



Caracterización de niveles de intervención antrópica en ecosistemas de páramo utilizando análisis de imágenes multiespectrales

Characterization of anthropic intervention levels in paramo ecosystems by multispectral image analysis

Omar Enrique Peláez-Martínez¹, Gloria Yaneth Flórez-Yepes²,

Óscar Cardona-Morales³

Resumen

La vegetación juega un papel importante como indicador del estado de los ecosistemas de humedales. En ese sentido, el sensoramiento remoto brinda la posibilidad de determinar el estado del ecosistema y permite reducir los tiempos de evaluación de los humedales. No obstante, el uso de imágenes satelitales en regiones de alta montaña es limitado por el alto grado de nubosidad. Adicionalmente, la resolución espacial no permite una adecuada clasificación del tipo de vegetación, generando dificultades para realizar análisis de terreno con escalas a nivel de detalle. En este trabajo se hace una evaluación de humedales altoandinos empleando imágenes adquiridas desde una aeronave remotamente tripulada. La zona de estudio está ubicada en el sector El Ocho, zona amortiguadora del Parque Nacional Natural Los Nevados, en un ecosistema de páramo con una altitud de 3.500 m.s.n.m., y con un área de 7,4 ha. La metodología para la realización del presente proyecto se compone de tres pasos: a) el humedal se dividió en cuatro sectores según su nivel de afectación antrópica, y se calculó el índice de Margalef en una parcela aleatoria; b) se obtuvieron imágenes aéreas mediante un ART (campo visible y multiespectrales), para posteriormente calcular el índice verde en todo el humedal y compararlo con el NDVI de sectores de prueba, y finalmente, c) se realizó una confrontación entre el índice verde con el estado de deterioro ambiental y el NDVI. Como resultado, se obtuvo una relación entre los valores del índice verde y su correlación con los niveles de intervención del ecosistema.

Palabras clave: teledetección, ecosistema humedal, imágenes multiespectrales, índices de vegetación.

1. Ingeniero forestal. Grupo de Investigación en Desarrollos Tecnológicos y Ambientales, Universidad Católica de Manizales. Correo: omar.pelaez@ucm.edu.co.

2. Mg en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Grupo de Investigación en Desarrollos Tecnológicos y Ambientales, Universidad Católica de Manizales. Correo: gyflorez@ucm.edu.co.

3. PhD en Ingeniería Automática. Grupo de Investigación en Desarrollos Tecnológicos y Ambientales, Universidad Católica de Manizales. Correo: ocardonam@ucm.edu.co.





Abstract

Vegetation plays an important role as an indicator of the wetland ecosystem state. In that regard, remote sensing provides the possibility to determine the ecosystem state, allowing reducing the time consumption of wetland assessment. Nonetheless, satellite images from high mountain regions are not commonly used because those images present a high level of cloudiness. Besides, the spatial resolution does not allow an adequate classification of the vegetation types, generating several difficulties to perform a ground analysis on high detailed-scale. In this work, it is presented an assessment of high-Andean wetlands using multispectral images acquired from an unmanned aerial vehicle. The study region is located at El Ocho sector, the buffer zone of the Los Nevados National Natural Park, in wasteland ecosystem with an altitude of 3500 m above sea level, and 20 ha of area. The methodology comprises three stages: a) The wetland was divided into four sectors according their anthropic affectation level; b) the vegetation indexes were obtained from aerial images captured using a RPAS (visible and multispectral), and then, the green index was calculated in the wetland and compared against NDVI in testing patches; Finally, c) it was performed the correlation between the green index and the environmental damage. As a result, the computed indexes showed a high correlation with the ecosystem intervention levels.

Keywords: *Remote Sensing, wetland, multispectral image, vegetation index.*





Introducción

La vegetación es uno de los recursos naturales más importantes en el momento de evaluar los ecosistemas de humedales, pues se convierte en un indicador fundamental de su estado. Para esto, es necesario disponer de información cuantitativa frente a su diversidad y distribución. Los humedales altoandinos, especialmente aquellos ubicados en zonas de páramo, poseen una vegetación particular, tanto por las condiciones climáticas como por las edáficas, que hacen que tengan características especiales y que muchos se encuentren en vías de extinción.

Muchos factores pueden influir en el estado de los humedales, como la presencia de sistemas productivos aledaños a estos ecosistemas, los cuales se ven afectados principalmente por las malas prácticas culturales asociadas principalmente al uso de agroquímicos y el tratamiento inadecuado del suelo para la producción. Estos factores tienen una injerencia directa sobre la biodiversidad, ocasionando homogeneidad en los procesos de regeneración natural, así como la pérdida de especies valiosas y difíciles de recuperar.

La vegetación, como indicador del estado del humedal, permite conocer de manera rápida el comportamiento que está tomando el ecosistema. En este sentido, donde hay más humedad encontramos especies asociadas a familias como la Poaceae y la Plantaginaceae, y a otras que contribuyen altamente a la regulación hídrica del humedal. Así mismo, en los humedales más intervenidos encontramos otro tipo de especies que se encuentran de manera más homogénea dentro del humedal.

Tradicionalmente, la discriminación de especies para cartografía florística requiere un trabajo de campo intenso, que incluye información taxonómica y la estimación visual del porcentaje de cobertura de cada especie. No obstante, esta tarea implica costos elevados y largas jornadas de trabajo, las cuales, en algunos casos, son imposibles de llevar a cabo por la inaccesibilidad de terreno, incluyendo la posible afectación antrópica que genera el mismo levantamiento de información de campo (Lee & Lunetta, 1995). El sensoramiento remoto, por otra parte, permite discriminar de forma práctica y económica los parámetros biofísicos y bioquímicos de las especies del humedal y facilita el monitoreo de la zona de forma más eficiente (Adam, Mutanga & Rugege, 2010). Las plantas de los humedales y sus propiedades no son fácilmente detectables como las plantas de otros tipos de ecosistemas, debido a que la vegetación del humedal exhibe alta variabilidad espectral y espacial que, a su vez, son ocasionadas por gradientes ambientales pronunciados, lo cual produce una demarcación aguda y ecotonos cortos entre individuos (Adam & Mutanga, 2009). Adicionalmente, la cubierta de la vegetación del humedal tiende a ser muy similar y se puede confundir por la reflectancia del suelo subyacente, el régimen hidrológico y el vapor atmosférico (Yuan & Zhang, 2006). Por lo tanto, la cartografía de vegetación terrestre usando teledetección puede no ser factible para distinguir vegetación de humedal porque las bandas de infrarrojo cercano y medio son atenuadas por las ocurrencias de agua y suelo húmedo (Zomer, Trabucco & Ustin, 2009), factores que se presentan en la zona de estudio con mucha frecuencia.





