

Estimación de Parámetros Biofísicos de la Vegetación en Praderas y Cultivos en Chile mediante Fotografía Digital Hemisférica obtenidas por una cámara GoPro

Uribe, D.*¹, Mattar, C.², Camacho, F.³

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

² Laboratorio de Geociencias (GEOLAB), Universidad de Aysén, Obispo Vielmo 62, Coyhaique, Chile.

³ EOLAB, C/ Catedrático Agustín Escardino, 9, 46980 Paterna, Valencia, España.

Resumen: La estimación de los parámetros biofísicos de la vegetación como el LAI (*Leaf Area Index*), FAPAR (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) y FCOVER (*Fraction of Green Vegetation*) tienen una gran cantidad de aplicaciones climáticas, hidrológicas, ecosistémicas y en sistemas silvoagropecuarios. A pesar de los diversos productos satelitales que estiman estos parámetros de forma continua y global, es necesario seguir generando estimaciones *in situ* para validar estos datos remotos. Es en este escenario en donde la técnica de Fotografía Digital Hemisférica (DHP) destaca por ser una de las más precisas y adaptables para funcionar de forma continua en diversos equipos fotográficos y escenarios de campo. El objetivo de este estudio es estimar el LAI efectivo (LAI_{eff}), LAI verdadero (LAI_{true}), FAPAR y FCOVER a través del método DHP sobre diversas cubiertas agrícolas de Chile, entre los años 2015 y 2016 utilizando la cámara fotográfica GoPro y el software CAN-EYE para procesar las fotografías hemisféricas. Los resultados obtenidos se compararon inicialmente con los suministrados por una cámara CANON EOS 6D montada junto a un lente ojo de pez SIGMA 8mm F3.5-EX DG y posteriormente con productos satelitales proporcionados por el servicio *Copernicus Global Land*, derivado de la misión PROBA-V a 333 m² de resolución espacial. La comparación entre las cámaras CANON y GoPro muestra estimaciones similares y valores de R² sobre 0,72 para todos los parámetros. La comparación con PROBA-V dio lugar a valores sobre 0,52 de R² para los parámetros y estimaciones multitemporales con patrones similares. Se concluye que con la cámara GoPro, es posible generar estimaciones de LAI_{eff} , FAPAR y FCOVER de forma similar a otras cámaras ojos de pez. Respecto a PROBA-V, a excepción de FAPAR, las estimaciones con la GoPro no muestran una alta correlación. En ambas campañas se observaron discrepancias significativas del LAI_{true} lo que se podría relacionar al cálculo del agrupamiento de la canopia de CAN-EYE sobre las características de la propia cámara.

Palabras clave: GoPro, Parámetros Biofísicos de la Vegetación, DHP.

Estimation of Vegetation Biophysical Parameters in Grasslands and Crops in Chile through Hemispheric Digital Photography by a GoPro camera

Abstract: The estimation of the biophysical parameters of vegetation such as LAI (Leaf Area Index), FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) and FCOVER (Fraction of Green Vegetation) have many

To cite this article: Uribe, D., Mattar, C., Camacho, F. 2018. Estimation of Vegetation Biophysical Parameters in Grasslands and Crops in Chile through Hemispheric Digital Photography by a GoPro camera. *Revista de Teledetección*, 52, 1-15. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.9315>

* Corresponding author: diego.uribe@ug.uchile.cl

climatic, hydrologic, ecosystem and silvo-agricultural applications. Despite the various satellite products that estimate these parameters continuously and globally, it is necessary to continue generating *in situ* estimations to validate these remote data. It is in this context where Digital Hemispheric Photography (DHP) technique stands out as being one of the most accurate and adaptable to operate continuously with diverse photographic equipment and field scenarios. The objective of this paper is to estimate effective LAI (LAI_{eff}), true LAI (LAI_{true}), FAPAR and FCOVER through the DHP method on several agricultural land covers in Chile, between the years 2015 and 2016 using a GoPro camera and the CAN-EYE software to process hemispheric photographs. The results obtained were initially compared with those provided by a CANON EOS 6D camera mounted together with a SIGMA 8mm F3.5-EX DG fisheye lens and subsequently with satellite products provided by the Copernicus Global Land service, derived from PROBA-V mission at 333 m² spatial resolution. The comparison between the CANON and GoPro shows similar values and R² over 0,72 for all parameters. The comparison with PROBA-V resulted in values over 0,52 of R² for the parameters, and similar multitemporal patterns. It's concluded that it is possible to estimate LAI_{eff} , FAPAR and FCOVER like other fish eyes cameras. Concerning PROBA-V, except for FAPAR, the estimates with the GoPro do not showing high correlation. In both campaigns significant discrepancies were observed in the LAI_{true} , which could be related to the calculation of CAN-EYE canopy clumping with the characteristics of the camera itself.

Key words: GoPro, Vegetation Biophysical Parameters, DHP.

1. Introducción

Los parámetros biofísicos de la vegetación como el índice de área foliar (*Leaf Area Index*, LAI), definido como la mitad del área total desarrollada de hojas por unidad de área de superficie horizontal (Chen and Black, 1992), la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*, FAPAR) y la fracción de cobertura vegetal (FCOVER) juegan un rol fundamental en el intercambio de agua y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera. Además, dirigen los principales procesos en la cubierta vegetal como la fotosíntesis, respiración y transpiración (Baret et al., 2013; Sellers et al., 1997; Verger et al., 2011). Tanto la FAPAR como el LAI son identificados como Variables Climáticas Esenciales (ECVs) por el *Global Climate Observing System* (GCOS) para el monitoreo a partir de mediciones sistemáticas a largo plazo recolectadas por satélite y redes de observación *in situ* (GCOS, 2011).

Estos tres parámetros son fundamentales para el monitoreo de la vegetación, el ciclo del carbono y el clima, por lo que su estimación tiene una gran cantidad de aplicaciones climáticas, hidrológicas, ecosistémicas y en sistemas silvoagropecuarios (Sellers et al., 1997). En este último, se hacen notorios en modelos de estimación de rendimiento de cultivos y en la producción primaria neta

(Fang et al., 2011; Kross et al., 2015). Ya que son factores críticos para estudios de carácter global hasta predial, es necesario tener diversidad de herramientas y técnicas para generar estimaciones precisas.

Entre las metodologías para estimar el LAI, FAPAR y FCOVER existen aquellas *in situ* y las remotas. Dentro de los métodos *in situ* están los que se basan en técnicas destructivas de cosecha, trampas para medir la caída de hojarasca o en estimaciones alométricas para la medición del LAI; sensores cuánticos para el LAI y FAPAR; o ceptómetros e imágenes digitales hemisféricas (*Digital Hemispherical Photography*, DHP) para medir LAI, FAPAR Y FCOVER. Esta última técnica ha sido ampliamente utilizada en los últimos años (Demarez et al., 2008; Latorre et al., 2016; Martínez et al., 2005a; Mougín et al., 2014; Nestola et al., 2017) debido que su instrumentación es asequible, la captura de imágenes posee un nulo impacto sobre la cubierta vegetal y hoy en día existen softwares que facilitan el procesamiento de las imágenes mediante herramientas de apoyo (Fournier et al., 1996; Gower et al., 1999; Jonckheere et al., 2004). Sin embargo, el problema de estos métodos *in situ* es que necesitan ser obtenidos en campañas de campo y por lo tanto, no poseen suficiente representación espacial cuando se trata de extensas áreas y representatividad temporal debido los altos costos económicos y

operacionales de muestreos multitemporales, limitando el estudio de diversos tipos de biomas a escala global. En complemento, también existen técnicas de teledetección tales como sensores aerotransportados, LiDAR y sensores a bordo de satélites (Zheng and Moskal, 2009). Estos sistemas permiten generar un monitoreo continuo y a diversas escalas de LAI, FAPAR y FCOVER. Actualmente, existen diversas bases de datos a nivel satelital como MODIS (Myneni *et al.*, 2015), CYCLOPES (Baret *et al.*, 2007) y el reciente GEOV3 (Baret and Weiss, 2018) derivado de PROBA-V. Sin embargo, la validación de estos datos sigue siendo crítica y la generación continua y precisa de valores *in situ* es necesaria. Esta necesidad, solo puede ser cumplida mediante la implementación de métodos que faciliten la estimación de parámetros biofísicos, que utilicen equipos masivos, de uso común y que permitan ser utilizados por una diversa gama de usuarios. Ejemplos de estos métodos son la estimación de carotenoides y clorofila mediante la toma de fotografías con la cámara de un smartphone (Rigon *et al.*, 2016) y respecto a los parámetros de la vegetación, las aplicaciones de smartphone *PocketLAI* Smart-App (Confalonieri *et al.*, 2013) y *VitiCanopy* (De Bei *et al.*, 2016) para la estimación de LAI en *Vitis vinifera* a través de la cámara del celular.

