

CASO PRÁCTICO

Caracterización espectral de *Quillaja saponaria* (Mol.)

Acuña-Ruz, T.^{1,2*}, Mattar, C.¹, Hernández, H.J.²

¹ Laboratorio para el Análisis de la Biósfera (LAB), Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

² Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje (GEP), Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Resumen: En este trabajo se presenta una caracterización de la reflectancia espectral de *Quillaja saponaria* (Mol.), especie endémica de Chile y principalmente valorada por los servicios ecosistémicos que brinda a la sociedad así como su elevada concentración de saponinas en la corteza, utilizada como insumo en la industria farmacéutica. Para la caracterización espectral se diseñó un protocolo de adquisición de firmas espectrales foliares, controlando parámetros instrumentales y ambientales. Se evaluó el comportamiento espectral y el grado de variabilidad de la especie en el rango del visible e infrarrojo cercano (VNIR; 400-990 nm) con dos sensores hiperespectrales (ASD HH y cámara PDF-65-V10E). Las firmas espectrales obtenidas con el ASD HH mostraron una variación inferior al 5% de reflectancia en el VNIR y en menor medida en la zona de transición del visible al infrarrojo cercano (*red-edge*; 680-730 nm). Además, se detectaron dos rasgos espectrales distintivos de la especie, el primero se relaciona con un incremento rápido de la reflectancia en los 450-480 nm y el segundo, un decrecimiento entre los 920-970 nm relacionado con las bandas de absorción de agua. De hecho, al medir la reflectancia de un conjunto de ramas apiladas, éstos rasgos perduran pero con una menor magnitud, indicando un patrón espectral característico y eventualmente utilizable en campañas de monitoreo del estado físico y sanitario de la especie mediante teledetección. Usando la cámara PDF-65 se estudió el vigor de las hojas bajo diferentes condiciones sanitarias (sana, enferma, muerta) a través de los índices espectrales de vegetación. Entre los resultados, el índice PSRI (*Plant Senescence Reflectance Index*) detecta sectores de bajo vigor fotosintético y el TVI (*Triangular Vegetation Index*) permite una caracterización gradual de cada condición. Este trabajo presenta la primera referencia espectral para una de las especies de bosque esclerófilo más importante de Chile.

Palabras clave: *Quillaja saponaria*, Chile, PSRI, Protocolo.

Spectral characterization of *Quillaja saponaria* (Mol.)

Abstract: This paper presents a spectral reflectance characterization of the specie *Quillaja saponaria* (Mol.), endemic tree of Chile and valued by society due to its provision of several ecosystem services that gives to society and also for its high concentration of saponins in cortex widely used in the pharmacological industry. For spectral characterization a foliar spectral signatures protocol was designed which included standardized instrumental and environmental parameters. The spectral response of different individuals was measured to evaluate the spectral behaviour and degree of variability within species in the visible and near infrared ranges (VNIR; 400-990 nm) with two hyperspectral sensors (ASD HH and camera PDF-65-V10E). The resulting spectral signatures obtained with ASD HH showed a variation less than 5% of reflectance in VNIR and lesser than that in the transition zone from red to near infrared (*red-edge*; 680-730 nm). Additionally, two distinctive spectral features were detected for the specie, the first is related to a fast

* Autor para la correspondencia: tomasacuna@ug.uchile.cl

increase of reflectance in bands 450-480 nm and the second, to a marked decrease in the 920-970 nm range associated with water absorption features. At branch level, these distinctive features are maintained but with a smaller magnitude of reflectance, which could indicate that they are useful characteristic spectral patterns that can eventually be used for monitoring the physical health state of the specie using remote sensing. On the other hand, we used a PDF-65 camera for study the plant vigour from different health states (healthy, ill, died) with spectral vegetation index. The Plant Senescence Reflectance Index detected stress on leaves, and Triangular Vegetation Index allows for a gradually characterization of every state. This work provides the first spectral reference for one of the most important sclerophyll species of Chile.

Key words: *Quillaja saponaria*, Chile, Plant Senescence Reflectance Index, Protocol.