En ese sentido, muchos autores han realizado estudios de humedales empleando diferentes tipos de índices de vegetación, con la finalidad de encontrar aquel que permita una mayor clasificación de la vegetación. Comúnmente, el más utilizado es el índice de vegetación normalizado (NDVI), dado que permite relacionar de forma efectiva las bandas de rojo en infrarrojo donde se presenta un gradiente en la reflectancia de la vegetación (Guo, Li, Sheng Xu, & Wu, 2017). No obstante, un factor relevante en los humedales altoandinos es la disponibilidad de imágenes multiespectrales provenientes de satélites debido a la cantidad de nubosidad de la zona, al encontrarse en un área de influencia de ecosistemas glaciares y a una altitud superior a los 3.000 m.s.n.m. Por tal razón, en este trabajo se hace uso de imágenes aerotransportadas para mejorar la claridad de la imagen en el área de estudio y la resolución espacial, dado que los humedales altoandinos no tienen extensas coberturas terrestres. Otro aspecto relevante es el creciente uso de aeronaves remotamente tripuladas (ART), las cuales permiten un monitoreo periódico con sensores ópticos RGB y cámaras multiespectrales. Sin embargo, como se mencionó, el procesamiento de dichas imágenes se torna complejo porque la reflectancia de la vegetación de humedal es muy homogénea en las bandas del rojo y el infrarrojo cercano.

En este artículo se presenta una metodología para cuantificar el nivel de intervención antrópico de los humedales empleando técnicas de teledetección. Para tal efecto, se propone el uso del índice de Margalef para cuantificar la biodiversidad en el humedal y, por ende, tener un estimativo de la intervención antrópica generada principalmente por actividad ganadera. Para establecer una correlación respecto al sensoramiento remoto, para el procesamiento de imágenes se propone un análisis multitemporal empleando dos tipos de sensores, UltraCam D y DJI Phantom. Las imágenes fueron adquiridas en el 2008 y el 2017, respectivamente. Para hacer las imágenes comparables, se realizó una calibración radiométrica empleando el método de corrección lineal empírico (ELC) y se procedió a calcular el NDVI en contraste con el índice verde (IV), teniendo como base tanto la coloración típica de la vegetación de humedal como la posibilidad de facilitar el proceso de monitoreo con cámaras RGB y ART convencionales. Por último, se comparó el IV entre ambas imágenes, y por medio de una clasificación basada en umbralización se determinaron las zonas con mayores cambios que están relacionadas con la intervención antrópica encontrada. La zona de estudio está ubicada en el sector El Ocho, zona amortiguadora del Parque Nacional Natural Los Nevados, en un ecosistema de páramo con una altitud de 3.500 m.s.n.m. y un área de 7,4 ha.

Desarrollo teórico y metodológico

El enfoque metodológico del artículo se describe en la figura 1, y se compone de las etapas de calibración (geométrica y radiométrica), estimación de índices espectrales asociados a vegetación, y la caracterización mediante el índice de Margalef para cuantificar un estado de biodiversidad del ecosistema.