El objetivo de este trabajo es validar las estimaciones de los parámetros estructurales de la vegetación como LAI, FAPAR y FCOVER a través de fotografías hemisféricas tomadas mediante una cámara GoPro. Para ello, se realizarán dos comparaciones. La primera, tiene el fin de validar de manera *in situ* las estimaciones obtenidas con la cámara GoPro y la segunda consiste en validar con datos satelitales. Estos dos métodos se distribuyen en dos campañas entre los años 2015 y 2016 realizadas en predios agrícolas. La estructura del siguiente trabajo se detalla a continuación. En la sección 2 se detalla el área de estudio y los datos utilizados, en la sección 3 se presentan el método de calibración y validación de las imágenes digitales. La sección 4 muestra los resultados de las dos campañas de campo y en la sección 5 y 6 se presenta la discusión y principales conclusiones de este trabajo.

2. Área de estudio y datos

La primera campaña de campo se efectuó durante los días 19 y 20 de enero del 2015 por parte de investigadores del Laboratorio de Observación de la Tierra (EOLAB; www.eolab.es) e investigadores del Laboratorio para el Análisis de la Biosfera de la Universidad de Chile (LAB; <http://biosfera.uchile.cl>) en la zona de Chimbarongo dentro de la Región de O'Higgins (latitud 34,7081° S, longitud 70,9948° O). La segunda campaña fue realizada mensualmente desde abril del 2015 hasta septiembre del 2016 únicamente por investigadores del LAB bajo el marco del proyecto Conicyt - Fondecyt Iniciación 11130359 "*Estimating the Surface soil moisture at regional scale by using a synergic optical-passive microwave approach and remote sensing data*" en distintas parcelas de pastoreo en la región de Los Lagos (latitud 41,4716° S, longitud 72,9366° O). Ambas áreas de estudio se pueden observar en la Figura 1.

El área de Chimbarongo, debido a su carácter agrícola presenta una alta heterogeneidad de coberturas de suelo, lo que la hace una atractiva zona de estudio, en donde ya se han realizado evaluaciones de métodos evapotranspiración real y de partición (Olivera-Guerra *et al.*, 2014, 2015) y validación de productos de vegetación derivados a partir de imágenes satelitales (Latorre *et al.*, 2016).

La región de los Lagos destaca por la producción ganadera basada en praderas que ocupan un 71% de la superficie total de la región (INE, 2001). Los puntos utilizados para las mediciones de pasturas presentan suelos de tipo trumaos y ñadis (Casanova *et al.*, 2013). El clima de esta zona es predominantemente templado lluvioso con precipitaciones anuales de entre 1800 y 2100 mm y una temperatura promedio anual cercana a 11°C (Sarricolea *et al.*, 2017).

2.1. Productos *in situ* IMAGINES (FP7)

La localidad de Chimbarongo fue seleccionada como parte del Proyecto FP7 ImagineS (<http://fp7-imagines.eu/>) para apoyar la prestación de un conjunto de datos de campo para la validación de los productos de *Copernicus Global Land products*. Entre los logros de esta campaña, estuvo la recolección de datos de

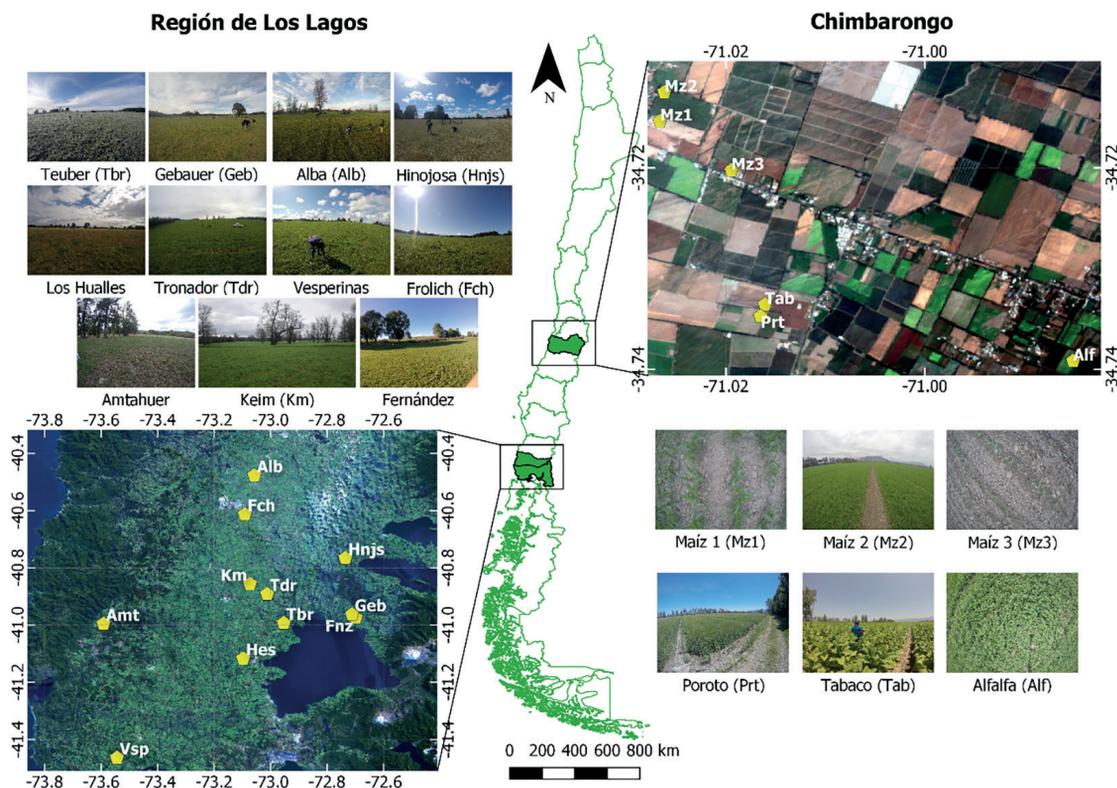


Figura 1. Izquierda: Región de los Lagos con 11 praderas de estudio. Derecha: Área de Chimbarongo con 5 cultivos de estudio.

LAI, FAPAR y FCOVER de distintos cultivos a través de la técnica de imágenes digitales hemisféricas, y el escalado de estos datos para la generación de mapas verdad-terreno a través de técnicas de regresión multivariada por mínimos cuadrados (Latorre *et al.*, 2016), utilizando datos del satélite chileno Fasat-C de 5,8 m de resolución espacial multispectral con 3 bandas en el visible, una banda en el infrarrojo cercano y una frecuencia de paso de 3 a 5 días (Mattar *et al.*, 2014). Los datos de campo y los mapas obtenidos están accesibles *on-line* (<http://fp7-imagines.eu>). Para validar los datos de LAI, FAPAR y FCOVER obtenidos con la cámara GoPro utilizando la técnica DHP, con los parámetros biofísicos de la vegetación obtenidos por la campaña de *ImagineS*, la primera campaña de campo de este estudio fue realizada de forma paralela, en la misma fecha, cultivos y ESUS con la campaña *ImagineS*.

