

Anexo 01 – Informes de las etapas metodológicas de calibración

Informe de Campaña Primavera 2025

Componente: Imágenes Satelitales

Preparado para: Codelco Salvador

Santiago, 25 de junio 2026



Documentación

Módulo de Corrección Atmosférica y Fusión

Pan-Sharpening para SPOT 6-7

PREPARADO PARA
SMI ICE Chile

ELABORADO POR
AGRO SPACE SPA

Enero 2026



AgroSpace



SMI ICE Chile

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I. Resumen ejecutivo.....	3
1. Caracterización de los sensores de SPOT-6/7	3
a. Configuración Espectral y Espacial.....	3
2. Corrección Atmosférica y Radiométrica.....	4
3. Fusión de imágenes - PanSharpening.....	6
a. Método IHS.....	6
II. Referencias Bibliográficas.....	8

I. Resumen ejecutivo

Este documento detalla la metodología implementada para el procesamiento de imágenes satelitales SPOT, abarcando la corrección atmosférica, el pansharpening (fusión pancromática) y el mosaico final. El flujo de trabajo se basa en scripts de Python que utilizan bibliotecas especializadas como Py6S para la corrección atmosférica para el procesamiento de imágenes, garantizando la generación de productos de reflectancia superficial de alta resolución espacial.

1. Caracterización de los sensores de SPOT-6/7

El flujo de trabajo se basa en imágenes adquiridas por la constelación de satélites SPOT 6 y SPOT 7 radiometricamente calibrados en función del metadato XML y ortorectificado. Estos sensores ópticos operan bajo un esquema *pushbroom*, capturando información en cinco bandas espectrales simultáneas.

a. Configuración Espectral y Espacial

El sensor cuenta con una banda Pancromática de alta resolución espacial y cuatro bandas multispectrales. Las especificaciones técnicas utilizadas para la configuración del procesamiento se indica en la Tabla 1:

Tabla 1. Características de las bandas de SPOT 6 y 7

Banda	Denominación	Rango espectral (μm)	Resolución espacial (GSD)
Pan	Pancromática	0,450 - 0,745	1,5m
B0	Azul	0,450 - 0,520	6,0m
B1	Verde	0,530 - 0,590	6,0m
B2	Roja	0,625 - 0,695	6,0m
B3	NIR (Infrarrojo cercano)	0,76 - 0,89	6,0m

2. Corrección Atmosférica

Todas las imágenes satelitales fueron corregidas atmosféricamente mediante el código de transferencia radiativa 6SV2.1 (Vermote et al., 1997). La señal recibida por los sensores de los satélites incluye no sólo la radiancia reflejada en la superficie, sino también la radiancia de la trayectoria procedente de la dispersión atmosférica (Rayleigh y aerosoles) y la absorción gaseosa (por ejemplo, O_3 , H_2O , CO_2). Como resultado, la corrección atmosférica es un paso crucial del preprocesamiento para convertir las mediciones de la parte superior de la atmósfera (TOA) en reflectancia de superficie (Vermote et al., 1997; 2006; 2008).

Esta corrección se consigue normalmente utilizando modelos de transferencia radiativa (RTM), que simulan la interacción de la radiación solar con la atmósfera y la superficie en determinadas condiciones de observación. Entre ellos, el modelo de Segunda Simulación de una Señal de Satélite en el Espectro Solar - Vector (6SV) destaca por su equilibrio entre precisión física y eficiencia computacional (Vermote et al., 1997). El modelo 6SV simula la propagación de la radiación solar a través de una atmósfera plano-paralela, teniendo en cuenta procesos clave como:

- Dispersión molecular (Rayleigh)
- Dispersión de aerosoles (Mie)
- Absorción gaseosa por O_3 , O_2 , CO_2 , H_2O , CH_4 y N_2O

Una característica definitoria de 6SV es su formulación de transferencia radiativa vectorial, que calcula el vector de Stokes completo (I, Q, U, V). Esto permite un modelado preciso de la radiación polarizada, mejorando la precisión de la simulación en casos de aerosoles no esféricos, superficies anisotrópicas (por ejemplo, BRDF) y observaciones fuera de nadir (Kotchenova et al., 2006).

El modelo resuelve la ecuación de transferencia radiativa vectorial utilizando el método de órdenes sucesivos de dispersión, descomponiendo la radiancia en contribuciones de cada orden de dispersión. La absorción gaseosa se calcula utilizando modelos estadísticos de bandas: el modelo Goody para el vapor de agua (Goody, 1964) y el modelo Malkmus (Malkmus, 1967) para otros gases. El producto ha sido compilado en Py6S para su aplicación operacional (Wilson, 2013). Esto proporciona simulaciones de transmitancia computacionalmente eficientes en amplios rangos espectrales. La corrección atmosférica se obtiene a través de la inversión de la ecuación de la señal obtenida por un sensor remoto, donde se expresa la reflectancia del TOA (ρ^*) como:

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v) + \frac{\rho_t T(\theta_s) T(\theta_v)}{1 - \rho_t S}$$

Donde,

- $\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v)$: reflectancia aparente TOA, dado los ángulos solares y de observación – donde θ denota el ángulo cenital y ϕ se refiere para el ángulo acimutal del sol (s)/ observación (v), respectivamente.
- $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v)$: Reflectancia atmosférica intrínseca (también conocida como radiancia de trayectoria), que representa la parte de la señal TOA debida únicamente a la dispersión atmosférica a lo largo de la trayectoria definida por los mismos ángulos.
- ρ_t : reflectancia de la superficie (objetivo)
- $T(\theta_s), T(\theta_v)$: transmitancia atmosférica en las direcciones solar y visual
- S : albedo esférico de la atmósfera

Los datos de parámetros atmosféricos serán derivados de bases de datos satelitales, del producto de Espesor Óptico (AOT por sus siglas en inglés) y vapor de agua del producto MCD19A2 MODIS MAIAC (Lyapustin et al., 2018), y el Ozono derivado de Sentinel-5P TROPOMI (Veekfind et al., 2012) desde la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Para el cálculo de la reflectancia de superficie se utilizarán los parámetros de calibración entregados por cada proveedor de las imágenes incorporando los valores de ángulo cenital solar, día del año, elevación solar, entre otros, con el fin de obtener la reflectancia de superficie. En la tabla 2 se presenta un resumen de los datos de entradas utilizados para la corrección atmosférica 6S.

Tabla 2. Datos de entrada para corrección atmosférica 6S

Parámetro	Fuente	Uso
Geometría Solar y de Visión $\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v$	Metadatos DIMAP XML SPOT	Define el ángulo relativo Sol-Objeto-Sensor.
Fecha de Adquisición	Metadatos DIMAP XML SPOT	Necesario para determinar la distancia Tierra-Sol.
Elevación del Terreno	Metadatos DIMAP XML SPOT	Define la altitud del objetivo
AOD (Optical Depth) Vapor de Agua (H₂O)	Google Earth Engine (GEE) - MODIS MCD19A2	Mide la concentración de aerosoles en la atmósfera y absorción de gases atmosféricos.
Ozono (O₃)	Google Earth Engine (GEE) - COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_O3	Mide la absorción de gases atmosféricos
Funciones de Respuesta Espectral	Proveedor de imágenes satelitales	Define la sensibilidad espectral precisa de los sensores SPOT 6/7.

En la figura 1 se representa la corrección atmosférica del producto para SPOT 6 durante el 8 de Diciembre del 2025

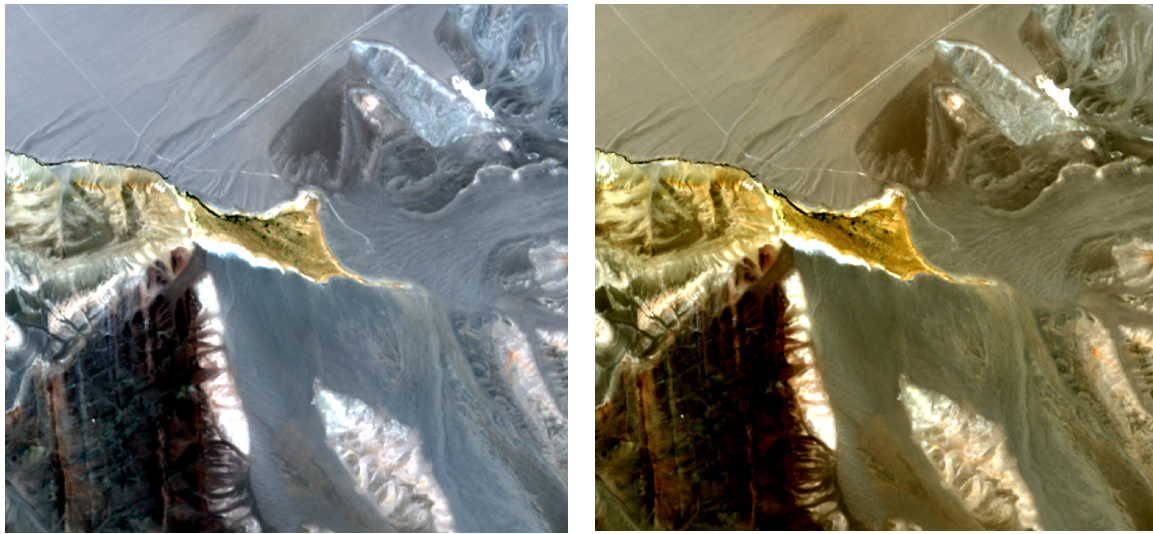


Imagen RGB sin corregir

Imagen RGB corregida atmosféricamente

Figura 1. Contraste entre imagen sin corregir e imagen corregida

3. Fusión de imágenes - PanSharpening

El proceso de *pansharpening* fusiona la información espectral de las bandas multiespectrales (baja resolución espacial) con la información estructural de la banda pancromática (alta resolución espacial).

a. Método IHS

Se emplea la transformación IHS clásica. Este método separa la información espacial (Intensidad) de la información espectral (Matiz y Saturación).

El flujo matemático implementado es el siguiente:

- i. **Re-muestreo:** Las bandas multiespectrales (R, G, B, NIR) se re-muestran mediante interpolación cúbica para coincidir con la resolución espacial de la banda pancromática (P).
- ii. **Transformación Directa (RGB → IHS):** El componente de Intensidad (I) se calcula como el promedio espectral:

$$I = \frac{R+G+B}{3}$$

El Matiz (H) y la Saturación (S) se calculan geométricamente para manejar la no linealidad del espacio de color.

- iii. **Sustitución:** Se asume que la banda pancromática contiene la información estructural más precisa. Por tanto, se sustituye el componente de Intensidad original (I) por la banda Pancromática (P):

$$I_{norm} = P_{norm}$$

- iv. **Transformación Inversa (IHS → RGB):** Se realiza la conversión de vuelta al espacio de color original utilizando Inuevo, H y S para obtener la imagen fusionada ($R_{fus}, G_{fus}, B_{fus}, NIR_{fus}$).

En la Figura 2 se presenta el efecto de fusión pansharpening sobre la imagen SPOT 6 adquirida el 8 de Diciembre de 2025.

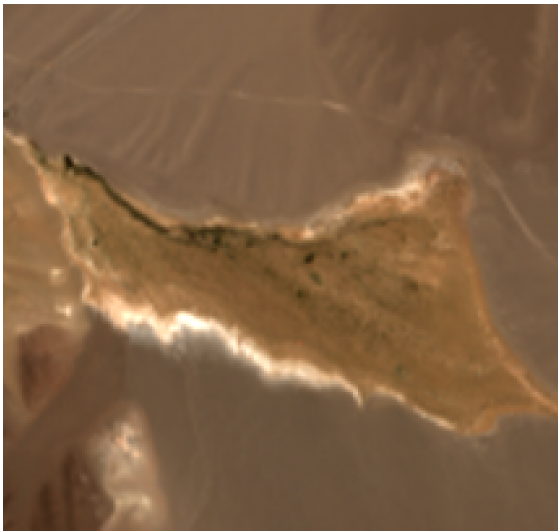


Imagen multispectral resolución nativa (6m)



Imagen multispectral fusionada (1,5m)

Figura 2. Fusión *Pan-sharpened* sobre imagen SPOT 6

II. Referencias Bibliográficas

Carper, W. J., Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (1990). The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(4), 459-467.