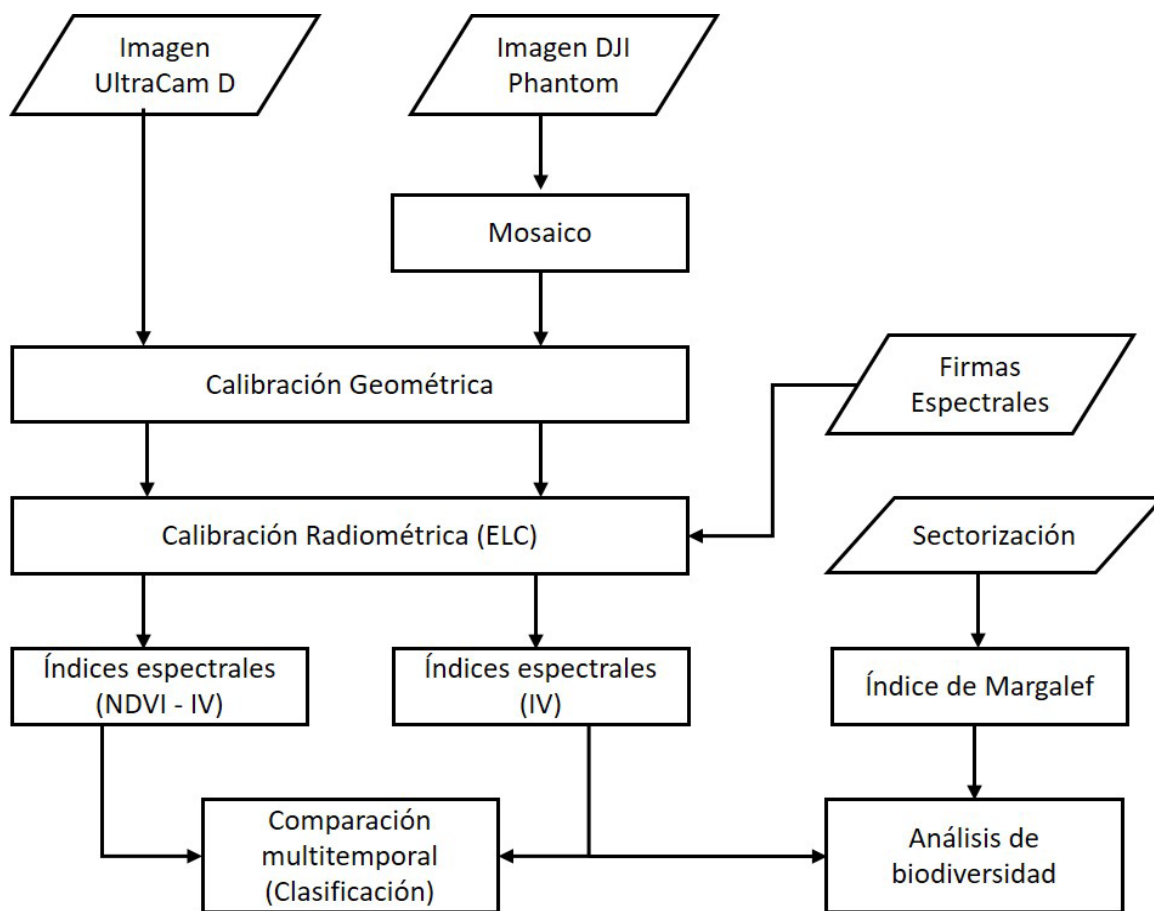


Figura 1. Enfoque metodológico
Fuente: elaboración de los autores.

Sectorización y cálculo del índice de Margalef

El área de estudio corresponde a 7,4 hectáreas, dentro de las cuales se hizo una sectorización y se dividió el humedal en cuatro sectores (figura 2). Esta sectorización se realizó teniendo en cuenta los criterios de: a) tipos de coberturas, b) vegetación asociada a espejos de agua y vegetación asociada a turbera, y c) vegetación asociada a intervención antrópica.

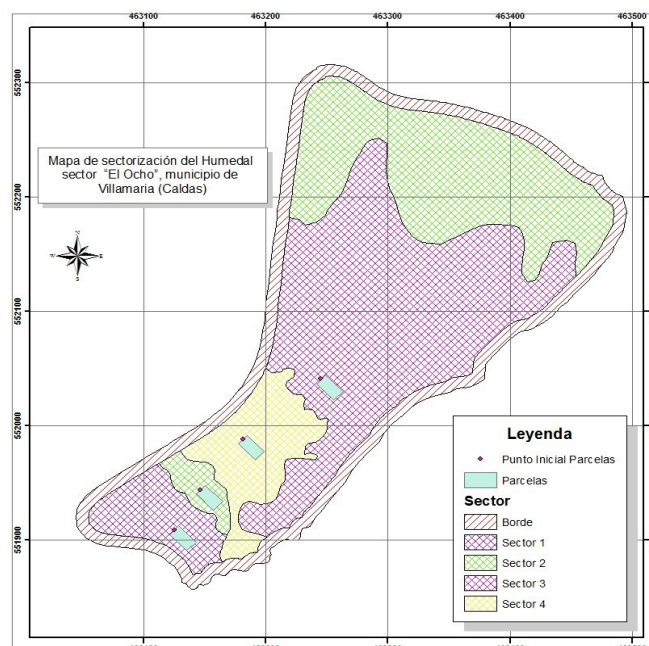


Figura 2. Parcelas por sectorización antrópica del humedal
Fuente: elaboración de los autores.





El estudio florístico se realizó a partir de la evaluación de cuatro parcelas temporales de 200 metros cuadrados (equivalentes al 1% del área de la zona de estudio), las cuales se georreferenciaron y espacializaron en las imágenes aéreas. El inventario de las parcelas se realizó al cien por ciento, registrando la taxonomía vegetal de cada individuo, lo que permitió establecer el número de ejemplares por familias y por especie.

El índice de Margalef se aplicó a través de la fórmula:

$$D_{Mg} = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Donde

S = Número de especies

N = Número total de individuos

Como se puede observar en la figura 3, el sitio donde se encuentra la mayor biodiversidad es el sector 1, que corresponde a la parte alta del humedal, y el sitio con el índice de Margalef más bajo en el sector 4, correspondiente a la parte baja, el cual se caracteriza por presentar rastros de afectación antrópica por pastoreo, con la secuela del establecimiento de gramíneas. El índice general de biodiversidad para las cuatro parcelas del área de estudio es de 0,79, lo cual indica que, en términos generales, es un humedal con un alto grado de biodiversidad.