2.2. Productos Copernicus Global Land Service

A partir de los datos de reflectancia al tope de la atmósfera a 333 metros de resolución de PROBA-V, se generan datos diarios de las variables LAI, FAPAR y FCOVER a través de un algoritmo de redes neuronales. A continuación, se genera una composición temporal a partir de estos datos y finalmente una colección consolidada a 333 metros de estos parámetros cada 10 días (Baret *et al.*, 2016). Estos productos han sido validados de acuerdo con la guía CEOS LPV sobre distintos biomas en Europa. Tomando en cuenta la gran homogeneidad de las praderas de la Región de los Lagos, para la segunda campaña de este estudio, se utilizó esta reciente colección de LAI, FAPAR y FCOVER, para validar las estimaciones *in situ*. Este producto se proyecta en una malla regular de latitud/longitud con el elipsoide WGS 1984 con una resolución de 1/336° y es calculada sobre una base diaria de

10 días. Estos datos de Copernicus son descargables a través de la plataforma de CGLS (<http://land.copernicus.eu/global/>) donde a su vez, es posible obtener más información detallada respecto a la validación y las bases teóricas de sus estimaciones.

3. Metodología

3.1. Instrumentación

En ambas campañas de campo, la estimación de los parámetros biofísicos de la vegetación se realizó mediante la técnica indirecta DHP. Como instrumento para la toma de fotografías se utilizó la cámara GoPro HERO 4+ BLACK, la cual es conocida por ser una cámara masiva, de fácil acceso y manipulación. Además, cuenta con una lente ojo de pez incluido, que permite ajustar distintos campos de visión y resoluciones, y también accesorios, entre ellos un bastón para facilitar la toma de fotografías digitales.

Las fotografías hemisféricas se procesaron utilizando el software CAN-EYE versión 6.3 desarrollado por INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique*; <http://www6.paca.inra.fr/can-eye>). Este software, mediante fotografías hemisféricas, estima la *fracción de huecos* (P_0) en función de los ángulos cenital y acimutal, permitiendo estimar los parámetros FAPAR, FCOVER, LAI y el factor de agrupamiento de la vegetación (λ_0), lo que permite diferenciar el LAI en efectivo (LAI_{eff}) y verdadero (LAI_{true}) a través de la relación $LAI_{\text{eff}} = LAI_{\text{true}} \times \lambda_0$ donde λ_0 tiene un valor mayor que la unidad para distribuciones regulares, e inferiores a la unidad para estructuras que presentan agrupamiento (Weiss *et al.*, 2004).

Previo al procesamiento de imágenes se realizó una calibración óptica del lente de la cámara para obtener las coordenadas del centro óptico y la función de magnificación del lente, los cuales son parámetros únicos de cada lente y fundamentales para la correcta estimación de P_0 . Para esto, el software CAN-EYE cuenta con un módulo de calibración que calcula estos dos parámetros mediante la toma de distintas fotografías hemisféricas. Una descripción más detallada es posible obtener en el manual de usuario (Weiss y Baret, 2016).

3.2. Mediciones *in situ*

Para cada parcela de cultivo se generaron entre 2 y 6 unidades de muestro elemental (*Elemental Sampling Unit*, ESU) dependiendo del tipo de cultivo o pradera. De acuerdo con el protocolo VALERI (Baret *et al.*, 2005) la extensión de cada ESU fue de 20 m² con una distribución aleatoria de toma de fotografías, estableciendo una ubicación mediante GPS en el área central (Figura 2). El protocolo de VALERI también considera distribuciones 30-50 ESUS dentro de un área de 3×3 km², ya que, como protocolo para validar imágenes satelitales de mediana resolución, es necesario escalar estos resultados con una imagen de alta resolución. Sin embargo, esta condición no pudo ser cumplida tanto en Chimbarongo y en la región de los Lagos debido que la adquisición de datos estuvo restringida solo a ciertos cultivos específicos a los que se pudo tener acceso. En la elaboración de cada ESU se tuvo especial cuidado en que mantuvieran características similares respecto a orientación de la cámara, iluminación, horizontalidad, altura de la cubierta (Martínez *et al.*, 2005b). En la mayoría de los casos las fotografías fueron tomadas a través de una posición horizontal respecto a la superficie con la ayuda de un bastón, la cámara mirando hacia la cubierta vegetal (*downward*) y manteniendo una distancia entre el lente y la parte superior de la vegetación de aproximadamente 1 m. Exclusivamente para dos mediciones realizadas en la primera campaña de campo, debido a la altura de los cultivos, fue realizado una medición posicionando la cámara bajo la cobertura vegetal mirando hacia el cielo (*upward*). Al igual que toda esta campaña de campo, se comparó con sus ESUS respectivas de la campaña ImagineS, las cuales fueron adquiridas de la misma forma.

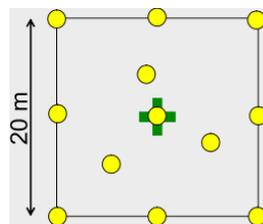


Figura 2. Distribución espacial de la adquisición de fotografías en una ESU de 20 m². Los círculos amarillos corresponden a fotografías y la cruz verde representa una medición GPS de la ubicación.

Tabla 1. Descripción de las ESUS obtenidas en la campaña de Chimbarongo para ambas cámaras. Se describe el tipo de cultivo, la ubicación (LAT y LON) y forma de adquisición (Up: upward, Down: downward).

| Cultivo | ID | LAT | LON | ADQ | GOPRO | | | | CANON+Fisheye | | | |
|---------|----|---------|---------|------|--------|--------|-------|--------|---------------|--------|-------|--------|
| | | | | | LAleff | LAtrue | FAPAR | FCOVER | LAleff | LAtrue | FAPAR | FCOVER |
| Maíz | M1 | -34,715 | -71,027 | Down | 0,483 | 1,096 | 0,310 | 0,332 | 0,657 | 1,030 | 0,350 | 0,272 |
| Maíz | M1 | -34,716 | -71,027 | Down | 0,699 | 1,630 | 0,417 | 0,430 | 0,653 | 1,095 | 0,310 | 0,191 |
| Maíz | M1 | -34,716 | -71,026 | Down | 0,725 | 1,902 | 0,436 | 0,355 | 0,613 | 0,990 | 0,370 | 0,302 |
| Maíz | M1 | -34,716 | -71,025 | Down | 0,773 | 1,965 | 0,409 | 0,366 | 0,523 | 0,830 | 0,320 | 0,270 |
| Maíz | M1 | -34,716 | -71,025 | Down | 0,752 | 1,816 | 0,435 | 0,303 | 0,743 | 1,180 | 0,370 | 0,283 |
| Maíz | M1 | -34,716 | -71,024 | Down | 0,996 | 2,402 | 0,520 | 0,353 | 0,880 | 1,335 | 0,430 | 0,331 |
| Maíz | M2 | -34,712 | -71,026 | Down | 0,031 | 0,034 | 0,026 | 0,028 | 0,033 | 0,030 | 0,030 | 0,027 |
| Maíz | M2 | -34,713 | -71,026 | Down | 0,045 | 0,053 | 0,037 | 0,029 | 0,030 | 0,035 | 0,030 | 0,022 |
| Maíz | M2 | -34,714 | -71,025 | Down | 0,054 | 0,061 | 0,040 | 0,041 | 0,023 | 0,020 | 0,020 | 0,018 |
| Maíz | M3 | -34,72 | -71,019 | Up | 1,720 | 4,585 | 0,653 | 0,359 | 1,417 | 2,580 | 0,650 | 0,541 |
| Maíz | M3 | -34,72 | -71,019 | Up | 1,844 | 4,658 | 0,671 | 0,475 | 1,727 | 3,580 | 0,700 | 0,568 |
| Poroto | P1 | -34,734 | -71,016 | Down | 3,176 | 5,630 | 0,878 | 0,848 | 2,210 | 3,505 | 0,790 | 0,739 |
| Poroto | P1 | -34,735 | -71,017 | Down | 3,211 | 4,736 | 0,917 | 0,897 | 1,497 | 2,485 | 0,660 | 0,674 |
| Poroto | P1 | -34,735 | -71,017 | Down | 2,990 | 5,215 | 0,892 | 0,843 | 3,027 | 4,445 | 0,920 | 0,902 |
| Poroto | P1 | -34,735 | -71,018 | Down | 3,923 | 5,944 | 0,963 | 0,966 | 2,333 | 3,305 | 0,800 | 0,762 |
| Tabaco | T1 | -34,733 | -71,016 | Down | 1,364 | 4,173 | 0,635 | 0,739 | 1,000 | 2,515 | 0,510 | 0,468 |
| Tabaco | T1 | -34,733 | -71,017 | Down | 2,779 | 6,951 | 0,810 | 0,816 | 2,307 | 5,395 | 0,820 | 0,770 |
| Tabaco | T1 | -34,733 | -71,017 | Down | 1,913 | 5,898 | 0,776 | 0,842 | 1,287 | 3,090 | 0,510 | 0,623 |
| Tabaco | T1 | -34,733 | -71,018 | Down | 1,702 | 6,240 | 0,831 | 0,929 | 1,867 | 3,975 | 0,730 | 0,637 |
| Alfalfa | A1 | -34,739 | -70,985 | Down | 3,120 | 4,503 | 0,923 | 0,925 | 2,430 | 3,830 | 0,790 | 0,759 |
| Alfalfa | A1 | -34,739 | -70,985 | Down | 1,293 | 1,600 | 0,666 | 0,641 | 1,690 | 2,525 | 0,800 | 0,794 |
| Alfalfa | A1 | -34,739 | -70,985 | Down | 1,303 | 1,849 | 0,626 | 0,575 | 1,793 | 2,600 | 0,710 | 0,612 |