Goody, R. M. Atmospheric Radiation 1 Theoretical Basis,(1964).

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27.

Kotchenova, S. Y., Vermote, E. F., Matarrese, R., & Klemm Jr, F. J. (2006). Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. *Applied optics*, 45(26), 6762-6774.

Lyapustin, Alexei, et al. "MODIS collection 6 MAIAC algorithm." *Atmospheric Measurement Techniques* 11.10 (2018): 5741-5765.

Malkmus, W. (1967). Random Lorentz band model with exponential-tailed S- 1 line-intensity distribution function. *Journal of the Optical Society of America*, 57(3), 323-329

Tu, T. M., Su, S. C., Shyu, H. C., & Huang, P. S. (2001). A new look at IHS-like image fusion methods. *Information Fusion*, 2(3), 177-186.

Veefkind, J. Pepijn, et al. "TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications." *Remote sensing of environment* 120 (2012): 70-83.

Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., & Morcrette, J.-J. (1997), Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 3, p. 675-686.

Vermote, E. (2006). 6S User Guide Version 3 Manual Part 1, Modis Land Surface Reflectance Science Computing Facility. <http://6s.ltdri.org/>.

Vermote, E. F., & Kotchenova, S. (2008). Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D23).

Wilson, R. T. (2013). Py6S: A Python interface to the 6S radiative transfer model. *Computers & Geosciences*, 51, 166-171.

Caracterización espectral de superficies altoandinas mediante mediciones de terreno



Resumen

Los ecosistemas altoandinos cumplen un rol ecológico fundamental en la regulación hídrica, el mantenimiento de la biodiversidad y el funcionamiento de sistemas socioambientales en zonas áridas de montaña. En estos ambientes, la vegetación se desarrolla bajo condiciones climáticas extremas, lo que se refleja en características estructurales y fisiológicas particulares, las cuales pueden ser capturadas a través de su respuesta espectral. Este estudio caracteriza firmas espectrales de terreno asociadas a distintos tipos de cobertura superficial en la cuenca del Salar de Pedernales, Región de Atacama, Chile. Se realizaron mediciones espectrales in-situ en 13 sitios representativos utilizando un espectroradiómetro. Los resultados permiten identificar tres tipos generales de respuesta espectral: superficies con vegetación continua, superficies con condiciones mixtas de vegetación y suelo desnudo, y superficies dominadas por suelo desnudo o costras salinas. Estas diferencias reflejan de manera consistente las condiciones superficiales observadas en terreno, destacando el valor de las mediciones espectrales in-situ como apoyo para la interpretación y el monitoreo de ecosistemas altoandinos.

Contenido

Introducción.....	4
Objetivos	5
Área de estudio.....	6
Metodología	7
Resultados	8
Conclusiones	11
Bibliografía	12
Anexo	13
1. Cartografías de los sitios de medición con las coordenadas.	13
2. Sitios con puntos fuera del área de estudio	16
3. Coordenadas de nubes de puntos	16

Introducción

Los ecosistemas altoandinos cumplen un rol ecológico clave, estos influyen de manera significativa en la regulación hídrica y en procesos ecológicos fundamentales que sostienen la biodiversidad, el almacenamiento de carbono orgánico del suelo y servicios ecosistémicos vinculados a actividades productivas (Cervantes et al. 2021; Rolando et al., 2016). Estos ecosistemas se desarrollan bajo condiciones ambientales extremas, caracterizadas por vientos de alta velocidad, intensa radiación solar, la ocurrencia de heladas diarias y la presencia de una cobertura nival estacional (Valois et al., 2020). En este contexto, los ecosistemas altoandinos presentan una alta sensibilidad frente a variaciones climáticas y a cambios en el uso del suelo, lo que puede afectar su estructura, funcionamiento y los servicios ecosistémicos que sustentan (Cavieres et al., 2025).

Estas condiciones ambientales se reflejan directamente en las características estructurales y fisiológicas de la vegetación altoandina, las cuales pueden asociarse a una respuesta espectral característica, dependiente del tipo de vegetación y de su estado fisiológico (Niphadkar & Nagendra, 2016; Iqbal et al., 2021). Una firma espectral corresponde al patrón único de luz reflejada o emitida por un objeto o material a través de distintas longitudes de onda, lo que permite su identificación y caracterización. En el caso de la vegetación, las firmas espectrales están directamente condicionadas por el estado y la estructura de la vegetación, constituyendo una herramienta fundamental para su caracterización y análisis (Noda et al. 2021).

En este contexto, el área de estudio se emplaza en la Región de Atacama, en la cuenca del Salar de Pedernales, correspondiendo a un entorno representativo de ambientes altoandinos, donde coexisten diversos tipos de vegetación y sistemas ambientales. El área comprende ecosistemas de vegas y pajonales hídricos, así como ecosistemas acuáticos asociados al salar, destacando el Sistema Vegetacional Azonal Hídrico Terrestre (SVAHT) asociado al Salar de Pedernales, el cual corresponde a un área de protección prioritaria debido a su alta riqueza ecosistémica (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], 2025; Corporación Nacional del Cobre [CODELCO], sf).

El presente estudio tiene como objetivo la medición y caracterización de firmas espectrales en distintos tipos de vegetación altoandina presentes en la cuenca del Salar de Pedernales, mediante mediciones in-situ con un espectroradiómetro, con el fin de generar información de base que contribuya a la caracterización y monitoreo de estos ecosistemas.

Objetivos

Caracterización de firmas espectrales de distintos tipos de vegetación altoandina presentes en la cuenca del Salar de Pedernales.

Objetivos específicos

- Medición de firmas espectrales in-situ en los sitios de interés.
- Analizar el comportamiento espectral de los principales tipos de vegetación altoandina.

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la cuenca del Salar de Pedernales, en la Región de Atacama, correspondiendo a un sector de alta montaña caracterizado por condiciones ambientales extremas, con vientos de alta velocidad, intensa radiación solar, una temporada de crecimiento corta, la ocurrencia de heladas diarias y la presencia de una cobertura nival estacional (Valois et al., 2020).

En la cuenca se desarrollan principalmente ecosistemas de vegas y pajonales hídricos, asociados a aportes de agua superficial o subterránea, junto con ecosistemas acuáticos emplazados a nivel del salar. Estos incluyen lagunas hipersalinas secuenciales, lagunas hipersalinas aisladas y la Laguna VCL, correspondiente a un sistema integrado vega–canal–laguna que forma parte del Sistema Vegetacional Azonal Hídrico Terrestre (SVAHT) del Salar de Pedernales (CODELCO, s.f.). La vegetación del área está dominada por formaciones de Matorral Bajo Desértico y Herbazal de Altitud, según la clasificación de Luebert y Plischoff (2017).

El estudio consideró la evaluación de 13 sitios de interés, representativos de la diversidad de coberturas y sistemas ambientales presentes en la cuenca, destacando el Salar de Pedernales como uno de los ambientes de mayor relevancia dentro del área de estudio (ver Figura 1).



Figura 1. Área de estudio.

Metodología

En cada sitio de interés se estableció una grilla de muestreo de 81m², compuesta por nueve cuadrantes de 3m × 3m, conformada por un cuadrante central fijo y un cuadrante móvil, el cual fue desplazado sucesivamente a cada una de las posiciones de la grilla (ver Figura 2). En cada posición se realizaron tres mediciones, totalizando 27 mediciones por sitio.

Las firmas espectrales fueron adquiridas mediante un espectroradiómetro Apogee PS-200, previamente calibrado. Las mediciones se realizaron en el intervalo horario comprendido entre las 11:00 y las 15:00h, con el fin de minimizar posibles efectos de sombra. Adicionalmente, cada punto muestreado fue georreferenciado mediante un sistema GNSS RTK, generándose una nube de puntos correspondiente a las mediciones realizadas.

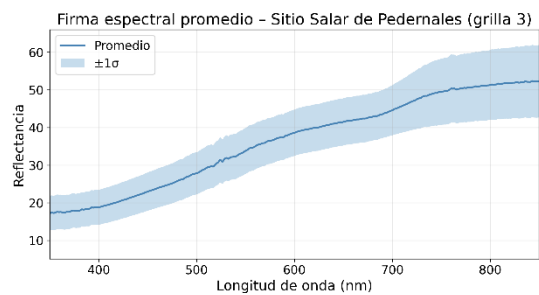
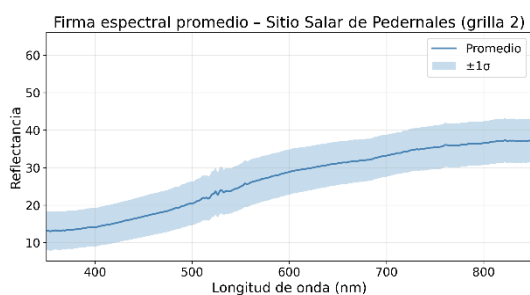
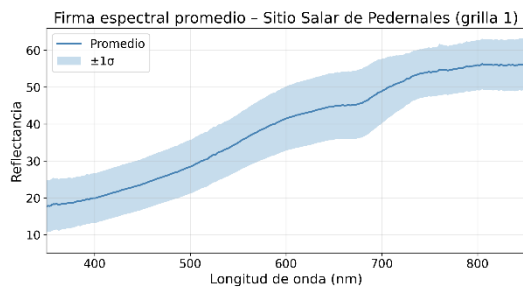
Se aplicó una grilla de medición por cada uno de los sitios de interés, con excepción del Salar de Pedernales, identificado como el SVAHT de mayor interés, donde se implementaron tres grillas de muestreo.



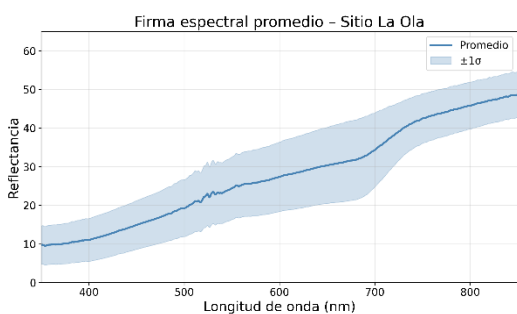
Figura 2. Cuadrante de medición en Río Negro.