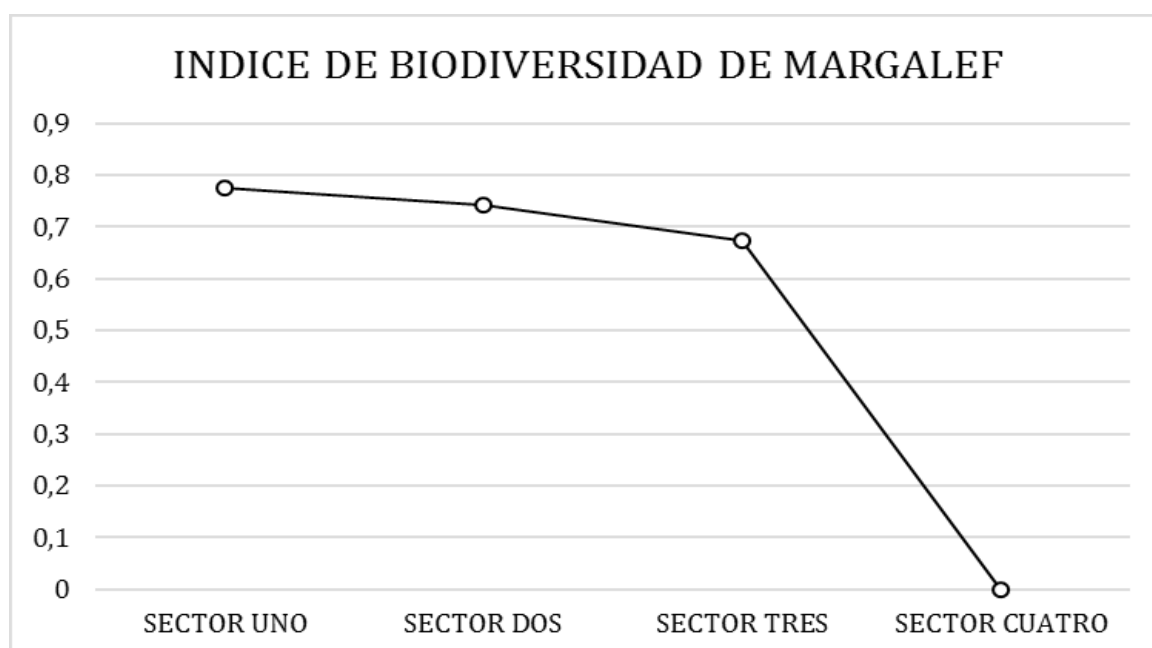


Figura 3. Índice de biodiversidad por sectores

Fuente: elaboración de los autores.



Los sectores presentan las siguientes características:

Sector 1 (área parte alta): con vegetación asociada a un espejo de agua de aproximadamente 20 metros cuadrados (figura 4a). En esta zona se encontraron siete familias con un índice de diversidad de 0,77, lo que indica que el humedal se encuentra en buenas condiciones de biodiversidad. En esta zona, el humedal no tiene afectaciones antrópicas. La vegetación asociada está representada por especies, en su mayoría, arbustivas. Las familias que poseen mayor número de especies son Hypericaceae y Ericaceae. Dentro de las especies que más sobresalen, aledañas a este espejo de agua, está el pajonal (*Calamagrostis effusa*). En este sector se encontró el índice de biodiversidad más alto en relación con toda la zona estudiada.

Sector 2 (posterior al sector 1): con vegetación en transición entre el área conservada y el área intervenida (figura 4b). En este sector se determinó un índice de biodiversidad de 0,74, un poco menos que el sector uno, con una abundancia marcada de la familia Asteraceae, con diferentes especies; el más abundante de esta familia es el *Pentacalia vaccinioides*. Igualmente se destaca, en la familia Hypericaceae, la especie *Hypericum goyanesii*, con una presencia muy marcada en este sector. De la familia Asteraceae se encontraron cinco especies diferentes, mientras que de las familias Hypericaceae, Melastomataceae y Ericaceae se encontró una especie, con diferente número de individuos.

Sector 3 (posterior al sector 4): con presencia de humedal tipo turbera (figura 4c). Este sector se caracteriza por presentar pajonales, los cuales son utilizados por conejos y cusumbos como madrigueras o pasaderos. Un aspecto importante es la alta presencia de humedad con vegetación indicadora de esta, como el plántago y el pajonal. El índice de biodiversidad para este sector fue de 0,67. Este sector presenta menor índice de biodiversidad que los anteriores, y es posible que esto se deba tanto a la presencia de pajonales y a la alta presencia de *Hypericum goyanesii* y de *Pentacalia vaccinioides*, como a la cercanía al sistema productivo de ganadería que se encuentra dentro del humedal. La familia Hypericaceae es la que tiene mayor abundancia de especies (con un total de dos), una de ellas, con más de 34 individuos (*Hypericum goyanesii*). La familia Asteraceae en este sector muestra una sola especie con 40 individuos, y existe una alta influencia del *Pentacalia vaccinioides*. Las especies que más se encuentran asociadas al contenido de humedad o a espejos de agua son los pajonales y el plántago.

Sector 4: el principal sistema productivo que afecta a los humedales altoandinos es el ganadero extensivo. En gran parte del humedal estudiado hay presencia de ganadería (figura 4d), y los principales impactos que se evidencian son los siguientes:

- Disminución de la biodiversidad: esta disminución se da principalmente por el ramoneo y pisoteo del ganado en la zona del humedal, que causan compactación del suelo y disminución de la posibilidad de regeneración natural, ya que la compactación del suelo, a través del tiempo, dificulta la penetración del agua, lo que hace que los humedales tiendan a desaparecer. En la medida en que aumenta la escorrentía, igualmente aumenta el lavado de nutrientes y la pérdida de la capacidad de regulación hídrica, que es una de las principales funciones de estos ecosistemas.
- Erosión por pata de vaca: esta es una de las problemáticas más severas que ocurren en la zona de estudio, pues este tipo de erosión ocasiona terraceo en el suelo. El área





de influencia directa del humedal presenta una leve pendiente, lo que favorece que los procesos erosivos no sean tan severos.

- Homogeneidad vegetal: cuando se amplía la frontera agropecuaria, eliminando la vegetación natural, los procesos de regeneración se vuelven muy homogéneos. Este es el caso en los sectores 2 y 3 del área de estudio, donde especies como *Pentacalia vaccinioides* aparecen de manera muy homogénea, especialmente cerca de la zona de potrero. Lo mismo se observa con las especies de la familia Hypericaceae, las cuales presentan una alta homogeneidad.
- Generación de residuos orgánicos y líquidos: la presencia de ganado dentro de los humedales hace que aumenten los residuos, tanto por heces fecales, que pueden incrementar los coliformes, como por el movimiento del suelo y del agua al entrar al humedal, lo cual causa una mayor sedimentación. Cuando los humedales tienen alta sedimentación, tanto por residuos sólidos y líquidos como por la presencia de agroquímicos producto de la fertilización de los pastos o del tratamiento de los cultivos de papa, también puede ocasionarse eutrofización. Para el caso del humedal estudiado, a pesar de que el número de vacas por hectárea es reducido, sí se puede observar una gran cantidad de excremento que afecta de manera directa su estado.
- Secamiento del humedal: finalmente, este es el mayor impacto ambiental que se genera. En la zona de estudio es evidente que el área afectada por la ganadería ha reducido el contenido de humedad del suelo y se nota una diferencia significativa entre el área afectada y aquella no afectada por este sistema productivo. Esto, unido al contenido de humedad reducido, también se nota en la pérdida de regeneración natural y de materia orgánica en el suelo, lo que disminuye la posibilidad de una buena infiltración y, por lo tanto, genera un aumento en el secamiento del humedal.