1. Introducción

El género *Quillaja* se constituye por dos especies de árboles en la región templada de Sudamérica, entre ellas, *Quillaja saponaria* Mol. (quillay) es una especie mono genérica y endémica de la zona central de Chile, distribuyéndose entre los 30° y 38° de latitud S (Donoso et al., 2011). El quillay es una de las especies más importantes dentro del tipo de bosque esclerófilo y fenológicamente se caracteriza por ser un árbol siempre verde, de hojas coriáceas y de un color verde-amarillo. Dado el gradiente altitudinal y geográfico de Chile, la especie desarrolló la capacidad de adaptarse a un amplio rango de hábitats (Rodríguez et al., 1983), lo que generó distintos fenotipos entre las comunidades vegetales y directamente relacionado con las condiciones ambientales de cada micro sitio. Desde el punto de vista económico, la especie fue intensamente explotada a principios del siglo XX, como fuente de combustión y principalmente por su concentración de saponinas para la elaboración de detergentes, pero además, por la extracción de hojarasca para ser usado como fertilizante y recientemente, se destaca su rol en la producción de miel multifloral (Díaz-Forestier et al., 2009). Esto ha provocado una mayor demanda del estado de este recurso natural, despertando el interés por conocer la distribución geográfica en la región y poder estimar, el potencial económico y el impacto ambiental que tiene en ambientes naturales y urbanos.

El quillay tiene características fisiológicas interesantes como tolerar diferentes condiciones ambientales para su crecimiento, siendo capaz de desarrollarse en suelos pobres de nutrientes, en zonas con altas oscilaciones térmicas y en condiciones extremas de sequía (Donoso et al., 2011). Estos atributos son adaptaciones de la especie al contraste estacional del clima mediterráneo,

con precipitaciones acumuladas en invierno y temperaturas intensas en verano, ocasionando restricciones asociadas a heladas, insolaciones y a la disponibilidad de agua (Rodríguez et al., 1983). En relación a la producción de biomasa, Cabrera (2002) documentó que el quillay logra mantener un balance positivo de almacenamiento de carbono aún bajo restricciones hídricas y según Donoso et al. (2011), esto se produciría por una disminución de la biomasa aérea por defoliación para favorecer la actividad fotosintética de las hojas remanentes.

Las propiedades descritas permiten considerar al quillay como una especie clave para los sistemas naturales y urbanos en Chile. Participa como un elemento fundamental dentro de la vegetación urbana y contribuye al desarrollo ambiental, social y económico del ecosistema urbano por beneficiar directa o indirectamente a la población por reducir la polución en el aire, enriquecer el valor estético y regular la temperatura del aire (Hassan y Lee, 2015). Bajo esta perspectiva, el quillay sería un componente estratégico por los servicios ambientales que brinda y que pueden mermar si las condiciones físicas y fitosanitarias perjudican el funcionamiento fisiológico de la especie. Por ello, es de interés monitorear periódicamente la condición del arbolado público, para ejecutar acciones de manejo y recuperación de áreas verdes para potenciar el impacto ambiental sobre la sociedad y discernir por ejemplo, aquellos casos dónde es apropiado utilizar especies nativas (quillay) o exóticas en el territorio.

De acuerdo al punto de vista económico, la importancia comercial de la especie radica en su concentración de saponinas en el tejido vegetal, extraída para ser utilizada como potencial adyuvante en vacunas para activar el sistema

inmunológico de mamíferos (Guo y Kenne, 2000; Sun *et al.*, 2009). Por otro lado, la especie tiene una importante participación en la producción melífera, destacada por las propiedades organolépticas de su miel en el mercado nacional e internacional, Díaz-Forestier *et al.* (2009) estimaron que el néctar secretado por un árbol puede llegar a producir cerca de 4,2 kg de miel.

Dado el importante valor comercial y ambiental que posee esta especie endémica, la teledetección se posiciona como una tecnología apropiada para estudiar su distribución espacial y para monitorear su condición fitosanitaria. Hasta la fecha no existen estudios de teledetección aplicados directamente al monitoreo del quillay, si no netamente dirigido al cambio de uso de suelo y fragmentación del bosque esclerófilo en el ecosistema mediterráneo en Chile central (Schulz *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2015) y a la variabilidad de la evapotranspiración real en esta región (Olivera-Guerra *et al.*, 2013). El objetivo principal de este caso práctico es presentar una caracterización espectral del quillay a escala foliar y su respuesta bajo diferentes estados sanitarios. De hecho, la determinación de la respuesta espectral de la especie es fundamental para orientar campañas de teledetección y eventualmente poder relacionar los factores ambientales que influyen en su crecimiento en zonas antrópicas y naturales, así como su posterior clasificación espacio-temporal a partir de imágenes hiperespectrales.

