

# Estudio de bofedales en los Andes ecuatorianos a través de la comparación de imágenes Landsat-8 y Sentinel-2

Jara, C.<sup>1,2\*</sup>, Delegido, J.<sup>2</sup>, Ayala, J.<sup>3</sup>, Lozano, P.<sup>1</sup>, Armas, A.<sup>1</sup>, Flores, V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Recursos Naturales, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Panamericana Sur, km 1,5, Riobamba, Ecuador.

<sup>2</sup> Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universitat de València. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna, Valencia, España.

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Chimborazo. Avenida Antonio José de Sucre, km 1,5, Riobamba, Ecuador.

---

**Resumen:** El objetivo del presente estudio fue comparar las imágenes Landsat-8 y Sentinel-2 para calcular la extensión, distribución y grado de conservación del bofedal en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo (RPFCH) ubicada en la región andina de Ecuador. Este proceso se desarrolló con trabajos *in situ* en 16 bofedales con diferentes grados de conservación. Las imágenes Landsat-8 y Sentinel-2 fueron procesadas a través de una calibración radiométrica (restauración de líneas o píxeles perdidos y la corrección del bandeo de la imagen) y una corrección atmosférica (conversión de los niveles digitales a valores de radiancia), para posteriormente calcular los índices espectrales de vegetación: NDVI, SAVI ( $L=0,5$ ) donde  $L$  es una constante del componente de brillo del suelo, EVI2 (índice de vegetación mejorado 2), NDWI (índice de agua de diferencia normalizada), WDRI (índice de vegetación de rango dinámico amplio) y el modelo Red Edge que solo está disponible en Sentinel-2 dentro de este estudio. Haciendo una clasificación del ecosistema bofedal en las imágenes satelitales aplicando Random Forest, las variables más importantes con Landsat-8 fueron EVI2 (37,72%) y SAVI con  $L=0,5$  (30,97%), mientras que con Sentinel-2 las variables más importantes corresponden a los índices Red Edge (38,54%) y WDRI (27,06%). A partir de los índices calculados, se determinaron dos categorías de análisis: a) bofedal, integrado por los niveles: intervenido [1], medianamente conservado [2] y conservado [3] y b) otros, integrado por áreas que no corresponden a bofedales [4]. Mediante Landsat-8 se evidenció que el porcentaje de clasificaciones correctas de píxeles pertenecientes a la categoría bofedal corresponde a: [1] 72,76%, [2] 58,38%, [3] 68,42%, mientras que para la categoría otros [4] 95,15% fueron correctas. Con Sentinel-2, el porcentaje de clasificaciones correctas corresponde a [1] 95,00%, [2] 82,60%, [3] 96,25%, y para la categoría otros [4] los aciertos fueron 98,13%. De esta forma con Landsat-8 el bofedal corresponde a 21.708,54 ha (41,21%), mientras que con Sentinel-2 el bofedal representa un total de 20.518 ha (38,95%), de las 52.560 ha que pertenecen a la RPFCH, concluyendo que Sentinel-2, debido a su mejor resolución espacial, y a la incorporación de bandas en el Red Edge, obtiene mejores resultados en la clasificación de imágenes.

**Palabras clave:** bofedal, Landsat-8, Sentinel-2, Random Forest, Red Edge.

**To cite this article:** Jara, C., Delegido, J., Ayala, J., Lozano, P., Armas, A., Flores, V. 2019. Study of wetlands in the Ecuadorian Andes through the comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 images. *Revista de Teledetección*, 53, 45-57. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.11715>

\* Corresponding author: [cjara@esepoch.edu.ec](mailto:cjara@esepoch.edu.ec)