(a) Sector 1



(b) Sector 2



(c) Sector 3



(d) Sector 4

Figura 4. Fotografías de la vegetación típica de cada parcela

Fuente: elaboración de los autores.

Adquisición y procesamiento de las imágenes

Equipos: en la realización del proyecto se utilizaron los equipos del laboratorio de espectrometría de la Universidad Católica de Manizales, en especial el ART y los espectrómetros (figura 5). Los parámetros de los sensores utilizados (UltraCam D y DJI Phantom) se muestran en la tabla 1.



Figura 5. Fotografías de los equipos del laboratorio de espectrometría: espectrómetro (izq.) y UAV Phantom 4 Advanced (der.)

Fuente: elaboración de los autores.

Tabla 1. Parámetros de los sensores utilizados

Sensor	Resolución radiométrica	Banda N°	Ancho de la banda (nm)	Nombre de la banda
Vexcel UltraCam D	12 bits	1	410-540	Azul
		2	480-630	Verde
		3	580-700	Rojo
		4	690-1000	NIR
DJI Phantom (Sony)	8-10 bits	1	400-560	Azul
		2	460-650	Verde
		3	560-700	Rojo

Fuente: elaboración de los autores.





Procesamiento digital de las imágenes: en esta etapa se transformaron los datos a los formatos y sistemas de referencia requeridos para el estudio. Las fotografías captadas por la cámara del DJI Phantom, al estar en formato *.jpg, fueron procesadas directamente por el software PIX4D (figura 6b). Luego los dos mosaicos y la imagen de la cámara UltraCam D fueron referenciados en el sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (en inglés, *Universal Transverse Mercator* [UTM]), región 18 norte (figura 6a).

Corrección radiométrica: se realizó a través del método de corrección lineal empírica (ELC, por la sigla en inglés de *Empirical Line Correction*). Este método permite realizar transformaciones radiométricas específicas por banda, entregando los valores en términos de reflectancia a nivel del suelo (corrección atmosférica) (Harris Geospatial Solutions, 2017) (figura 7). Para poder realizar de forma correcta este procedimiento de ELC, en campo se realizó la toma de firmas espectrales de: a) asfalto, b) agua, c) vegetación (*Espeletia argentea*), d) vegetación (*Holcus lanatus*) y e) suelo expuesto, empleando el espectrómetro Flame-T (VIS-NIR) de Ocean Optics.



Figura 6. Comparación en color verdadero de las imágenes corregidas (ELC) de las cámaras UltraCam D (2008, izq.) y DJI Phantom (2017, mosaico, der.)

Fuente: elaboración de los autores.

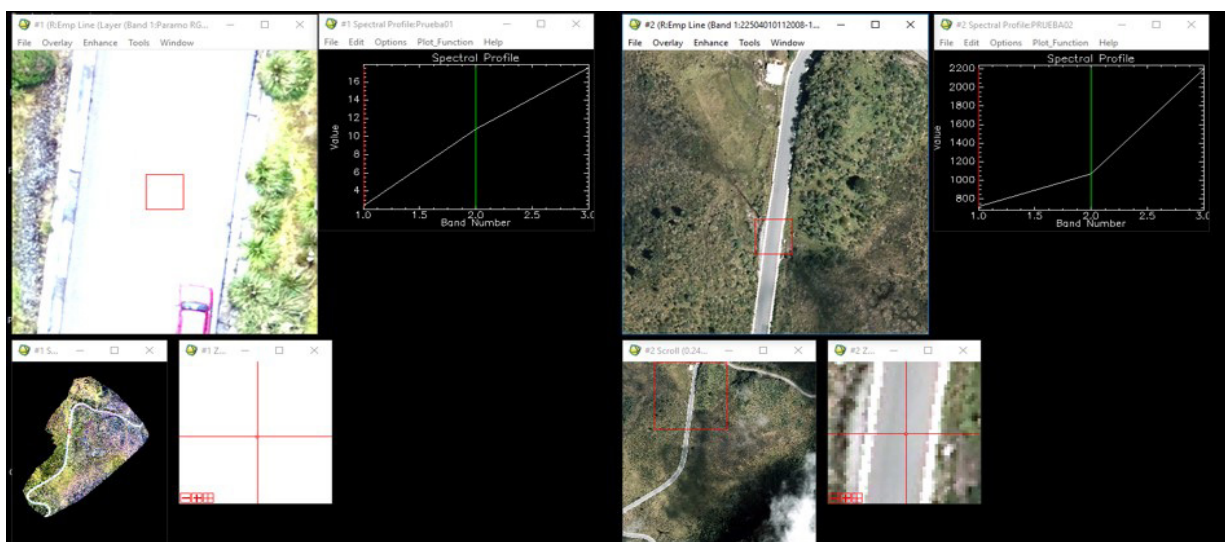


Figura 7. Comparación de las firmas espectrales de las imágenes multispectrales y de campo visible después de la calibración lineal empírica: DJI Phantom, 2007 (izq.) y UltraCam D, 2008 (der.)

Fuente: elaboración de los autores.





Caracterización y evaluación empleando índices espectrales

Los índices espectrales (IE) son el producto de la comparación de dos regiones del espectro electromagnético (EEM), generalmente discriminadas por ser las regiones de mayor y menor reflectancia en una curva espectral. Los índices espectrales de vegetación son un subtipo de IE, se calculan según la curva de reflectancia de la hoja en distintas regiones del EEM y nos entregan una medida cuantitativa que representa la biomasa o vigor vegetal. Esta medida se calcula a través de los niveles digitales (ND) que contiene la imagen (figura 8).