Resultados

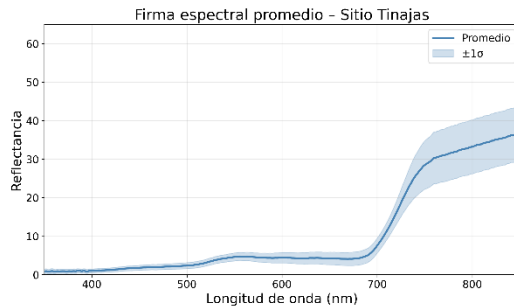
Salar de Pedernales



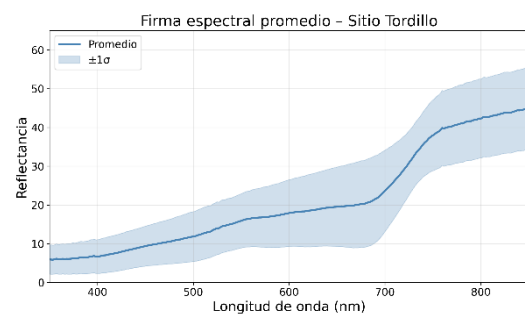
La ola



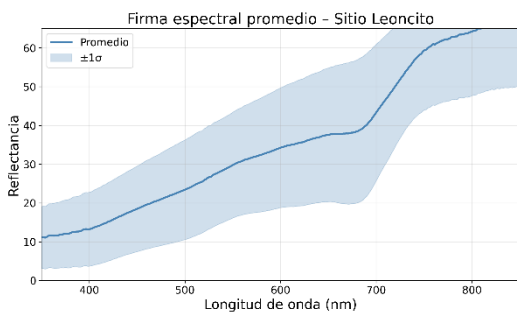
Tinajas



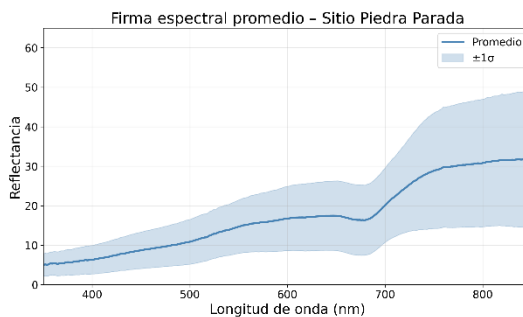
Tordillos



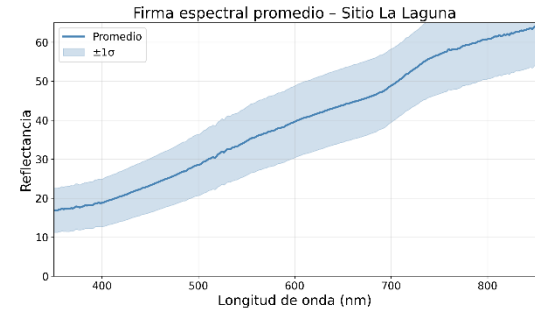
Leoncito



Piedra Parada



La Laguna



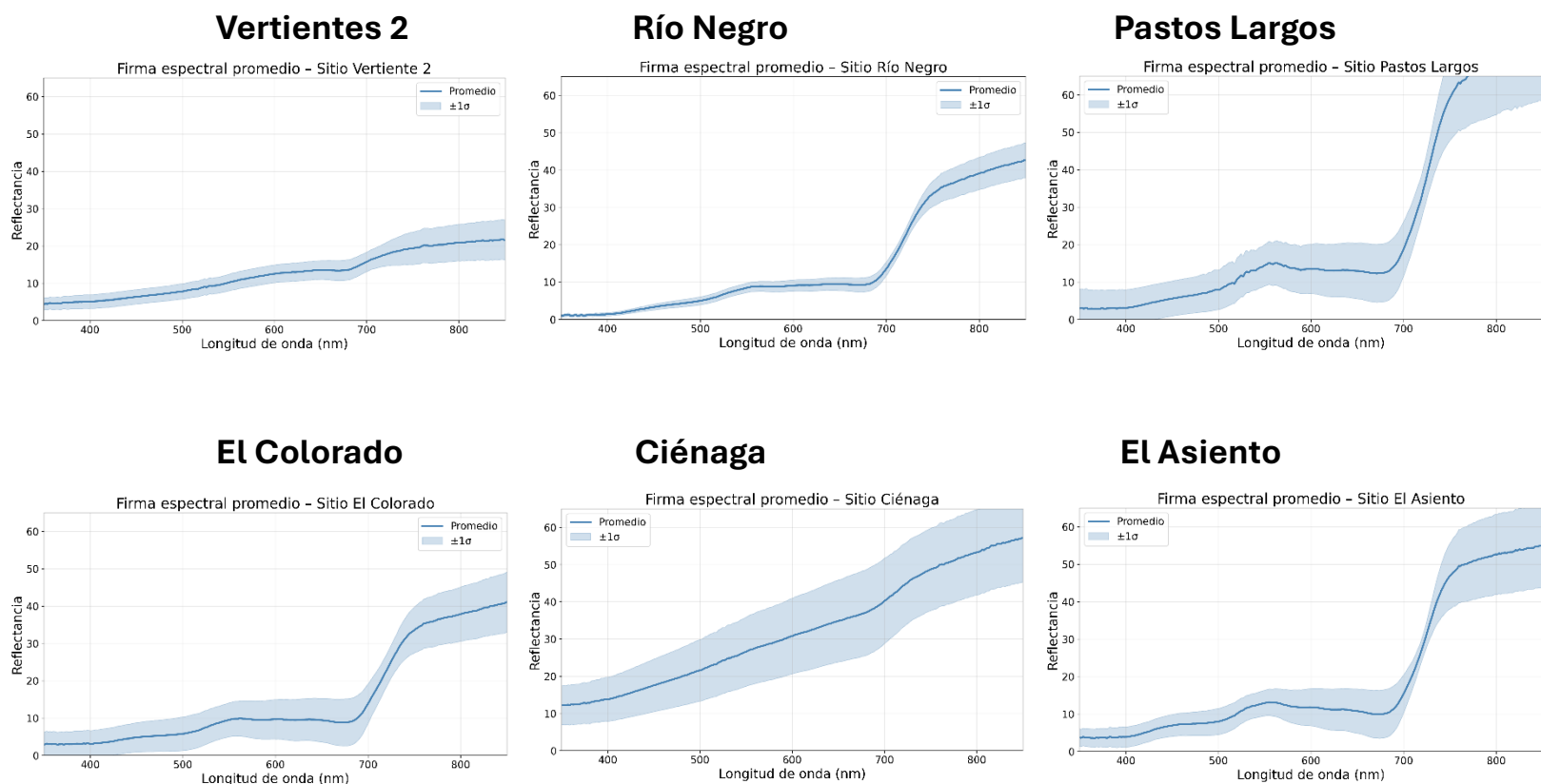


Figura 3. Reflectancia promedio y su desviación estándar de todos los sitios de medición.

Las firmas espectrales medidas en los distintos sitios de interés presentan una respuesta espectral similar a lo largo del espectro visible–infrarrojo cercano (350–850 nm), caracterizado por un aumento progresivo de la reflectancia hacia el infrarrojo cercano.

Las superficies con presencia continua de vegetación, como Pastos Largos, Tinajas, Río Negro y El Asiento, muestran los valores más bajos de reflectancia en el rango del espectro visible (350–700 nm) y un aumento pronunciado en el infrarrojo cercano (700–850 nm) (ver Figura 3), donde se alcanzan los valores más altos del conjunto de mediciones. Este comportamiento espectral es consistente con la presencia de una cobertura vegetal verde y relativamente homogénea (ver Figura 4).



Figura 4. Sitio de medición Pastos Largos

En contraste, los sitios con condiciones superficiales mixtas (ver Figura 5) presentan una respuesta espectral que refleja el efecto del promedio de distintas coberturas dentro de cada grilla de medición, incluyendo parches de vegetación, áreas de suelo desnudo y/o presencia de sales. Esta integración de componentes genera firmas espectrales suavizadas en comparación con aquellas asociadas a sitios con coberturas más homogéneas dominadas por vegetación, y se manifiesta además en una mayor variabilidad espectral dentro de las grillas de medición.



Figura 5. (a) Sitio de medición Leoncito. (b) Sitio de medición Piedra Parada.

Finalmente, los sitios dominados por suelo desnudo o costras salinas, como el Salar de Pedernales y la Laguna (ver Figura 6), muestran firmas espectrales homogéneas, con reflectancias bajas a moderadas y sin un incremento significativo en el infrarrojo cercano, en contraste con los sitios dominados por vegetación.



Figura 6. Sitio de medición Salar de Pedernales.

Cabe destacar que, durante la revisión espacial de las mediciones, se identificó que algunos puntos quedaron fuera del área de estudio definida. Estos casos se detallan en el Anexo 2.

Conclusiones

En el presente estudio se caracterizaron firmas espectrales representativas de distintos tipos de cobertura presentes en la cuenca del Salar de Pedernales, un sistema altoandino altamente dependiente de las condiciones ambientales. Los resultados muestran que las firmas espectrales reflejan de manera consistente las condiciones dominantes de cada sitio, permitiendo distinguir tres patrones principales asociados a superficies dominadas por vegetación, superficies con condiciones mixtas y superficies dominadas por suelo desnudo o costras salinas. Estos resultados confirman el potencial de las firmas espectrales como herramienta para la caracterización y diferenciación de coberturas altoandinas, y entregan una base sólida para su integración en estudios de monitoreo ambiental y análisis remoto de ecosistemas sensibles en ambientes de alta montaña.

Bibliografía

Cavieres, L. A., Llambí, L. D., Anthelme, F., Hofstede, R., & Arroyo, M. T. (2025). High-Andean Vegetation Under Environmental Change: A Continental Synthesis. *Annual Review of Environment and Resources*, 50.

Cervantes, R., Sánchez, J., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J., Locatelli, B., Bonnesoeur, V. (2022). Contribución de los ecosistemas altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. *Ecología Aplicada*.

Corporación Nacional del Cobre [CODELCO]. (sf). *Salar de Pedernales*. <https://www.codelco.com/salar-de-pedernales>

Iqbal, I. M., Balzter, H., & Shabbir, A. (2021). Identifying the spectral signatures of invasive and native plant species in two protected areas of Pakistan through field spectroscopy. *Remote Sensing*, 13(19), 4009.

Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*. Editorial universitaria.

Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. (2025). *Red de Salares es una realidad: aprueban 6 áreas protegidas para resguardar 10 ecosistemas en Atacama*. <https://www.gob.cl/noticias/proteccion-red-salares-areas-preservacion-ecosistemas-atacama/>

Niphadkar, M., & Nagendra, H. (2016). Remote sensing of invasive plants: incorporating functional traits into the picture. *International Journal of Remote Sensing*, 37(13), 3074-3085.

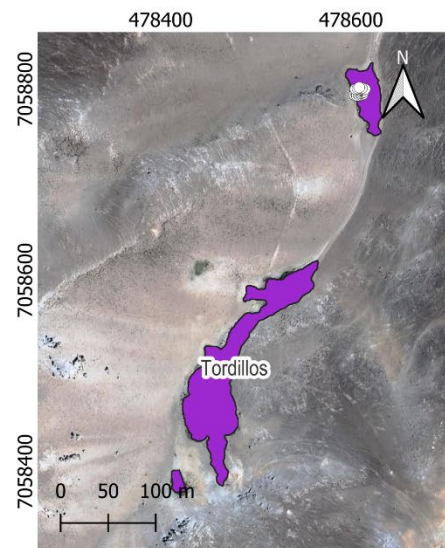
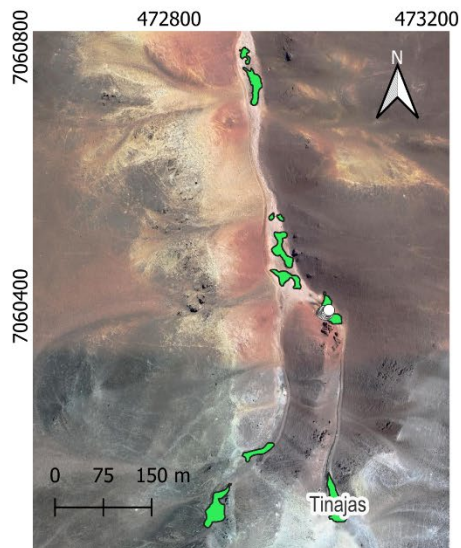
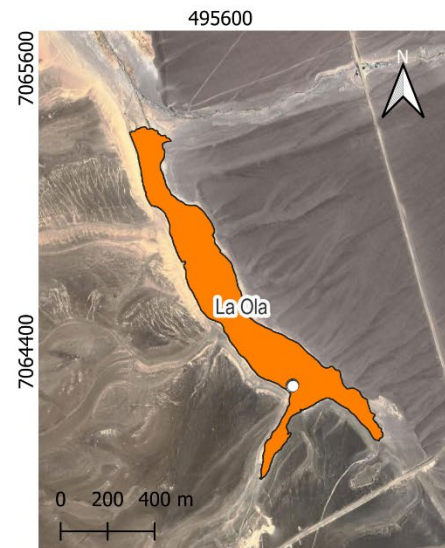
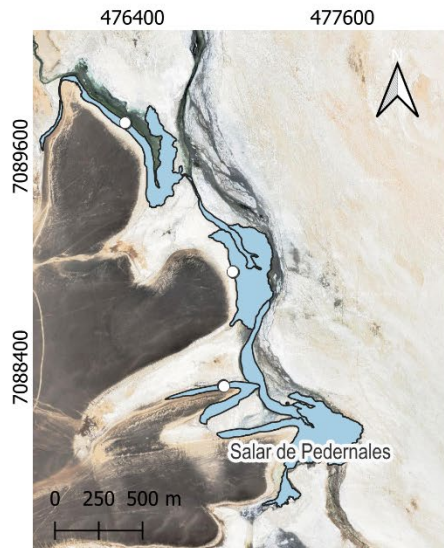
Noda, H. M., Muraoka, H., & Nasahara, K. N. (2021). Plant ecophysiological processes in spectral profiles: perspective from a deciduous broadleaf forest. *Journal of plant research*, 134(4), 737-751.