En la primera campaña de campo se realizaron estimaciones en 6 parcelas de cultivo del área de estudio de Chimbarongo, las cuales son indicadas en la Tabla 1. Debido a la gran extensión de la zona, en los muestreos de “Mz1” se realizaron 6 ESU, por el contrario, en “Mz2”, donde solo fue posible realizar 2 ESUS debido al área reducida de este cultivo. En la figura 3 se muestra la extensión de cada parcela de cultivo junto con la distribución de las ESUS.

Respecto a la segunda campaña de campo, para representar la homogeneidad de las praderas de la Región de los Lagos, se utilizaron las parcelas de diez productores de leche ubicados en diversas partes de esta región (Tabla 2).

En la Tabla 3 se indican la cantidad de ESUS generadas en el área de estudio de la Región de los Lagos.

Se observa que en ciertos meses no se contaron con ESUS de muestreo. Esto se debió a la



Figura 3. Ubicación de las ESU tomadas durante la campaña de enero en Chimbarongo, junto con la extensión espacial de los cultivos. Izquierda: Maíz; Centro: Tabaco (arriba) y Poroto (abajo); Derecha: Alfalfa.

Tabla 2. Praderas de estudio de la segunda campaña 2015-2016 en Los Lagos.

| ID | Lugar de Pradera | Latitud | Longitud |
|------|------------------|----------|----------|
| Alb | Alba | -40,4773 | -73,0576 |
| Amt | Amtahuer | -40,9963 | -73,5917 |
| Fch | Frölich | -40,6135 | -73,0915 |
| Fnz | Fernández | -40,9743 | -72,6988 |
| Geb | Gebauer | -40,9633 | -72,7119 |
| Hnjs | Hinojosa | -40,7665 | -72,7355 |
| Km | Keim | -40,8567 | -73,0733 |
| Hes | Los Hualles | -41,1175 | -73,0974 |
| Tbr | Teuber | -40,9936 | -72,9533 |
| Tdr | Tronador | -40,8921 | -73,0125 |
| Vsp | Vesperinas | -41,4644 | -73,5442 |

inaccesibilidad a los sectores (anegación por lluvias o riego), también a que no se pudo seguir realizando mediciones en esa parcela (e.g. “Geb”) o que fue comenzado con un desfase (“Fnz”). En otros casos la cantidad de imágenes fue muy limitada por lo que la cantidad de ESUS fueron de 1 a 2. Por lo tanto, para la segunda campaña de campo las parcelas de estudio se limitaron a aquellos con mínimo dos ESUS por mes, que no existieran más de 4 meses sin datos y que hayan cumplido

Tabla 3. ESUS obtenidas en la segunda campaña 2015-2016 en Los Lagos.

| Fecha | Alb | Amt | Fch | Fnz | Geb | Hnjs | Km | Hes | Tbr | Tdr | Vsp |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|-----|-----|-----|-----|
| may-15 | 1 | - | 2 | - | 1 | - | - | 1 | 1 | 1 | 1 |
| jun-15 | 3 | 2 | - | - | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| jul-15 | 3 | 2 | 3 | - | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| ago-15 | 3 | 2 | 3 | - | 1 | - | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| sept-15 | 3 | 2 | 3 | - | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 |
| oct-15 | 3 | 2 | 3 | - | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| nov-15 | 3 | 1 | 1 | - | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| dic-15 | - | 2 | 3 | - | - | - | - | 3 | 2 | - | 3 |
| ene-16 | 3 | 2 | 3 | - | 3 | - | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 |
| feb-16 | - | 1 | 2 | 3 | - | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | - |
| mar-16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| abr-16 | - | 3 | 3 | 3 | - | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| may-16 | 3 | 3 | 3 | 3 | - | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| jun-16 | 4 | - | 3 | 3 | - | 3 | 2 | 3 | - | 2 | 3 |
| jul-16 | 3 | - | 3 | 3 | - | 2 | 3 | 3 | - | 2 | 3 |
| ago-16 | 4 | - | 3 | 3 | - | - | 3 | 3 | - | 2 | 3 |
| sept-16 | 3 | - | 3 | 4 | - | - | 4 | 4 | - | 2 | 4 |

correctamente el protocolo de toma de imágenes. De esta forma, se utilizaron para la Región de Los Lagos solamente las praderas de “Fch”, “Fnz”, “Km”, “Hes” y “Tdr” (Figura 4).

3.3. Procesado de fotografías

Para procesar las fotografías en el software se agruparon entre 8 y 12 imágenes por estimación. Luego se realizaron los 3 pasos principales para cada ESU (Weiss *et al.*, 2004): Primero, se removieron objetos no deseados de las imágenes (e.g. el operador) y se ajustó el contraste de visualización para asegurar una mejor discriminación entre la vegetación y el fondo; segundo, se aplicó una clasificación automática (*k-means*) para reducir el número total de colores distintivos de la imagen a 324, lo cual es suficiente para asegurar una discriminación certera a través de un menor número de colores para una manipulación más simple; tercero, se procedió a entrenar interactivamente el modelo mediante indicaciones iterativas del usuario para establecer que colores representan a la cobertura de vegetación y por defecto cuales son las correspondientes al fondo. Tanto para tomas hacia el cielo o hacia el suelo se generan complicaciones para diferenciar entre el fondo y la vegetación. En los casos que se generen algunas zonas con sombras (tomas hacia el suelo), zonas sobreexpuestas a la luz (tomas hacia el cielo) o artefactos de todo tipo, fue necesario sectorizar y definirle al software de forma manual a que cobertura corresponde. Como resultado se obtiene una imagen binaria de vegetación versus el fondo (cielo o suelo) para obtener P_0 .