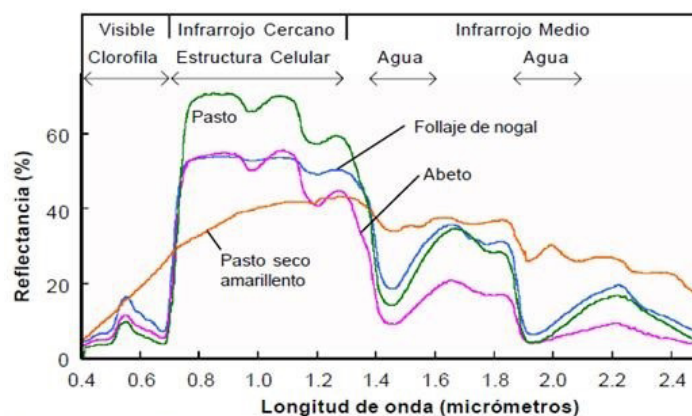


Figura 8. Espectros de reflectancia de diferentes tipos de vegetación verde según el elemento estructural de la hoja que interviene
Fuente: Smith (2012).

En el presente proyecto se utilizaron dos índices de vegetación: 1) el índice verde (IV), el cual se obtiene de la relación entre la banda roja y la banda verde, y 2) el índice de vegetación normalizado (NDVI, por la sigla en inglés de *normalized difference vegetation index*). Estos están diseñados para producir un valor simple que indica la cantidad o el vigor de la vegetación dentro de un pixel. Los altos valores de índices de vegetación identifican pixeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable.

Al comparar los índices espectrales de IV y NDVI (figura 9) se debe tener en cuenta que, a nivel de vegetación, lo primero, al trabajar en la región del visible, nos va a indicar la presencia del color verde como resultado de la actuación de los pigmentos. En cambio, el NDVI, al utilizar la región visible y la región del infrarrojo cercano, revela información a nivel estructural de las hojas (figura 8). En el área de estudio encontramos vegetación con gran cantidad de pigmentos verdes, pero también se encuentra vegetación con carotenos (especialmente las xantofilas), por lo cual el índice verde mostrará un comportamiento de sobrestimación hacia valores altos en vegetación con grandes cantidades de clorofila, pero que no necesariamente están realizando un proceso fotosintético activo; por el contrario, las plantas que estén fotosintéticamente activas, pero presenten gran cantidad de carotenoides, el índice verde las subestimarán.



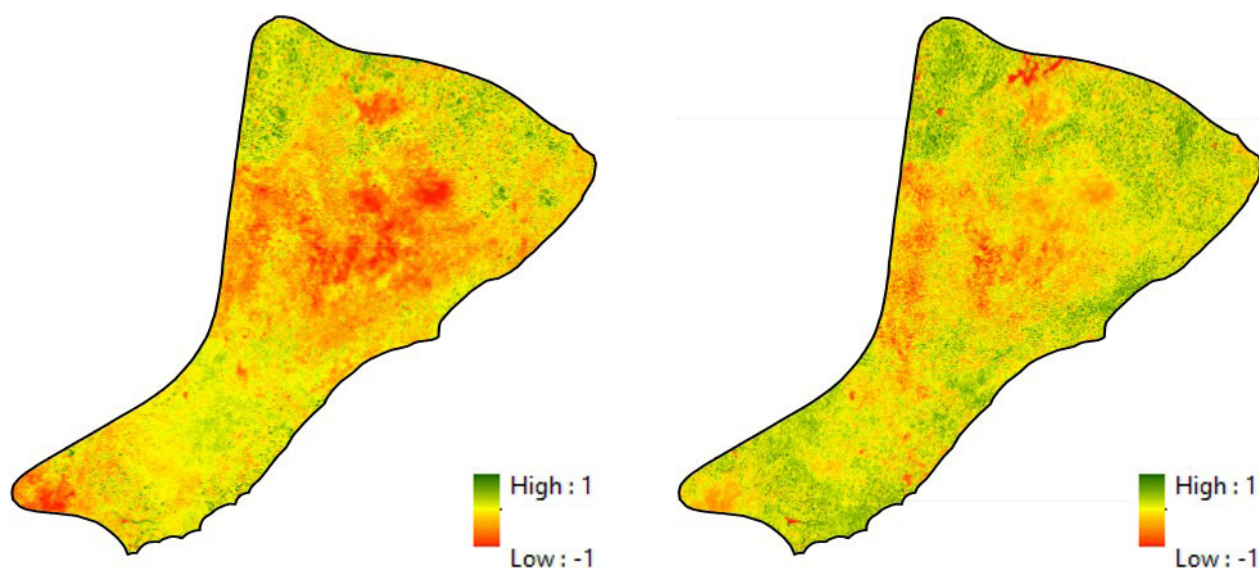
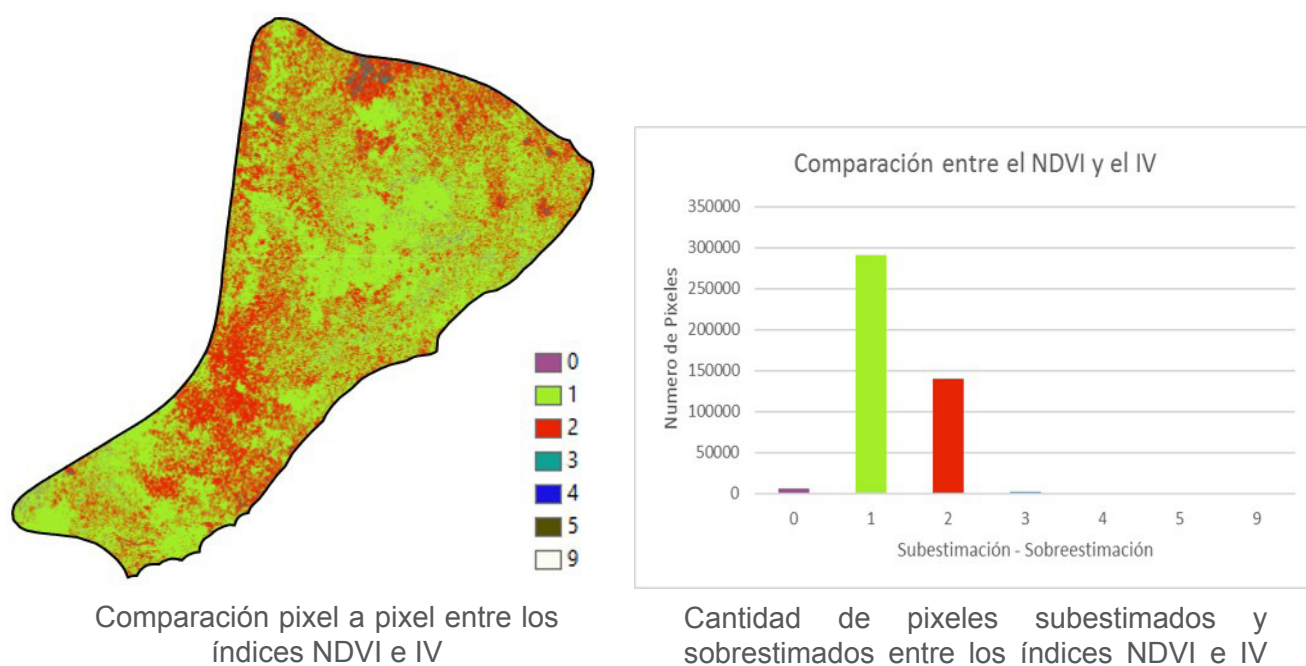


