ubicación sobre las aguas superficiales en estudio.

Al comparar las imágenes de la figura 5.3, también es posible distinguir la diferente resolución espacial, de 10 m para Sentinel-2 y 30 m para PRISMA. La simbología se mantuvo en automático para ambas imágenes.

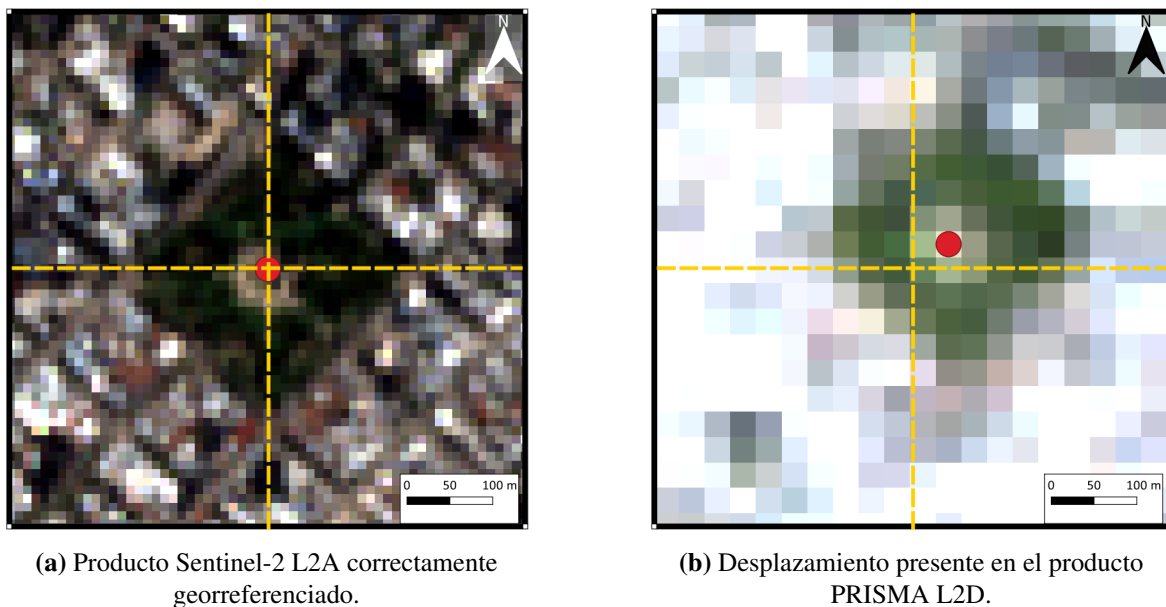


Figura 5.3: El punto rojo indica la misma posición, las líneas de trazos sirven a modo de guía. (a) Sentinel-2 posee una georeferenciación correcta. (b) PRISMA muestra un corrimiento.

5.2. Firmas espectrales

En esta sección se realiza el análisis y la interpretación de las firmas espectrales de los productos PRISMA y Sentinel-2, para las aguas clases A, B y C. Se evalúan firmas espectrales corregidas por la presencia de la atmósfera, de manera automática (PRISMA L2D, S2 L2A), y manual con ACOLITE (PRISMA L1 + ACOLITE, S2 L1C + ACOLITE), en reflectancia de superficie. Además, se analizan las firmas espectrales con y sin corrección atmosférica de ambos sensores, para lo cual se muestran los resultados de firmas de Sentinel-2 simuladas mediante convolución espectral a partir de datos PRISMA.

5.2.1. Firmas espectrales en reflectancia de superficie

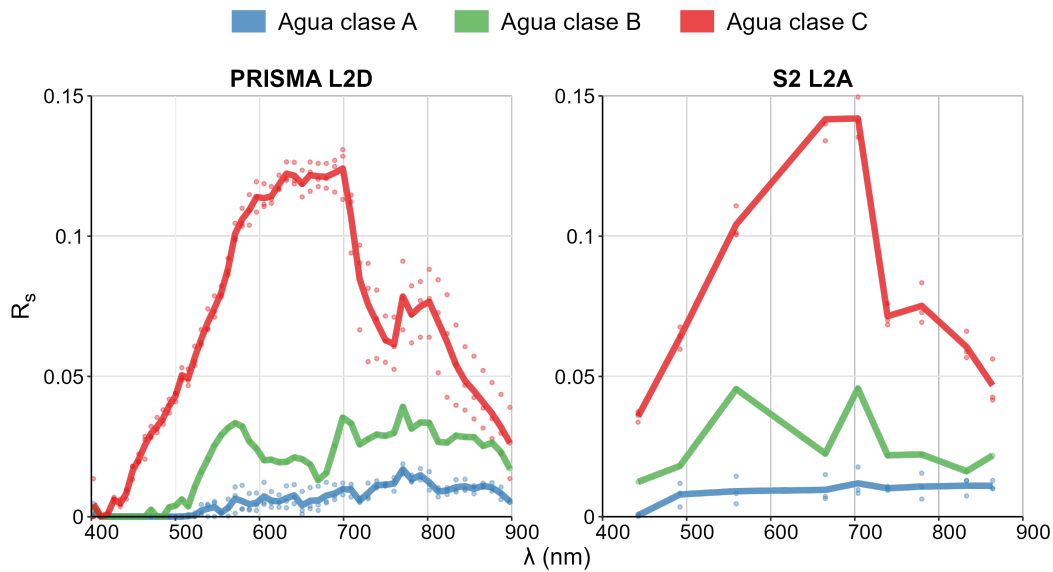


Figura 5.4: Firmas espectrales para las tres clases de agua, obtenidas por PRISMA L2D y S2 L2A.

Las firmas espectrales de las tres clases de agua, a partir de los productos PRISMA L2D y S2 L2A, se muestran en la figura 5.4. Los valores están en reflectancia de superficie (R_s), compartiendo el eje vertical. El rango de longitudes de onda (λ) fue acotado para coincidir con la región VNIR, de 400 nm a 900 nm.

Los puntos traslúcidos en la figura 5.4 marcan los valores individuales extraídos de los sitios muestrales. Las curvas continuas son las firmas espectrales medias para cada clase de agua.

Las formas generales de las curvas son similares para ambos sensores, con mayor nivel de detalle en las firmas espectrales dadas por PRISMA L2D, aprovechando las 63 bandas discretas, contra las 9 de S2 L2A.

Independientemente del sensor, el agua clase A (bajo contenido de sedimentos, figura 5.4, en azul) presenta las R_s más bajas, con valores uniformes en todo el rango de longitud de onda. El agua clase B (altas concentraciones de clorofila-a, línea en verde) posee un pico en los 560 nm, longitud de onda correspondiente al color verde; y un pico en 705 nm, causado por la adsorción de clorofila-a a los 669 nm. La firma espectral del agua tipo C (elevadas presencia de sólidos en suspensión, línea en rojo) presenta los valores más altos de R_s , con máximos alrededor de los 600-700 nm.

Los efectos de la corrección atmosférica realizada con ACOLITE sobre los productos hiperespectral y multispectral, para cada clase de agua, pueden verse en la figura 5.5. Las curvas en gris representan firmas espectrales en R_s (BOA, *bottom of atmosphere*) y las curvas en negro las firmas espectrales de los productos en tope de atmósfera, luego corregidas manualmente por ACOLITE (TOA + ACOLITE, *top of atmosphere*).

Las curvas espectrales para el agua clase A, entre PRISMA L2D y PRISMA L1 + ACOLITE, presentan una separación entre ambas firmas. El método de corrección aplicado para generar el producto PRISMA L2D anula por completo los valores de reflectancia a bajas longitudes de onda, hasta los 500 nm. Aplicar la corrección manual mediante ACOLITE mejoró los valores, que dejan de ser nulos, aunque surge un valor aislado negativo a los 419 nm. S2 L2A presenta en la mayor parte de la curva espectral reflectancias que son menores a las de

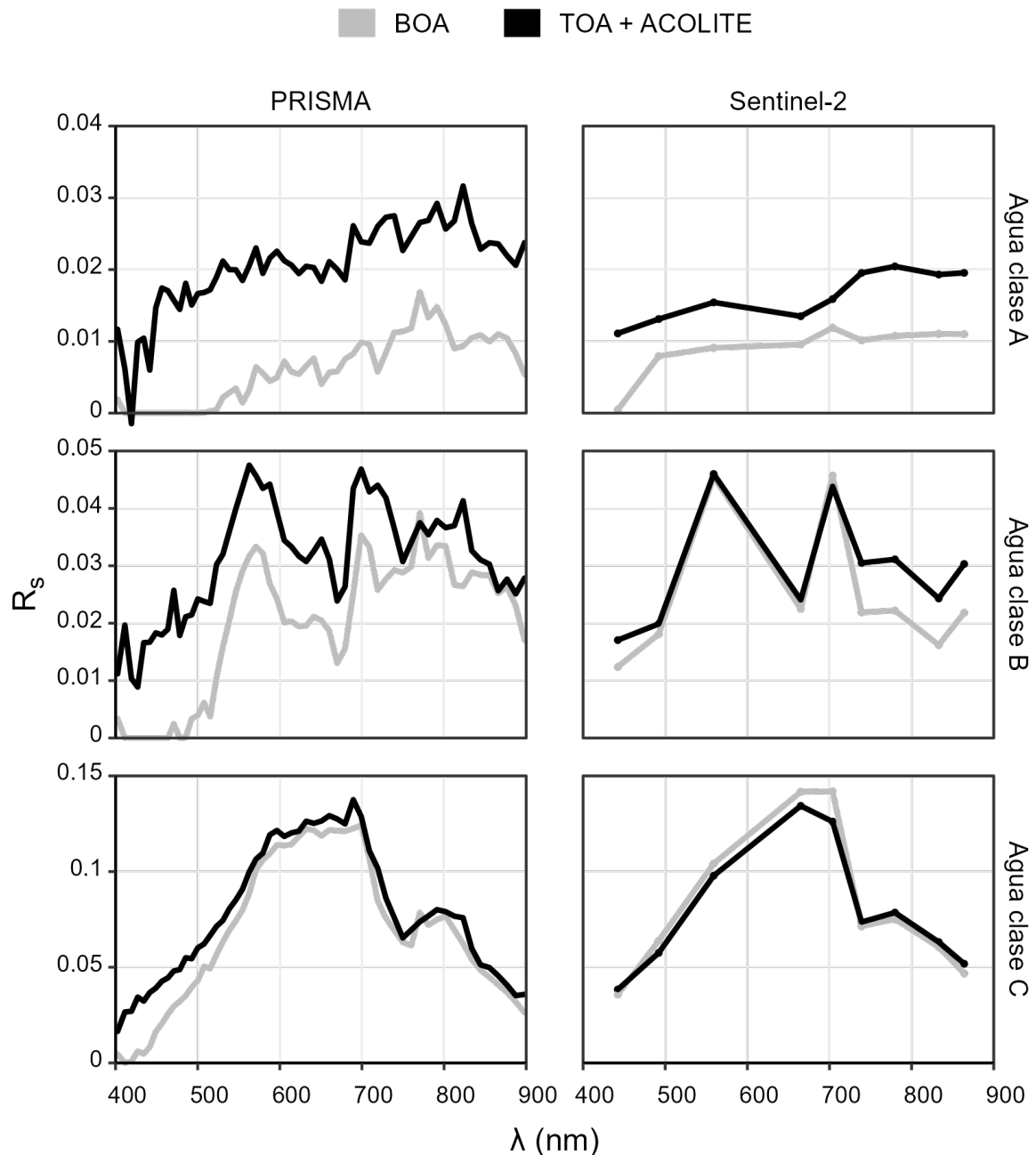


Figura 5.5: Firmas espectrales para cada clase de agua y plataforma, de acuerdo al método de corrección atmosférica. En gris, reflectancia de superficie automática (BOA); en negro, reflectancia a tope de atmósfera (TOA) con posterior corrección vía ACOLITE.

S2 + ACOLITE, similar a lo que sucede con el producto hiperespectral. Las diferencias entre ambos métodos de corrección atmosférica son notables dados los bajos valores de R_s . Los puntos de muestreo se observan como píxeles oscuros al visualizar en composición RGB, posiblemente indicando la presencia de sedimentos en el fondo de los cuerpos de agua [98], que explica el leve ascenso de la respuesta espectral. La baja señal generada da lugar a una gran variabilidad en la respuesta hiperespectral, con altibajos a lo largo del rango de longitudes de onda observado.