2. Materiales y Métodos

2.1. Protocolo de Adquisición

La adquisición de firmas espectrales se obtuvo bajo condiciones ambientales controladas, estandarizando parámetros instrumentales de medición para el registro espectral del quillay. Se trabajó a escala foliar debido a que la propiedad espectral a nivel de dosel se relaciona directamente con el follaje del árbol y técnicamente, su interpretación se limita a la respuesta foliar (Knippling, 1970; Jacquemoud y Baret, 1990). De esta manera, cada medición será indicativa para un período del año, permitiendo estudiar el cambio espectral de la especie a través del tiempo (Blackburn y Milton, 1995; Pfitzner *et al.*, 2011). El protocolo de adquisición de firmas espectrales foliares está disponible en el sitio web: <http://www.gep.uchile.cl/SPEC>. Este protocolo se replicó sistemáticamente en distintos individuos para medir el grado de variabilidad de la especie. En la Figura 1 se presenta un esquema gráfico del experimento, definiendo condiciones instrumentales estandarizadas en la literatura tales como la altura del sensor a la muestra, el ángulo de geometría de visión y el tipo de arreglo de la muestra vegetal (Milton *et al.*, 2009; Rasaiah *et al.*, 2014). En este trabajo se utilizó un espectro radiómetro portátil *Analytical Spectral Devices Hand Held* (ASD), abarcando la región del visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR; en conjunto VNIR; 325-1075 nm).

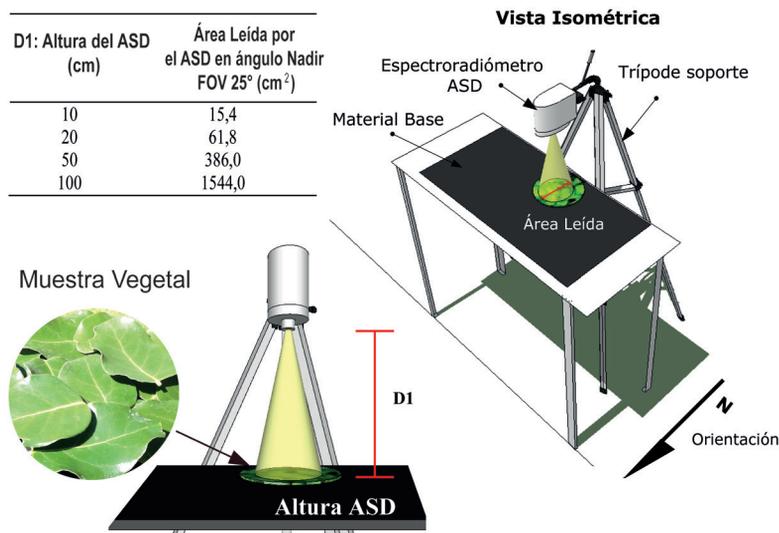


Figura 1. Experimento de adquisición de firmas espectrales foliares. La orientación norte aplica sólo para el hemisferio Sur.

2.2. Muestras vegetales de quillay

Las muestras fueron extraídas de individuos de quillay en condiciones sanas de crecimiento (mismo estado de vigor), registrando para cada árbol el diámetro a la altura del pecho (1,3 m desde el suelo), la altura total y su coordenada geográfica (Tabla 1). Adicionalmente, se comparó la respuesta espectral de un conjunto de ramas apiladas (Tabla 1: N° 15 y 17) con la respuesta espectral de solo hojas (Foliar). Para cada muestra vegetal se registraron diez espectros consecutivos, los cuales fueron procesados para generar una firma espectral promedio a través de la distribución estadística *T-Student*. Adicionalmente, cada firma espectral posee un mejor metadato instrumental para asegurar la comparación e interoperabilidad en el tiempo con otras librerías espectrales tales como la propuesta por Rasaiah *et al.* (2014).

2.3. Imagen Cámara Hiperespectral

Paralelamente se complementó la caracterización espectral del quillay con una imagen capturada mediante una cámara hiperespectral (PDF-65-V10E de SPECIMEN INC.) de 388 bandas en el rango de los 400-1000 nm en la región del VNIR y de una resolución de pixel fina (<9 µm) cada 3 nm de resolución espectral. Esta información

se comparó con la información adquirida con el sensor ASD, evaluando la respuesta del quillay en diferentes condiciones sanitarias (sana, enferma y muerta) y su comportamiento frente a seis índices espectrales de vegetación utilizados para detectar el verdor (Figura 4). Estos índices corresponden a la eficiencia en el uso de la luz y la senescencia de la vegetación tales como RENDVI (*Red Edge Normalized Difference Vegetation Index*), mSR705 (*Modified Red Edge Simple Ratio Index*), PRI (*Photochemical Reflectance Index*), TVI (*Triangular Vegetation Index*), PSRI (*Plant Senescence Reflectance Index*) y RSVI (*Red-edge Vegetation Stress Index*) (Broge y Leblanc, 2001; Sims y Gamon, 2002; Ollinger, 2011).