Figura 9. Comparación del índice verde normalizado ($R-G/R+G$) (izq.) y el NDVI ($NIR-R/NIR+R$) (der.) en imágenes corregidas (ELC) de la cámara UltraCam, 2008

Fuente: elaboración de los autores.



Comparación pixel a pixel entre los índices NDVI e IV

Cantidad de píxeles subestimados y sobrestimados entre los índices NDVI e IV

Figura 10. Resultado de la comparación del índice verde normalizado ($R-G/R+G$) y el índice NDVI en imágenes corregidas (ELC) de las cámaras UltraCam

Fuente: elaboración de los autores.

Validación del índice verde normalizado

Como se muestra en la figura 10, al realizar la comparación entre el IV y NDVI a nivel de píxeles (después de realizar una clasificación en 10 clases) se determinó que el índice verde realiza una sobrestimación entre una y dos clases, es decir los valores que el NDVI ubica en la clase 5 (correspondiente a valores de $-0,2$ a $0,0$), en el IV se ubican en la clase 6 (correspondiente a valores de $0,0$ a $0,2$).

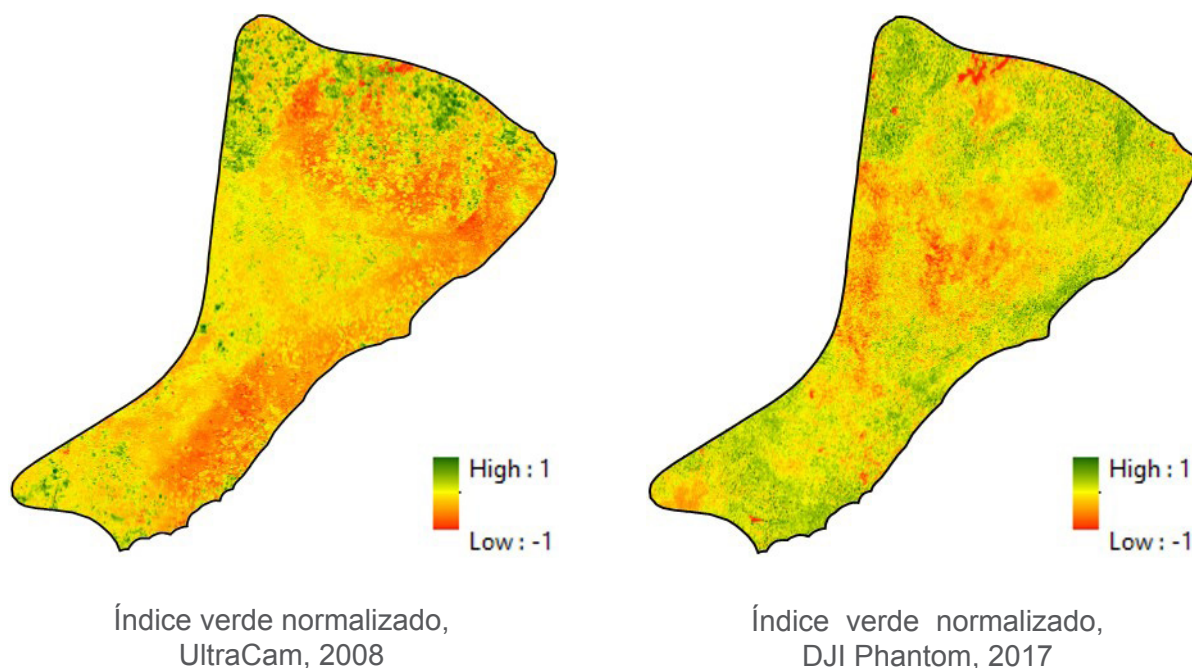


Figura 11. Comparación del índice verde normalizado (R-G/R+G) en imágenes corregidas (ELC) de las cámaras UltraCam y DJI
Fuente: elaboración de los autores.

Comparación multitemporal entre el índice verde normalizado

Para realizar la comparación del cambio que ha sufrido el humedal El Ocho por afectaciones antrópicas a partir del cálculo del índice verde normalizado, se procedió a clasificar cada periodo en 10 clases (tabla 2), y posteriormente se realizó una comparación de pixel a pixel (figura 11), obteniendo como resultado un deterioro general del humedal, donde algunos sectores alcanzaron a retroceder hasta 6 clases (tabla 3).