Para el agua clase B, en todas las firmas espectrales, presenta un pico alrededor de los 570 nm (B03 en Sentinel-2), característico ante la presencia de clorofila-a y con bajas concentraciones relativas de sólidos suspendidos [99]. Bajas R_s en la región del azul (400 nm a 500

nm) y un pico cercano a los 550 nm se corresponden con la presencia de clorofila-a en el agua [100]. La absorción causada por la clorofila-a sería responsable de las bajas R_S a los 430 nm y 675 nm [101]. El pico visto a los 700 nm probablemente sea generado por dos absorciones alrededor del mismo, a los 680 nm debido a la clorofila-a y a los 750 nm generada por el agua [102]; y el valle a 620 nm debido a ficocianina [103], pigmento característico de cianobacterias. La curva que mejor explica este comportamiento, con gran nivel de detalle, es la PRISMA L2D.

La corrección de ACOLITE sobre el producto multiespectral no presenta grandes desviaciones hasta los 700 nm, donde las firmas espectrales se separan. En el producto PRISMA L2D, la mayoría de las reflectancias captadas a menos de 485 nm son nulas. ACOLITE corrige estos valores nulos y la curva se asemeja a la dada por S2 L1C + ACOLITE.

Las firmas espectrales para el agua clase C (figura 5.5) presentan los valores más altos de R_S . Posiblemente, la gran concentración de sólidos suspendidos es causante de los elevados valores [99]. Manteniendo la escala del eje vertical, las cuatro curvas presentan pequeñas desviaciones entre sí, existiendo diferencias menores entre la forma de la firma y los valores de R_S . La correspondencia entre las reflectancias de PRISMA L2D y S2 L2A es evidente a varias longitudes de onda [48]. Para el producto PRISMA, a bajas longitudes de onda, las reflectancias dadas por PRISMA L1 + ACOLITE resultan superiores a las de PRISMA L2D.

Los métodos de corrección atmosférica aplicados a la imagen Sentinel-2, Sen2Cor y ACOLITE, presentan de manera general buenos resultados en aguas mesotróficas a hipereutróficas [4]. Asimismo, Sen2Cor, para aguas claras y turbias, presentan errores similares a pesar de las diferencias en las aguas superficiales [104]. Para aguas claras, ambos métodos de corrección muestran desviaciones comparables [104].

Las firmas espectrales de las figuras 5.4 y 5.5 muestran el efecto en la respuesta espectral debido a las características del agua. Para el agua clase C las diferencias son mínimas, posiblemente dada los altos valores de reflectancia; sin embargo, para el agua clase A, con baja señal, las discrepancias entre firmas es evidente.

5.2.2. Firma espectral Sentinel-2 simulada por convolución

La figura 5.6 muestra las respuestas espectrales para las clases de agua obtenidas por PRISMA L2D, junto con la firma espectral sintética, simulada por convolución espectral (S2 SIM). En cada panel, en la esquina superior izquierda se indica el valor de SAM, en grados, como una medida de la desviación de las firmas comparadas.

Cada columna muestra las firmas espectrales de cada producto, hiper y multispectral, con corrección atmosférica automática o manual (vía ACOLITE). Cada fila muestra la respuesta espectral de cada clase de agua.

La curva S2 SIM sólo está compuesta por 9 puntos, ya que consiste en una firma espectral sintética generada a partir de la ecuación 4.2, tomando como base S2 L2A, con las características espectrales de PRISMA L2D.

Los puntos de S2 SIM se superponen sobre la curva PRISMA L2D para las tres clases de agua, con una buena correspondencia en los valores (R_s) y la forma de la firma espectral, tal como lo indican los bajos SAM, que son los más bajos comparados con el resto de productos. El agua clase C, para todos los casos, es la que menos diferencias presenta a lo largo de los diferentes productos analizados.

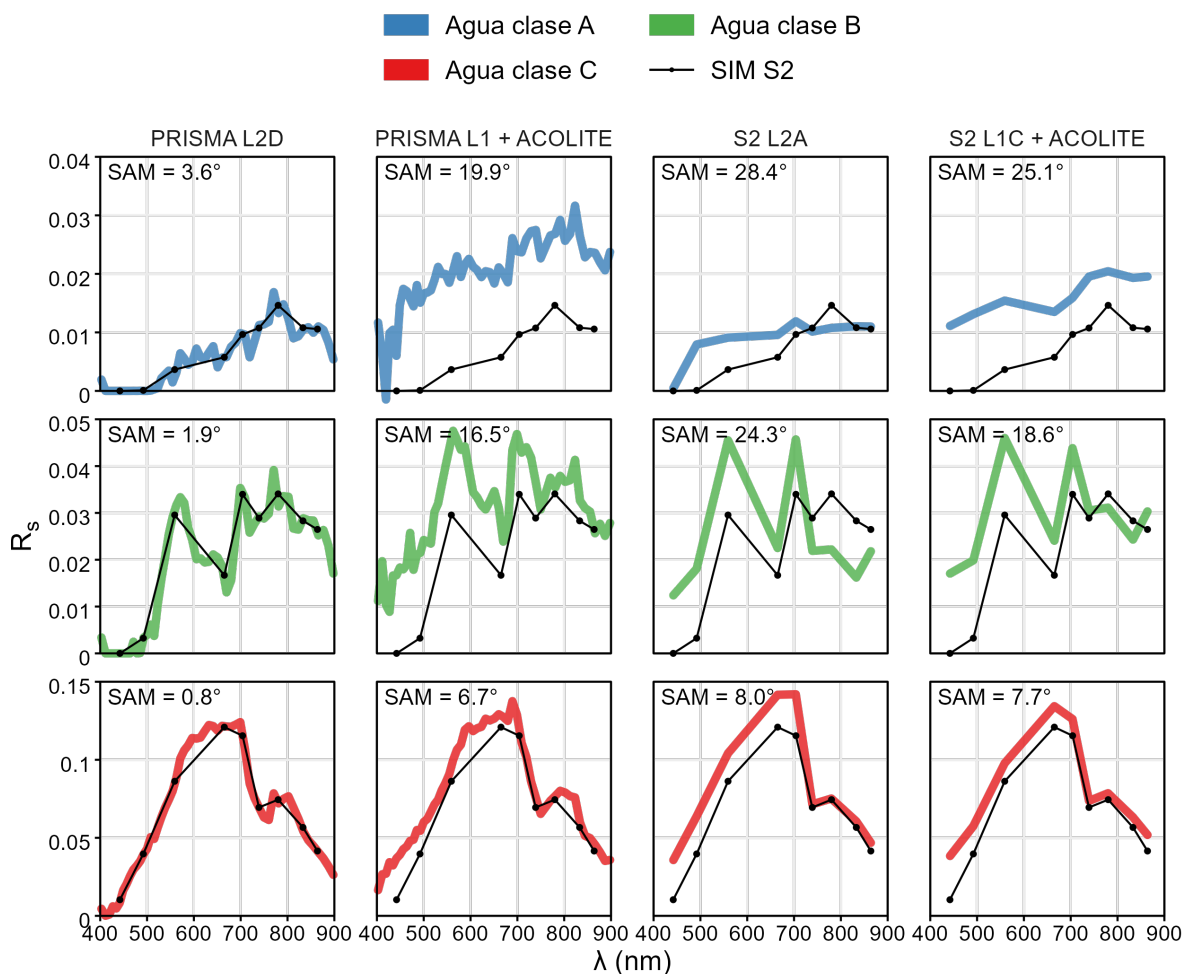


Figura 5.6: Comparación de las firmas espectrales de las diferentes clases de agua, por producto analizado, respecto de la firma espectral sintética SIM S2. Valores de medición del ángulo espectral (SAM) se ubican en cada panel.

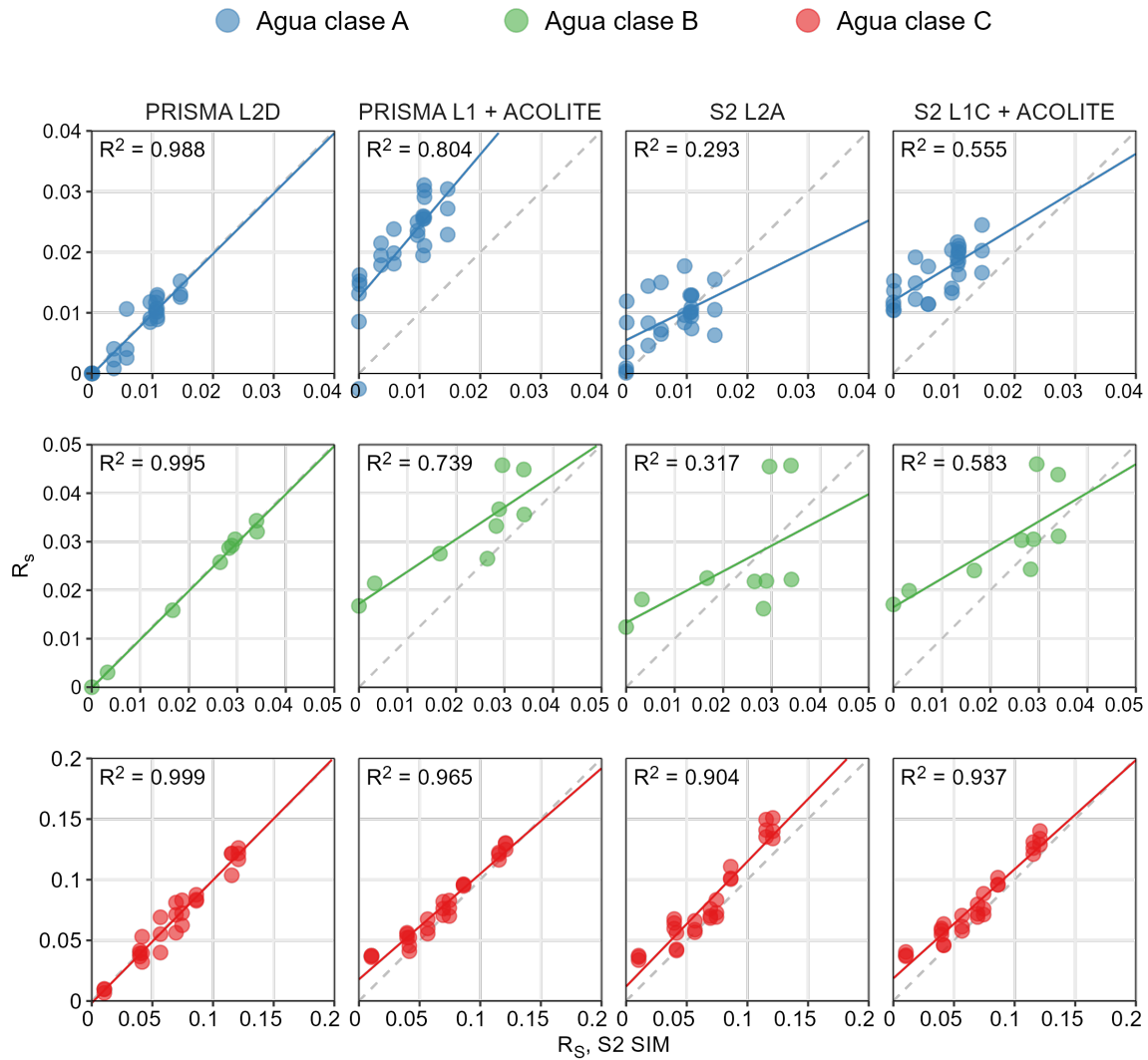


Figura 5.7: Comparación de las R_s de las diferentes clases de agua, por producto analizado, respecto de la R_s sintética SIM S2. Valores de coeficiente de correlación (R^2) se ubican en cada panel.

La figura 5.7 muestra cómo se distribuyen las reflectancias de superficie, para cada tipo de agua (en filas) y productos (en columnas), comparadas con los valores dados por convolución espectral (S2 SIM). Se trazó una línea punteada a 45° , como referencia de una correspondencia ideal e indica si existe sobrestimación o subestimación de los datos. La línea continua en cada panel marca la recta de regresión entre los conjuntos de datos, para visualizar su distanciamiento respecto de la línea a 45° . Los valores del coeficiente de correlación de Pearson al cuadrado, R^2 , se encuentran en la esquina superior izquierda.

La distribución de puntos entre PRISMA L2D vs S2 SIM se ubican mayoritariamente sobre la línea de trazos, coincidentes con los R^2 cercanos a la unidad. Este comportamiento entre las R_s del producto PRISMA L2D con las de S2 SIM indica un buen ajuste lineal entre datos, con una superposición casi total entre la recta pendiente y la línea punteada.