3.4. Validación

Como última etapa, para la validación de las estimaciones de los parámetros biofísicos de la campaña de enero del 2015 se trabajó con los valores de LAI, FAPAR y FCOVER obtenidos por una cámara CANON EOS 6D y un lente ojo de pez SIGMA 8mm F3.5-EX DG la cual ya ha sido utilizada para estudios similares de (Lang *et al.*, 2010; Latorre *et al.*, 2016; Nestola *et al.*, 2017) y fue comparada con los datos obtenidos por la cámara GoPro HERO4+ BLACK. En la segunda campaña de campo, se comparó utilizando los valores de LAI, FAPAR y FCOVER de los productos Copernicus de PROBA-V con las mediciones *in situ* de la

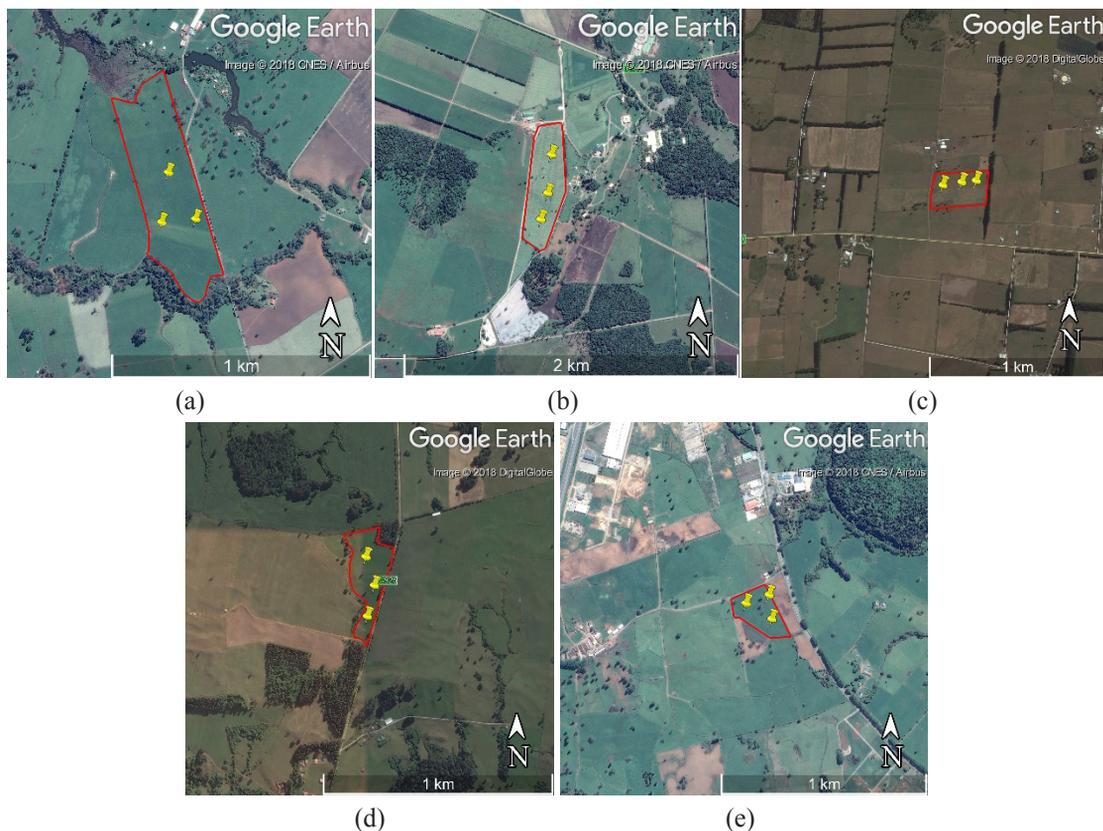


Figura 4. Ubicación de las ESU tomadas durante la campaña en la Región de Los Lagos, junto con la extensión espacial de las praderas de Keim (a), Tronador (b), Hualles (c), Fernández (d) y Frölich (e) durante el 16 de octubre del 2016.

cámara GoPro en las praderas. Para esto, fueron promediados los valores de las ESUS de cada pradera, luego se promediaron los valores de los píxeles de PROBA-V dentro del área de cada pradera y finalmente se compararon estos resultados. Para ambos casos se utilizaron diferentes estadígrafos como el coeficiente de determinación (R^2), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), el sesgo (*bias*) y la desviación estándar (σ) de las diferencias entre las estimaciones DHP y las utilizadas para la validación. Además, gráficos de dispersión fueron utilizados para caracterizar la relación entre los datos *in situ* provenientes de la cámara GoPro y los datos de la cámara CANON EOS 6D o los datos de PROBA-V según corresponda.

4. Resultados y Análisis

4.1. Calibración de Lente

La Figura 5 describe el resultado de la calibración realizada a la cámara fotográfica cuyo centro

óptico se obtuvo para el píxel $x=1989, y=1488$. Se observa que es posible utilizar imágenes con un límite en grados (*Circle Of Interest, COI*) sobre los 45° y con una circunferencia semi-completa a los 60° .

4.2. Validación *in situ*

En la Figura 6 se presentan gráficos de barras comparativos de valores medios por cultivo de LAI_{eff} , LAI_{true} , FAPAR y FCOVER para las estimaciones de la cámara GoPro y la cámara CANON, los que fueron recolectados en la campaña de enero del 2016. Estos resultados muestran una variabilidad entre $0,05$ y $3,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ para LAI_{eff} ; entre 1 y $6 \text{ m}^2/\text{m}^2$ para LAI_{true} ; y dentro de todo el rango físico para FAPAR y FCOVER. Se puede observar que las estimaciones de los parámetros biofísicos obtenidas por la cámara GoPro siguen un patrón respecto a las estimaciones de la cámara CANON (Latorre *et al.*, 2016). Sin embargo, se detectan sobreestimaciones de la cámara GoPro para la mayoría de

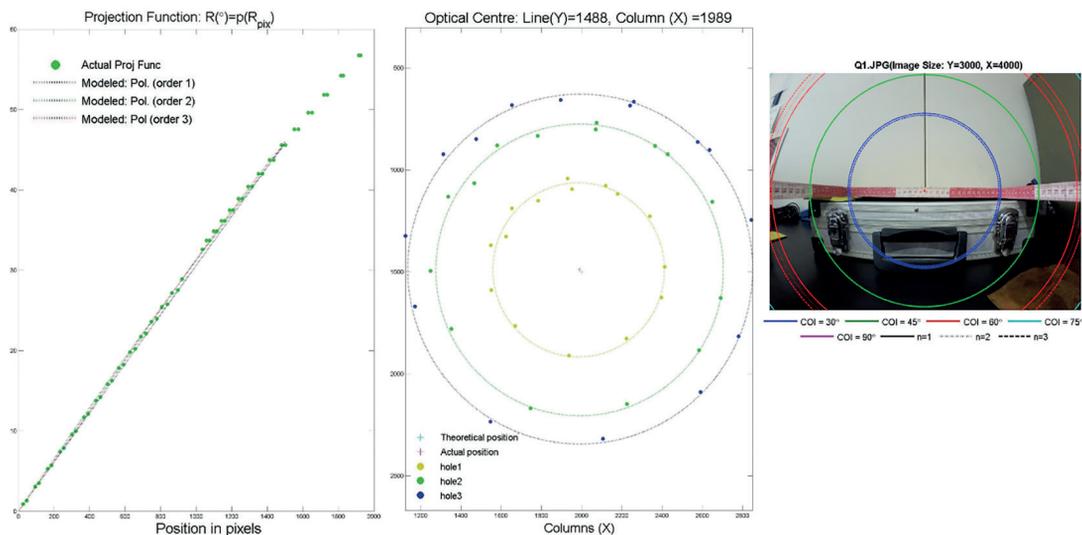


Figura 5. Arriba: distribución de la apertura de campo en la imagen. Abajo: resultados de la calibración del centro (izquierda) y proyección óptica (derecha).

los cultivos, con la excepción del cultivo de “Alf”. Las diferencias entre las estimaciones de ambas cámaras son en general altas para el LAI_{true} , con promedio cercano a $2,17 \text{ m}^2/\text{m}^2$, mientras que para los otros tres parámetros se muestran diferencias de $0,31 \text{ m}^2/\text{m}^2$, $0,008$, $0,016$ para el LAI_{eff} , FAPAR y FCOVER respectivamente.

En la Figura 7 se observa la dispersión de los cultivos entre las dos cámaras hemisféricas en función de cada parámetro biofísico, donde se obtuvo un

R^2 de 0,79 para el LAI_{eff} ; 0,83 de LAI_{true} ; 0,88 para FAPAR y 0,82 de FCOVER. El RMSE dio valores de $0,61 \text{ m}^2/\text{m}^2$ para el LAI_{eff} y de $1,45 \text{ m}^2/\text{m}^2$ para el LAI_{true} , mientras que para los parámetros FAPAR y FCOVER fueron de 0,11 y 0,15, respectivamente.