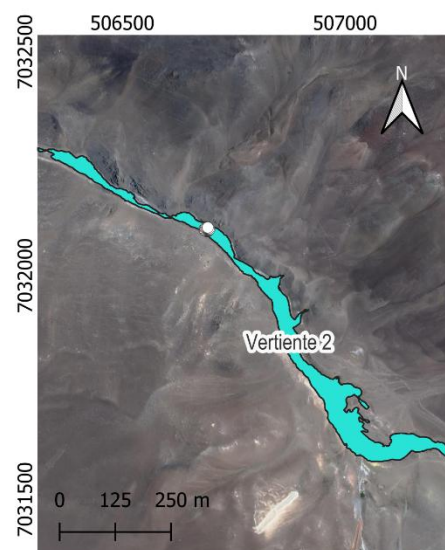
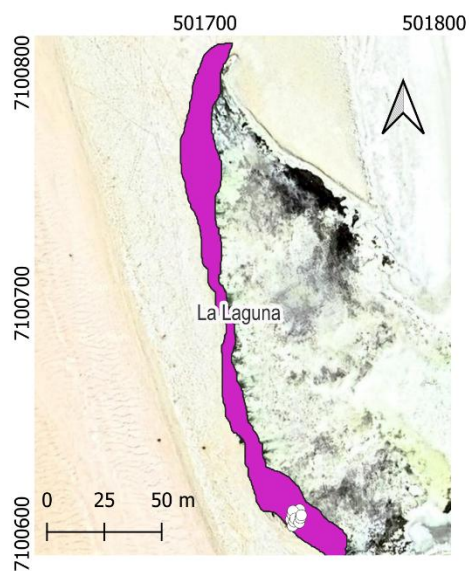
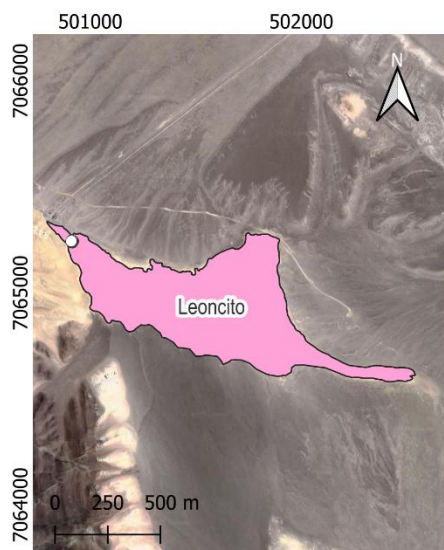
Rolando, J. L., Turin, C., Ramírez, D. A., Mares, V., Moneris, J., & Quiroz, R. (2017). Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 221-233.

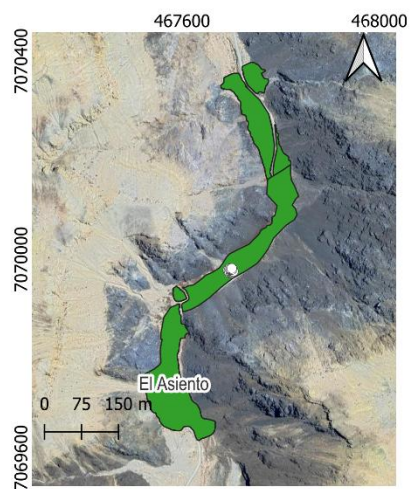
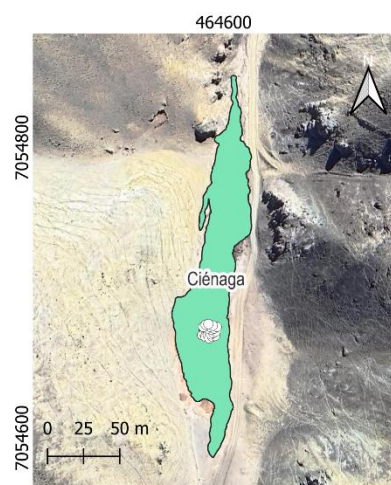
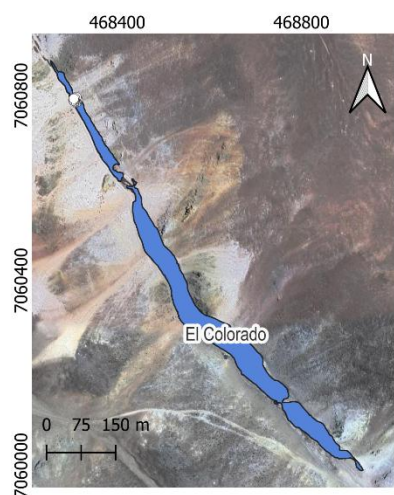
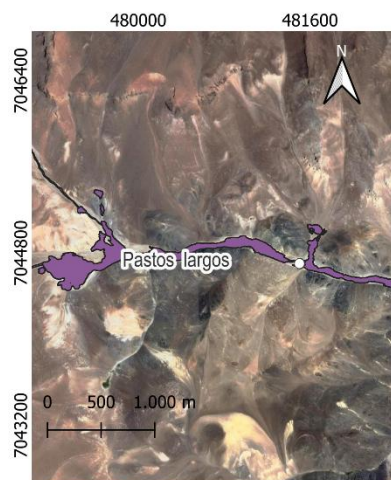
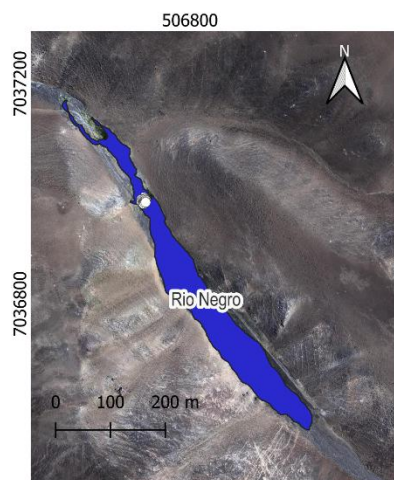
Valois, R., Schaffer, N., Figueroa, R., Maldonado, A., Yáñez, E., Hevia, A., ... & MacDonell, S. (2020). Characterizing the water storage capacity and hydrological role of mountain peatlands in the arid Andes of north-central Chile. *Water*, 12(4), 1071.

Anexo

1. Cartografías de los sitios de medición indicando con color blanco el punto de medición.







2. Sitios con puntos fuera del área de estudio

Sitio	Puntos fuera del área de estudio
El Colorado	3
Tinajas	3
Tordillo	2
Pedernales	26

3. Coordenadas de nubes de puntos

ID	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación
1	Ciénaga	-26.628394	-69.355741	3720.255
2	Ciénaga	-26.628383	-69.355723	3720.317
3	Ciénaga	-26.628374	-69.355706	3720.009
4	Ciénaga	-26.628382	-69.355769	3720.637
5	Ciénaga	-26.628374	-69.355757	3720.393
6	Ciénaga	-26.628368	-69.355741	3720.323
7	Ciénaga	-26.628411	-69.355781	3720.247
8	Ciénaga	-26.628403	-69.355766	3720.227
9	Ciénaga	-26.628396	-69.355751	3720.221
10	Ciénaga	-26.628421	-69.355757	3719.951
11	Ciénaga	-26.628411	-69.355741	3719.733
12	Ciénaga	-26.628405	-69.355724	3719.546
13	Ciénaga	-26.628432	-69.35573	3720.225
14	Ciénaga	-26.628422	-69.35571	3720.094
15	Ciénaga	-26.628416	-69.355691	3719.967
16	Ciénaga	-26.628406	-69.355718	3719.552
17	Ciénaga	-26.628399	-69.355702	3719.252
18	Ciénaga	-26.62839	-69.355687	3719.396
19	Ciénaga	-26.628378	-69.355716	3719.064
20	Ciénaga	-26.628371	-69.355696	3719.067
21	Ciénaga	-26.628361	-69.355679	3719.207
22	Ciénaga	-26.628369	-69.355742	3719.947
23	Ciénaga	-26.62836	-69.355726	3719.806
24	Ciénaga	-26.628353	-69.355707	3719.73
25	Ciénaga	-26.628361	-69.355772	3720.037
26	Ciénaga	-26.628347	-69.355755	3719.704
27	Ciénaga	-26.628343	-69.355737	3719.438
1	El Asiento	-26.490276	-69.324127	3145.87
2	El Asiento	-26.490279	-69.324105	3146.033
3	El Asiento	-26.490284	-69.32409	3146.09
4	El Asiento	-26.490252	-69.324147	3146.602

5	El Asiento	-26.490261	-69.324131	3147.06
6	El Asiento	-26.490263	-69.324111	3147.422
7	El Asiento	-26.490274	-69.324166	3146.604
8	El Asiento	-26.490276	-69.324146	3146.85
9	El Asiento	-26.490279	-69.324129	3146.708
10	El Asiento	-26.490298	-69.32415	3147.829
11	El Asiento	-26.490302	-69.324135	3147.71
12	El Asiento	-26.490305	-69.324115	3147.73
13	El Asiento	-26.490316	-69.324129	3144.772
14	El Asiento	-26.490319	-69.324105	3144.508
15	El Asiento	-26.490321	-69.324085	3144.47
16	El Asiento	-26.4903	-69.324104	3140.659
17	El Asiento	-26.490301	-69.324086	3140.279
18	El Asiento	-26.490307	-69.324068	3140.434
19	El Asiento	-26.490289	-69.324073	3139.44
20	El Asiento	-26.490289	-69.324065	3137.827
21	El Asiento	-26.49029	-69.324052	3137.776
22	El Asiento	-26.490255	-69.324106	3137.777
23	El Asiento	-26.490256	-69.324088	3137.521
24	El Asiento	-26.490254	-69.324074	3137.415
25	El Asiento	-26.490237	-69.324123	3137.6
26	El Asiento	-26.490237	-69.324102	3137.658
27	El Asiento	-26.490236	-69.324083	3137.483
1	El Colorado	-26.573265	-69.318223	3870.575
2	El Colorado	-26.573252	-69.318218	3870.608
3	El Colorado	-26.573232	-69.318214	3870.739
4	El Colorado	-26.57328	-69.318244	3870.368
5	El Colorado	-26.573261	-69.318239	3870.561
6	El Colorado	-26.573245	-69.318236	3870.747
7	El Colorado	-26.573301	-69.318224	3871.263
8	El Colorado	-26.573284	-69.31822	3871.664
9	El Colorado	-26.573268	-69.318218	3871.529
10	El Colorado	-26.573289	-69.318206	3870.505
11	El Colorado	-26.573274	-69.318199	3870.198
12	El Colorado	-26.573261	-69.318195	3869.285
13	El Colorado	-26.57328	-69.31818	3867.963
14	El Colorado	-26.573259	-69.318175	3867.618
15	El Colorado	-26.573243	-69.318171	3867.148
16	El Colorado	-26.573254	-69.318196	3865.774
17	El Colorado	-26.573235	-69.318191	3865.77
18	El Colorado	-26.573219	-69.318188	3865.893
19	El Colorado	-26.573226	-69.318211	3864.815
20	El Colorado	-26.573207	-69.318206	3865.173