Las pendientes de los productos restantes se alejan de la diagonal a 45° . Para PRISMA L1 + ACOLITE (segunda columna) se observa que los valores de S2 SIM son superiores para los tres tipos de agua. Para el agua tipo C (fila inferior, en rojo), todos los productos presentan reflectancias similares a S2 SIM, con altos R^2 y líneas de pendiente cercanas a la recta a 45° .

En la figura 5.8 se muestran los estadísticos calculados para comparar el desempeño de los

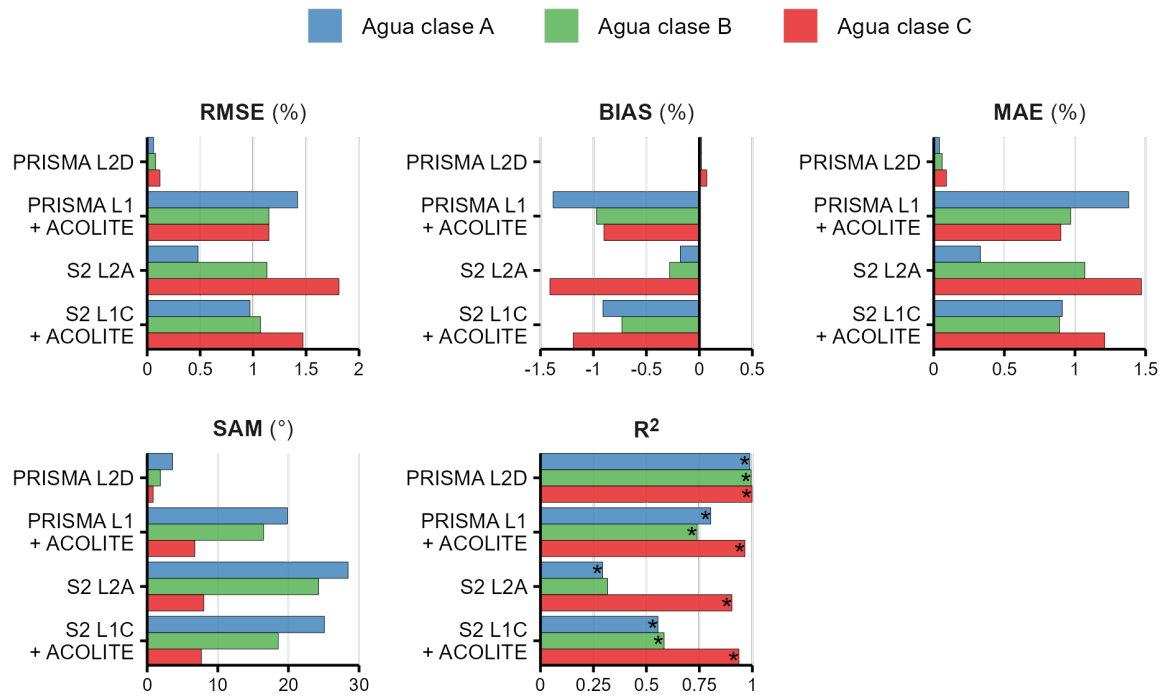


Figura 5.8: Métricas de desempeño por producto analizado, por clase de agua.

diferentes productos analizados respecto de los valores de referencia S2 SIM. Las métricas RMSE, BIAS y MAE se encuentran en porcentaje (%) y SAM en grados (°). Los asteriscos (*) sobre las barras del panel de R² indican que los coeficientes son significativos, con un 95 % de confianza, considerando un p-valor < 0,05.

Los valores de RMSE, BIAS y MAE no sobrepasan 0,15 % de error para el caso PRISMA L2D vs S2 SIM, indicando una correspondencia muy cercana entre valores. Puede inferirse que las mediciones y las correcciones atmosféricas del producto PRISMA L2D está en similar nivel de calidad a lo generado por S2 L2A, generando productos afines.

Considerando todos los productos comparados con S2 SIM, es PRISMA L2D el que muestra la mayor cercanía, en todas las clases de agua. Posee los menores valores de SAM, los R² más altos y mejores métricas de desempeño que Sentinel-2, con corrección automática (S2 L2A) o manual (S2 L1C + ACOLITE); o PRISMA con corrección atmosférica externa (PRISMA L1 + ACOLITE).

Junto con los bajos valores de SAM (< 5°) y altos R² (cerca de la unidad), se infiere que PRISMA ofrece un producto en reflectancia de superficie (nivel L2D) comparable a lo dado por MSI en Sentinel-2 (nivel L2A). Esto fue observado en otros trabajos [48].

Las características hiperespectrales de PRISMA, con bandas estrechas y mediciones en el rango VNIR y SWIR, con una calidad comparable a Sentinel-2 MSI, de acceso gratuito, hacen del sensor desarrollado por ASI una opción viable a considerar para el estudio de la superficie terrestre mediante teledetección. El producto PRISMA L2D ha demostrado ser apto para realizar estudios de la calidad del agua: Niroumand-Jadidi [48] verificó una correlación alta entre PRISMA y Sentinel-2 a nivel reflectancia de superficie, generando productos comparables entre sí, aplicado a un lago con características turbias. Giardino [105] recomienda continuar las comparaciones entre PRISMA, mediciones de campo y otros sensores espectrales, para generar productos L2D que permitan más y mejores usos de PRISMA.

Sumado a esto, PRISMA ha demostrado ser una herramienta de utilidad para diferentes áreas

de estudio. Los productos PRISMA permiten detectar cambios en las firmas espectrales de superficies afectadas por el fuego, y los efectos en el suelo y vegetación [106]. Asimismo, el monitoreo y mapeo de la textura del terreno y del carbón orgánico pueden verse beneficiados con PRISMA [107].

El agua clase C es la que presenta las mayores desviaciones en RMSE, BIAS y MAE. Sin embargo, posee los valores de SAM más bajos y R^2 más altos. Esto puede explicarse por los altos valores de reflectancia, que incrementan los errores, siendo la forma de la curva espectral la más semejante a la dada por S2 SIM.

Entre Sentinel-2 L2A y Sentinel-2 L1C corregida con ACOLITE, es conveniente emplear el primero en caso de agua clase A, ya que las desviaciones son menores. Para agua clase B, la corrección manual dada por ACOLITE arroja mejores resultados. Las R_S dadas por PRISMA L2D muestran una mayor precisión en los resultados comparada con PRISMA L1 corregida con ACOLITE. En todos los casos, todos los productos dieron buenos resultados para el agua clase C, indicando que las diferencias existentes entre las distintas correcciones disminuyen relativamente, dados los altos valores de reflectancia del agua. Sin embargo, a menores reflectancias (agua clase A y agua clase B), la dispersión de la luz debido a la presencia de la atmósfera tiene una contribución mayor, evidente en las diferencias entre los sensores y métodos de corrección aplicados.

En la mayoría de los gráficos de la figura 5.7 los puntos se ubican por encima de la diagonal a 45° , indicando una sobrestimación de las reflectancias, al ser comparadas con S2 SIM. Esto se evidencia en el signo de BIAS, en la figura 5.8, usualmente negativo. Recordar que el signo de BIAS surge por la diferencia entre datos comparados (ecuación 4.6).

5.2.3. Firmas espectrales en reflectancia a tope de atmósfera

La figura 5.9 muestra seis paneles que contienen las firmas espectrales dadas por PRISMA y Sentinel-2 (en columnas), para las tres clases de agua (en filas), con corrección atmosférica automática (BOA, *bottom of atmosphere*, líneas en color negro) y sin corrección (TOA, *top of atmosphere*, líneas en gris). Las firmas espectrales corregidas corresponden a los productos PRISMA L2D y S2 L2A.

La presencia de aerosoles en la atmósfera genera un aumento de la señal leída por los sensores a bajas longitudes de onda, que se observa en todas las firmas espectrales. Luego, los métodos de corrección atmosférica disminuyen tal efecto, reduciendo el valor de la respuesta.

Las reflectancias a tope de atmósfera (R_t) iniciales, en todos los casos, fueron mayores para Sentinel-2, principalmente debido a las diferencias en las características de los sensores de ambas plataformas. Esta diferencia en los valores de R_t también se observa para las firmas espectrales en reflectancia de superficie R_s , figura 5.4.

La diferencia de un día entre la adquisición de las imágenes, y los cambios en la composición de la atmósfera, principalmente espesor óptico de aerosoles y columna de vapor de agua, pueden ser responsables de las desviaciones en cómo Sen2Cor y PRISMA transforman los datos leídos.

La corrección automática de los datos de PRISMA para el caso de aguas clase C dan como resultado valores más altos en longitudes de onda del verde-NIR que la reflectancia a tope de atmósfera. Este hecho podría atribuirse a una subestimación de la radiación dispersada en el modelo de corrección atmosférica utilizado, pero es un tema que debe seguir siendo analizado.

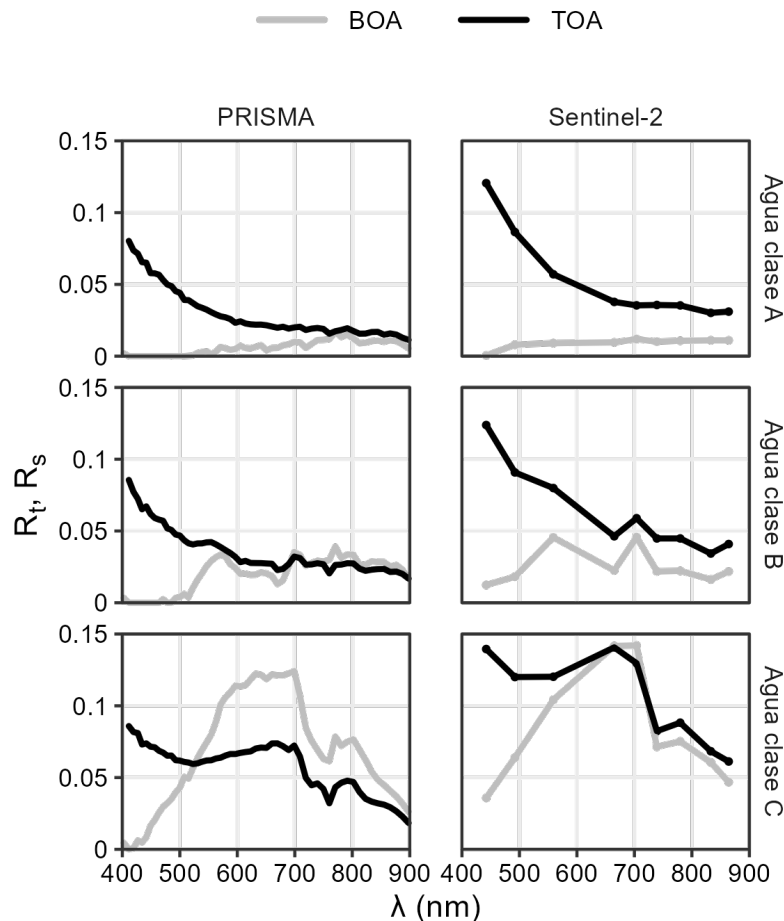


Figura 5.9: Firmas espectrales, por plataforma y clase de agua. En gris, R_s , reflectancias de superficie (BOA), con corrección atmosférica. En negro, R_t , reflectancias a tope de atmósfera (TOA), sin corrección atmosférica.

5.3. Transecta sobre el río Paraná

La composición RGB (figura 5.1) muestra en el Río Paraná una variación gradual del color del agua. En la costa oeste se observan colores marrones intensos; en la costa este, aguas más claras.

Para analizar dicha variación del color del agua se llevó a cabo una exploración espectral a lo largo de diez sitios ubicados en una transecta al Río Paraná, empleando el producto hiperspectral PRISMA L2D; un análisis cromático, mediante las reflectancias de superficie dadas por Sentinel-2 L2A; y una comparación en composición RGB de los puntos en la transecta y valores estimados de turbidez empleando ACOLITE.