3. Resultados

3.1. Respuesta espectral por ASD

En la Figura 2 se muestran las firmas espectrales medidas para las 17 muestras vegetales analizadas. Se aprecia que el quillay sigue el patrón espectral característico de la vegetación, una baja reflectancia en el VIS y relativamente alta en el NIR, presentando un incremento de la reflectancia en el verde en torno a los 550 nm. Entre las características distinguibles, la especie presenta un incremento pronunciado de la reflectancia en

Tabla 1. Código para muestras de *Quillaja saponaria* (QUSA) según ejemplar (A-K), N° de muestras extraídas (1-2), coordenada geográfica (Latitud y Longitud), diámetro a la altura del pecho (DAP a 1,3 m) y altura del árbol (H).

N °	Código muestra	Latitud	Longitud	DAP [cm]	H [m]
1	QUSA - A	-33,43735401	-70,549634	27	14
2	QUSA - B	-33,43742299	-70,548553	24	7
3	QUSA - C	-33,43815599	-70,544816	19	6
4	QUSA - D	-33,43975098	-70,549647	33	15
5	QUSA - E1	-33,43875404	-70,558510	15	5
6	QUSA - E2	-33,43875404	-70,558510	15	5
7	QUSA - F1	-33,43808197	-70,569228	22	9
8	QUSA - F2	-33,43808197	-70,569228	22	9
9	QUSA - G	-33,43273801	-70,557388	15	7
10	QUSA - H1	-33,43453702	-70,555511	13	5
11	QUSA - H2	-33,43453702	-70,555511	13	5
12	QUSA - I1	-33,43452604	-70,555467	13,5	5
13	QUSA - I2	-33,43452604	-70,555467	13,5	5
14	QUSA - J	-33,56927902	-70,632212	15	5
15	QUSA - J Ramas	-33,56927902	-70,632212	15	5
16	QUSA - K	-33,56908903	-70,632253	17	6
17	QUSA - K Ramas	-33,56908903	-70,632253	17	6

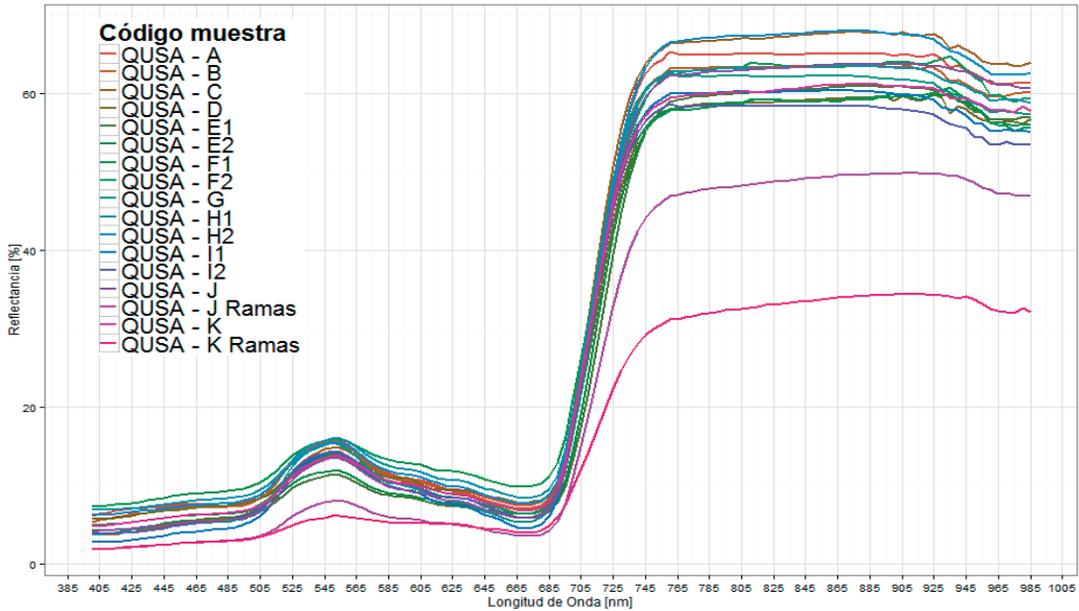


Figura 2. Firmas Espectrales Foliares de *Quillaja saponaria* (QUSA) adquiridas con sensor ASD HH según árbol muestreado (A-K), N° de muestras extraídas (1-2) y la respuesta espectral de ramas apiladas (Ramas) para las muestras QUSA - J y QUSA - K.