21	El Colorado	-26.57319	-69.318203	3864.757
22	El Colorado	-26.573245	-69.318236	3864.812
23	El Colorado	-26.573225	-69.318235	3864.482
24	El Colorado	-26.573208	-69.318231	3864.273
25	El Colorado	-26.573255	-69.318261	3863.959
26	El Colorado	-26.573237	-69.318257	3863.564
27	El Colorado	-26.573222	-69.318255	3863.292
1	La Laguna	-26.214083	-68.982578	3549.133
2	La Laguna	-26.214068	-68.982573	3549.827
3	La Laguna	-26.214055	-68.982569	3549.802
4	La Laguna	-26.214093	-68.982607	3549.695
5	La Laguna	-26.214074	-68.9826	3550.192
6	La Laguna	-26.21406	-68.982598	3549.802
7	La Laguna	-26.214118	-68.982599	3549.214
8	La Laguna	-26.214102	-68.982593	3549.457
9	La Laguna	-26.21409	-68.982588	3549.299
10	La Laguna	-26.214105	-68.982571	3548.183
11	La Laguna	-26.214088	-68.982565	3550.549
12	La Laguna	-26.214077	-68.982561	3550.292
28	La Ola	-26.542274	-69.041077	3670.83
29	La Ola	-26.542289	-69.041086	3670.831
30	La Ola	-26.542305	-69.041096	3670.352
31	La Ola	-26.542268	-69.041052	3670.05
32	La Ola	-26.542282	-69.04106	3669.822
33	La Ola	-26.542298	-69.041065	3669.611
34	La Ola	-26.542244	-69.04106	3669.11
35	La Ola	-26.54226	-69.04107	3668.609
36	La Ola	-26.542273	-69.041076	3668.669
37	La Ola	-26.542253	-69.041087	3669.265
38	La Ola	-26.542269	-69.04109	3669.445
39	La Ola	-26.542286	-69.041099	3669.231
40	La Ola	-26.542261	-69.041114	3669.08
41	La Ola	-26.542273	-69.041124	3668.926
42	La Ola	-26.542291	-69.041132	3668.798
43	La Ola	-26.542289	-69.041118	3669.63
44	La Ola	-26.542301	-69.041129	3669.371
45	La Ola	-26.542318	-69.041136	3669.523
46	La Ola	-26.542324	-69.041112	3669.346
47	La Ola	-26.542337	-69.041118	3669.315
48	La Ola	-26.542347	-69.041124	3669.674
49	La Ola	-26.542307	-69.041082	3669.363
50	La Ola	-26.54232	-69.04109	3669.298
51	La Ola	-26.542336	-69.041096	3669.363

52	La Ola	-26.542295	-69.041046	3669.224
53	La Ola	-26.542307	-69.041053	3669.183
54	La Ola	-26.542321	-69.041061	3669.011
1	Leoncito	-26.533422	-68.990814	3771.354
2	Leoncito	-26.533403	-68.99082	3770.748
3	Leoncito	-26.533389	-68.990823	3771.233
4	Leoncito	-26.533443	-68.99084	3771.148
5	Leoncito	-26.533426	-68.990842	3771.445
6	Leoncito	-26.533411	-68.990845	3771.371
7	Leoncito	-26.533454	-68.990815	3770.731
8	Leoncito	-26.533436	-68.990813	3770.474
9	Leoncito	-26.533418	-68.990814	3770.384
10	Leoncito	-26.533431	-68.9908	3763.779
11	Leoncito	-26.533416	-68.990803	3762.866
12	Leoncito	-26.5334	-68.990806	3762.749
13	Leoncito	-26.533407	-68.990781	3761.057
14	Leoncito	-26.533392	-68.990783	3761.064
15	Leoncito	-26.533379	-68.990784	3761.046
16	Leoncito	-26.533391	-68.9908	3761.035
17	Leoncito	-26.533373	-68.9908	3760.847
18	Leoncito	-26.53336	-68.990804	3760.868
19	Leoncito	-26.533375	-68.990828	3760.114
20	Leoncito	-26.533358	-68.990831	3760.146
21	Leoncito	-26.53334	-68.990832	3760.139
22	Leoncito	-26.533397	-68.990845	3760.475
23	Leoncito	-26.533378	-68.990847	3760.167
24	Leoncito	-26.533365	-68.990851	3760.267
25	Leoncito	-26.533421	-68.990865	3760.132
26	Leoncito	-26.533404	-68.990867	3760.039
27	Leoncito	-26.53339	-68.99087	3760.191
1	Pastos Largos	-26.718736	-69.185889	4040.218
2	Pastos Largos	-26.718716	-69.185895	4039.476
3	Pastos Largos	-26.718697	-69.185902	4039.186
4	Pastos Largos	-26.718754	-69.185907	4038.34
5	Pastos Largos	-26.718738	-69.18591	4038.128
6	Pastos Largos	-26.718725	-69.185917	4037.9
7	Pastos Largos	-26.718762	-69.185875	4036.731

8	Pastos Largos	-26.718751	-69.185885	4036.549
9	Pastos Largos	-26.718737	-69.185892	4036.573
10	Pastos Largos	-26.718742	-69.185864	4035.858
11	Pastos Largos	-26.718726	-69.185867	4035.681
12	Pastos Largos	-26.718707	-69.185873	4035.549
13	Pastos Largos	-26.718716	-69.185851	4035.046
14	Pastos Largos	-26.718699	-69.185853	4035.48
15	Pastos Largos	-26.718682	-69.185863	4035.485
16	Pastos Largos	-26.718704	-69.185877	4035.254
17	Pastos Largos	-26.718684	-69.185879	4035.118
18	Pastos Largos	-26.718672	-69.185885	4035.243
19	Pastos Largos	-26.71869	-69.185901	4035.473
20	Pastos Largos	-26.718672	-69.185904	4035.134
21	Pastos Largos	-26.718656	-69.185909	4035.217
22	Pastos Largos	-26.718713	-69.185918	4034.991
23	Pastos Largos	-26.718697	-69.185922	4034.925
24	Pastos Largos	-26.718681	-69.185927	4035.492
25	Pastos Largos	-26.71874	-69.18593	4035.327
26	Pastos Largos	-26.718723	-69.185934	4035.732
27	Pastos Largos	-26.718709	-69.185942	4035.01
1	Pedernales	-26.311561	-69.236805	3402.848
2	Pedernales	-26.311547	-69.236812	3402.914
3	Pedernales	-26.311534	-69.236819	3403.23
4	Pedernales	-26.311594	-69.236815	3400.475
5	Pedernales	-26.311577	-69.23682	3399.955
6	Pedernales	-26.311564	-69.236829	3399.3

7	Pedernales	-26.311599	-69.236781	3395.261
8	Pedernales	-26.311583	-69.236792	3395.003
9	Pedernales	-26.311568	-69.236798	3394.325
10	Pedernales	-26.311573	-69.236776	3394.941
11	Pedernales	-26.311553	-69.236787	3394.95
12	Pedernales	-26.311541	-69.236796	3394.932
13	Pedernales	-26.311552	-69.236772	3394.551
14	Pedernales	-26.311536	-69.236777	3394.671
15	Pedernales	-26.311523	-69.236787	3394.766
16	Pedernales	-26.31154	-69.236794	3394.893
17	Pedernales	-26.311523	-69.236801	3394.833
18	Pedernales	-26.311508	-69.236808	3394.982
19	Pedernales	-26.311527	-69.23682	3395.124
20	Pedernales	-26.311508	-69.236827	3394.964
21	Pedernales	-26.311492	-69.236834	3394.618
22	Pedernales	-26.311556	-69.236834	3394.637
23	Pedernales	-26.311538	-69.236842	3394.74
24	Pedernales	-26.311523	-69.23685	3394.754
25	Pedernales	-26.311573	-69.236845	3395.218
26	Pedernales	-26.311558	-69.236851	3395.339
27	Pedernales	-26.311541	-69.236857	3395.655
28	Pedernales	-26.319221	-69.230658	3397.953
29	Pedernales	-26.319205	-69.230662	3398.27
30	Pedernales	-26.319187	-69.230665	3398.018
31	Pedernales	-26.319242	-69.230678	3397.71
32	Pedernales	-26.319227	-69.230679	3397.943
33	Pedernales	-26.319212	-69.230682	3397.643
34	Pedernales	-26.319263	-69.230653	3397.209
35	Pedernales	-26.31925	-69.230653	3397.271
36	Pedernales	-26.31923	-69.230658	3397.113
37	Pedernales	-26.319242	-69.230633	3396.888
38	Pedernales	-26.319226	-69.230636	3397.045
39	Pedernales	-26.319208	-69.23064	3396.882
40	Pedernales	-26.319222	-69.23061	3397.485
41	Pedernales	-26.319206	-69.230615	3396.819
42	Pedernales	-26.319189	-69.230616	3396.833
43	Pedernales	-26.319205	-69.230639	3397.013
44	Pedernales	-26.31919	-69.230639	3397.136
45	Pedernales	-26.319171	-69.230641	3397.028
46	Pedernales	-26.319186	-69.230664	3396.689
47	Pedernales	-26.319168	-69.230667	3396.705
48	Pedernales	-26.31915	-69.23067	3396.621
49	Pedernales	-26.319206	-69.230685	3396.858

50	Pedernales	-26.319188	-69.230687	3396.811
51	Pedernales	-26.319171	-69.23069	3396.663
52	Pedernales	-26.319226	-69.230697	3397.201
53	Pedernales	-26.319208	-69.230697	3397.061
54	Pedernales	-26.31919	-69.230698	3397.219
55	Pedernales	-26.325032	-69.231217	3407.667
56	Pedernales	-26.325045	-69.231219	3407.796
57	Pedernales	-26.325062	-69.231222	3407.873
58	Pedernales	-26.32502	-69.231193	3405.241
59	Pedernales	-26.325034	-69.231196	3404.573
60	Pedernales	-26.32505	-69.231195	3403.965
61	Pedernales	-26.324999	-69.231209	3399.587
62	Pedernales	-26.325015	-69.231215	3399.736
63	Pedernales	-26.325031	-69.231215	3399.425
64	Pedernales	-26.325014	-69.231233	3397.623
65	Pedernales	-26.32503	-69.231233	3397.394
66	Pedernales	-26.325045	-69.231236	3397.224
67	Pedernales	-26.325022	-69.231258	3397.38
68	Pedernales	-26.325042	-69.231261	3397.187
69	Pedernales	-26.325058	-69.231264	3397.215
70	Pedernales	-26.325047	-69.231239	3396.896
71	Pedernales	-26.32507	-69.231243	3397.177
72	Pedernales	-26.325085	-69.231245	3397.343
73	Pedernales	-26.325073	-69.231224	3397.313
74	Pedernales	-26.325089	-69.231227	3397.329
75	Pedernales	-26.325106	-69.231227	3397.199
76	Pedernales	-26.32506	-69.231197	3397.74
77	Pedernales	-26.325076	-69.231202	3397.644
78	Pedernales	-26.325096	-69.231205	3397.674
79	Pedernales	-26.325052	-69.231173	3397.718
80	Pedernales	-26.325064	-69.231179	3397.735
81	Pedernales	-26.325083	-69.231186	3397.83
82	Pedernales	-26.536387	-69.046188	3675.619
83	Pedernales	-26.536371	-69.046184	3675.742
84	Pedernales	-26.536357	-69.046182	3675.548
1	Piedra Parada	-26.320196	-68.792568	4171.368
2	Piedra Parada	-26.320205	-68.792554	4171.749
3	Piedra Parada	-26.320215	-68.792537	4171.713
4	Piedra Parada	-26.320171	-68.792577	4171.931