5.3.1. Firmas espectrales en reflectancia de superficie

Se tomaron 10 puntos muestrales a lo largo de una recta transecta al Río Paraná (figura 4.1). Las firmas espectrales extraídas del producto PRISMA L2D se grafican en la figura 5.10, entre 400 a 900 nm. Cada panel representa un punto muestral, comenzando por P01 al noroeste, cercano a la orilla de la Provincia del Chaco; hasta P10, al sureste, en la costa de la Provincia de Corrientes. El círculo rojo presente en cada panel señala el valor máximo de la curva. Los rangos de reflectancias de superficie y longitudes de onda se mantuvieron

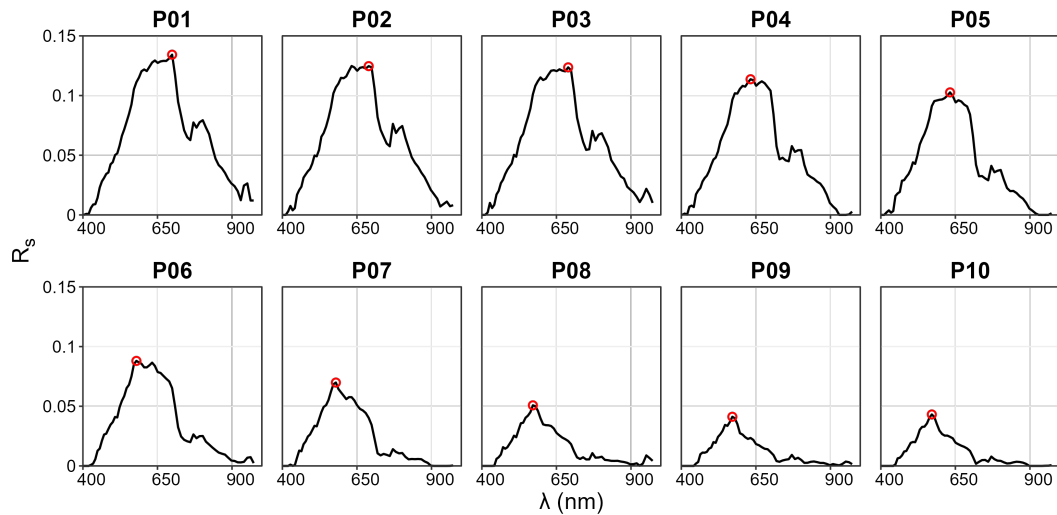


Figura 5.10: Firmas espectrales en R_S de los puntos ubicados en una transecta al Río Paraná. El círculo rojo señala el máximo de cada curva.

constantes para facilitar la comparación.

A medida que el sitio muestral se desplaza en dirección noroeste-sureste, las concentraciones de sedimentos disminuyen y el color del agua se aclara. La forma de la firma espectral del agua se modifica gradualmente, los valores de máxima reflectancia disminuyen y las longitudes de onda correspondiente bajan.

La firma espectral del sitio muestral P01 tiene las características del agua clase C, por su similitud en la respuesta espectral (figura 5.4). Los altos valores de reflectancia, alrededor de los 700 nm, es indicativo de presencia elevada de sólidos en suspensión [99].

El sitio P10, más cercano a la provincia de Corrientes, posee una firma espectral que tiene características similares a la presencia de bajas concentraciones de clorofila-a y sólidos suspendidos [99]. Aguas más transparentes tienen un comportamiento espectral similar a lo firma dada por P10 [108].

El punto máximo en cada firma espectral de la figura 5.10 se desplaza de arriba a abajo, y de derecha a izquierda. Los valores máximos de R_S se desplazan de los 699 nm en la costa con mayor presencia de sólidos, a 571 nm, en aguas más claras. Asimismo, las R_S a 750 nm (NIR) cambian de 6,5% a 0,5%, en el punto P01 y P10, respectivamente. Este comportamiento puede explicarse con la presencia de sedimentos arcillosos en la cuenca del Río Paraná [109]. La arcillas y minerales de carbonato incrementan el albedo del agua, con bajos valores de reflectancias y elevada dispersión de la luz [109].

Es decir, que aguas asociadas a altas concentraciones de sedimentos poseen altos valores de R_S , a mayores longitudes de onda. Aguas claras, poseen R_S máximas con valores menores, y a longitudes de onda más bajas.

Para ilustrar mejor la transformación del máximo de la curva espectral en los sitios de muestreo a lo largo de la transecta, se tomaron los pares ordenados de cada máximo de las diez firmas espectrales y se construyó el gráfico de la figura 5.11. El eje vertical representa el valor máximo de la firma espectral ($R_{S,max}$), para cada sitio muestral; y el eje horizontal, la longitud de onda correspondiente a la reflectancia máxima (λ a $R_{S,max}$).

El punto P01 posee su máximo en la longitud de onda del rojo, asociado a aguas turbias. Los sitios de muestreo de agua clara, tienen su máximo ubicado alrededor del verde amarillen-

to, con reflectancias cada vez menores, indicando una disminución en la concentración de sólidos suspendidos y CDOM en el agua [108].

El seguimiento del punto máximo de la firma espectral del agua, a lo largo de una transecta en el río Paraná, permitió dar cuenta del cambio en las propiedades ópticas del agua, ya que involucra a la reflectancia y longitud de onda. En la figura 5.11, la presencia de sedimentos en la costa chaqueña (P01) genera un aumento en los valores de reflectancia; asimismo, la dispersión por las partículas presentes en el agua causa un corrimiento de la posición del máximo a mayores longitudes de onda.

El estudio propuesto en esta sección, el cambio en la posición del máximo de la firma espectral de los puntos sobre una transecta en el río Paraná, es posible a partir de productos hiperspectrales, como ser PRISMA L2D, gracias a su alta resolución espectral y espacial.

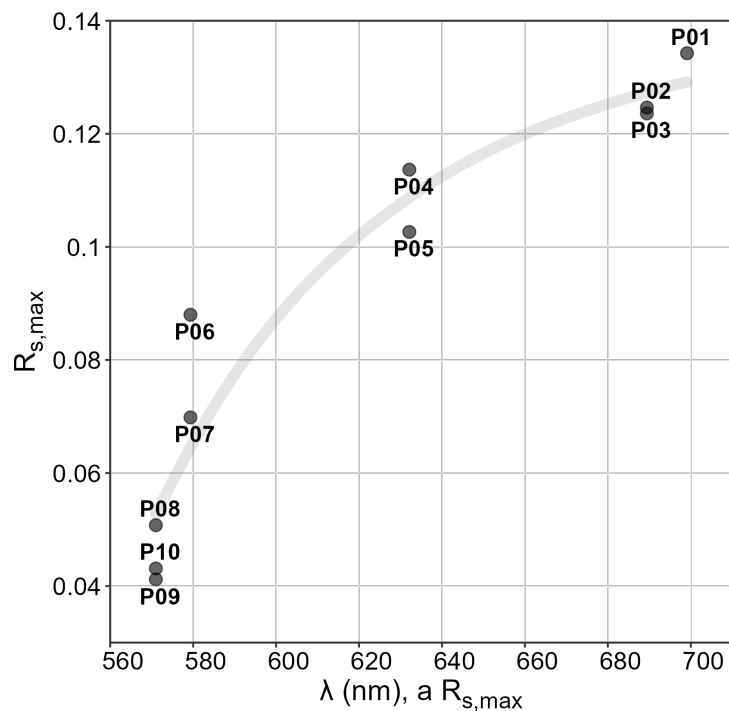


Figura 5.11: Reflectancia de superficie máxima ($R_{s,max}$) de cada sitio muestral en la transecta, con su correspondiente longitud de onda (λ).

5.3.2. Análisis cromático y turbidez

En la figura 5.12 se muestra, en el gráfico de la izquierda, el plano cromático entero. Alrededor del contorno se encuentran las longitudes de onda características, en nm. El recuadro se encuentra ampliado a la derecha, donde se ubican los diez sitios muestrales de la transecta.

El punto muestral P01, más cercano a la costa de la provincia del Chaco, posee el color naranja-marrón más intenso. A medida que se avanza en los sitios muestrales a lo largo de la transecta, la coloración va modificándose a tonalidades más amarillentas-verdosas. El punto P09 y P10 se ubican en el extremo opuesto en la distribución de puntos. Las coordenadas cromáticas (x ; y) de los puntos se ubican en del plano cromático dentro de los valores correspondientes a clorofila-a $0,5 \text{ mg/m}^3$ y sólidos suspendidos totales $0,5\text{-}600 \text{ ppm}$, reportados en trabajos previos [110, 111].

El color de los diez puntos muestrales se ubican en el diagrama cromáticos entre los colores

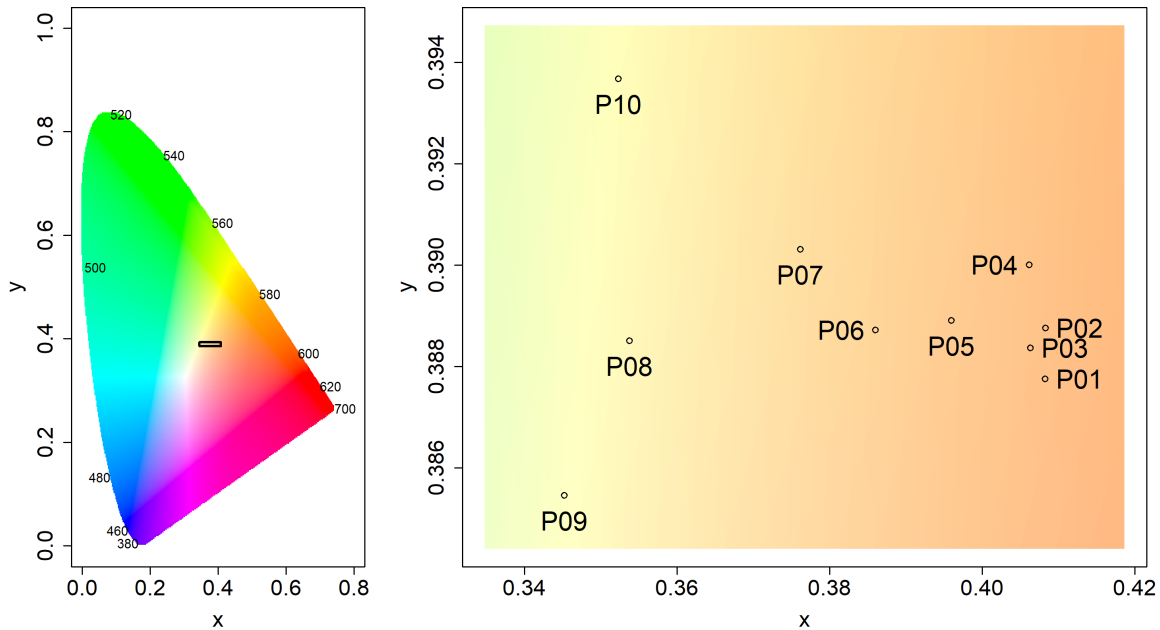


Figura 5.12: Izquierda: plano cromático completo. A la derecha se muestra ampliado el recuadro en el centro de la figura. Derecha: distribución de puntos muestrales en la transecta al río Paraná.

amarillo y naranja. Ninguno se acerca a la región del azul, como se ve en el plano cromático completo de la figura 5.12. La absorción y dispersión de las moléculas de agua clara producen reflectancias en la región del azul [111]. Colores como el verde, naranja, amarillo y rojo son generados por la presencia en el agua de componentes como la clorofila, fitoplancton, CDOM, sólidos suspendidos, etc [111].

No obstante, el color como estimador de la calidad de agua es limitado [83]. El análisis cromático evalúa la capacidad del ser humano de percibir color, un fenómeno no uniforme y no lineal [112]. El color del agua es un parámetro complementario, que por si solo es insuficiente para caracterizar el agua; sin embargo, posee gran impacto sobre las personas que lo observan.

La tabla 5.3 muestra los valores de longitud de onda dominante (λ_d) y ángulo del tono del color (α), ambos obtenidos a partir del diagrama cromático (figura 5.12). El ángulo α muestra una tendencia creciente a medida que se avanza del punto muestral P01 al P10, dando cuenta del cambio de color progresivo en el agua del Río Paraná. λ_d se interpreta como aquella longitud de onda, que al mezclarse con el color blanco origina el color del punto muestral dado. Al igual que α , λ_d presenta una tendencia creciente. Inicia con un color amarillento (582 nm, P01) y finaliza en una tonalidad amarillo-verdosa (566 nm, P10).

Para estimar la turbidez de los sitios muestrales a lo largo de la transecta se empleó un algoritmo presente en ACOLITE [113], que cuenta con una colección de algoritmos que pueden ser utilizados para la estimación de diferentes parámetros relacionados con la calidad del agua. La figura 5.13 muestra el cambio en la turbidez (NTU) a lo largo de la transecta, con los correspondientes colores de píxel, en composición RGB para los productos PRISMA L2D y S2 L2A.

Los colores de píxel se obtuvieron a partir de la visualización de los productos satelitales en QGIS, manteniendo la configuración predeterminada, tal como se ve en las figuras 5.1.

Punto	α (°)	λ_d (nm)
P01	36,00	582
P02	36,49	582
P03	37,02	582
P04	37,90	581
P05	41,59	580
P06	46,44	577
P07	53,09	575
P08	69,70	567
P09	77,19	563
P10	72,58	566

Tabla 5.3: Ángulos de tono del color (α) y longitud de onda dominante (λ_d) para cada punto muestral en la transecta al río Paraná.