4.2.1. Validación Satelital

En la Figura 8 se observa la dispersión de la GoPro con PROBA-V de los parámetros biofísicos. En las praderas de la Región todos los parámetros

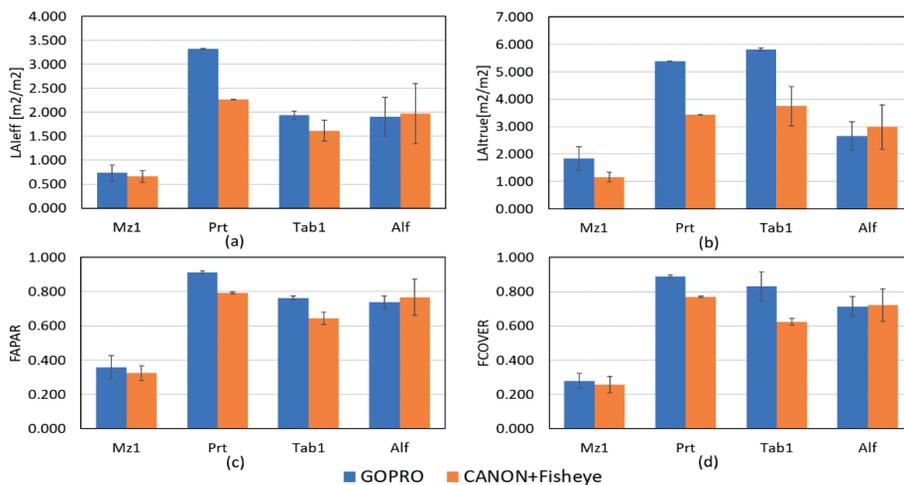


Figura 6. Comparación de valores medios con desviación estándar de los parámetros biofísicos para los cultivos estimados por GoPro y CANON. LAI_{eff} (a), LAI_{true} (b), FAPAR (c) y FCOVER (d).

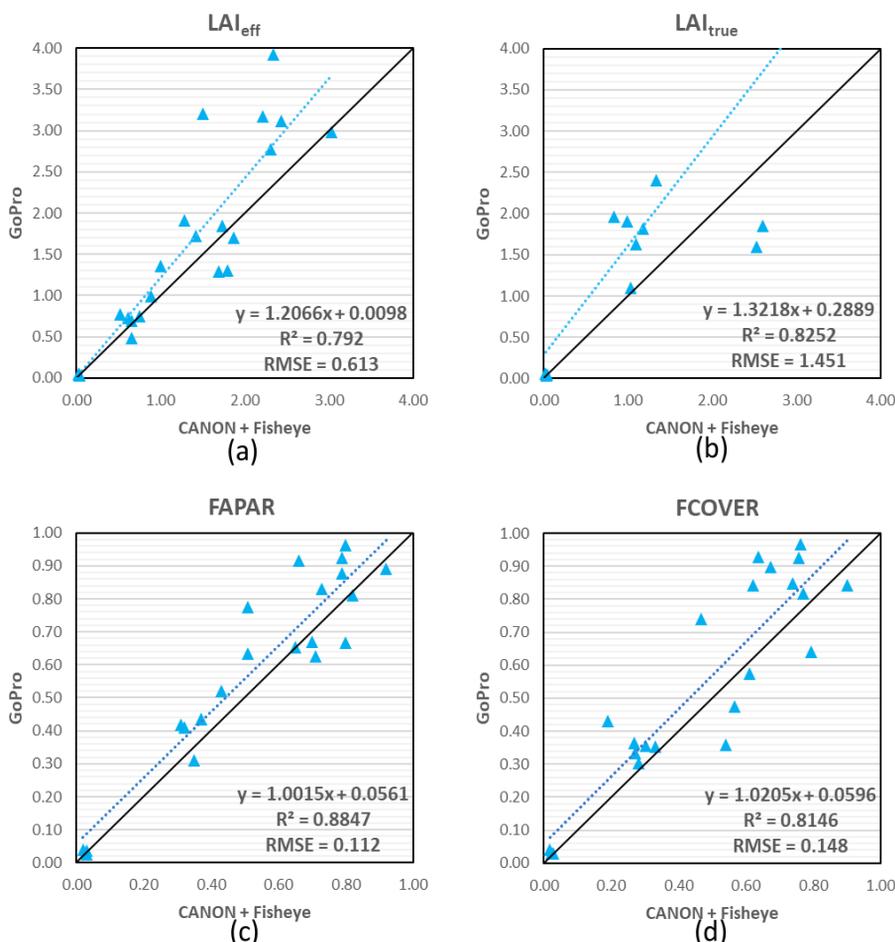


Figura 7. Relación de las estimaciones de los parámetros biofísicos de la vegetación entre la cámara GoPro y la cámara CANON. Arriba: LAI_{eff} (izquierda) y LAI_{true} (derecha). Abajo: FAPAR (izquierda) y FCOVER (derecha).

biofísicos muestran valores entre 0,42 y 0,7 de R². Existe un mayor R² cuando se considera el LAI_{eff} respecto al LAI_{true}, ya que aumenta de 0,42 a 0,52. El FAPAR muestra el mayor valor de R² con 0,7, mientras que el FCOVER es de 0,52. El RMSE presenta valores mayores para el LAI_{true} que para el LAI_{eff}.

Para caracterizar la comparación multitemporal de la cámara digital y el satélite, se muestra en la Figura 9 los ejemplos de las praderas de “Los Hualles” (Hes) y “Tronador” (Tdr). Se nota que independiente del parámetro biofísico, existe un patrón similar entre ambas estimaciones y que para la mayoría de los casos las estimaciones provenientes de la cámara GoPro sobrestima los parámetros. También se diferencia que para el año

2015 y comienzos del 2016 existen mayores similitudes que respecto a julio del 2016 en adelante.

5. Discusión

El método presentado en este trabajo demuestra que es posible generar estimaciones de LAI_{eff}, LAI_{true}, FAPAR y FCOVER a través de la técnica DHP en praderas y cultivos de Chile utilizando una cámara GoPro. Si bien, existen mayores errores en comparación a otras cámaras hemisféricas utilizadas en estudios similares (López-Lozano et al., 2009; Verger et al., 2011), sí es posible generar estimaciones de LAI_{eff}, FAPAR y FCOVER de forma simple a través del uso de esta cámara de uso masivo.

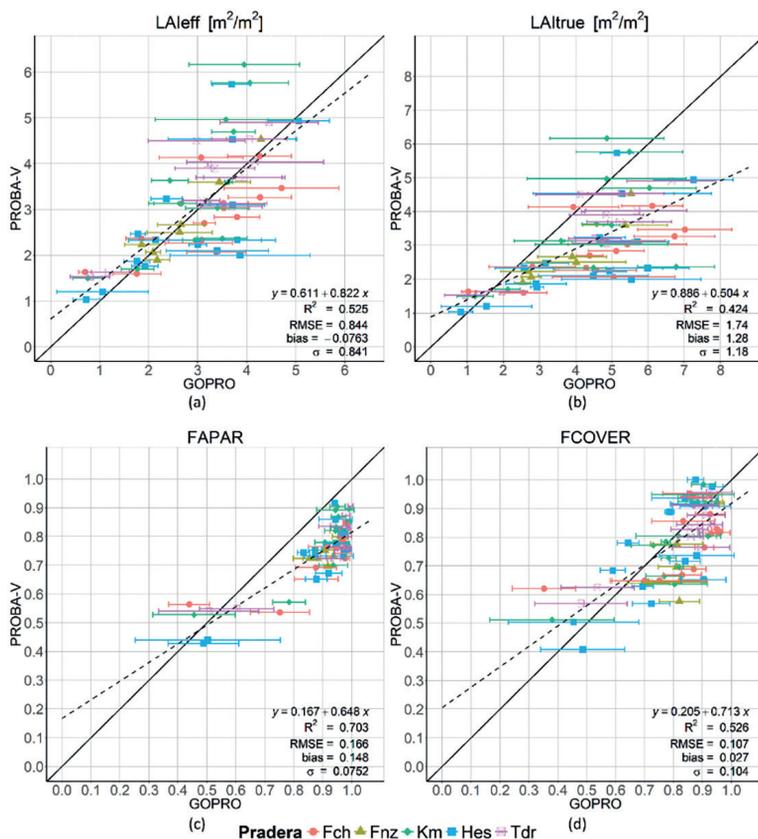


Figura 8. Relación de las estimaciones de los parámetros biofísicos de la vegetación entre la cámara GoPro y los productos de PROBA-V en praderas de Los Lagos. LAI_{eff} (a), LAI_{true} (b), FAPAR (c) y FCOVER (d).

