

Primera aplicación de imágenes Fasat-Charlie al estudio de praderas semi-áridas de Chile

A. Santamaría-Artigas¹, C. Mattar¹, C. Durán-Alarcón¹, L. Olivera¹,
M. Inzunza², D. Tapia² y E. Escobar-Lavín²

¹ Laboratorio para el Análisis de la Biósfera (LAB). Dpto. de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile. Av. Santa Rosa 11315, La Pintana. Santiago, Chile

² Grupo de Operaciones Espaciales. Fuerza Aérea de Chile. Volcán Osorno s/n. El Bosque, Santiago, Chile

Resumen

La Región semi-árida de Chile ha cobrado una gran relevancia durante las últimas décadas debido al aumento de la desertificación, ocurrencia de eventos extremos climáticos y decreciente volumen de precipitación. Esta situación condiciona a dicha región para convertirse en una zona de relevante interés científico en el estudio y análisis de los recientes fenómenos climáticos y su relación la cobertura de la superficie. En este contexto, las nuevas tecnologías satelitales que dispone Chile, podrían ayudar hacia una entrega constante de información actualizada de esta zona. El Sistema Satelital para Observación de la Tierra (SSOT/Fasat-C) a cargo de la Fuerza Aérea de Chile (FACH) es el primer sensor multiespectral lanzado por Chile en diciembre de 2011 que presenta una resolución espacial de 5.8 metros para las bandas azul (455-520 nm), verde (528-588 nm), rojo (625-695 nm) e infrarrojo cercano (758-881 nm), y una resolución espacial de 1.45 metros para la banda pancromática (455-744 nm). Entre sus principales objetivos se encuentra la detección y monitoreo de cambios en el territorio chileno, con el fin de generar las bases para un sistema de respuesta en el caso de eventos extremos, así como permitir el estudio de series temporales de las superficies naturales afectadas por el cambio climático.

En el presente trabajo se realizó una calibración radiométrica y posterior corrección atmosférica de una escena Fasat-Charlie. A partir de los valores de reflectancia de superficie, se calcularon diferentes curvas espectrales para coberturas de vegetación, suelo desnudo (del orden Aridisol) y concreto, siendo este último representativo de los materiales urbanos presentes en la zona. Estos comportamientos espectrales fueron comparados con información proporcionada por la Aster Spectral Library (ASL), encontrando un comportamiento similar. Luego se estimaron cuatro índices de vegetación: Cociente, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), LAI (Leaf Area Index) y MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index). Los índices de vegetación estimados entregaron magnitudes bajas que podrían explicarse por la heterogeneidad espacial de la vegetación presente en el área de estudio. En este caso, el índice MSAVI fue el que representó de mejor manera la característica dispersa de la vegetación. Estos resultados muestran el potencial del Fasat-C para ser utilizado como una herramienta útil en el monitoreo, estudio y análisis de las coberturas de la superficie terrestre sometidas a constantes cambios de carácter global.

Palabras clave: Fasat-C, Región-Semiárida, índices de vegetación, Chile.

* Autor para la correspondencia: andres.santamaria.artigas@gmail.com
Recibido: 11-11-13; Aceptado: 29-11-13.

Abstract

First application of FASAT-Charlie Imagery for the assessment of semiarid prairies in Chile

The semi-arid region of Chile has gained great relevance in the recent decades mainly due to the constant desertification process it's suffering, the increase of climatic extreme events occurrence and the decrease in the precipitation volume. This scenario makes the region a zone of great scientific relevance to the scientific community for the study and analysis of recent climatic events and their relationship with the land cover change process. In this context, satellite technologies now available to Chile could help towards a consistent delivery of updated information from this area. The Satellite System for Earth Observation (SSOT/Fasat-C) controlled by the Chilean Air Force (FACH) carries on board the multispectral sensor NAOMI-1 which has a spatial resolution of 5.8 meters for the blue (455-520 nm), green (528-588 nm), red (625-695 nm) and near infrared (758-881 nm) bands, and a spatial resolution of 1.45 meters for the panchromatic band (455-744 nm). Among its main objectives are land use change detection and monitoring in the Chilean territory, in order to create the basis for a response system in the case of extreme events, and to allow time series study of natural surfaces affected by climate change.

In this paper the radiometric calibration and atmospheric correction of a Fasat-Charlie scene was carried out. Spectral signatures of vegetation, bare soil (Aridisol) and concrete were obtained from surface reflectance values. The spectral behavior was then compared with information from the Aster Spectral Library (ASL), and a similar behavior was found. Then, four vegetation indexes were calculated, those are: Simple Ratio (SR), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), LAI (Leaf Area Index) and MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index). The estimated vegetation indexes showed low magnitudes, which could be explained by the scarce characteristics of the vegetation. The MSAVI index showed to be the one that best represented this scarce distribution of the vegetation. These results show the potential that the Fasat-Charlie has as a tool for the monitoring, study and analysis of land covers affected by constant global changes.

Key words: Fasat-C, Semi-arid region, vegetation index, Chile.