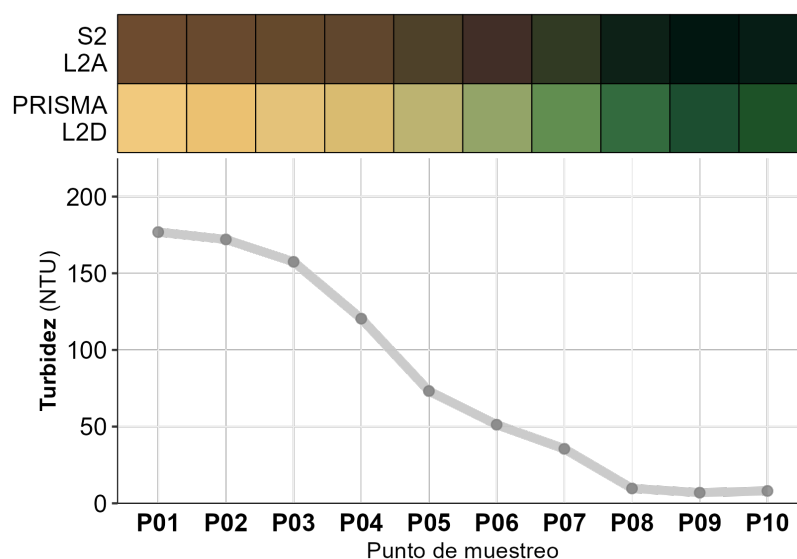


Figura 5.13: Color real RGB de los píxeles de los puntos muestrales en la transecta al río Paraná y variación de la turbidez estimada.

A pesar de las diferencias, los colores de píxel en composición RGB que más se acercan a los mostrados en la figura 5.12 son los del producto PRISMA L2D, partiendo de una tonalidad naranja-marrón hasta tonos verdes. S2 L2A muestra colores más intensos y oscuros.

La turbiedad estimada disminuye progresivamente en dirección noroeste-sureste, tal como puede inferirse de las firmas espectrales de la figura 5.10. Los colores de píxel marrones están asociados a los valores de turbidez más altos, disminuyendo hacia las costas sureste, donde se hayan aguas más claras.

El estudio cromático de los puntos muestrales sobre una recta transecta al río Paraná permiten observar una relación entre el color del agua y la turbidez de la misma, siendo un parámetro de interés para el estudio de la calidad del agua.

5.4. Estimación de variables biogeofísicas

Para dar soporte a todo lo inferido a partir de las firmas espectrales, es necesario estimar las características biofísicas del agua. Se aplicaron algoritmos para obtener la concentración de sólidos totales, concentración de clorofila-a y turbidez. ACOLITE tiene incorporados una colección de algoritmos desde los cuales se eligieron algunos de referencia para calcular los diferentes parámetros.

La estimación de concentración de sólidos suspendidos (g/m^3) se realizó con un algoritmo bio-óptico que relaciona esta propiedad con la R_S y las propiedades ópticas del agua, basado en una única banda en la longitud de onda del rojo [114, 115]. La concentración de clorofila-a ($\mu\text{g/l}$) se puede estimar mediante el índice normalizado de diferencia de clorofila (NDCI) [56]. La turbidez (NTU) se obtiene mediante un algoritmo que emplea la banda roja o NIR según el valor de la reflectancia, con una ponderación lineal [113].

La figura 5.14 muestra los valores de los parámetros, para cada clase de agua analizada. El agua clase A posee la menor cantidad de sólidos suspendidos, clorofila-a y turbidez, lo cual es esperable dada la ubicación y características de las lagunas elegidas. La mayor concentración de clorofila-a se encuentra en el agua clase B, tal como lo muestra su firma espectral (figura 5.4). El agua clase C posee la mayor turbidez y concentración de sólidos suspendidos, siguiendo los resultados observados en la respuesta espectral.

Los algoritmos aplicados a las tres clases de agua arrojan resultados concordantes con lo observado previamente en las firmas espectrales, confirmando lo inferido. La respuesta hiperespectral registrada por PRISMA L2D es la que más detalles ofrece, permitiendo conocer con mayor exactitud las características de las aguas superficiales. El estudio de los máximos y valles de la respuestas espectrales, con la alta resolución espectral de PRISMA, permitieron obtener resultados valiosos para el estudio de la calidad del agua en el AMGR.

En el Anexo F, la tabla F.1 resume los valores de los parámetros biogeofísicos, los algoritmos usados en ACOLITE y las referencias correspondientes.

El proyecto de investigación “Caracterización fisicoquímica de cuerpos de aguas continentales para la evaluación de la utilización de algoritmos en el monitoreo satelital de la calidad del agua”, MSPPBRE0008091, desarrollado por el Grupo de Investigación Sobre Temas Ambientales y Químicos (GISTAQ), de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional

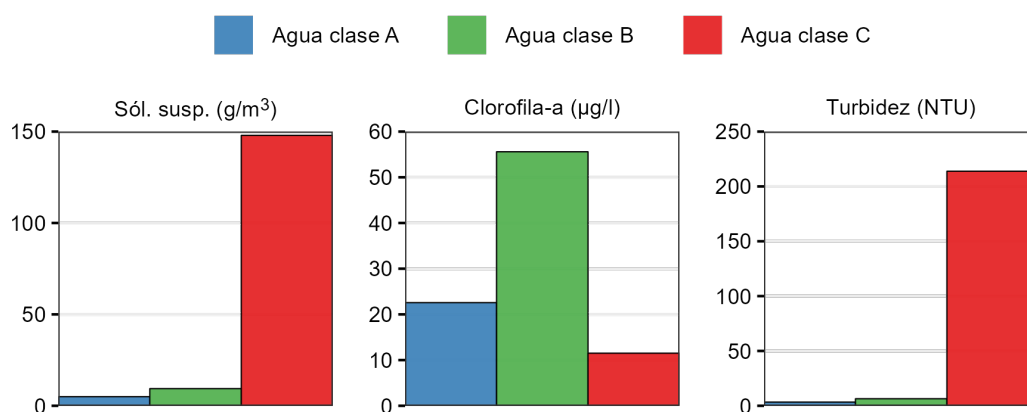


Figura 5.14: Parámetros estimados mediante algoritmos presentes en ACOLITE, para las tres clases de agua.

Resistencia (UTN-FRRe), llevó a cabo muestreos y mediciones de laboratorio en algunos de los sitios presentes en este trabajo. Se cuenta con valores para las aguas clase B y C.

El agua clase B presentó durante el período 2021-2022, en promedio, 118,2 $\mu\text{g/l}$ de clorofila-a, 12,0 g/m^3 de sólidos suspendidos y 42,6 NTU de turbidez. El agua clase C, para el mismo período, en promedio, presentó 119,4 g/m^3 de sólidos suspendidos y 179,3 NTU de turbidez.

Los valores de los parámetros estimados con ACOLITE se encuentran en el mismo rango de magnitud con los obtenidos mediante técnicas analíticas de laboratorio, dando cuenta de las características de las clases de agua estudiadas.

CAPÍTULO 6

Conclusión

En el marco de la presente Tesis de Maestría se realizó la primera caracterización óptica de aguas superficiales de la zona de estudio a partir de información satelital hiperespectral y multiespectral. Se logró la búsqueda, descarga, procesamiento, visualización y extracción de datos de un producto hiperespectral PRISMA correspondiente al Área Metropolitana del Gran Resistencia. Dada el gran número de bandas discretas se pudieron obtener firmas espectrales detalladas correspondientes a tres clases de agua presentes en la región. Se seleccionaron cuerpos de agua de diferente naturaleza con el objetivo de evaluar la capacidad de los sensores satelitales utilizados para identificar diferencias entre aguas claras (agua clase A), aguas eutrofizadas (agua clase B) y aguas turbias (agua clase C). Las características del agua pudieron ser diferenciadas gracias a la evaluación de la respuesta espectral y estimaciones mediante algoritmos encontrados en bibliografía.

Se compararon las firmas espectrales dadas por PRISMA y Sentinel-2, a nivel de reflectancia de superficie, y luego de una transformación por convolución, se evidencia la gran similitud entre sensores. Dado que uno de los objetivos de la misión PRISMA es testear la tecnología vigente, estos resultados permiten apoyar la buena calidad de los productos generados. Los valores de las métricas para MAE, RMSE y BIAS entre PRISMA y Sentinel-2, con corrección atmosférica automática, son los más bajos comparados con otros métodos de corrección.

La baja respuesta espectral dada por el agua clase A implica que las métricas de desempeño sean las mayores para este tipo de agua. El agua clase C, con las reflectancias de superficies más altas, mostraron desviaciones menores entre todos los productos comparados.

El análisis de las firmas espectrales de PRISMA L2D permitió identificar picos y valles en los valores de reflectancia de superficie. Las conclusiones alcanzadas fueron que el agua clase A cuenta con baja presencia de sedimentos; la firma espectral del agua clase B está dominada por la clorofila-a; y el agua clase C tiene un comportamiento propio de aguas turbias.

Los algoritmos presentes en ACOLITE permitieron estimar la concentración de sólidos suspendidos, clorofila-a y turbidez. Los valores obtenidos para las tres clases de agua permiten corroborar lo inferido mediante las firmas espectrales dadas por PRISMA L2D, ya que posee un nivel de detalle superior al producto multiespectral Sentinel-2 L2A.

El estudio hiperespectral de una transecta en el río Paraná mostró el cambio en la respuesta espectral, desde la región con mayor concentración de sedimentos (orilla de la Provincia del Chaco) a la de menor concentración (costa de la Provincia de Corrientes). El análisis cromático de los sitios muestrales demuestra este cambio en el color del agua entre orillas, evidente en las imágenes RGB. El color del agua, obtenido a partir de la información de bandas multiespectrales, sirve como un parámetro para ser evaluado espacial y temporalmente. Particularmente en la transecta, tiene interés ya que permite estudiar el punto de cambio entre las regiones con altos y bajos sedimentos. El color del agua demuestra ser un parámetro relacionado con la turbidez, como lo indican las estimaciones vía ACOLITE.

A partir del estudio del máximo de las firmas espectrales, se observó un corrimiento hacia el rojo y un aumento del valor de reflectancia conforme el agua cambia de clara a turbia, sobre los puntos muestrales en la transecta. Este aspecto se seguirá investigando en trabajos futuros, que contemplan el monitoreo de campo, para desarrollar algoritmos semiempíricos novedosos a partir de estos parámetros derivados de información hiperespectral.

Dada la nula cantidad de publicaciones que utilizan productos hiperespectrales PRISMA en la región de estudio, como así también la falta de mediciones con radiómetro de campo, esta Tesis de Maestría representa un avance en el estudio espectral de aguas interiores. A futuro se espera poder extraer aún más información de las cientos de bandas espectrales que ofrece PRISMA, para identificar otros pigmentos además de la clorofila-a, realizar clasificaciones automáticas de la cobertura terrestre, modelar algoritmos semiempíricos para generar mapas que permitan estimar variables y llevar a cabo comparaciones con otros sensores hiperespectrales en actividad. Es conveniente, en una etapa futura, incorporar más puntos de comparación y ampliar la diversidad de cuerpos de agua. Aumentar la cantidad de pares de productos satelitales para análisis, hiperespectrales y multiespectrales, adquiridos en la misma fecha. Incrementar la cantidad de cuerpos de agua para abarcar características biofísicas diversas, y sobre éstos, tomar más puntos muestrales, para una mejor representatividad y solidez estadística.

La teledetección hiperespectral ofrece una gran cantidad de bandas, ampliamente superior a los sensores tradicionales multiespectrales. Esta abundancia permite construir firmas espectrales con gran nivel de detalle, enriqueciendo los resultados, con el potencial de generar productos innovadores para el monitoreo y seguimiento de cuerpos de agua.

Finalmente, la experiencia adquirida en la solicitud de adquisiciones del sensor PRISMA, y el desarrollo de códigos de programación asociados al procesamiento de los productos hiperespectrales, son de utilidad para realizar estudios de validación y simulaciones numéricas de reflectancia. Esto toma mayor importancia en el marco de la misión argentina SABIA-Mar, desarrollado en conjunto por CONAE e INPE (Brasil).