el azul [420-480 nm]. Del mismo modo, en el NIR se aprecia una caída a partir de los 920 nm, directamente relacionada con el contenido de agua en el mesófilo, según lo reportado por Sims y Gamon (2003). La región del *red edge* [690-740 nm] presenta la menor variabilidad en todo el intervalo analizado (VNIR una variación inferior al 5%). Entre las muestras, QUSA - E se desplaza marcadamente hacia la derecha del *red edge* y al mismo tiempo tiene una baja reflectancia en el VIS dado por una condición sanitaria pobre (hojas levemente amarillas y con menor turgencia) en relación al resto de las muestras analizadas. Estas propiedades responden a patrones espectrales característicos de la especie, condición clave para focalizar el estudio de la especie a una escala de análisis más gruesa (i.e. dosel).

Al analizar la respuesta espectral de ramas apiladas en la Figura 2 (QUSA - J Ramas y QUSA - K Ramas), existe una menor reflectancia para todo el rango analizado, explicado principalmente por la participación de otros componentes (i.e. peciolo, corteza) y por la disposición y geometría intrínseca de las hojas en la rama. Esto se debe a que la arquitectura y posición de las hojas en el árbol obedecen a una geometría más compleja (Ollinger, 2011) y

provocan una variación en la firma espectral por la dispersión diferencial de fotones al interactuar con peciolo, hojas y ramas. Por otro lado, al comparar la respuesta de los individuos -J y -K, se evidencia una similitud del espectro tanto en forma como en magnitud en la región del VIS. En cambio en el NIR es determinante la forma más que la magnitud del patrón de reflectancia. Finalmente, ambos esquemas de medición (foliar y ramas) mantienen, en cierta medida, las características de la especie descritas anteriormente en la región del azul y en las bandas de absorción de agua.

3.2. Respuesta espectral de la cámara hiperespectral

En la Figura 3 se presenta la imagen captada por la cámara hiperespectral en RGB, en esta se delimitaron tres estados fitosanitarios detectados en las hojas: sana (1), seca (2) y muerta (3). Para cada región se elaboró la firma espectral promedio del conjunto de píxeles, resultando en tres curvas tratadas con una pérdida del *red-edge* en las hojas secas y hoja muerta. Al comparar estas curvas con las firmas adquiridas con el ASD (promedio, Figura 2, excluyendo ramas), se establece un

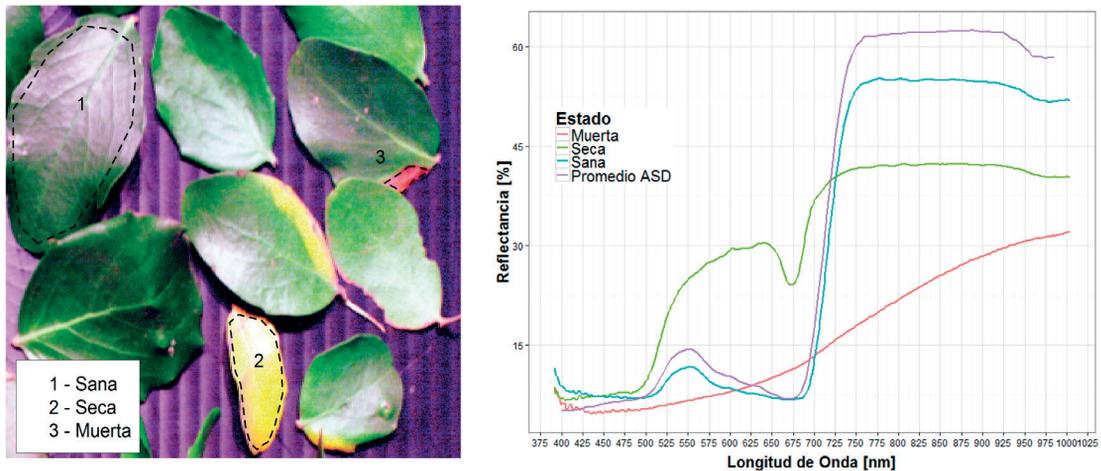


Figura 3. A la izquierda composición en RGB [684,69, 551,52, 451,15 nm] obtenida con la cámara PDF-65-V10E de hojas de *Quillaja saponaria* y a la derecha las firmas espectrales asociadas a los tres estados fitosanitarios: 1- Sana (azul), 2- Seca (verde) y 3- Muerta (roja). Además se grafica la firma espectral promedio obtenida con el ASD HH (púrpura).

grado de similitud con la condición sana del quillay, respondiendo a las características descritas anteriormente de la especie y además afirmando el protocolo de adquisición de firmas espectrales foliares propuesto.