Introducción

La región semi-árida de Chile es una zona clave para el estudio de un futuro escenario de cambio climático. En esta zona se desarrolla ampliamente la agricultura, la que se ha visto fuertemente beneficiada por la construcción de reservas de agua artificial, sin embargo, son los montos de precipitaciones los que definen la posibilidad de un desarrollo agrícola real en la zona. En efecto, la magnitud de los fenómenos climáticos que han ocurrido en la última década (*i.e.* ENSO) tienen influencia directa en los montos de precipitaciones y por ende, podrían ser gravitantes para los procesos de cambio climático que podría afrontar esta región (Meza, 2013).

Diversos trabajos se han desarrollado con el objetivo de estudiar una serie de aspectos de la zona semi-árida de Chile tales como la: demanda hídrica, paleoclimatología, flujo de energía de la superficie, variación espacial de la ve-

getación productiva (Squeo *et al.*, 2006; Meza, 2013; Maldonado y Villagrán, 2006; flujo de energía de la superficie; Kalthoff *et al.*, 2006; Squeo *et al.* 2008). Sin embargo, una relación que todavía no ha sido estudiada en profundidad es la existente entre la demanda hídrica y la cobertura natural de la superficie. Ciertos trabajos a escala global abordan los cambios espacio-temporales de la vegetación en zonas áridas y semi-áridas de Chile (Sobrino *et al.*, 2006; Julien *et al.*, 2011), pero todavía no existe un real análisis de los posibles cambios en las coberturas de la superficie de la región en las últimas década. Para llevar a cabo el análisis espacio-temporal es necesario un monitoreo continuo de las diversas superficies, tales como: cuerpos de agua, cultivos y vegetación semi-árida, esta última de especial vulnerabilidad ecosistémica debido a que ha sido sometida a un excesivo pastoreo (e.g. debido a producción caprina) y a la extracción de leña (Perez *et al.*, 2012). El monitoreo de estas zonas semi-áridas

(i.e. predominantemente praderas), praderas semi-áridas es clave para el desarrollo y sustento en la región semi-árida de Chile, la que podría ver alterada su acción de reservorio de carbono debido a los usos antrópicos y de esta manera intensificar los efectos del cambio climático en esta zona (Frank, 2002).

En este contexto, nuevas tecnologías satelitales para el continuo monitoreo remoto de diferentes coberturas naturales se presentan como una alternativa para un estudio constante de los parámetros ligados a las coberturas de la superficie. Este es el caso del Fasat-Charlie, el primer satélite chileno de observación de la tierra que posee un gran utilidad para el monitoreo de los recursos naturales (SAF, 2013). A partir de estas imágenes, los usuarios han comenzado a generar requerimientos de información y procesamiento con el objetivo de utilizar la información entregada por este sensor. El objetivo de esta nota técnica, es presentar la utilidad de las imágenes del satélite chileno Fasat-C en el monitoreo las zonas naturales sensibles de Chile, tanto para el estudio de los recursos naturales como para el análisis de los efectos de fenómenos ambientales en la región semi-árida de este país. Esta nota técnica, se divide en las siguientes secciones: La sección 2 presenta las características principales del sensor Naomi-1. La sección 3 describe el área de estudio correspondiente a un sector de la región semi-árida de Chile. En la sección 4, se muestra un protocolo simple de calibración radiométrica, corrección atmosférica y comparación con espectros de librería. La sección 5 muestra diversas aplicaciones para el estudio de la cobertura mediante imágenes Fasat-C y finalmente, la sección 6 presenta algunas conclusiones y comentarios futuros.

Sensor Naomi-1

El satélite Fasat-Charlie fue lanzado el 16 de diciembre de 2011, convirtiéndose en la primera misión satelital exitosa de la Fuerza Aérea Chilena (FACH). Entre los principales objetivos de la misión se encuentra la detección y cuantificación de cambios en el territorio chileno, con el fin de generar las bases de un sistema de respuesta en el caso de eventos extremos como te-

rremotos o erupciones volcánicas y para permitir el estudio de series temporales de las superficies naturales afectadas por el cambio climático.

El Fasat-Charlie es el primer satélite de alta resolución espacial operado por la fuerza aérea chilena (FACH). A bordo del Fasat-C se encuentra el sensor NAOMI-1 (New AstroSat Optical Modular Instrument), el cual registra la información de la superficie terrestre desde una órbita de 620km en una resolución radiométrica de 10 bits para las bandas azul (455-520 nm), verde (528-588 nm), rojo (625-695 nm), infrarrojo cercano (758-881 nm) y pancromática (455-744 nm). La resolución espacial del sensor es de 5.8 m para las bandas multiespectrales y de 1.45 m para la banda pancromática. Las características temporales del sensor corresponden a un tiempo de revisita de entre 3 a 5 días para un ángulo de observación de hasta 30°, y de 37 días para una visión desde el nadir. Mas antecedentes del Fasat-C pueden consultarse en Mattar *et al.* (2013).