Referencias bibliográficas

- [1] Naciones Unidas/CEPAL, *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales*. 2019.
- [2] M. H. Gholizadeh, A. M. Melesse, and L. Reddi, “A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 8, 2016.
- [3] E. Seyhan and A. Dekker, “Application of remote sensing techniques for water quality monitoring,” *Hydrobiological Bulletin*, vol. 20, pp. 41–50, 11 1986.
- [4] M. Pereira-Sandoval, A. Ruescas, P. Urrego, A. Ruiz-Verdú, J. Delegido, C. Tenjo, X. Soria-Perpinyà, E. Vicente, J. Soria, and J. Moreno, “Evaluation of atmospheric correction algorithms over spanish inland waters for sentinel-2 multi spectral imagery data,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 12, pp. 1–23, 2019.
- [5] I. Caballero, F. Steinmetz, and G. Navarro, “Evaluation of the first year of operational Sentinel-2A data for retrieval of suspended solids in medium- to high-turbiditywaters,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 7, 2018.
- [6] F. S. Watanabe, G. T. Miyoshi, T. W. Rodrigues, N. M. Bernardo, L. H. Rotta, E. Alcântara, and N. N. Imai, “Inland water’s trophic status classification based on machine learning and remote sensing data,” *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 19, no. April, 2020.
- [7] V. Sagan, K. T. Peterson, M. Maimaitijiang, P. Sidike, J. Sloan, B. A. Greeling, S. Maalouf, and C. Adams, “Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing,” *Earth-Science Reviews*, vol. 205, no. August 2019, p. 103187, 2020.
- [8] I. Chawla, L. Karthikeyan, and A. K. Mishra, “A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes,” *Journal of Hydrology*, vol. 585, no. March, p. 124826, 2020.

- [9] E. L. Hestir, V. E. Brando, M. Bresciani, C. Giardino, E. Matta, P. Villa, and A. G. Dekker, “Measuring freshwater aquatic ecosystems: The need for a hyperspectral global mapping satellite mission,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 167, pp. 181–195, 2015.
- [10] S. Liang, *Quantitative remote sensing of land surfaces*, vol. 19. 2004.
- [11] D. Diner, J. Beckert, T. Reilly, C. Bruegge, J. Conel, R. Kahn, J. Martonchik, T. Ackerman, R. Davies, S. Gerstl, H. Gordon, J. Muller, R. Myneni, P. Sellers, B. Pinty, and M. Verstraete, “Multi-angle imaging spectroradiometer (misr) instrument description and experiment overview,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, pp. 1072–1087, 7 1998.
- [12] A. Signoroni, M. Savardi, A. Baronio, and S. Benini, “Deep learning meets hyperspectral image analysis: A multidisciplinary review,” 5 2019. RS: remote sensing
HSI: hyperspectral imaging
DL: deep learning.
- [13] S. Chander, A. Gujrati, A. V. Krishna, A. Sahay, and R. P. Singh, *Remote sensing of inland water quality: A hyperspectral perspective*. LTD, 2020.
- [14] S. A. Poi de Neiff, C. A. Patiño, J. J. Neiff, and A. O. Ramos, “Calidad Del Agua En El Tramo Bajo Del Rio Negro (Chaco, Argentina),” *FACENA*, vol. 19, no. 2, pp. 67–85, 2003.
- [15] M. L. Clark, T. M. Aide, H. R. Grau, and G. Riner, “A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, no. 11, pp. 2816–2832, 2010.
- [16] M. Baumann, C. Levers, L. Macchi, H. Bluhm, B. Waske, N. I. Gasparri, and T. Kuemmerle, “Mapping continuous fields of tree and shrub cover across the Gran Chaco using Landsat 8 and Sentinel-1 data,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 216, no. March, pp. 201–211, 2018.
- [17] E. M. Silveira, V. C. Radeloff, S. Martinuzzi, G. J. Martínez Pastur, L. O. Rivera, N. Politi, L. Lizarraga, L. S. Farwell, P. R. Elsen, and A. M. Pidgeon, “Spatio-temporal remotely sensed indices identify hotspots of biodiversity conservation concern,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 258, no. April 2020, p. 112368, 2021.
- [18] M. Salvia, F. Grings, H. Karszenbaum, P. Ferrazzoli, P. Kandus, A. Soldano, and L. Guerriero, “Monitoring inundation dynamics in paranà river, Argentina, by C and L Band SAR,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 1, no. 1, pp. 102–105, 2008.
- [19] Z. Y. Marchetti, E. M. Latrubesse, M. S. Pereira, and C. G. Ramonell, “Vegetation and its relationship with geomorphologic units in the Parana River floodplain, Argentina,” *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 46, pp. 122–136, 2013.
- [20] V. H. Sailaja, P. S. Babu, and M. A. Reddy, “Hyper-spectral Remote Sensing of Water Quality Parameters in Lakes: A Case Study of Hyderabad City, Telangana State, India,” *IRA-International Journal of Technology and Engineering (ISSN 2455-4480)*, vol. 8, no. 2, p. 5, 2017.

- [21] M. Meini, A. Bini, L. Giunti, E. Fossati, and R. Formaro, “Hyperspectral payload for Italian PRISMA programme,” *Optical Payloads for Space Missions*, no. Mcc, pp. 183–213, 2015.
- [22] R. Loizzo, R. Guarini, F. Longo, T. Scopa, R. Formaro, C. Facchinetti, and G. Varacalli, “Prisma: The Italian hyperspectral mission,” in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 2018-July, pp. 175–178, IEEE, 2018.
- [23] X. Chen and L. Feng, *Remote sensing of lakes’ water environment*, vol. 1-9. Elsevier, 2017.
- [24] P. Huovinen, J. Ramírez, L. Caputo, and I. Gómez, “Mapping of spatial and temporal variation of water characteristics through satellite remote sensing in Lake Panguipulli, Chile,” *Science of the Total Environment*, vol. 679, pp. 196–208, 2019.
- [25] D. Liu, H. Duan, S. Yu, M. Shen, and K. Xue, “Human-induced eutrophication dominates the bio-optical compositions of suspended particles in shallow lakes: Implications for remote sensing,” *Science of the Total Environment*, vol. 667, pp. 112–123, 2019.
- [26] Y. Li, B. Dang, Y. Zhang, and Z. Du, “Water body classification from high-resolution optical remote sensing imagery: Achievements and perspectives,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 187, no. March, pp. 306–327, 2022.
- [27] J. He, Y. Chen, J. Wu, D. A. Stow, and G. Christakos, “Space-time chlorophyll-a retrieval in optically complex waters that accounts for remote sensing and modeling uncertainties and improves remote estimation accuracy,” *Water Research*, vol. 171, p. 115403, 2020.
- [28] L. Rodríguez-López, I. Duran-Llacer, L. González-Rodríguez, R. Abarca-del Rio, R. Cárdenas, O. Parra, R. Martínez-Retureta, and R. Urrutia, “Spectral analysis using LANDSAT images to monitor the chlorophyll-a concentration in Lake Laja in Chile,” *Ecological Informatics*, vol. 60, no. September, 2020.
- [29] A. Morel and L. Prieur, “Analysis of variations in ocean color,” *Limnology and Oceanography*, vol. 22, no. 4, pp. 709–722, 1977.
- [30] D. Liu, H. Duan, S. Loïsel, C. Hu, G. Zhang, J. Li, H. Yang, J. R. Thompson, Z. Cao, M. Shen, R. Ma, M. Zhang, and W. Han, “Observations of water transparency in China’s lakes from space,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 92, no. June, p. 102187, 2020.
- [31] H. C. Kim, S. Son, Y. H. Kim, J. S. Khim, J. Nam, W. K. Chang, J. H. Lee, C. H. Lee, and J. Ryu, “Remote sensing and water quality indicators in the Korean West coast: Spatio-temporal structures of MODIS-derived chlorophyll-a and total suspended solids,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 121, no. 1-2, pp. 425–434, 2017.
- [32] F. Gohin, D. Van der Zande, G. Tilstone, M. A. Eleveld, A. Lefebvre, F. Andrieux-Loyer, A. N. Blauw, P. Bryère, D. Devreker, P. Garnesson, T. Hernández Fariñas, Y. Lamaury, L. Lampert, H. Lavigne, F. Menet-Nedelec, S. Pardo, and B. Saulquin, “Twenty years of satellite and in situ observations of surface chlorophyll-a from the northern Bay of Biscay to the eastern English Channel. Is the water quality improving?,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 233, no. September, p. 111343, 2019.

- [33] S. N. Topp, T. M. Pavelsky, D. Jensen, M. Simard, and M. R. Ross, “Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science: Moving towards multi-disciplinary applications,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 1, pp. 1–34, 2020.
- [34] R. E. Carlson, “A trophic state index for lakes,” *Limnology and Oceanography*, vol. 22, pp. 361–369, 1977.
- [35] K. T. Peterson, V. Sagan, P. Sidike, A. L. Cox, and M. Martinez, “Suspended sediment concentration estimation from landsat imagery along the lower missouri and middle Mississippi Rivers using an extreme learning machine,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 10, 2018.
- [36] F. P. Maciel, P. E. Santoro, and F. Pedocchi, “Spatio-temporal dynamics of the Río de la Plata turbidity front; combining remote sensing with in-situ measurements and numerical modeling,” *Continental Shelf Research*, vol. 213, p. 104301, jan 2021.
- [37] V. S. Martins, A. Kaleita, C. C. Barbosa, A. C. Fassoni-Andrade, F. d. L. Lobo, and E. M. Novo, “Remote sensing of large reservoir in the drought years: Implications on surface water change and turbidity variability of Sobradinho reservoir (Northeast Brazil),” *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 13, no. November 2018, pp. 275–288, 2019.
- [38] V. Garg, A. Senthil Kumar, S. P. Aggarwal, V. Kumar, P. R. Dhote, P. K. Thakur, B. R. Nikam, R. S. Sambare, A. Siddiqui, P. R. Muduli, and G. Rastogi, “Spectral similarity approach for mapping turbidity of an inland waterbody,” *Journal of Hydrology*, vol. 550, pp. 527–537, 2017.
- [39] D. A. Romero-Rodríguez, L. A. Soto-Mardones, J. Cepeda-Morales, J. P. Rivera-Cacedo, and E. A. Inda-Díaz, “Satellite-derived turbidity in front of small rivers mouths in the Eastern Tropical Pacific coast of Mexico,” *Advances in Space Research*, vol. 66, no. 10, pp. 2349–2364, 2020.
- [40] E. M. Isenstein, D. Kim, and M. H. Park, “Modeling for multi-temporal cyanobacterial bloom dominance and distributions using landsat imagery,” *Ecological Informatics*, vol. 59, no. June, p. 101119, 2020.
- [41] F. M. Breunig, W. Pereira Filho, L. S. Galvão, F. Wachholz, and M. A. G. Cardoso, “Dynamics of limnological parameters in reservoirs: A case study in South Brazil using remote sensing and meteorological data,” *Science of the Total Environment*, vol. 574, pp. 253–263, 2017.
- [42] X. Sòria-Perpinyà, E. Vicente, P. Urrego, M. Pereira-Sandoval, A. Ruíz-Verdú, J. Delegido, J. M. Soria, and J. Moreno, “Remote sensing of cyanobacterial blooms in a hypertrophic lagoon (Albufera of València, Eastern Iberian Peninsula) using multi-temporal Sentinel-2 images,” *Science of the Total Environment*, vol. 698, p. 134305, 2020.
- [43] M. Bonansea, M. Ledesma, R. Bazán, A. Ferral, A. German, P. O’Mill, C. Rodriguez, and L. Pinotti, “Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 imagery for water clarity assessment in a reservoir,” *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 95, no. May, p. 102265, 2019.
- [44] A. Ferral, E. Luccini, A. Aleksinkó, and C. M. Scavuzzo, “Flooded-area satellite monitoring within a Ramsar wetland Nature Reserve in Argentina,” *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 15, no. November 2017, p. 100230, 2019.