5	Piedra Parada	-26.320181	-68.792566	4172.221
6	Piedra Parada	-26.320191	-68.792545	4172.159
7	Piedra Parada	-26.320177	-68.792597	4170.544
8	Piedra Parada	-26.320189	-68.792583	4171.069
9	Piedra Parada	-26.320196	-68.79257	4171.15
10	Piedra Parada	-26.320205	-68.792593	4170.977
11	Piedra Parada	-26.320215	-68.792576	4170.629
12	Piedra Parada	-26.320227	-68.792564	4170.502
13	Piedra Parada	-26.320228	-68.79259	4170.246
14	Piedra Parada	-26.320239	-68.792569	4170.155
15	Piedra Parada	-26.320251	-68.792555	4170.195
16	Piedra Parada	-26.320228	-68.792557	4170.857
17	Piedra Parada	-26.320236	-68.792542	4170.554
18	Piedra Parada	-26.320248	-68.792527	4170.617
19	Piedra Parada	-26.320222	-68.792528	4171.493
20	Piedra Parada	-26.320236	-68.792512	4171.653
21	Piedra Parada	-26.32024	-68.792497	4171.879
22	Piedra Parada	-26.320194	-68.792535	4170.711
23	Piedra Parada	-26.3202	-68.792522	4170.394
24	Piedra Parada	-26.320209	-68.792507	4170.87
27	Piedra Parada	-26.320184	-68.792499	4169.354
25	Piedra Parada	-26.32018	-68.79253	4170.903
26	Piedra Parada	-26.320188	-68.792516	4171.028
1	Rio Negro	-26.78849	-68.932443	4282.004

2	Rio Negro	-26.788507	-68.932446	4282.235
3	Rio Negro	-26.788524	-68.932447	4282.071
4	Rio Negro	-26.788469	-68.932423	4281.278
5	Rio Negro	-26.788489	-68.932426	4281.542
6	Rio Negro	-26.788504	-68.932424	4281.964
7	Rio Negro	-26.788451	-68.932441	4281.415
8	Rio Negro	-26.788466	-68.932443	4281.511
9	Rio Negro	-26.788481	-68.932442	4281.284
10	Rio Negro	-26.788468	-68.932461	4282.05
11	Rio Negro	-26.78849	-68.932458	4281.962
12	Rio Negro	-26.788504	-68.93246	4281.775
13	Rio Negro	-26.788487	-68.932484	4282.364
14	Rio Negro	-26.788506	-68.932485	4282.631
15	Rio Negro	-26.788523	-68.932481	4282.813
16	Rio Negro	-26.78851	-68.932466	4282.482
17	Rio Negro	-26.788527	-68.932466	4282.577
18	Rio Negro	-26.788545	-68.932462	4282.461
19	Rio Negro	-26.788528	-68.932445	4281.962
20	Rio Negro	-26.788544	-68.932444	4282.081
21	Rio Negro	-26.78856	-68.93244	4282.331
22	Rio Negro	-26.788511	-68.932421	4280.983
23	Rio Negro	-26.788528	-68.932422	4281.573
24	Rio Negro	-26.788542	-68.932421	4282.161
25	Rio Negro	-26.788499	-68.932399	4280.768
26	Rio Negro	-26.788519	-68.932402	4280.865
27	Rio Negro	-26.788533	-68.932402	4280.965
1	Tinajas	-26.576954	-69.270703	3922.125
2	Tinajas	-26.576944	-69.270686	3921.987
3	Tinajas	-26.576933	-69.270673	3922.3
4	Tinajas	-26.576953	-69.27073	3922.267
5	Tinajas	-26.576944	-69.270715	3922.101
6	Tinajas	-26.576932	-69.270703	3922.005
7	Tinajas	-26.576973	-69.270731	3924.062
8	Tinajas	-26.576964	-69.270717	3923.667
9	Tinajas	-26.576954	-69.270705	3923.459
10	Tinajas	-26.576982	-69.270703	3923.826
11	Tinajas	-26.576971	-69.270691	3923.224
12	Tinajas	-26.576962	-69.270683	3922.616
13	Tinajas	-26.576983	-69.270671	3922.722
14	Tinajas	-26.576972	-69.270655	3922.656
15	Tinajas	-26.576964	-69.270648	3922.328
16	Tinajas	-26.576954	-69.270665	3922.97
17	Tinajas	-26.576943	-69.270649	3922.52

18	Tinajas	-26.576932	-69.270636	3922.457
19	Tinajas	-26.576935	-69.270661	3922.906
20	Tinajas	-26.576926	-69.27065	3922.801
21	Tinajas	-26.576913	-69.27064	3922.24
22	Tinajas	-26.576919	-69.270633	3922.28
23	Tinajas	-26.576919	-69.270633	3922.28
24	Tinajas	-26.576919	-69.270633	3922.28
25	Tinajas	-26.576919	-69.270633	3922.28
26	Tinajas	-26.576919	-69.270633	3922.28
27	Tinajas	-26.576919	-69.270633	3922.28
1	Tordillo	-26.591445	-69.214839	3969.548
2	Tordillo	-26.591438	-69.214826	3968.685
3	Tordillo	-26.591428	-69.214813	3967.761
4	Tordillo	-26.591437	-69.214875	3968.553
5	Tordillo	-26.591432	-69.214861	3967.947
6	Tordillo	-26.591424	-69.214845	3967.266
7	Tordillo	-26.591463	-69.214882	3966.992
8	Tordillo	-26.591459	-69.214863	3967.083
9	Tordillo	-26.591446	-69.214853	3966.928
10	Tordillo	-26.591471	-69.214857	3967.041
11	Tordillo	-26.591462	-69.214841	3966.76
12	Tordillo	-26.591456	-69.214824	3966.537
13	Tordillo	-26.591472	-69.214829	3967.908
14	Tordillo	-26.591464	-69.214813	3967.523
15	Tordillo	-26.591458	-69.214794	3966.607
16	Tordillo	-26.591449	-69.214818	3967.072
17	Tordillo	-26.591443	-69.2148	3966.548
18	Tordillo	-26.591436	-69.214786	3965.832
19	Tordillo	-26.591423	-69.214809	3964.736
20	Tordillo	-26.591417	-69.214789	3964.162
21	Tordillo	-26.591409	-69.214773	3964.024
22	Tordillo	-26.591418	-69.214834	3963.496
23	Tordillo	-26.591408	-69.214822	3964.353
24	Tordillo	-26.591401	-69.214806	3963.855
25	Tordillo	-26.591409	-69.214872	3965.082
26	Tordillo	-26.591404	-69.214851	3965.289
27	Tordillo	-26.591394	-69.214833	3964.688
1	Vertiente 2	-26.83261	-68.932692	4353.888
2	Vertiente 2	-26.832603	-68.932672	4353.792
3	Vertiente 2	-26.832607	-68.932655	4354.226
4	Vertiente 2	-26.832586	-68.932717	4353.509
5	Vertiente 2	-26.832586	-68.932696	4353.491
6	Vertiente 2	-26.832585	-68.932679	4353.488

7	Vertiente 2	-26.832612	-68.932732	4352.695
8	Vertiente 2	-26.83261	-68.932717	4352.478
9	Vertiente 2	-26.832613	-68.9327	4352.242
10	Vertiente 2	-26.832629	-68.932712	4352.929
11	Vertiente 2	-26.832625	-68.932691	4353.176
12	Vertiente 2	-26.832624	-68.932668	4353.508
13	Vertiente 2	-26.832641	-68.932685	4353.212
14	Vertiente 2	-26.832643	-68.93266	4353.493
15	Vertiente 2	-26.832642	-68.932648	4353.781
16	Vertiente 2	-26.832631	-68.932669	4352.408
17	Vertiente 2	-26.832626	-68.93265	4352.862
18	Vertiente 2	-26.832625	-68.932633	4352.936
19	Vertiente 2	-26.832608	-68.93265	4352.516
20	Vertiente 2	-26.832607	-68.932629	4352.905
21	Vertiente 2	-26.832606	-68.932615	4352.883
22	Vertiente 2	-26.832588	-68.932666	4352.744
23	Vertiente 2	-26.832587	-68.932647	4352.508
24	Vertiente 2	-26.832587	-68.932628	4352.653
25	Vertiente 2	-26.832568	-68.932686	4352.582
26	Vertiente 2	-26.832568	-68.932668	4352.75
27	Vertiente 2	-26.832567	-68.932651	4352.919

Reporte de Validación Imágenes satelitales SPOT 6-7

PREPARADO PARA
SMI ICE Chile

ELABORADO POR
AGRO SPACE SPA

Enero 2026



AgroSpace



SMI ICE Chile

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I. Resumen ejecutivo.....	3
1. Métodos.....	3
a. Datos in situ.....	3
b. Convolución espectral de medidas hiperespectrales.....	4
c. Comparación punto–píxel y métricas de validación.....	6
2. Resultados y Discusión.....	7
3. Conclusión.....	10
II. Referencias Bibliográficas.....	11

I. Resumen ejecutivo

El presente informe evalúa la calidad radiométrica de las reflectancias de superficie derivadas de imágenes SPOT en ambientes altoandinos de la Región de Atacama, mediante la comparación directa con mediciones hiperspectrales obtenidas en terreno. Para ello, se utilizaron firmas espectrales representativas de distintos tipos de superficie, las cuales fueron convolucionadas a las bandas multispectrales de SPOT y comparadas con la información satelital adquirida en las mismas ubicaciones. Los resultados muestran una alta coherencia en las bandas visibles (Blue, Green y Red), con buena correspondencia entre la señal satelital y la medida in-situ, lo que evidencia la estabilidad del procesamiento radiométrico y la capacidad del sensor para reproducir adecuadamente superficies homogéneas dominadas por vegetación continua. La mayor dispersión se observó en la banda NIR, donde las diferencias entre terreno y satélite se explican por la heterogeneidad espacial de ciertos sitios, caracterizados por mezclas de vegetación discontinua, suelo desnudo y costras salinas. Estas variaciones son inherentes a las condiciones biofísicas locales y no reflejan un sesgo sistemático del sensor. En conjunto, los resultados validan el uso de SPOT como una fuente confiable de reflectancia en estudios ecológicos y de monitoreo ambiental en zonas altoandinas, destacando su robustez en el visible y la necesidad de considerar la variabilidad superficial al interpretar la señal NIR en áreas mixtas.

1. Métodos

La validación se realizó siguiendo las recomendaciones del *CEOS Land Product Validation Subgroup* para productos de reflectancia y albedo superficial, particularmente las directrices del *Global Surface Albedo Product Validation Best Practices Protocol* (Wang et al., 2026), adaptadas al caso de reflectancias de alta resolución (SPOT 6/7). El procedimiento consiste en un enfoque **point-to-pixel**, donde mediciones hiperspectrales in-situ se comparan directamente con la reflectancia satelital corregida.

a. Datos in situ

Las mediciones in-situ utilizadas en esta validación provienen del informe técnico de terreno realizado en los días 15-19 de diciembre de 2025 (Carrasco & Mattar, 2026), donde se aplicó un diseño de muestreo estandarizado para todos los sitios evaluados. En cada ubicación se instaló una grilla de medición compuesta por nueve celdas de 3×3 m, abarcando un área total de 81 m². Esta superficie corresponde funcionalmente a una *Elementary Sampling Unit* (ESU) bajo la

definición establecida por CEOS, es decir, una unidad espacial dentro de la cual la reflectancia puede considerarse representativa del píxel satelital comparable.