Area de estudio: Región semi-árida de Chile

Para una aplicación de las funcionalidades de los productos Fasat-Charlie, se seleccionó un sitio experimental ubicado en la región semi-árida de Chile. Esta área de estudio corresponde al sitio experimental «Las Cardas» de la Universidad de Chile, ubicado en la región de Coquimbo, Chile (30°15' S; 71°17' W), a 45 km al sur de La Serena en la depresión central entre las planicies costeras y la Cordillera de los Andes. El clima es del tipo Mediterráneo con alta influencia marina (i.e. menos de 20 km desde el Océano Pacífico). La precipitación promedio es inferior a los 140 mm anuales y se concentra entre junio y septiembre. La temperatura anual varía entre los 26° en enero (verano) y 5°C en julio (invierno). El tipo de vegetación dominante es arbustiva de estructura abierta no-saturada (1,2 m), y los suelos son del tipo Aridisol derivados de depósitos graníticos aluviales, con texturas franco-arenosos en la superficie del horizonte y franco-arcillosos en las capas profundas (Perez *et al.*, 2012). La Figura 1 muestra el área de estudio en la escena Fasat-C utilizada.

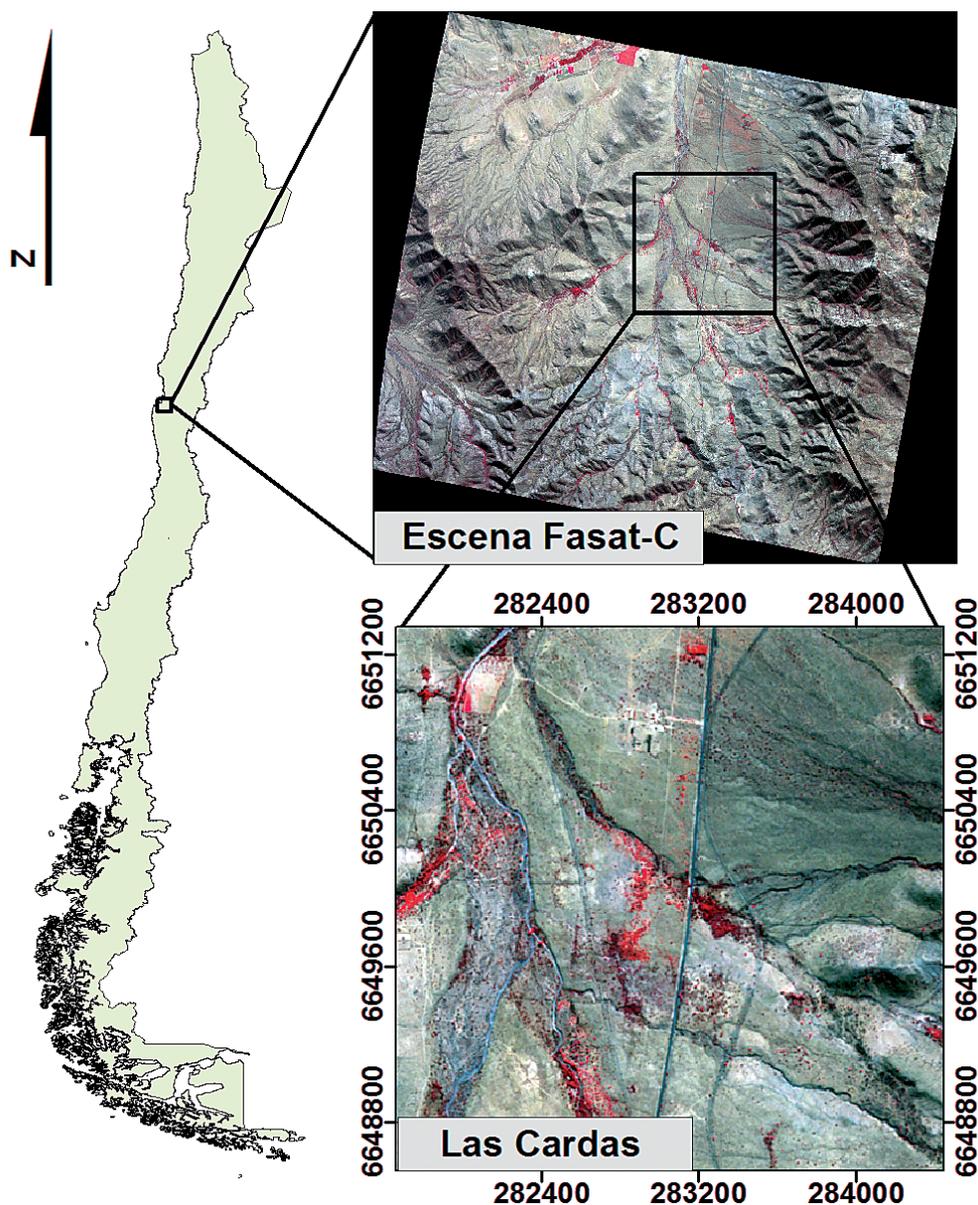


Figura 1. Area de estudio en falso color convencional.