En la Figura 4 se presenta cada índice espectral calculado para la imagen de la cámara PDF-65-V10E, entre ellos el índice PSRI (Merzlyak *et al.*, 1999) detectó las hojas secas respondiendo al estrés producido por un aumento en la concentración

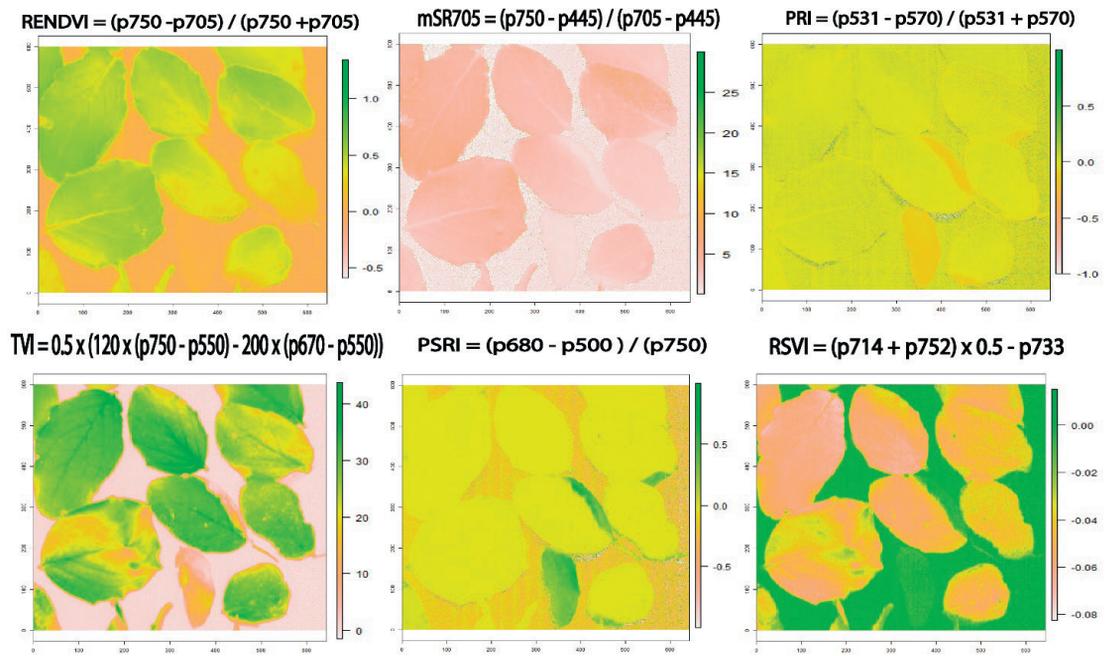


Figura 4. Índices espectrales de vegetación y su banda espectral en longitudes de onda (p): RENDVI (*Red Edge Normalized Difference Vegetation Index*), mSR705 (*Modified Red Edge Simple Ratio Index*), PRI (*Photochemical Reflectance Index*), TVI (*Triangular Vegetation Index*), PSRI (*Plant Senescence Reflectance Index*) y RSVI (*Red-edge Vegetation Stress Index*).