En cada celda de la grilla se adquirieron tres mediciones hiperespectrales independientes, totalizando 27 mediciones por sitio. Todas fueron georreferenciadas mediante GNSS RTK, asegurando precisión submétrica en la ubicación de cada punto. Las firmas espectrales se registraron entre los 350 y 850 nm y dentro del intervalo horario de 11:00 a 15:00 h, siguiendo las recomendaciones de medición en condiciones de iluminación estable descritas en el informe de terreno.

Para cada uno de los sitios se obtuvo una firma representativa a partir del promedio espectral de las 27 mediciones, y se calculó además la desviación estándar intra-ESU. Este valor resume la heterogeneidad superficial presente dentro de la grilla y constituye, de acuerdo con las guías de CEOS, un indicador relevante para interpretar la variabilidad esperable en la comparación punto-píxel.

En conjunto, este procedimiento asegura una correspondencia espacial adecuada entre los datos hiperespectrales de campo y la resolución multiespectral de SPOT *pansharpened* (1,5 m GSD), permitiendo que cada ESU represente de forma consistente el footprint efectivo necesario para validaciones de sensores ópticos de alta resolución.

b. Convolución espectral de medidas hiperespectrales

Para asegurar la comparabilidad espectral entre las mediciones hiperespectrales de terreno y las reflectancias obtenidas desde SPOT corregidas atmosféricamente (AgroSpace, 2026), cada firma in-situ fue convolucionada (Durán-Alarcón et al, 2014; Ecuación 1) utilizando las *Spectral Response Functions* (SRF) oficiales de SPOT-6/7 (Tabla 1, Figura 1).

$$\rho_{spot} = \frac{\int R(\lambda)SRF(\lambda)d\lambda}{\int SRF(\lambda)d\lambda}$$

Ecuación 1

Donde ρ_{spot} corresponde a la reflectancia multiespectral de spot, $R(\lambda)$ corresponde a la reflectancia hiperespectral medida en terreno, y $SRF(\lambda)$ representa la respuesta espectral normalizada del sensor para la banda específica.

La aplicación de esta convolución es un requisito metodológico en validaciones CEOS, ya que evita sesgos derivados de la distinta resolución espectral entre los instrumentos de campo y los

sensores satelitales, y permite comparar ambas mediciones dentro del mismo marco espectral operativo.

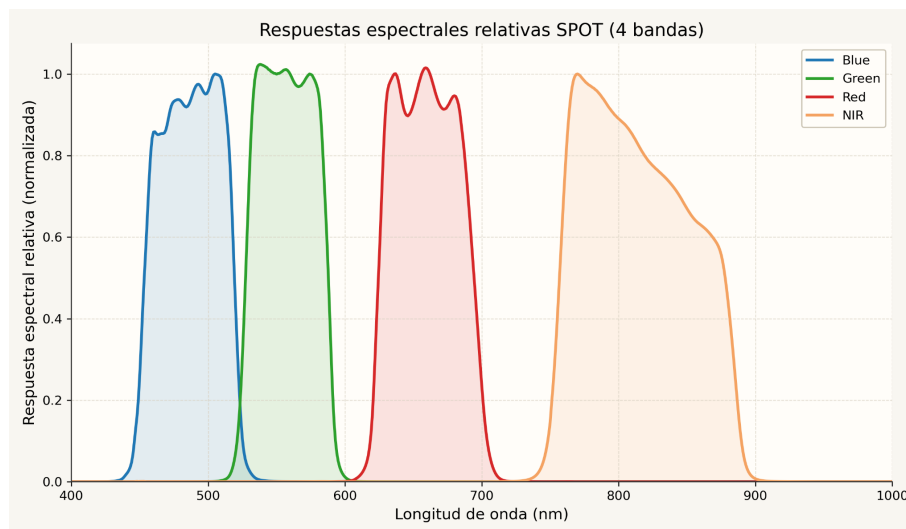


Figura 1. Respuesta espectral relativa de las bandas de SPOT 6.

Estas funciones de respuesta describen la sensibilidad espectral efectiva de cada banda multispectral del sensor y permiten transformar un espectro continuo en una reflectancia equivalente al comportamiento real del instrumento. Los rangos espectrales utilizados para cada banda (Blue, Green, Red y NIR) se presentan en la tabla correspondiente.

Tabla 1. Características de las bandas de SPOT 6 y 7

Banda	Denominación	Rango espectral (μm)	Resolución espacial (GSD)
Pan	Pancromática	0,450 - 0,745	1,5m
B0	Azul	0,450 - 0,520	6,0m
B1	Verde	0,530 - 0,590	6,0m
B2	Roja	0,625 - 0,695	6,0m
B3	NIR (Infrarrojo cercano)	0,76 - 0,89	6,0m

c. Comparación punto-píxel y métricas de validación

La comparación entre las mediciones de terreno y los valores satelitales se realizó mediante un enfoque *point-to-pixel*. Estas mediciones se compararon con el mosaico SPOT-6 generado a partir de dos adquisiciones del 8 de diciembre de 2025 (14:03-14:14 hora local) siguiendo las recomendaciones del protocolo CEOS para la validación de productos de reflectancia (capítulos 2.4 y 5.3.3) , y las directrices metodológicas descritas por *de los Reyes et al. (2026)* en el marco de los estándares CHIME. CHIME corresponde a la Copernicus Hyperspectral Imaging Mission, una misión de referencia para validación espectral terrestre, que establece la necesidad de cuantificar la representatividad espacial del muestreo de campo y de reportar estadísticas intra-ESU para comparaciones radiométricas con sensores remotos de alta resolución.

En cada sitio, la posición geográfica del ESU obtenida mediante GNSS RTK se utilizó para identificar el píxel correspondiente en la imagen SPOT. A partir de dicho píxel se extrajo la reflectancia superficial corregida, la cual se comparó directamente con las reflectancias in-situ previamente convolucionadas a las funciones de respuesta espectral de SPOT. Para cada ESU se calculó tanto el valor promedio como la desviación estándar de las mediciones hiperespectrales, siguiendo lo recomendado por CHIME y CEOS para caracterizar la heterogeneidad superficial y garantizar que la comparación punto-píxel sea representativa del área observada por el sensor.

La calidad del ajuste entre ambas fuentes de información se evaluó mediante las métricas propuestas por CEOS: el coeficiente de determinación (R^2) como indicador de consistencia entre terreno y satélite (Ecuación 2), el sesgo (Bias) definido como la diferencia media entre SPOT e in-situ como métrica principal de exactitud radiométrica (Ecuación 3), y la desviación estándar de las diferencias como descriptor de la dispersión y de la variabilidad interna del ESU (Ecuación 4) y el error cuadrático medio (RMSE; Ecuación 5). Además, se emplearon gráficos de regresión con línea 1:1, tal como sugiere CEOS, para identificar patrones sistemáticos o errores dependientes de la magnitud de la reflectancia.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad bias = \frac{\sum_{i=0}^n \hat{y}_i - y_i}{n} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-1}}$$

Ecuación 2

Ecuación 3

Ecuación 4

$$RMSE = \sqrt{bias^2 + \sigma^2}$$

Ecuación 5

Estas métricas se calcularon de forma independiente para cada banda multispectral (Blue, Green, Red y NIR)

2. Resultados y Discusión

La comparación entre las firmas hiperespectrales medidas en terreno y las reflectancias provenientes de SPOT muestra patrones claros y coherentes con las condiciones superficiales observadas durante la campaña. En la **Figura 2** se aprecia que los sitios dominados por vegetación continua, como Pastos Largos, Tinaja-Trojita, Río Negro y El Asiento, presentan curvas bien definidas con un incremento pronunciado en el NIR, acompañado de desviaciones estándar estrechas. Esta homogeneidad espectral se refleja luego en la validación satelital: en la **Figura 3**, estos sitios se agrupan cercanos a la línea 1:1 en las bandas visibles y con una dispersión reducida, manteniendo valores de R^2 superiores a 0.83 en Blue, Green y Red, con RMSE entre 0.057 y 0.072. Estos umbrales se encuentran dentro de los rangos de error aceptables por el CEOS CAL/VAL (de Los Reyes et al., 2026; Liang et al., 2001)

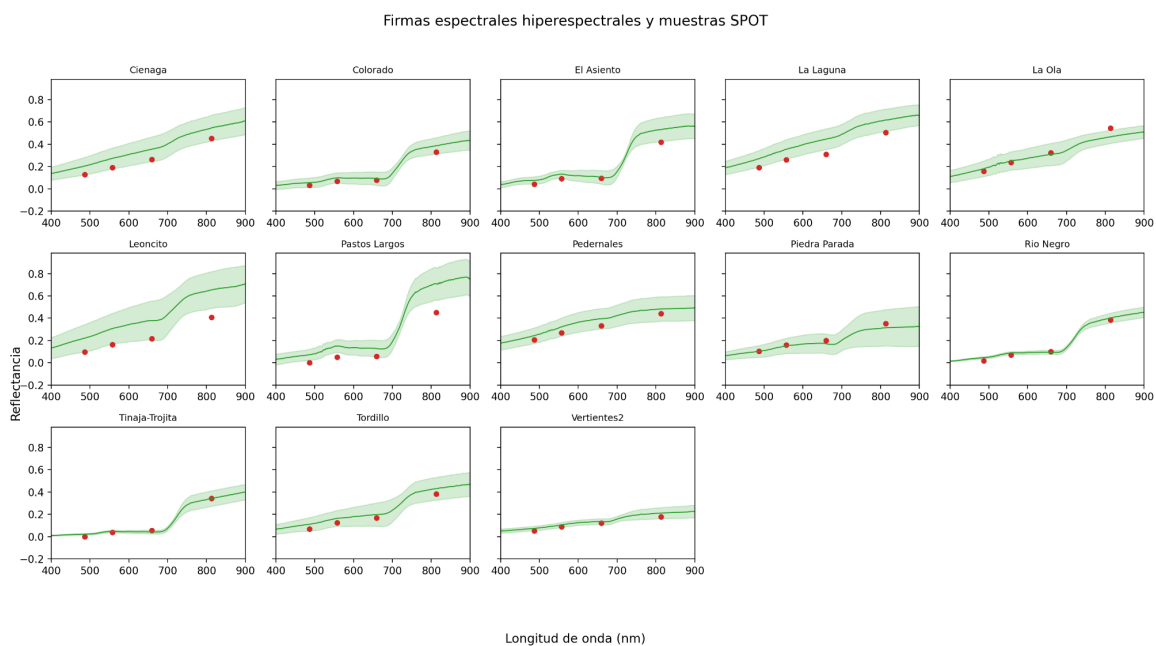


Figura 2. Valores de reflectancia hiperespectral promedio para cada sitio y su desviación estándar. Los puntos corresponden al valor promedio de la reflectividad para cada longitud de onda de la imagen SPOT 6 del 8 de Diciembre del 2025 para cada sitio.