Calibración radiométrica, corrección atmosférica y caracterización espectral del Fasat-C

Con el objetivo de utilizar magnitudes físicas como reflectancia de la superficie e índices de vegetación, los valores en niveles digitales (ND) de la imagen FASAT-Charlie adquirida el 4 de mayo del 2013 fueron transformados en valores de radiancia aparente pa-

ra cada una de las bandas espectrales utilizando la ecuación [1]:

$$L_{\lambda} = ND_{\lambda} \cdot (Gain_{\lambda})^{-1} + Offset \quad [1]$$

donde λ es la banda espectral del Fasat-Charlie; L_{λ} es la radiancia aparente registrada por el sensor ($W m^{-2} \mu m^{-1} str^{-1}$); ND_{λ} es el nivel digital de cada banda (0-1024); $Gain$ es el factor de conversión entregado por los coeficientes 0.9338110; 1.0134981; 1.2136321 y 1.5855519 para las bandas azul, verde, rojo e infrarrojo cercano respectivamente. El offset se conside-

Tabla 1. Condiciones de Observación de la escena Fasat-C

Condición Gométrica	Valor
Ángulo de Observación	26.44°
Ángulo de Azimutal de la Plataforma	100.67°
Ángulo Azimutal Solar	33.36°
Ángulo de Elevación Solar	37.44°

ró igual a cero (SAF 2013, Reporte técnico Fasat-C). Una vez convertidos los valores en niveles digitales a radiancia aparente, la reflectancia en el tope de la atmósfera se puede derivar utilizando [2]:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{sun_{\lambda}} \cdot \cos(\theta)} \quad [2]$$

Donde ρ_{λ} es la reflectancia espectral en el tope de la atmósfera; d es la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas (1.00831 para el 4 de mayo de 2013), π es una constante igual a 3.1415927, θ es el ángulo de cenit solar dado por el tiempo de adquisición de la imagen y $E_{sun_{\lambda}}$ ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$) es la irradiancia solar espectral media en el tope de la atmósfera propuesta por Thuillier *et al.* (2003).

La información de observación para la escena trabajada se entrega en la Tabla 1.

Productos MODIS

Debido a la falta de medición de las características atmosféricas en el lugar durante la hora de paso del Fasat-Charlie, se utilizaron productos atmosféricos del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para caracterizar las condiciones atmosféricas del momento en el que fue obtenida la escena. Los productos atmosféricos de MODIS han sido utilizados en otras publicaciones científicas con resultados confiables (Gillingham y Shepard, 2004; Norjamäki y Tokola, 2007; Jiménez-Muñoz *et al.*, 2010; Jiménez-Muñoz *et al.*, 2013b). Para este trabajo, se utilizó el producto de perfil atmosférico MOD04_L2 (Kaufman y Tanré, 1998) para estimar el espesor óptico a 550 nm en una resolución espacial de 10×10 km; la concentración de ozono se obtuvo del producto MOD07 (Gao y Kaufman, 1998) en una resolución de

Tabla 2. Caracterización Atmosférica para la captura de la escena Fasat-C (04/05/2013)

Condición Atmosférica	Valor
Concentración de Vapor de Agua (g/cm^2)	0.63
Concentración de Ozono (cm-atm)	0.307
Modelo de Aerosoles	Continental
Espesor Óptico en los 550 nm	0.0

5×5 km; finalmente, la concentración de vapor de agua se obtuvo a partir del producto MOD05 (Seeman *et al.*, 2002) en una resolución espacial de 1×1 km.

Corrección Atmosférica

Para estimar los valores de reflectancia in situ desde los valores medidos por el sensor, se utilizó el código de transferencia radiativa 6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*) desarrollado por Vermote *et al.* (1997). Los parámetros atmosféricos usados como entrada para el modelo 6S se presentan en la Tabla 2.

El modelo 6S ha sido ampliamente utilizado para la corrección atmosférica de imágenes remotas pues su implementación es práctica, rápida y eficiente. Diversos estudios han aplicado este método para corregir información de muy alta (Franch *et al.*, 2013), alta (Martin *et al.*, 2012), media (Jimenez-Muñoz *et al.*, 2010) y baja (Vermote, 1997) resolución espacial.

Aplicaciones del Fasat-C a la región semi-árida de Chile

Comparación con librerías Espectrales

La caracterización espectral de diferentes coberturas fue analizada mediante la comparación de diversos valores espectrales obtenidos desde las imágenes Fasat-Charlie, con valores obtenidos de la Aster Spectral Library (Baldrige *et al.*, 2009). Esta librería presenta una robusta serie de espectros de la superficie que permiten una comparación con ciertos elementos de la superficie detectados por sensores remotos. Para este caso, se seleccionaron

Tabla 3. Índices de vegetación aplicados a la escena Fasat-C

Índice	Fórmula	Referencia
Cociente (C)	$C = \frac{\rho_{IRC}}{\rho_{Rojo}}$	Pearson y Miller, 1972
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{Rojo}}{\rho_{IRC} + \rho_{Rojo}}$	Rouse, Haas, Schell, Deering y Harlan, 1974
Índice de Área Foliar (LAI)	$LAI = -0.397 + 2.268 * NDVI$	Fan <i>et al.</i> 2009
Índice de Vegetación Modificado Ajustado al Suelo (MSAVI)	$MSAVI = \frac{2\rho_{IRC} + 1 - \sqrt{(2\rho_{IRC} + 1)^2 - 8(\rho_{IRC} - \rho_{Rojo})}}{2}$	Qi, Chehbouni, Huete, Kerr y Sorooshian, 1994

las coberturas de «Vegetación Arbórea», «Aridisol» el cual es el orden de suelo más común en el área de estudio y «Concreto». Las firmas fueron posteriormente convolucionadas numéricamente a partir de la función de respuesta espectral relativa del sensor para cada banda Fasat-C. Para esto se utilizó el software gratis RSR Calculator® desarrollado por Durán-Alarcón *et al.* (2013).