- [45] U. Bhangale, S. More, T. Shaikh, S. Patil, and N. More, “Analysis of Surface Water Resources Using Sentinel-2 Imagery,” *Procedia Computer Science*, vol. 171, no. 2019, pp. 2645–2654, 2020.
- [46] D. Phiri, M. Simwanda, S. Salekin, V. Nyirenda, Y. Murayama, and M. Ranagalage, “Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review,” *Remote Sensing*, vol. 12, p. 2291, jul 2020.
- [47] C. Giardino, M. Bresciani, F. Braga, A. Fabbretto, N. Ghirardi, M. Pepe, M. Gianinetto, R. Colombo, S. Cogliati, S. Ghebrehiwot, M. Laanen, S. Peters, T. Schroeder, J. A. Concha, and V. E. Brando, “First Evaluation of PRISMA Level 1 Data for Water Applications,” *Sensors*, vol. 20, p. 4553, aug 2020.
- [48] M. Niroumand-Jadidi, F. Bovolo, and L. Bruzzone, “Water quality retrieval from PRISMA hyperspectral images: First experience in a turbid lake and comparison with sentinel-2,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 23, pp. 1–21, 2020.
- [49] R. E. O’Shea, N. Pahlevan, B. Smith, M. Bresciani, T. Egerton, C. Giardino, L. Li, T. Moore, A. Ruiz-Verdu, S. Ruberg, S. G. Simis, R. Stumpf, and D. Vaičiūtė, “Advancing cyanobacteria biomass estimation from hyperspectral observations: Demonstrations with HICO and PRISMA imagery,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 266, 2021.
- [50] V. Sagan, K. T. Peterson, M. Maimaitijiang, P. Sidike, J. Sloan, B. A. Greeling, S. Maalouf, and C. Adams, “Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing,” *Earth-Science Reviews*, vol. 205, no. April, p. 103187, 2020.
- [51] IOCCG, *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group*, vol. 3. 2000.
- [52] “Chapter 1 - a systematic view of remote sensing,” in *Advanced Remote Sensing (Second Edition)* (S. Liang and J. Wang, eds.), pp. 1–57, Academic Press, second edition ed., 2020.
- [53] H. R. Gordon and M. Wang, “Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with seawifs: a preliminary algorithm,” 1994.
- [54] “Chapter 4 - atmospheric correction of optical imagery,” in *Advanced Remote Sensing (Second Edition)* (S. Liang and J. Wang, eds.), pp. 131–156, Academic Press, second edition ed., 2020.
- [55] G. Kirches, “Algorithm Theoretical Basis Document Sentinel 2 Global Mosaics,” 2020.
- [56] S. Mishra and D. R. Mishra, “Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 117, pp. 394–406, 2012.
- [57] A. J. Sánchez Guzmán, “Primera Fase: Convenio CFI-Provincia del Chaco–Municipalidad de Resistencia,” 1995.
- [58] M. Scornik, “Áreas urbanas vulnerables: algunas consideraciones para un sector de Resistencia, Chaco,” *Cuaderno Urbano*, vol. 6, p. 127, nov 2007.

- [59] J. A. Alberto, A. M. Mignone, G. A. Arce, and S. Lopez, “Condiciones hidrogeomorfológicas en el área metropolitana del Gran Resistencia, Provincia del Chaco, República Argentina,” *Contribuciones Científicas GAEA*, vol. 29, pp. 37–50, 2017.
- [60] M. Iriondo, “Cambios ambientales en el Chaco Argentino y Boliviano en los últimos miles de años,” *Folia Histórica del Nordeste*, vol. 16, p. 39, jan 2006.
- [61] M. Main-Knorn, B. Pflug, J. Louis, V. Debaecker, U. Müller-Wilm, and F. Gascon, “Sen2Cor for Sentinel-2,” in *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII* (L. Bruzzone, F. Bovolo, and J. A. Benediktsson, eds.), p. 3, SPIE, oct 2017.
- [62] Y. J. Kaufman and C. Sendra, “Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-ir satellite imagery,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, no. 8, pp. 1357–1381, 1988.
- [63] D. Schläpfer, C. C. Borel, J. Keller, and K. I. Itten, “Atmospheric precorrected differential absorption technique to retrieve columnar water vapor,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, no. 3, pp. 353–366, 1998.
- [64] M. A. Warren, S. G. Simis, V. Martinez-Vicente, K. Poser, M. Bresciani, K. Alikas, E. Spyarakos, C. Giardino, and A. Ansper, “Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 225, no. March, pp. 267–289, 2019.
- [65] B. Mayer and A. Kylling, “Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - Description and examples of use,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 5, no. 7, pp. 1855–1877, 2005.
- [66] “PRISMA Products Specification Document,” 2020.
- [67] RBINS, “ACOLITE User Manual,” 2021.
- [68] Q. Vanhellemont and K. Ruddick, “Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 216, no. March, pp. 586–597, 2018.
- [69] Q. Vanhellemont, “Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 225, no. November 2018, pp. 175–192, 2019.
- [70] S. Y. Kotchenova and E. F. Vermote, “Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces.,” *Applied optics*, vol. 46, no. 20, pp. 4455–64, 2007.
- [71] M. H. Tavares, R. C. Lins, T. Harmel, C. R. Fragoso, J. M. Martínez, and D. Motta-Marques, “Atmospheric and sunglint correction for retrieving chlorophyll-a in a productive tropical estuarine-lagoon system using Sentinel-2 MSI imagery,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 174, no. April 2020, pp. 215–236, 2021.
- [72] G. Chander, B. L. Markham, and D. L. Helder, “Summary of current radiometric calibration coefficients for landsat mss, tm, etm+, and eo-1 ali sensors,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. 893–903, 5 2009.

- [73] W. W. Gregg and K. L. Carder, “A simple spectral solar irradiance model for cloudless maritime atmospheres,” *Limnology and Oceanography*, vol. 35, pp. 1657–1675, 12 1990.
- [74] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*. Elsevier, 1983.
- [75] P. D’Odorico, A. Gonsamo, A. Damm, and M. E. Schaepman, “Experimental evaluation of sentinel-2 spectral response functions for ndvi time-series continuity,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 1336–1348, 2013.
- [76] B. N. Seegers, R. P. Stumpf, B. A. Schaeffer, K. A. Loftin, and P. J. Werdell, “Performance metrics for the assessment of satellite data products: an ocean color case study,” *Optics Express*, vol. 26, no. 6, p. 7404, 2018.
- [77] C. J. Willmott and K. Matsuura, “Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance,” *Climate Research*, vol. 30, no. 1, pp. 79–82, 2005.
- [78] F. A. Kruse, A. B. Lefkoff, J. W. Boardman, K. B. Heidebrecht, A. T. Shapiro, P. J. Barloon, and A. F. Goetz, “The spectral image processing system (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 44, no. 2-3, pp. 145–163, 1993.
- [79] J. L. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. 8 ed., 2011. $SSE = (y - y_{estimado})^2 < br / > SST = y^2 - y_{prom}^2$.
- [80] C. CIE, “Commission internationale de l’éclairage proceedings, 1931,” *Cambridge University, Cambridge*, 1932.
- [81] H. J. van der Woerd and M. R. Wernand, “Hue-angle product for low to medium spatial resolution optical satellite sensors,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, pp. 1–18, 2018.
- [82] H. J. van der Woerd and M. R. Wernand, “True colour classification of natural waters with medium-spectral resolution satellites: SeaWiFS, MODIS, MERIS and OLCI,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 10, pp. 25663–25680, 2015.
- [83] J. R. Gardner, X. Yang, S. N. Topp, M. R. Ross, E. H. Altenau, and T. M. Pavelsky, “The Color of Rivers,” *Geophysical Research Letters*, vol. 48, no. 1, 2021.
- [84] J. Schanda, “Cie chromaticity diagrams, cie purity, cie dominant wavelength,” 2015.
- [85] Q. Vanhellemont and K. Ruddick, “Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery,” *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, vol. SP-740, no. May, pp. 9–13, 2016.
- [86] Q. Vanhellemont, “Sensitivity analysis of the dark spectrum fitting atmospheric correction for metre- and decametre-scale satellite imagery using autonomous hyperspectral radiometry,” *Optics Express*, vol. 28, no. 20, p. 29948, 2020.
- [87] T. Mansencal, M. Mauderer, M. Parsons, N. Shaw, K. Wheatley, S. Cooper, J. D. Vandenberg, L. Canavan, K. Crowson, O. Lev, K. Leinweber, S. Sharma, T. J. Sobotka, D. Moritz, M. Pppp, C. Rane, P. Eswaramoorthy, J. Mertic, B. Pearlstine, M. Leonhardt, O. Niemitalo, M. Szymanski, M. Schambach, S. Huang, M. Wei,

- N. Joywardhan, O. Wagih, P. Redman, J. Goldstone, S. Hill, J. Smith, F. Savoie, G. Saxena, S. Chopra, I. Sibiryakov, T. Gates, G. Pal, N. Tessore, A. Pierre, F.-X. Thomas, S. Srinivasan, and T. Downs, “Colour 0.4.2,” Nov. 2022.
- [88] QGIS Development Team, *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association, 2022.
- [89] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021.
- [90] RStudio Team, *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio, PBC., Boston, MA, 2020.
- [91] L. Busetto and L. Ranghetti, *prismaread: Import PRISMA L1/L2 hyperspectral data and convert them to a more user friendly format*, 2021. R package version 1.0.0.
- [92] R. J. Hijmans, *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*, 2021. R package version 3.4-13.
- [93] R. Bivand, T. Keitt, and B. Rowlingson, *rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library*, 2021. R package version 1.5-23.
- [94] B. Hamner and M. Frasco, *Metrics: Evaluation Metrics for Machine Learning*, 2018. R package version 0.1.4.
- [95] J. Gama and G. Davis, *colorscience: Color Science Methods and Data*, 2019. R package version 1.0.8.
- [96] H. Wickham, M. Averick, J. Bryan, W. Chang, L. D. McGowan, R. François, G. Grolemond, A. Hayes, L. Henry, J. Hester, M. Kuhn, T. L. Pedersen, E. Miller, S. M. Bache, K. Müller, J. Ooms, D. Robinson, D. P. Seidel, V. Spinu, K. Takahashi, D. Vaughan, C. Wilke, K. Woo, and H. Yutani, “Welcome to the tidyverse,” *Journal of Open Source Software*, vol. 4, no. 43, p. 1686, 2019.
- [97] M. Kim, S. Park, C. Anderson, and G. L. Stensaas, “System Characterization Report on PRecurSore IperSpettrale della Missione Applicativa (PRISMA),” tech. rep., 2022.
- [98] A. Albert and C. Mobley, “An analytical model for subsurface irradiance and remote sensing reflectance in deep and shallow case-2 waters,” *Optics Express*, vol. 11, no. 22, p. 2873, 2003.
- [99] E. F. F. da Silva, E. M. L. d. M. Novo, F. d. L. Lobo, C. C. F. Barbosa, M. A. Noernberg, L. H. d. S. Rotta, C. T. Cairo, D. A. Maciel, and R. Flores Júnior, “Optical water types found in Brazilian waters,” *Limnology*, vol. 22, pp. 57–68, jan 2021.
- [100] G. Dall’Olmo and A. A. Gitelson, “Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: Experimental results (Applied Optics (2005) 44 (412-422)),” *Applied Optics*, vol. 44, no. 16, p. 3342, 2005.
- [101] A. Morel and A. Bricaud, “Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton,” *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, vol. 28, pp. 1375–1393, nov 1981.
- [102] A. Gitelson, Y. Yacobi, J. D. S. R. L. Han, R. Stark, and D. Etzion, “Remote estimation of phytoplankton density in productive waters,” 2000.

- [103] D. R. Mishra, I. Ogashawara, and A. A. Gitelson, *Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters*. Elsevier, 2017.
- [104] V. S. Martins, C. C. F. Barbosa, L. A. S. de Carvalho, D. S. F. Jorge, F. d. L. Lobo, and E. M. L. de Moraes Novo, “Assessment of atmospheric correction methods for sentinel-2 MSI images applied to Amazon floodplain lakes,” *Remote Sensing*, vol. 9, no. 4, 2017.
- [105] C. Giardino, M. Bresciani, A. Fabbretto, N. Ghirardi, S. Mangano, A. Pellegrino, D. Vaiciute, F. Braga, V. E. Brando, M. Laanen, and A. Tzimas, “Hyperspectral prisma products of aquatic systems,” vol. 2021-July, pp. 1229–1232, IEEE, 7 2021.
- [106] G. Lazzeri, W. Frodella, G. Rossi, and S. Moretti, “Multitemporal mapping of post-fire land cover using multiplatform prisma hyperspectral and sentinel-uav multispectral data: Insights from case studies in portugal and italy,” *Sensors*, vol. 21, 6 2021.
- [107] N. Mzid, F. Castaldi, M. Tolomio, S. Pascucci, R. Casa, and S. Pignatti, “Evaluation of agricultural bare soil properties retrieval from landsat 8, sentinel-2 and prisma satellite data,” *Remote Sensing*, vol. 14, 2 2022.
- [108] V. P. Curtarelli, E. F. F. da Silva, F. d. L. Lobo, C. C. F. Barbosa, and E. M. L. d. M. Novo, “Water Transparency in a Brazilian Reservoir,” *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pp. 3287–3290, 2019.
- [109] L. L. Richardson and E. F. LeDrew, eds., *Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes - Science and Management Applications*, vol. 9. Springer, 2006.
- [110] M. K. Lehmann, U. Nguyen, M. Allan, and H. J. van der Woerd, “Colour classification of 1486 lakes across a wide range of optical water types,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 8, pp. 1–22, 2018.
- [111] C. Giardino, K.-L. Kōks, R. Bolpagni, G. Luciani, G. Candiani, M. K. Lehmann, H. Jan Van der Woerd, and M. Bresciani, “The Color of Water from Space: A Case Study for Italian Lakes from Sentinel-2,” in *Earth Observation and Geospatial Analyses [Working Title]*, IntechOpen, jun 2019.
- [112] R. W. G. Hunt and M. R. Pointer, *Measuring Colour*. Chichester, UK: John Wiley and Sons, Ltd, 4th ed., sep 2011.
- [113] A. I. Dogliotti, K. G. Ruddick, B. Nechad, D. Doxaran, and E. Knaeps, “A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 156, pp. 157–168, 2015.
- [114] B. Nechad, K. G. Ruddick, and Y. Park, “Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, no. 4, pp. 854–866, 2010.
- [115] D. Doxaran, E. Leymarie, B. Nechad, A. Dogliotti, K. Ruddick, P. Gernez, and E. Knaeps, “Improved correction methods for field measurements of particulate light backscattering in turbid waters,” *Optics Express*, vol. 24, no. 4, p. 3615, 2016.