Validacion SPOT: hiperespectral convolucionada vs SPOT

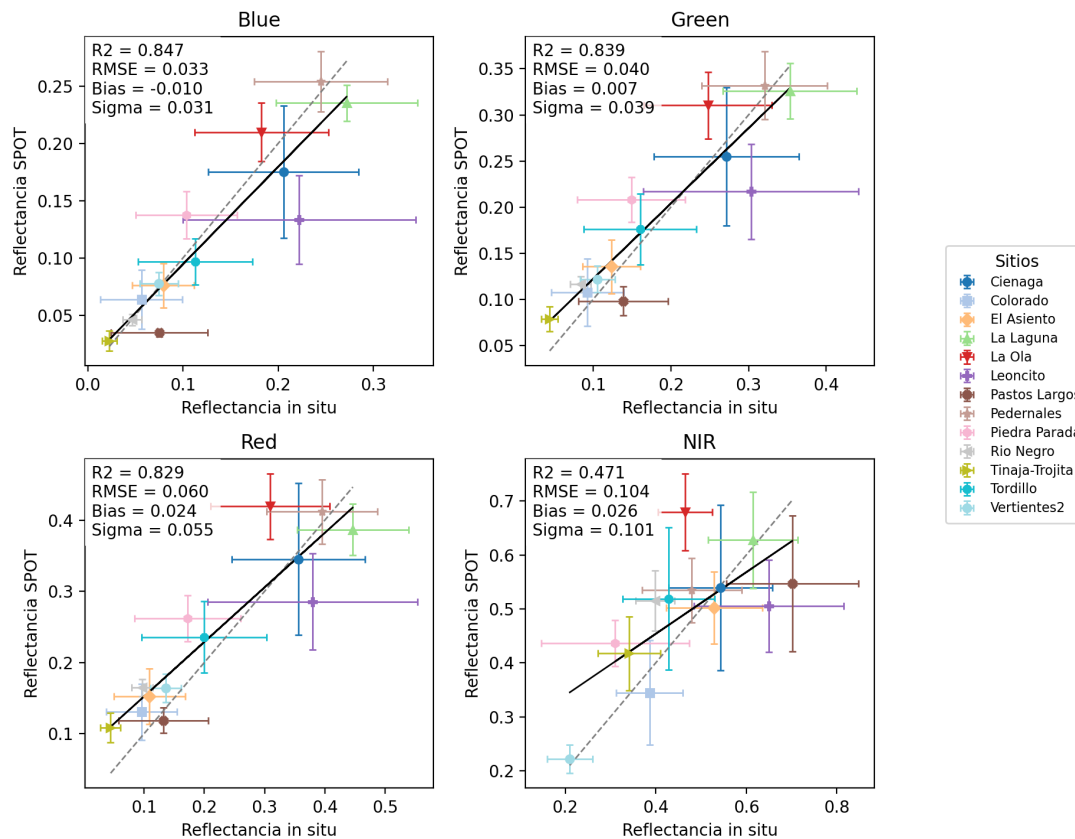


Figura 3. Validación de productos satelitales spot vs medidas in situ para cada banda y sitio medido.

En contraste, sitios catalogados en el informe de terreno como heterogéneos o mixtos como por ejemplo Leoncito, Piedra Parada, Pedernales, Colorado y Tordillo, muestran en la Figura 2 espectros más suavizados, con ausencia de un salto marcado hacia el NIR y con bandas de desviación estándar considerablemente más amplias. Esto responde a la mezcla de parches de vegetación, suelo desnudo, zonas húmedas y costras salinas descritas en la campaña, lo que genera variación espacial significativa incluso dentro de un área pequeña. Esa heterogeneidad se traslada directamente al desempeño de la validación: en la Figura 3, estos sitios exhiben barras de error extensas y una mayor separación respecto a la línea 1:1, especialmente en la banda NIR, donde el coeficiente de determinación baja a 0.54 y el RMSE aumenta a 0.114.

La explicación física de esta diferencia radica en la sensibilidad del NIR a la estructura vegetal y a la continuidad del dosel. En los sitios homogéneos, la vegetación verde y relativamente densa proporciona una señal fuerte y estable; en cambio, en los sitios mixtos la señal NIR se ve modulada por la proporción de vegetación y suelo expuesto, que cambia abruptamente entre puntos de la misma cuadrícula. Esto significa que un único valor satelital integrando vegetación,

suelo y sales no siempre coincide con el promedio espectral medido en terreno, lo que se observa como puntos desviados en los gráficos de validación.

En sectores dominados por suelos minerales o costras salinas, como partes del Salar de Pedernales y de La Laguna se registran curvas espectrales planas y de baja reflectancia (Figura 2), sin el incremento característico en el NIR. Esta baja señal amplifica el impacto relativo de cualquier discrepancia entre mediciones, lo que explica por qué algunos puntos presentan desviaciones que exceden la variabilidad observada en terreno. Del mismo modo, en sitios como Leoncito o Piedra Parada, donde se documentaron transiciones abruptas entre vegetación húmeda, parches secos y áreas de suelo claro, los puntos en la Figura 3 muestran dispersión y barras horizontales más extensas, reflejando la variabilidad registrada en las firmas in-situ.

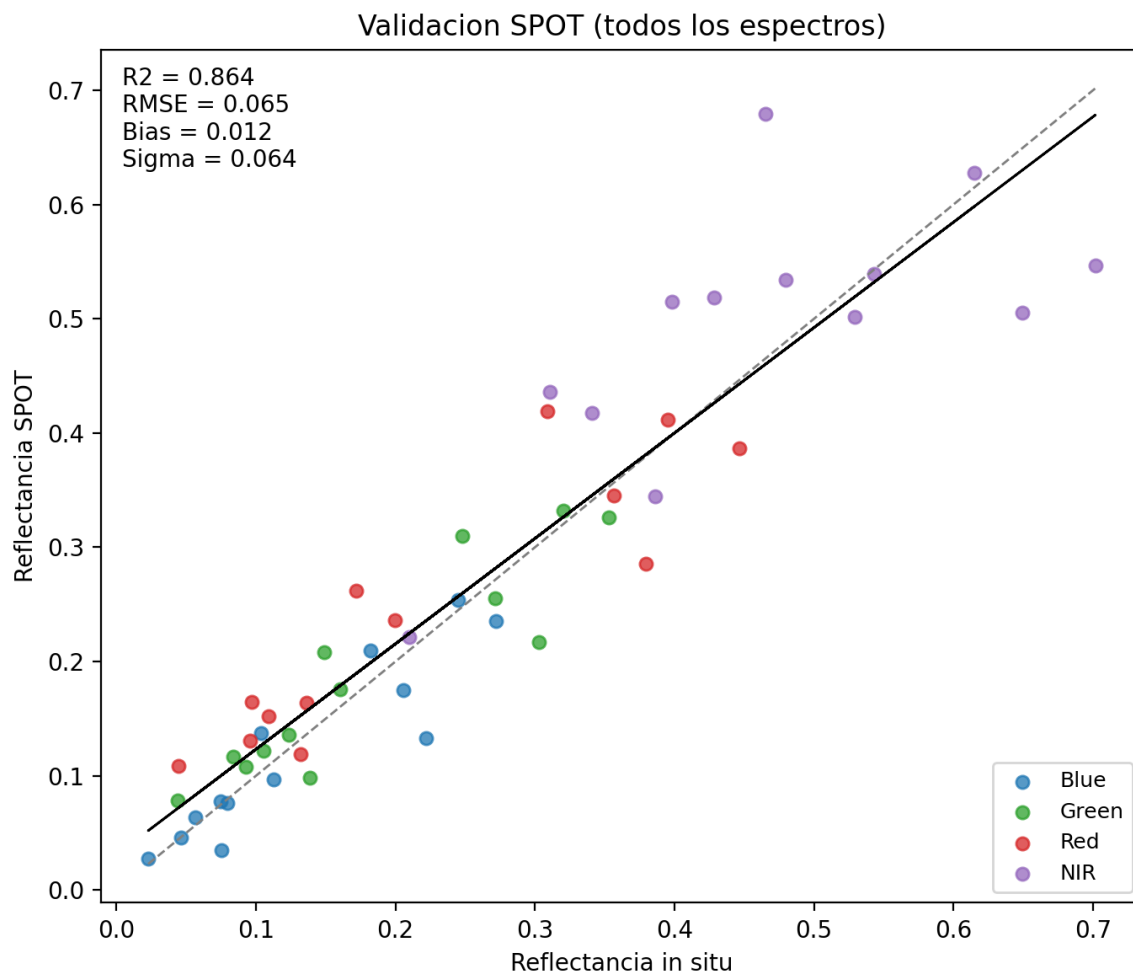


Figura 3. Validación generalizada de productos satelitales SPOT.

En este contexto, resulta especialmente relevante el desempeño del modelo generalizado (Figura 3), el cual integra simultáneamente todos los sitios y bandas espectrales. A pesar de

incluir superficies altamente heterogéneas y condiciones espectrales contrastantes, el modelo mantiene una relación robusta entre reflectancia satelital y mediciones in situ, con un coeficiente de determinación global de $R^2 = 0.864$, un RMSE de 0.065 y un sesgo reducido (Bias = 0.012). Estos resultados indican que el modelo es capaz de capturar de manera consistente la señal dominante del sistema superficie-atmósfera, amortiguando el efecto de la variabilidad sub-píxel y de la mezcla espectral presente en los sitios más complejos. En términos prácticos, esto demuestra que el enfoque adoptado no solo es válido en condiciones ideales u homogéneas, sino que presenta capacidad de generalización y estabilidad frente a escenarios reales de alta complejidad superficial, lo que refuerza su aplicabilidad operativa para análisis regionales y productos de monitoreo satelital.

En síntesis, los resultados indican que SPOT reproduce adecuadamente la reflectancia de superficies homogéneas, especialmente en las bandas visibles donde la respuesta espectral es menos sensible a la estructura del dosel. Las discrepancias más grandes se concentran en la banda NIR y corresponden directamente a sitios donde las firmas espectrales presentan mayor variabilidad interna. Esto confirma que las diferencias observadas en la validación responden a la naturaleza heterogénea de los sitios y no a un error sistemático del sensor ni del proceso de convolución espectral.

3. Conclusión

La validación realizada demuestra que las reflectancias de superficie derivadas de SPOT presentan un comportamiento consistente con las mediciones hiperespectrales obtenidas en terreno, especialmente en las bandas visibles, donde los valores altos de R^2 y los bajos RMSE reflejan una reproducción adecuada de la magnitud y forma espectral observada in-situ. Las discrepancias más pronunciadas se concentraron en la banda NIR y se explican por la heterogeneidad superficial registrada en los sitios mixtos o dominados por suelo desnudo y costras salinas, cuyos espectros muestran variaciones abruptas y un incremento NIR débil o ausente. Esta variabilidad intrínseca a las condiciones locales, evidente en las firmas espectrales del terreno, generan desviaciones que incrementan los errores sistemáticos del sensor debido principalmente a la combinación de componentes dentro del píxel satelital. En conjunto, los resultados confirman que SPOT ofrece reflectancias estables y confiables para el monitoreo de ecosistemas altoandinos (RMSE < 6,5%), con un desempeño particularmente robusto en el rango visible y una dispersión en NIR coherente con la complejidad biofísica de los sitios evaluados.

II. Referencias Bibliográficas

AgroSpace SPA. (2026). Documentación: Módulo de Corrección Atmosférica y Fusión Pan-Sharpeneo para SPOT 6–7. Informe técnico preparado para SMI-ICE Chile.

Carrasco, V., & Mattar, C. (2025). Caracterización espectral de superficies altoandinas mediante mediciones de terreno. Informe técnico. AgroSpace SPA / SMI-ICE Chile.

de los Reyes, R., Langheinrich, M., Schwind, P., Guerrero, C., Lamquin, N., Louis, J., Meiller, C., Milioti, E., Moletto, I., Somlai-Schweiger, I., Werfeli, M., Zimmermann, A. M., De Vis, P., Franch, B., Gege, P., Hueni, A., Ingram, D. M., Agrimano, L., De Pasquale, V., Novelli, A., Celesti, M., & Boccia, V. (2026). CHIME atmospheric correction for surface and water remote sensing products. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2026)*, Washington, D.C., USA, 9–14 August 2026.

Durán-Alarcón, C., Santamaría-Artigas, A., Valenzuela, N., & Mattar, C. (2014). RSR Calculator, una herramienta para el proceso de Calibración/Validación. *Revista de Teledetección*, (42), 111–118.

Liang, Shunlin, et al. "Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. II. Validation and applications." *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40.12 (2002): 2736–2746.

Wang, Z., Schaaf, C., Lattanzio, A., Carrer, D., Grant, I., Román, M., ... & Nickeson, J. (2019). Global surface Albedo product validation best practices protocol. Version 1.0. *Good Practices for Satellite-Derived Land Product Validation*, 45.