Índices de Vegetación

Los índices de vegetación obtenidos a partir de datos remotos son una de las principales fuentes de información para el monitoreo de la cubierta vegetal sobre la superficie de la tierra (Gilabert *et al.*, 2002). Uno de los objetivos principales del Fasat-C es la detección y cuantificación de cambios en la superficie terrestre (Mattar *et al.*, 2013a), por lo que la obtención de índices de vegetación a partir de información remota entregada por esta misión es una de las principales aplicaciones a evaluar. La Tabla 3 muestra los índices de vegetación derivados a partir de la información del Fasat-C.

Resultados y análisis

Comparación con espectros

La Figura 2 muestra los espectros de tres zonas clasificadas como vegetación, suelo desnudo y concreto. Para el caso de la vegetación,

existe una diferencia cercana al 30% al comparar la reflectancia de superficie con la reflectancia presente en la librería ASL. Esto se debe principalmente a que la vegetación existente en la zona semi-árida corresponde a arbustos que no presentan una gran cobertura, además de no contar con irrigación artificial. Para el resto de las bandas, la vegetación se comporta muy similar al espectro de referencia presentado por la ASL. Para el caso del suelo desnudo, los espectros correspondientes al orden de suelo Aridisol que presentaron texturas franco-arenosas presentan una diferencia aparente con los derivados del sensor Fasat-C. Esto se debe principalmente a que las muestras presentadas por la ASL no necesariamente calzan con la gran variedad de suelos que existen en la Cordillera de los Andes, más todavía, cuando estos corresponden a composiciones aluviales andesíticas las que no se ven representadas por la librería ASL. Pese a esto, la tendencia positiva de los dos espectros de Aridisol, tanto los presentados por ASL como por el Fasat-C, siguen el mismo patrón, donde el máximo se estimó para la banda azul (cerano al 10%) y el máximo para la banda del infrarrojo cercano (33% y 18% para ASL y Fasat-C respectivamente). Finalmente, para el caso del concreto, es posible apreciar una importante similitud entre los valores entregados por ASL y Fasat-C, existiendo diferencias menores (cercanas al 8%) para la banda infrarroja cercana. No obstante, esta similitud presenta una gran desviación de valores producto de los diferentes materiales que podrían constituir esta su-