## Study of wetlands in the Ecuadorian Andes through the comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 images

**Abstract:** The objective of the present study was to compare the Landsat-8 and Sentinel-2 images to calculate the wetland's extension, distribution and degree of conservation, in Reserva de Producción de Fauna Chimboraço (RPFCH) protected area located in the Andean region of Ecuador. This process was developed with *in situ* work in 16 wetlands, distributed in different conservation levels. The Landsat-8 and Sentinel-2 images were processed through a radiometric calibration (restoration of lost lines or pixels and correction of the stripe of the image) and an atmospheric correction (conversion of the digital levels to radiance values), to later calculate the Vegetation spectral indexes: NDVI, SAVI ( $L = 0.5$ ) where  $L$  is a constant of the soil brightness component, EVI2 (improved vegetation index 2), NDWI (standard difference water index), WDRI (wide dynamic range vegetation index) and the Red Edge model only available for Sentinel-2 in this study. Making a classification of the Bofedal ecosystem in satellite images by applying Random Forest, the most important variables with Landsat-8 were EVI2 (37.72%) and SAVI with  $L = 0.5$  (30.97%), while with Sentinel-2 the most important variables correspond to the Red Edge (38.54%) and WDRI (27.06%). With the indices calculated, two categories of analysis were determined: a) wetland integrated by the levels: intervened [1], moderately conserved [2] and conserved [3] and b) other than wetland [4] integrated by areas that do not correspond to this ecosystem. Landsat-8 shows that the percentage of correct classifications of pixels belonging to the wetland category corresponds to: [1] 72.76%, [2] 58.38%, [3] 68.42%, while for the category other [4] were correct 95.15%. With Sentinel-2, the percentage of correct classifications corresponds to [1] 95.00%, [2] 82.60%, [3] 96.25%, while for the category other [4] the correct answers were 98.13%. In this way with Landsat-8 the wetland corresponds to 21,708,54 ha (41.21%), while with Sentinel-2 the wetland represents a total of 20,518 ha (38.95%), of the 52,560 ha that belong to the RPFCH, concluding that Sentinel-2, due to its better spatial resolution, and the incorporation of its new bands in Red Edge, obtains better results in image classification.

**Key words:** bofedal, Landsat8, Sentinel2, Random Forest, Red Edge.

### 1. Introducción

Los humedales pueden describirse como sistemas transicionales, donde los biotipos acuáticos y terrestres convergen debido al alto grado de saturación que presenta el suelo, y a pesar de que ocupan entre el 5 y 8% de la superficie terrestre, son uno de los ecosistemas más importantes del planeta, puesto que almacenan más del 30% del carbono del suelo a nivel mundial (Mahdianpari *et al.*, 2018). Los humedales altoandinos, conocidos como bofedales, se caracterizan por tener una vegetación perenne dentro del paisaje semiárido de los Andes (García y Otto, 2015). Esta vegetación ha desarrollado adaptaciones morfológicas, fisiológicas y reproductivas que les permiten tolerar el exceso de humedad (Heynes *et al.*, 2017) y destacan por la presencia de agua como factor determinante de la dinámica socio-cultural, ecológica y económica (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013). La extensión de los bofedales está disminuyendo a escala local y global por efectos de actividades antrópicas y el cambio climático

(Dwire *et al.*, 2017), por ello es de gran importancia conocer su estado de conservación.

En este contexto se ha utilizado la teledetección, que ha demostrado ser efectiva en análisis de diferentes coberturas: vegetación (Nie *et al.*, 2018), agua (Di Vittorio y Georgakakos, 2018) y suelo (Bansal *et al.*, 2018), ya que ofrece herramientas para caracterizar y seguir el funcionamiento de los ecosistemas, debido a que proporciona índices que informan reiteradamente de los intercambios de materia y energía que tienen lugar entre la biota y la superficie terrestre (Cabello *et al.*, 2016); es decir, que las imágenes satelitales tienen el potencial de proveer valiosa información para la gestión y conservación de los bofedales (García y Llellish, 2012). En este sentido las imágenes Landsat se han utilizado en distintos estudios de humedales, debido a que es un sistema de satélites diseñados y operados para observar repetidas veces la cubierta de la Tierra con una resolución moderada (Halabisky *et al.*, 2016). El satélite Sentinel-2 tiene una excelente resolución espacial

(10 y 20 m) en comparación a Landsat (30 m), cuenta con 13 bandas y está incluido dentro del programa Copernicus de monitoreo de la Tierra. Este programa constituye un sistema unificado para distribuir una gran cantidad de información, recogida desde el espacio o sobre el terreno (Delegido *et al.*, 2016).