Tabla 2. Intervalo de clases por valores

Intervalo de clase	Número de clase
- 1,0 a -0,8	1
- 0,8 a -0,6	2
- 0,6 a -0,4	3
- 0,4 a -0,2	4
- 0,2 a 0,0	5
0,0 a 0,2	6
0,2 a 0,4	7
0,4 a 0,6	8
0,6 a 0,8	9
0,8 a 1,0	10

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Porcentaje de área que ha retrocedido a nivel de clase según el índice verde normalizado

Nº	Retroceso	Área m2	Porcentaje
1	-6	1,3485	0,002%
2	-5	85,6312	0,116%
3	-4	34.454,5709	46,580%
4	-3	35.366,1718	47,812%
5	-2	3.982,5229	5,384%
6	-1	58,6607	0,079%
7	0	9,4397	0,013%
8	1	10,1139	0,014%
9	2	0,8428	0,001%
Total		73.969,3024	100,00%

Fuente: elaboración propia.





Al realizar la correlación entre el IV y el índice de Margalef (figura 12), se observa que el análisis propuesto a través de los índices tiene una correspondencia para cada uno de los sectores establecidos. Esto indica que el IV puede ser utilizado como un indicador indirecto de la biodiversidad en el ecosistema de estudio. La baja correlación ($R^2 = 0,5511$) es producto del sesgo que introduce el bajo índice de Margalef para el sector 4, el cual es cercano a cero. No obstante, al descartar este sector la correlación alcanza un valor de $R^2 = 0,7665$, el cual indica que para los sectores donde no hay una alta intervención antrópica, los IV pueden ser un indicador adecuado asociado a la biodiversidad.

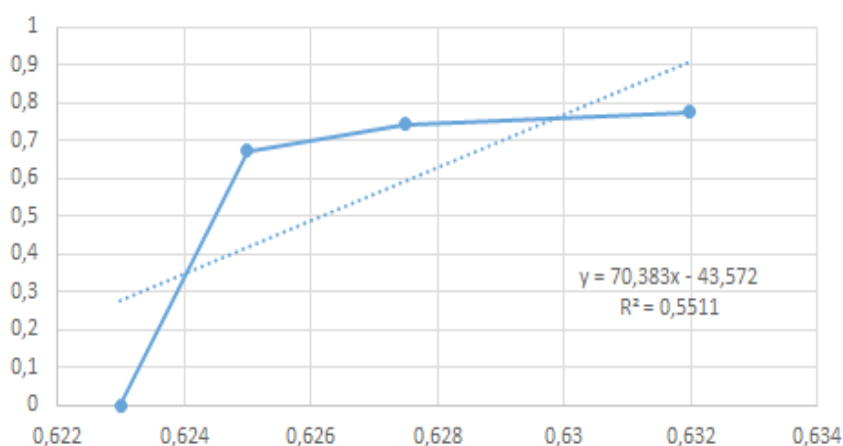


Figura 12. Relación entre el IV y el índice de Margalef

Fuente: elaboración de los autores.

Conclusiones

- El índice verde normalizado se constituye en una herramienta alterna que puede utilizarse en ausencia de la banda del infrarrojo cercano, con unos resultados cercanos a los entregados por el índice de vegetación normalizado. También brinda la posibilidad de ser utilizado para análisis de biodiversidad de forma indirecta, evitando así generación de factores de intervención antrópica ocasionados por los recorridos de campo y brindando información de zonas de difícil acceso.
- El humedal estudiado muestra dos procesos generales: el primero es la degradación general de la cobertura vegetal, pero también se ha presentado un fenómeno de isla en dos regiones que han consolidado los procesos de regeneración vegetal.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Católica de Manizales por el soporte financiero mediante el proyecto de investigación *Aplicabilidad de índices espectrales para la evaluación del estado de los humedales altoandinos empleando una cámara multiespectral soportada por un vehículo aéreo no tripulado. Caso de estudio complejo de humedales El Ocho y páramo de Letras*. Adicionalmente, extienden los agradecimientos al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y al Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF) por el permiso para el uso de los datos de la cámara UltraCam D.





Bibliografía

- Adam, E. & Mutanga, O. (2009). Spectral discrimination of papyrus vegetation (*Cyperus papyrus* L.) in swamp wetlands using field spectrometry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6), 612-620. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.04.004>.
- Adam, E., Mutanga, O. & Rugege, D. (2010). Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: A review. *Wetlands Ecology and Management*, 18(3), 281-296. <https://doi.org/10.1007/s11273-009-9169-z>.
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J. & Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. *Sensors (Switzerland)*, 17(4), 1-36. <https://doi.org/10.3390/s17040777>.
- Harris Geospatial Solutions (2017). *Atmospheric Correction*. Recuperado de <https://www.harrisgeospatial.com/docs/AtmosphericCorrection.html>.
- Lee, K. H. & Lunetta, R. S. (1995). Wetland detection methods. In J. G. Lyon & J. McCarthy (Eds.), *Wetland and environmental applications of GIS* (1st ed.). Boca Raton, CA: CRC Press.
- Smith, R. B. (2012). *Introduction to Hyperspectral Imaging*. Recuperado de <http://www.microimages.com/documentation/Tutorials/hyrspec.pdf>.
- Universidad Católica de Manizales (2017), *Equipos de espectrometría*. Recuperado de <http://www.ucm.edu.co/programa/maestria-en-teledeccion/recursos-2/>
- Yuan, L. & Zhang, L. Q. (2006). Identification of the spectral characteristics of a submerged plant *Vallisneria spiralis*. *Acta Ecologica Sinica*, 26(4), 1005-1011. [https://doi.org/10.1016/S1872-2032\(06\)60019-X](https://doi.org/10.1016/S1872-2032(06)60019-X).
- Zomer, R. J., Trabucco, A. & Ustin, S. L. (2009). Building spectral libraries for wetlands land cover classification and hyperspectral remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 90(7), 2170-2177. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.028>.