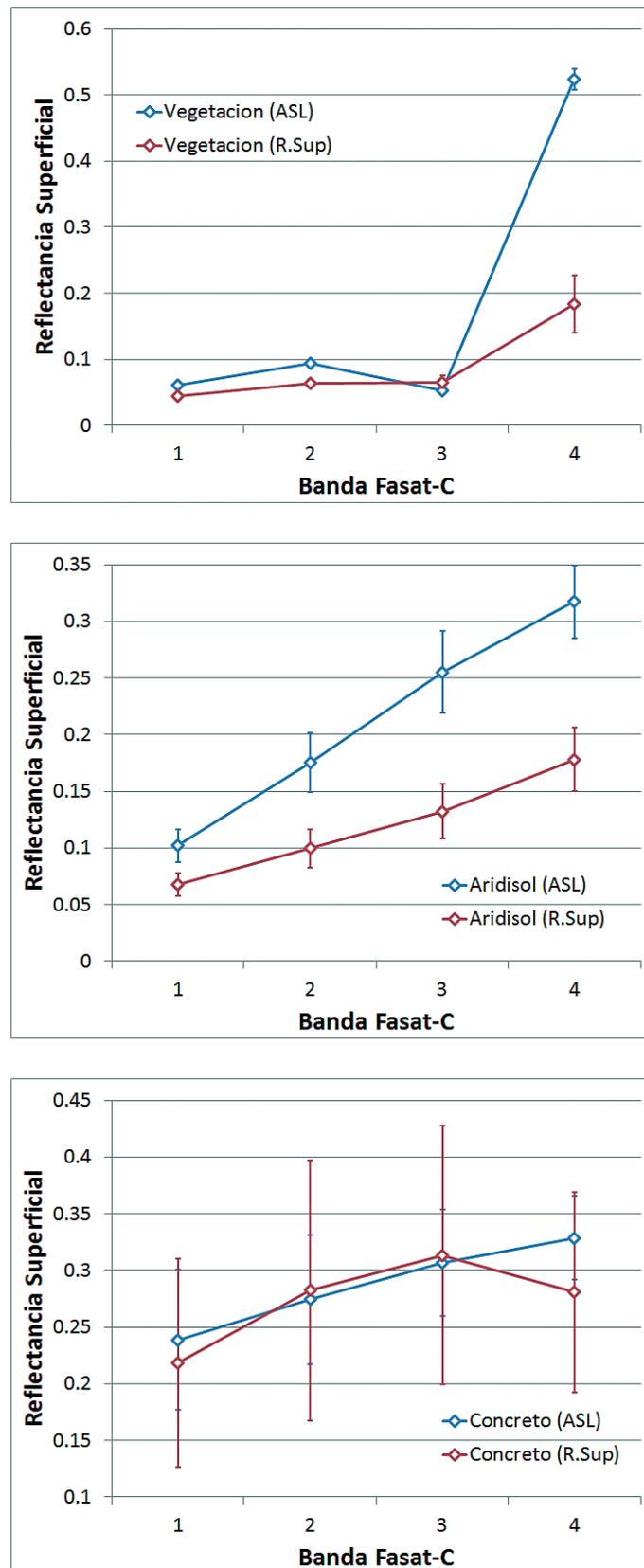


Figura 2. Firma espectral de vegetación (a), suelo (b) y concreto (c).

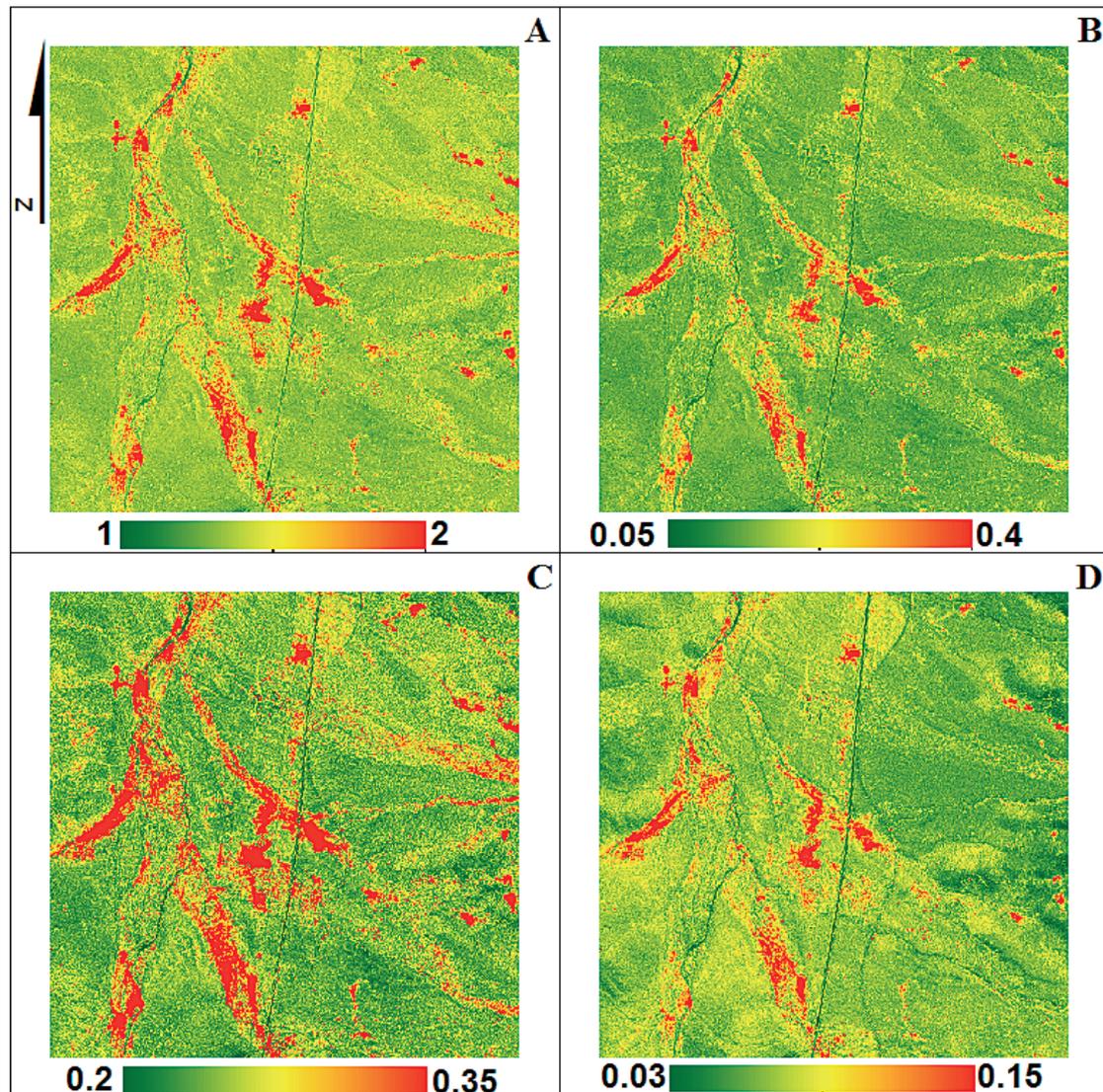


Figura 3. Cociente (A), NDVI (B), LAI (C) y MSAVI (D) calculados para el área de estudio.