A partir de las imágenes satelitales se pueden calcular índices espectrales, que son el resultado de las combinaciones de varias bandas del espectro electromagnético y su función es realzar la cubierta vegetal en función de su respuesta espectral (Houborg *et al.*, 2015). La información generada desde las imágenes satelitales puede ser procesada mediante clasificadores o máquinas de aprendizaje, que implica el uso de la experiencia pasada para optimizar el rendimiento de un algoritmo particular (Amin y Riza, 2018). Entre los clasificadores destaca *Random Forest*, en comparación a Algoritmos genéticos, Máquinas de vectores de soporte o Algoritmos de agrupamiento, por su capacidad para manejar datos tanto continuos como categóricos (O’Neil *et al.*, 2018). El uso

combinado de Índices Espectrales de Vegetación (SVI), datos geográficos auxiliares y el clasificador *Random Forest* (RF) permiten cartografiar de manera precisa paisajes montañosos difíciles de alcanzar, y ayudan a descubrir factores subyacentes que permiten diferenciar la cubierta vegetal en ecosistemas de montaña (Lary *et al.*, 2014).

En Ecuador los humedales abarcan una superficie de 286.659 ha y se distribuyen a lo largo de la parte continental (Figura 1). El 86% se encuentran dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, al cual pertenece la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo (RPFCH) desde 1987, la misma que se asienta sobre la cordillera de los Andes. El objetivo de este trabajo es aplicar la teledetección en la RPFCH, ya que dentro del área existen zonas de bofedales aún no cartografiados. Considerando que la teledetección ha mejorado mucho las técnicas aplicadas al estudio de bofedales, pues proporciona datos muy cercanos a la situación real que con trabajos *in situ* resultaría más complejo, el presente estudio busca analizar problemáticas vinculadas a la extensión, distribución y estado de