La comparación entre estimaciones de los parámetros biofísicos de la vegetación permitió concluir que el uso de una cámara de uso masivo genera estimaciones similares a los producidos por cámaras profesionales como es el modelo CANON. En cambio, respecto a la comparación con los productos de PROBA-V existe una relación baja, no necesariamente coincidiendo en la magnitud de las mediciones LAI_{eff}, FAPAR y FCOVER, pero sí se marcan similitudes en el patrón de aumentos y disminuciones para cada mes. Esto se podría explicar debido a que al comparar estos parámetros biofísicos sobre un área de 333 m² con mediciones *in situ* no siempre es posible obtener resultados equivalentes. Debido a que las mediciones *in situ* en la región de los Lagos estaban ligadas a ciertos predios privados y no fue posible generarlas en mayor cantidad y densidad, y la extensión de las medidas mediante información satelital para generar mapas de verdad-terreno no fue realizada ya

que no se cumplirían los protocolos de validación como de VALERI.

Además, es necesario considerar que existen incertidumbres asociadas al procedimiento de adquisición de fotografías y procesamiento de ellas. En el caso específico del parámetro de LAI_{true}, el RMSE hace notorio que los resultados no son consistentes tanto para la comparación *in situ* entre cámaras hemisféricas y en mayor medida con la comparación satelital. La razón por la que las estimaciones de la GoPro de LAI_{eff} son más cercanas a las de PROBA-V que las de LAI_{true} podría estar relacionada a una incertidumbre asociada al factor de agrupamiento propio de esta variable o también a una limitación técnica de la cámara GoPro la cual no permite trabajar con un COI igual a una circunferencia completa de 60°, como lo hace la cámara CANON y que es lo recomendado para procesar imágenes dentro de CAN-EYE (Weiss y Baret, 2016) y también a que el factor

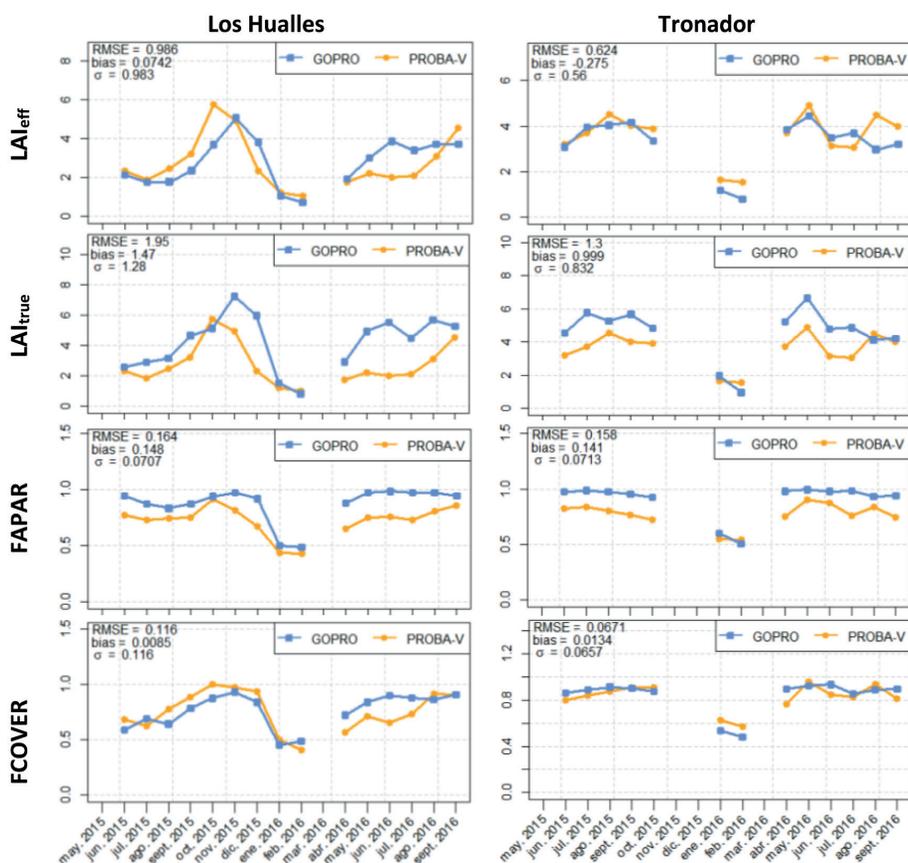


Figura 9. Ejemplo en las praderas “Hes” y “Tdr” de las estimaciones multitemporales de GoPro y PROBA-V para la campaña 2015-2016 de la región de los Lagos.

de agrupamiento posee un cálculo relacionado al tamaño de la celda utilizada para dividir la fotografía hemisférica (Demarez *et al.*, 2008) lo cual se potencia con las limitaciones del lente de la cámara GoPro. Además, existe la incertidumbre propia de los datos satelitales, las que en el caso de los productos GEOV3 aún no se han terminado de definir completamente sobre otros tipos de biomas y fuera del continente europeo debido a que son productos muy recientes (Baret and Weiss, 2018).

Si bien, el uso de las técnicas DHP permite generar un monitoreo de LAI, FAPAR y FCOVER de forma más versátil y simple que otros métodos, aún existe un elevado costo en la tecnología utilizada debido a la necesidad de una cámara más un lente ojo de pez (Bréda, 2003; Cescatti, 2007; Garrigues *et al.*, 2008; Lang *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2015; López-Lozano *et al.*, 2009; Martínez *et al.*,

2005b; Nestola *et al.*, 2017; Tarnavsky *et al.*, 2008; Verger *et al.*, 2011). Por lo tanto, con el uso de una cámara GoPro sería posible generar estimaciones de LAI_{eff}, FAPAR y FCOVER comparables con otras tecnologías disponibles a solo una fracción del costo de ellas. Además, al igual que nuevos métodos que utilizan smartphones para generar estimaciones en viñas como *VitiCanopy* (De Bei *et al.*, 2016) y *PocketLAI* (Confalonieri *et al.*, 2013) la técnica de la fotografía digital hemisférica podría ser extrapolada mediante aplicaciones de smartphones utilizando lentes ojos de pez compatibles con ellos. De esta manera, se podría generar información rápida, y amigable con el usuario que facilite la toma de decisiones en escenarios que requieran de una menor cantidad de recursos económicos y una mayor constancia de muestreos.

6. Conclusiones

En este estudio, se complementa la aplicación de la fotografía digital hemisférica como técnica *in situ* para la obtención de parámetros biofísicos de la vegetación. Esto se logra a través del uso de una cámara hemisférica de gran accesibilidad y de uso masivo como los modelos de GoPro para la estimación de LAI_{eff} , LAI_{true} , FAPAR y FCOVER a largo del tiempo, y en coberturas vegetales de gran heterogeneidad como cultivos de la zona de Chimbarongo, así como la gran homogeneidad de las praderas que predominan en toda la Región de Los Lagos, ambas pertenecientes a Chile. Los resultados muestran que con una cámara GoPro es posible estimar LAI_{eff} , FAPAR y FCOVER de forma consistente con los de una cámara profesional (CANON), lo cual se respalda con un R^2 de 0,72. En paralelo, las estimaciones obtenidas con GoPro de LAI_{eff} , FAPAR y FCOVER respecto a los datos que proporciona PROBA-V, muestran unos R^2 que varían entre 0,42 y 0,7, pero patrones marcados a lo largo del tiempo. Tanto en las mediciones *in situ* como satelitales, el FAPAR estimado por la GOPRO ha mostrado los mejores resultados con R^2 superiores a 0,7, sin embargo, el LAI_{true} estimado con GoPro ha presentado discrepancias importantes y no se consideran fiables, debido principalmente a las limitaciones técnicas de la cámara con el ángulo de visión.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento parcial del proyecto Conicyt – Fondecyt Iniciación 11130359 “Estimating the Surface soil moisture at regional scale by using a synergic optical-passive microwave approach and remote sensing data”. Al Earth Observation Laboratory (EOLAB) y al proyecto IMAGINES, junto con la libre entrega de datos PROBA-V Copernicus.