perficie y el aparente desgaste. Si bien es cierto, los materiales de construcción como ladrillos, concretos y metales poseen ciertas curvas espectrales de fácil caracterización, su variabilidad en la magnitud espectral resulta una desventaja al momento de clasificarla debido a que estas dependen de la composición del material y el desgaste de estos. En adición a los espectros de material urbanos publicados por la ASL, en la actualidad, existen varias librerías espectrales que abordan el tema de la clasificación de elementos urbanos, tales como Herold *et al.* (2004); Sobrino *et al.* (2012), Small *et al.* (2006); Roberts *et al.* (2012) entre otras. Sin embargo, el alto grado de heterogeneidad es-

pecial y espectral todavía sigue siendo un tema de debate que requiere de especial atención sobre la dimensión espectral para una clasificación y comparación de superficies.

Aplicaciones de Índices de Vegetación

Los índices de vegetación derivados de la información del Fasat-C se presentan en la Figura 3. En general, para todos los índices puede observarse una fuerte diferenciación entre las praderas de vegetación nativa que se encuentran dentro del área de estudio. Al mismo tiempo, es posible identificar que el mayor vi-

gor de la vegetación se localiza en el cauce que cruza el área de estudio. Por otra parte, las áreas de suelo desnudo o materiales urbanos también pueden ser distinguidos en el cálculo de estos índices. Esto genera un potencial uso para las imágenes del Fasat-C sobre el análisis de la dinámica espacial de la cobertura de uso de suelo en la región semi-árida de Chile.

Conclusiones y futuras perspectivas

En esta nota técnica se presenta la primera aplicación de imágenes Fasat-C al estudio de la pradera semi-árida de Chile. Además, se caracterizaron y detallaron los procesos de calibración radiométrica así como una corrección atmosférica a partir de un modelo de transferencia radiativa y productos atmosféricos. Las imágenes Fasat-C son una útil herramienta para el estudio y análisis de cubiertas y procesos que ocurren a pequeña escala, entregando información espectral que permite la elaboración de diversos índices que contribuyen a la profundización en el conocimiento de las áreas sensibles en un futuro escenario de cambio climático. Por otra parte, se hace posible la generación de clasificaciones a escalas pequeñas, las que permiten entre otras cosas facilitar el monitoreo de procesos como el cambio de uso de suelo, desertificación o cambios de la propia cobertura de la superficie (*i.e.* pérdida de vigor de la vegetación). A futuro, se espera que diversos estudios puedan focalizarse en el monitoreo constante de las región semi-árida de Chile a partir del análisis dinámico de las coberturas de esta zona, la cual está en transición entre climas desérticos y mediterráneos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente auspiciado por Programa U-Inicia VID 2012 (4/0612), Beca Santander a jóvenes investigadores, Universidad de Chile, Fondecyt-Iniciación (CONICYT/ref-11130359). Los autores también agradecen al equipo MODIS y NASA por la libre disposición de los productos atmosféricos ([\[mos.gsfc.nasa.gov/\]\(http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/\)\) y las firmas espectrales ASTER \(<http://speclib.jpl.nasa.gov/>\) respectivamente.](http://modis-at-</p>
</div>
<div data-bbox=)

Referencias

- DURÁN-ALARCÓN, C., SANTAMARÍA-ARTIGAS, A., VALENZUELA, N., & MATTAR, C. 2013. RSRcalculator[®]. Software libre para la convolución espectral. Universidad de Chile. Ref. 228209.
- FAN, L., GAO, Y., BRÜCK, H., & BERNHOFER, C. 2009. Investigating the relationship between NDVI and LAI in semiarid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theoretical and Applied Climatology*. Vol 95, 151-156.
- FRANCH, B., VERMOTE, E. F., SOBRINO, J. A., & FÉDÈLE, E. 2013. Analysis of directional effects on atmospheric correction. *Remote Sensing of Environment*, 128, Vol. 1, 276-288.
- FRANK, A. B. 2002. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains. *Environmental Pollution* 116, 397-403.
- GAO, B., & KAUFMAN, Y. 1998. The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm – Algorithm Theoretical Basis Document. MOD05.
- GILABERT, M. A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J., GARCÍA-HARO, F. J., & MELIA, J. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 82, Vol. 1, 303-310.
- GILLINGHAM, S. S., & SHEPHERD, J. D. 2004. Evaluation of Modis for Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Imagery. *Journal of Spatial Science*, 49, Vol. 2, 43-56.
- HEROLD, M., ROBERTS, D., GARDNER, M., & DENNISON, P. 2004. Spectrometry for urban area remote sensing - Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, 91, 304-319.
- HOLBEN, B. N. 1980. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, Vol. 1, 651-656.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SOBRINO, J. A., MATTAR, C., & FRANCH, B. 2010. Atmospheric correction of optical imagery from MODIS and Reanalysis atmospheric products. *Remote Sensing of Environment*, 114, Vol. 1, 2195-2210.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SOBRINO, J. A., MATTAR, C., & HULLEY, G. 2013. Temperature and Emissivity Separation from MSG/SEVIRI data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. (accepted)
- JULIEN, Y., SOBRINO, J. A., & JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.-C. (2011). Land use classification from multitemporal Landsat imagery using the Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method, *Inter-*