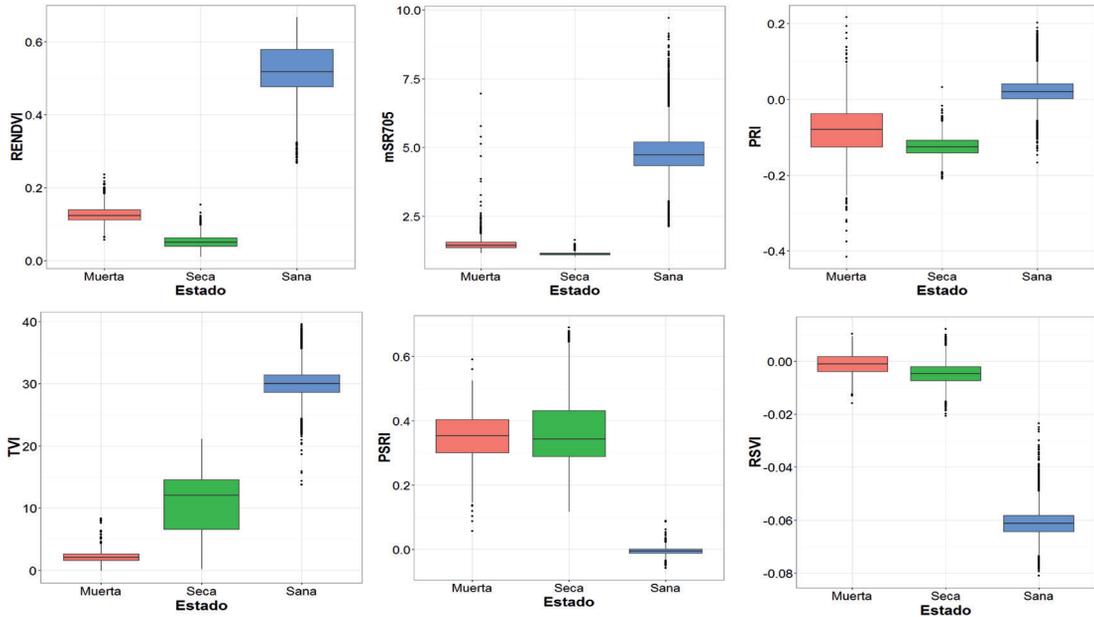


Figura 5. Gráficos de dispersión de los índices espectrales de vegetación para la condición muerta, seca y sana de *Quillaja saponaria*. Los índices son: RENDVI (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index), mSR705 (Modified Red Edge Simple Ratio Index), PRI (Photochemical Reflectance Index), TVI (Triangular Vegetation Index), PSRI (Plant Senescence Reflectance Index) y RSVI (Red-edge Vegetation Stress Index).

de carotenos. Por otra parte, el índice RENDVI detectó los sectores de hojas sanas o vigorosas, explicado por una mayor concentración de clorofila. Por último, el índice TVI delimita de manera específica la variabilidad en las hojas muestreadas y el grado de diferenciación entre los distintos estados sanitarios. Finalmente, se evaluó la distribución de cada índice según estado sanitario demarcado, resultando en los gráficos de caja en la Figura 5. Para cada clase (estado) se muestra el grado de variación del índice para el conjunto de píxeles y destaca claramente el contraste que existe entre la condición sana y las condiciones desfavorables (seca y muerta).

Es relevante considerar que la vegetación posee una fuerte anisotropía especular (Asner *et al.*, 1998) y los resultados obtenidos pueden estar influenciados por la variabilidad óptica del tejido vegetal, la morfología y la rugosidad del quillay (i.e. convexidad, presencia de venas, estructura coriácea), así como también por la geometría de iluminación y observación de la cámara hiperespectral. Esto se visualiza al comparar la Figura 3 y Figura 4, ya que la posición y curvatura de las hojas modifica la reflectancia de la luz y, consecuentemente, el valor de los índices espectrales.

Además, la variación de cada clase (estado) depende de la iluminación recibida en el píxel y por ejemplo, la muestra sana (1) tiene un sector de alto y bajo brillo, ocasionando que el índice RENDVI disminuya en el sector de mayor brillo, y al mismo tiempo, presentando una mayor variabilidad.

4. Conclusión

La utilización de métodos estandarizados para adquirir firmas espectrales es un proceso fundamental para la validación de datos adquiridos desde sensores remotos, siendo relevante catalogar en librerías espectrales los distintos materiales de la superficie terrestre. Actualmente, la tecnología hiperespectral brinda la opción de detectar remotamente especies de alto potencial económico y ambiental, es por esto que aquí se entrega la primera caracterización de la especie *Quillaja saponaria*, valorada por su alta concentración en saponinas y por ser un ejemplar importante del bosque nativo en Chile. Con esta información se podrá generar nuevos estudios para conocer el impacto ambiental sobre la población, de manera de evitar la pérdida de bosque nativo por actividades antrópicas o por factores naturales por procesos de