Referencias

Baret, F., Camacho, F., Cernicharo, J., Lacaze, R., Weiss, M. 2013. GEOV1: LAI, FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: Principles of development and production. *Remote Sensing of Environment*, 137, 310-329. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.027>

- Baret, F., Hagolle, O., Geiger, B., Bicheron, P., Miras, B., Huc, M., Berthelot, B., Niño, F., Weiss, M., Samain, O., Roujean, J.L., Leroy, M. 2007. LAI, fAPAR and fCOVER CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 110(3), 275-286. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.018>
- Baret, F., Weiss, M. 2018. Gio Global Land Component - Lot I “Operation of the Global Land Component” Algorithm Theoretical Basis Document, 1-41.
- Baret, F., Weiss, M., Allard, D., Garrigues, S., Leroy, M., Jeanjean, H., *et al.*, 2005. VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products. *Remote Sensing of Environment*, 76(3), 36-39.
- Baret, F., Weiss, M., Verger, A., Smets, B. 2016. Gio Global Land Component - ATBD.
- Bréda, N.J.J. 2003. Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2403-2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>
- Casanova, M., Salazar, O., Seguel, O., Luzio, W. 2013. The Soils of Chile, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5949-7>
- Cescatti, A. 2007. Indirect estimates of canopy gap fraction based on the linear conversion of hemispherical photographs. Methodology and comparison with standard thresholding techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.04.009>
- Chen, J.M., Black, T.A. 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15(4), 421-429. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x>
- Confalonieri, R., Foi, M., Casa, R., Aquaro, S., Tona, E., Peterle, M., *et al.* 2013. Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.04.019>
- De Bei, R., Fuentes, S., Gilliam, M., Tyerman, S., Edwards, E., Bianchini, N., Smith, J., Collins, C. 2016. Viticanopy: A free computer app to estimate canopy vigor and porosity for grapevine. *Sensors*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/s16040585>
- Demarez, V., Duthoit, S., Baret, F., Weiss, M., Dedieu, G. 2008. Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(4), 644-655. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.11.015>

- Fang, H., Liang, S., Hoogenboom, G. 2011. Integration of MODIS LAI and vegetation index products with the CSM-CERES-Maize model for corn yield estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 32(4), 1039-1065. <https://doi.org/10.1080/01431160903505310>
- Fournier, R.A., Landry, R., August, N.M., Fedosejevs, G., Gauthier, R.P. 1996. Modelling light obstruction in three conifer forests using hemispherical photography and fine tree architecture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82(1-4), 47-72. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(96\)02345-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(96)02345-3)
- Garrigues, S., Shabanov, N. V., Swanson, K., Morisette, J.T., Baret, F., Myneni, R.B. 2008. Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8-9), 1193-1209. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.02.014>
- Gower, S.T., Kucharik, C.J., Norman, J.M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70(1), 29-51. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00056-5)
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., Baret, F. 2004. Review of methods for *in situ* leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., Champagne, C. 2015. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34(1), 235-248. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.002>
- Lang, M., Kuusk, A., Mõttus, M., Rautiainen, M., Nilson, T. 2010. Canopy gap fraction estimation from digital hemispherical images using sky radiance models and a linear conversion method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1), 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.08.001>
- Latorre, C., Camacho, F., Mattar, C., Santamaría-Artigas, A., Leiva-Büchi, N., Lacaze, R. 2016. Obtención de mapas verdad-terreno de LAI, FAPAR y cobertura vegetal a partir de imágenes del satélite chileno FASat-C y medidas in-situ en la zona agrícola de Chimbarongo, Chile, para la validación de productos de satélite. *Revista de Teledetección*, 2016(47), 51-64. <https://doi.org/10.4995/raet.2016.5691>
- Li, W., Weiss, M., Waldner, F., Defourny, P., Demarez, V., Morin, D., Hagolle, O., Baret, F. 2015. A generic algorithm to estimate LAI, FAPAR and FCOVER variables from SPOT4_HRVIR and landsat sensors: Evaluation of the consistency and comparison with ground measurements. *Remote Sensing*, 7(11), 15494-15516. <https://doi.org/10.3390/rs71115494>
- López-Lozano, R., Baret, F., García de Cortázar-Atauri, I., Bertrand, N., Casterad, M.A. 2009. Optimal geometric configuration and algorithms for LAI indirect estimates under row canopies: The case of vineyards. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(8), 1307-1316. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.001>
- Martínez, B., Camacho-de Coca, F., García-Haro, F. 2005a. Estimación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal a alta resolución a partir de medidas *in-situ* obtenidas en SPARC'03. *XI Congreso Nacional de Teledetección*, 21-23.
- Martínez, B., García-haro, F., Camacho-de Coca, F. 2005b. Estimación de parámetros biofísicos de vegetación utilizando el método de la cámara hemisférica. *Revista de Teledetección*, 23, 13-26.
- Mattar, C., Hernández, J., Santamaría-Artigas, A., Durán-Alarcón, C., Olivera-Guerra, L., Inzunza, M., Tapia, D., Escobar-lavín, E. 2014. A first in-flight absolute calibration of the Chilean Earth Observation Satellite. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.017>
- Mougin, E., Demarez, V., Diawara, M., Hiernaux, P., Soumaguel, N., Berg, A. 2014. Estimation of LAI, fAPAR and fCover of Sahel rangelands (Gourma, Mali). *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.006>
- Nestola, E., Sánchez-Zapero, J., Latorre, C., Mazzenga, F., Matteucci, G., Calfapietra, C., Camacho, F. 2017. Validation of PROBA-V GEOV1 and MODIS C5 & C6 fAPAR Products in a Deciduous Beech Forest Site in Italy. *Remote Sensing*, 9(2), 126. <https://doi.org/10.3390/rs9020126>
- Olivera-Guerra, L., Mattar, C., Galleguillos, M. 2014. Estimation of real evapotranspiration and its variation in Mediterranean landscapes of central-southern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28(1), 160-169. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.012>
- Olivera-Guerra, L., Merlin, O., Mattar, C., Duran-Alarcon, C., Santamaría-Artigas, A., Stefan, V. 2015. Combining meteorological and lysimeter data to evaluate energy and water fluxes over a row crop for remote sensing applications. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015-Novem, 4649-4651. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326865>

- Paul M. Rich, 1990. Characterizing Plant Canopies with Hemispherical Photographs. *Remote Sensing Reviews*, 5(November 2012), 37-41. <https://doi.org/10.1080/02757259009532119>
- Rigon, J.P.G., Capuani, S., Fernandes, D.M., Guimarães, T.M. 2016. A novel method for the estimation of soybean chlorophyll content using a smartphone and image analysis. *Photosynthetica*, 54(4), 559-566. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0214-x>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., Meseguer-Ruiz, Ó. 2017. Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Sellers, P.J., Dickinson, R.E., Randall, D.A., Betts, A.K., Hall, F.G., Berry, J.A., et al. 1997. Modeling the Exchanges of Energy, Water, and Carbon between Continents and the Atmosphere. *Science*, 275(5299), 502-509. <https://doi.org/10.1126/science.275.5299.502>
- Tarnavsky, E., Garrigues, S., Brown, M.E. 2008. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 535-549. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.008>
- Verger, A., Baret, F., Camacho, F. 2011. Optimal modalities for radiative transfer-neural network estimation of canopy biophysical characteristics: Evaluation over an agricultural area with CHRIS/PROBA observations. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 415-426. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.012>
- Weiss, M., Baret, F. 2016. Can Eye User Manual.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I., Coppin, P. 2004. Review of methods for *in situ* leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 37-53. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.001>
- Zheng, G., Moskal, L.MX009. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors*, 9(4), 2719-2745. <https://doi.org/10.3390/s90402719>