- national Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 13 (2011), 711-720.
- KALTHOFF, N., FIEBIG-WITTMACK, M., MEISSNER, C., KOHLER, M., URIARTE, M., BISCHOFF-GAUSS, I., & GONZÁLES, E. 2006. The energy balance, evapotranspiration and nocturnal dew deposition of an arid valley in the Andes. *Journal of Arid Environments*, 65, 420-433.
- KAUFMAN, Y. J., & TANRÉ, D. 1998. Algorithm for Remote sensing of tropospheric Aerosol from MODIS.
- MALDONADO, A., & VILLAGRÉN, C. 2006. Climate variability over the last 9900 cal yr BP from a swamp forest pollen record along the semi arid coast of Chile. *Quaternary Research*, 66, 246-258.
- MARTIN, J., EUGENIO, F., MARCELLO, J., MEDINA, A., BERMEJO, J. A., & ARBELO, M. 2012. Atmospheric correction models for high resolution WorldView-2 multispectral imagery: A case study in Canary Islands, Spain. Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XVII; and Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VIII. Proceedings of the SPIE, 8534, 10 pp
- MATTAR, C., HERNÁNDEZ, J., SANTAMARÍA-ARTIGAS, A., DURAN-ALARCÓN, C., OLIVERA-GUERRA, L., INZUNZA, M., TAPIA, D., & ESCOBAR-LAVÍN. 2013. A first in-flight absolute calibration of the Chilean Earth Observation Satellite. *ISPRS Photogrammetry and Remote Sensing Journal* (Accepted).
- MEZA, F. 2013. Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climates Extremes*, 1, 51-58.
- NORJAMÄKI, I., & TOKOLA, T. 2007. Comparison of Atmospheric Correction Methods in Mapping Timber Volume with Multitemporal Landsat Images in Kainuu, Finland. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73, Vol. 2, 155-163.
- PEREZ-QUEZADA, J. F., BOWN, H. E., FUENTES, J. P., ALFARO, F. A., & FRANCK, N. 2012. Effects of afforestation on soil respiration in an arid shrubland in Chile. *Journal of Arid Environments*, 83, 45-53.
- ROBERTS, D., QUATTROCHI, D., HULLEY, G., HOOK, S., & GREEN, R. 2012. Synergies between VSWIR and TIR data for the urban environment: An evaluation of the potential for the Hyperspectral Infrared Imager (HypIRI) Decadal Survey mission. *Remote Sensing of Environment*, 117, 83-101.
- SAF (Servicio Aéreo Fotogramétrico de Chile). 2013. Reporte técnico Fasat-C (SSOT). Disponible en: http://www.saf.cl/images/Material%20PDF/FASAT-C_Specifications_v1.3.pdf
- SEEMANN, S. W., BORBAS, E. E., LI, J., MENZEL, W. P., & GUMLEY, L.E. 2002. Modis Atmospheric Profile Retrieval Algorithm Theoretical Basis Document. MOD07.
- SMALL, CH. 2006. Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 104 (2), 168-189.
- SOBRINO, J. A., JULIEN, Y., & MORALES, L. (2006). Multitemporal analysis of PAL images for the study of land cover dynamics in *South America, Global and Planetary Change*, 51 (2006) 172-180
- SOBRINO, J. A., OLTRA-CARRIÓ, R., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., JULIEN, Y., SORIA, G., FRANCH, B., & MATTAR, C. 2012. Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 141-147.
- SOUDANI, K., C. FRANCOIS, G. MAIRE, V LE DANTEC, & DUFRÉNE, E. 2006. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sens. Environ.* 102:161-175.
- SQUEO, F. A., ARAVENA, R., AGUIRRE, E., POLLASTRI, A., JORQUERA, C. B., & EHLE-RINGER, J. R. 2006. Ground dynamics in a coastal aquifer in north-central Chile: Implications for groundwater recharge in an arid ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 67, 240-254.
- SQUEO, F. A., TRACOL, Y., LÓPEZ, D., LEÓN, M., & GUITÉRREZ, J. R. 2008. Vegetación nativa y variación temporal de su productividad en la Provincia de Elqui. Vulnerabilidad y cambio del clima. CEPEDA PJ (ed): 168-191 (2008). Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- HUILLIER, G., HERSE, M., LABS, S., FOUJOLS, T, PEETERMANS, W., GILLOTAY, D., SIMON, P. C. & MANDEL, H. 2003. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by SOLSPEC spectrometer from the ATLAS 123 and EURECA missions. *Solar Physics*, 214, Vol. 1, 1-22.
- VERMOTE, E., TANRÉ, D., DEUZÉ, J. L., HERMAN, M., & MORCRETTE, J. J. 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in Solar Spectrum: An overview. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing*, 35, Vol. 1, 675-686.