desertificación. El beneficio de utilizar firmas espectrales radica en su capacidad para automatizar el monitoreo del quillay de forma remota, relacionando aquellas bandas espectrales que mejor expliquen su estado funcional en el ecosistema. A través de índices espectrales como el PSRI o el TVI, se podría alertar tempranamente sobre las condiciones desfavorables para el desarrollo de la especie, lo que potencialmente podría contribuir a su monitoreo y manutención en el ambiente urbano y natural. Por otro lado, esta información a escala foliar debe ser validada para ser utilizada a escalas de estudio más gruesas (i.e. dosel), porque la reflectancia de las hojas es una proporción de la respuesta espectral del árbol, compuesta por corteza y otros elementos (sombra) que pueden generar una firma espectral diferente, como en el caso de ramas apiladas del quillay. La consecuencia directa de esta caracterización espectral se relaciona con la generación de estrategias de monitoreo del estado físico y sanitario de la especie en ambientes naturales y urbanos, con el sentido de optimizar los recursos económicos destinados para su manutención en el territorio.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto Fondecyt 1140319 “Vegetation Knowledge-based Indicators for Urban Sustainable Planning” de CONICYT Chile. Los autores también agradecen a AGSEN y a SPECIM por contribuir con la imagen obtenida con la cámara hiperespectral PDF-65-V10E.

Referencias

Blackburn, G., Milton, E. J. 1995. Seasonal variations in the spectral reflectance of deciduous tree canopies. *International Journal of Remote Sensing*, 16(4), 37-41. <https://doi.org/10.1080/01431169508954435>

Broge, N. H., Leblanc, E. 2001. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 156-172. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00197-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00197-8)

Díaz-Forestier, J., Gómez, M., Montenegro, G. 2009. Nectar volume and floral entomofauna as a tool for the implementation of sustainable apicultural management plans in *Quillaja saponaria* Mol. *Agroforestry Systems*, 76(1), 149-162. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9193-7>

Donoso, S., Peña, K., Pacheco, C., Luna, G., Aguirre, A. 2011. Respuesta fisiológica y de crecimiento en plantas de *Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba* sometidas a restricción hídrica. *Bosque*, 32(2), 187-195. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000200009>

Guo, S., Kenne, L. 2000. Structural studies of triterpenoid saponins with new acyl components from *Quillaja saponaria* Molina. *Phytochemistry*, 55(5), 419-428. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00340-X](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00340-X)

Hassan, A. M., Lee, H. 2015. Land Use Policy Toward the sustainable development of urban areas: An overview of global trends in trials and policies. *Land Use Policy*, 48(1), 199-212. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.04.029>

Hernández, A., Miranda, M. D., Arellano, E. C., Dobbs, C. 2015. Landscape trajectories and their effect on fragmentation for a Mediterranean semi-arid ecosystem in Central Chile. *Journal of Arid Environments*, 127(1), 74-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.10.004>

Jacquemoud, S., Baret, F. 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34(2), 75-91. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90100-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90100-Z)

Knipling, E. B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1(3), 155-159. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)

Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., Rakitin, V. Y. U. 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106(1), 135-141. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x>

Milton, E. J., Schaepman, M. E., Anderson, K., Kneubühler, M., Fox, N. 2009. Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 113(Suppl. 1), S92-S109. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.001>

Olivera-Guerra, L., Mattar, C., Galleguillos, M. 2013. Estimation of real evapotranspiration and its variation in Mediterranean landscapes of central-southern Chile. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 28(1), 160-169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.012>

Ollinger, S. V. 2011. Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist*, 189(2), 375-394. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03536.x>

Pfützner, K., Bartolo, R., Carr, G., Esparon, A., Bollhöfer, A. 2011. Standards for reflectance spectral measurement of temporal vegetation plots. Supervising Scientist Report 195, Supervising Scientist, Darwin NT.

- Rasaiah, B. A., Jones, S. D., Bellman, C., Malthus, T. J., 2014. Critical metadata for spectroscopy field campaigns. *Remote Sensing*, 6(5), 3662-3680. <https://doi.org/10.3390/rs6053662>
- Rodríguez, R., Matthei, S., Quezada, M. 1983. Flora arbórea de Chile. Concepción, Chile. Editorial Universidad de Concepción. 408 p.
- Schulz, J. J., Cayuela, L., Echeverría, C., Salas, J., Benayas, J.M.R. 2010. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008). *Applied Geography*, 30(3), 436-447. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.12.003>
- Sims, D. A., Gamon, J. 2003. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 84(4), 526-537. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00151-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00151-7)
- Sims, D. A., Gamon, J. A. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 337-354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Sun, H-X., Xie, Y., Ye, Y-P. 2009. Advances in saponin-based adjuvants. *Vaccine*, 27(12), 1787-1796. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2009.01.091>