Espectro solar extraterrestre

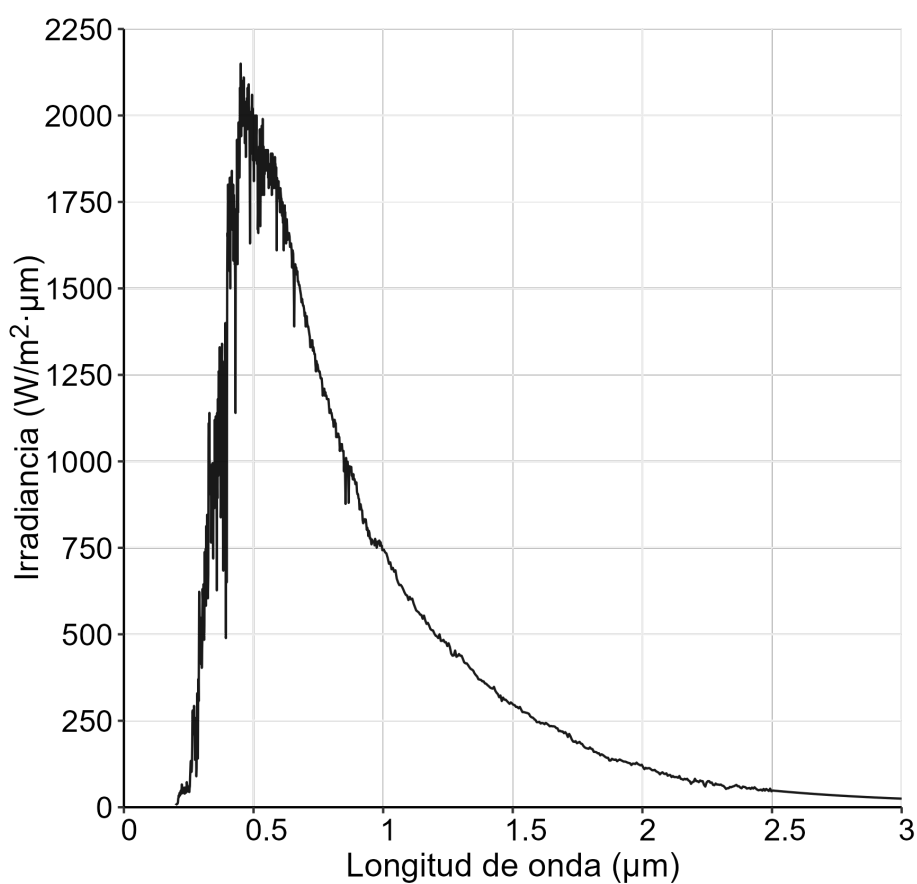


Figura A.1: Espectro solar extraterrestre, en irradiancia por longitud de onda.

Variación de la irradiancia correspondiente al espectro solar extraterrestre con la longitud de onda. Los pares ordenados que conforman esta figura se encuentran disponibles en el siguiente [enlace](#).

Diagrama cromático

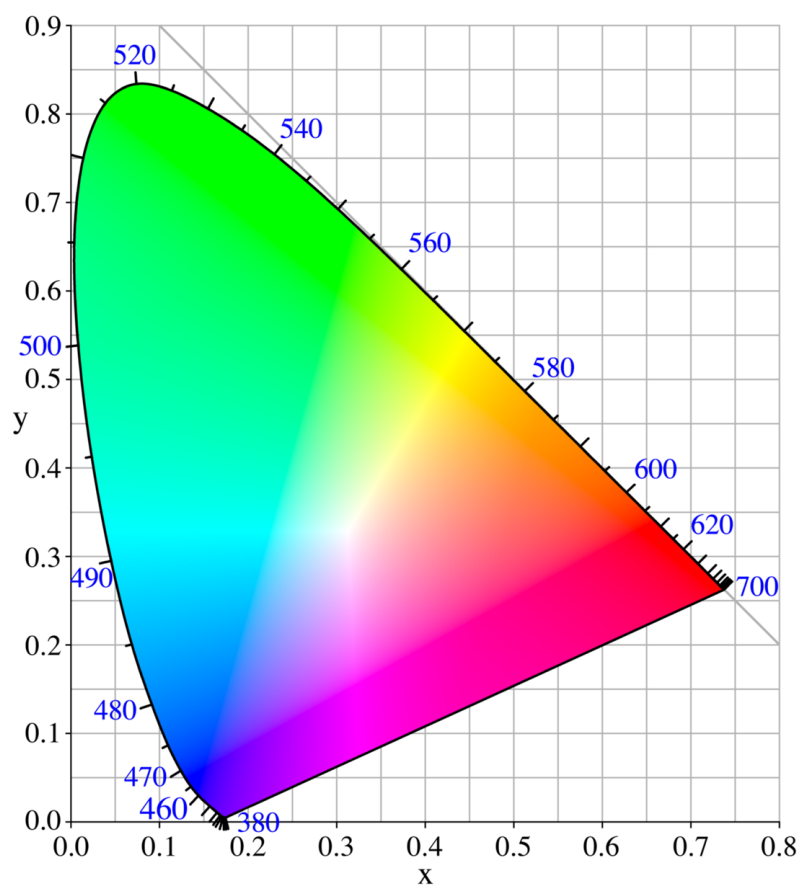


Figura B.1: Diagrama cromático CIE 1931.

En las coordenadas $y_m = x_m = 1/3$ se encuentra el centro del plano cromático, correspondiente al color blanco. Alrededor de la curva externa se muestran, en texto azul, las longitudes de onda dominante λ_d , en nm, Tomado del siguiente [enlace](#), de dominio público.

ANEXO C

Bandas espectrales VNIR PRISMA

#	Banda	Centro de banda (nm)	FWHM (nm)
1	4	402,44	11,41
2	5	411,32	10,56
3	6	419,37	9,84
4	7	426,97	9,40
5	8	434,31	9,25
6	9	441,66	9,22
7	10	449,03	9,15
8	11	456,38	9,08
9	12	463,73	8,96
10	13	470,95	8,96
11	14	478,18	8,95
12	15	485,41	9,03
13	16	492,70	9,20
14	17	500,14	9,30
15	18	507,66	9,37
16	19	515,18	9,49
17	20	522,92	9,64
18	21	530,67	9,67
19	22	538,49	9,78
20	23	546,48	9,99
21	24	554,56	10,06
22	25	562,74	10,17
23	26	571,00	10,31
24	27	579,35	10,40
25	28	587,82	10,55
26	29	596,48	10,80
27	30	605,39	10,96

#	Banda	Centro de banda (nm)	FWHM (nm)
28	31	614,17	11,04
29	32	623,20	11,23
30	33	632,13	11,15
31	34	641,33	11,53
32	35	650,79	11,64
33	36	660,26	11,72
34	37	669,82	11,83
35	38	679,47	11,97
36	39	689,42	12,08
37	40	699,10	11,98
38	41	709,00	12,43
39	42	719,17	12,35
40	43	729,24	12,41
41	44	739,42	12,54
42	45	749,73	12,62
43	46	760,10	12,77
44	47	770,53	12,73
45	48	780,91	12,76
46	49	791,36	12,83
47	50	801,94	12,93
48	51	812,54	12,94
49	52	823,15	12,97
50	53	833,75	12,99
51	54	844,43	13,06
52	55	855,18	13,13
53	56	865,95	13,15
54	57	876,64	13,07

#	Banda	Centro de banda (nm)	FWHM (nm)
55	58	887,27	13,10
56	59	897,99	13,12
57	60	908,64	13,08
58	61	919,18	12,92
59	62	929,39	12,76
60	63	939,86	13,17
61	64	951,36	13,52
62	65	962,26	12,98
63	66	972,63	12,91

Tabla C.1: Número, centro y FWHM de las 63 bandas VNIR de PRISMA L2D.

Centros de las bandas espectrales y FWHM de PRISMA, en la región VNIR, obtenidos a partir de los metadatos presentes en el producto L2D.

Bandas espectrales Sentinel-2

Banda	Resolución (m)	S2A		S2B	
		Ancho de banda (nm)	Longitud de onda (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda (nm)
B01	60	21	442,2	21	442,7
B02	10	66	492,1	66	492,4
B03	10	36	559	36	559,8
B04	10	31	664,9	31	664,6
B05	20	15	703,8	16	704,1
B06	20	15	739,1	15	740,5
B07	20	20	779,7	20	782,8
B08	10	106	833	106	832,8
B8A	20	21	864	22	864,7
B09	60	20	943,2	21	945,1
B10	60	31	1376,9	30	1373,5
B11	20	91	1610,4	94	1613,7
B12	20	175	2185,7	185	2202,4

Tabla D.1: Características espectrales de las plataformas Sentinel-2 S2A y S2B.

Características de las bandas espectrales del sensor MSI a bordo de la plataforma Sentinel-2. En la presente Tesis de Maestría se empleó un producto capturado por Sentinel-2 S2B.

Métricas de desempeño

Clase	Producto	RMSE (%)	BIAS (%)	MAE (%)	SAM (°)	R ²
Agua clase A	PRISMA L2D	0,06	0,02	0,04	3,6	0,988*
	PRISMA L1 + ACOLITE	1,42	-1,38	1,38	19,9	0,804*
	S2 L2A	0,48	-0,18	0,33	28,4	0,293*
	S2 L1C + ACOLITE	0,97	-0,91	0,91	25,1	0,555*
Agua clase B	PRISMA L2D	0,08	0,02	0,06	1,9	0,995*
	PRISMA L1 + ACOLITE	1,15	-0,97	0,97	16,5	0,739*
	S2 L2A	1,13	-0,28	1,07	24,3	0,317
	S2 L1C + ACOLITE	1,07	-0,73	0,89	18,6	0,583*
Agua clase C	PRISMA L2D	0,12	0,07	0,09	0,8	0,999*
	PRISMA L1 + ACOLITE	1,15	-0,90	0,90	6,7	0,965*
	S2 L2A	1,81	-1,41	1,47	8,0	0,904*
	S2 L1C + ACOLITE	1,47	-1,19	1,21	7,7	0,937*

Tabla E.1: Métricas de desempeño entre diferentes productos y S2 SIM.

Todas las métricas se obtuvieron mediante la comparación entre la firma espectral simulada mediante convolución espectral (S2 SIM) y la del producto correspondiente.

Las unidades de RMSE, BIAS y MAE son en porcentaje de reflectancia de superficie, SAM tiene unidades angulares, en grados (°) y R² es adimensional. Bajos valores de RMSE, BIAS, MAE y SAM indican similitudes entre las firmas espectrales analizadas, equivalente a R² cercano a la unidad.

 Parámetros biogeofísicos estimados

Parámetro	Unidades	Agua clase A	Agua clase B	Agua clase C	Algoritmo ACOLITE	Referencia
Turbidez	NTU	3,37	6,43	213,87	tur_dogliotti2015	[113]
Sólidos suspendidos	g/m ³	4,98	9,39	147,94	spm_nechad2016	[114, 115]
Clorofila-a	μg/L	22,57	55,58	11,51	chl_re_mishra	[56]

Tabla F.1: Valores estimados para los distintos tipos de agua, obtenidos mediante ACOLITE.

Valores de turbidez, sólidos suspendidos y clorofila-a, para las clases de agua A, B y C. Se utilizó el software ACOLITE para la estimación, de acuerdo al algoritmo correspondiente.