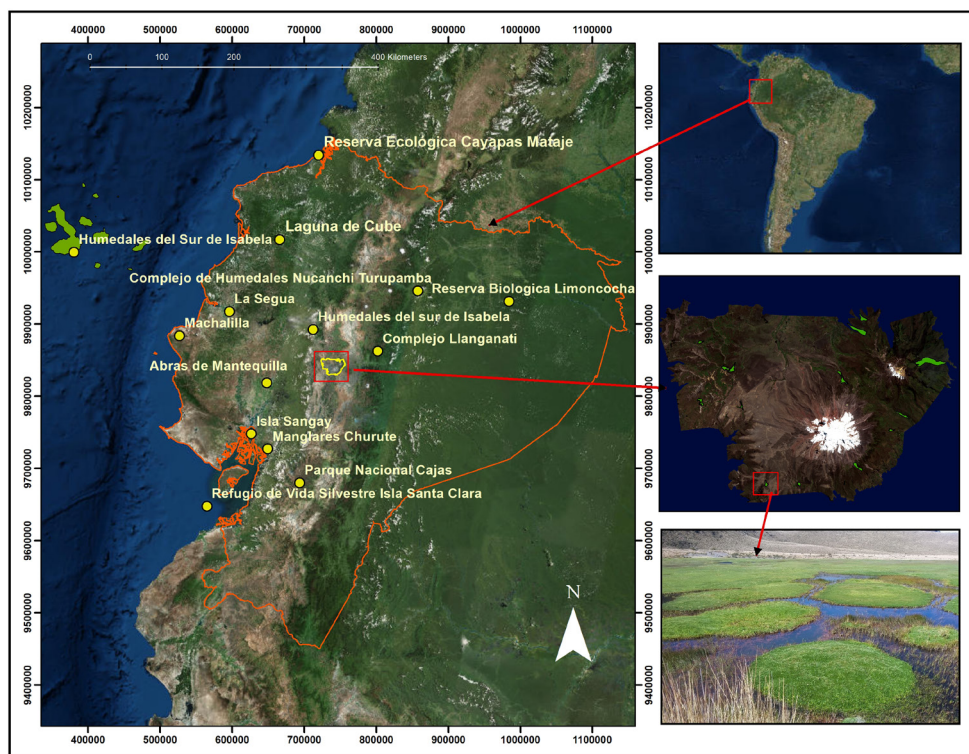


Figura 1. Humedales de Ecuador y área de estudio.

conservación de los bofedales mediante la comparación de las imágenes de Landsat-8 y Sentinel-2. Para ello se pretende cartografiar la extensión total de los bofedales en la RPFCH clasificándolos en función de su grado de conservación.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Área de estudio

El presente estudio se realizó en la jurisdicción de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, cuyas coordenadas son: 1° 30' 0" S, 78° 51' 0" W; en decimal -1.5°, -78.85°. Posee una extensión de 52.560 hectáreas, con altitudes que van desde los 3.800 hasta los 6.268 m.s.n.m. (Ministerio del Ambiente, 2014). El estudio se centró en los bofedales de la RPFCH que se encuentran distribuidos en las provincias de Tungurahua, Chimborazo y Bolívar. Las altitudes de los sitios de muestreo varían desde 3.825 hasta 4.442 m.s.n.m. En relación a la precipitación, en los años 2016 y 2017 fue variable, estacionaria e interanual significativa; es decir, los bofedales recibieron una precipitación promedio de 846 mm. La temporada de lluvia (invierno) ocurre entre diciembre y junio, con una precipitación media anual que va desde 68 mm a los 176 mm, y la temporada seca (verano) de julio a noviembre, con una precipitación media anual que va desde 7 a 55 mm. En este mismo período la temperatura promedio anual varió de 2 a 5 °C

y la humedad promedio anual varió de 72 a 82% (Figura 2). Los bofedales en estudio se encuentran en terrenos planos e inclinados en fondos de valles asociados a microcuencas y fuentes de agua, por tanto, la hidrología es principalmente agua subterránea, influenciadas por fuentes de agua y glaciares. La cobertura vegetal es densa y está conformada por comunidades naturales mixtas de turberas, esporádicos charcos de agua y vegetación de cojín, dando origen a un suelo orgánico profundo y turboso. Todos los factores descritos inciden en la vegetación de los bofedales, principalmente en la permanencia y crecimiento de su cobertura vegetal.

### 2.2. Métodos

#### 2.2.1. Determinación de las zonas de muestreo

Se seleccionaron 16 bofedales caracterizados por Andrade (2016), los cuales fueron discriminados por su condición: a) 11 bofedales fueron categorizados como “Intervenidos”, b) los 5 bofedales restantes se categorizaron como “Medianamente conservados”, y c) sobre estos 5 bofedales se seleccionaron 20 áreas de 30×30 metros categorizados como “Conservados” (Granizo *et al.*, 2006). Las 20 áreas fueron identificadas mediante un muestreo aleatorio estratificado *in situ* con cinco

**Tabla 1.** Cálculo de índices usados en este estudio.

Índice	Descripción	Ecuación	Bandas	
			Landsat-8	Sentinel-2
NDVI	Índice de vegetación normalizado (Rouse <i>et al.</i> , 1974)	$NDVI=(NIR-R)/(NIR+R)$	$(b5-b4)/(b5+b4)$	$(b8-b4)/(b8+b4)$
SAVI	Índice de vegetación ajustado con el suelo (Qi <i>et al.</i> , 1994)	$SAVI=((NIR-R)/(NIR+R+L)) \cdot (1+L)$ Donde L= componente de brillo del suelo (0,5)	$((b5-b4)/(b5+b4+L)) \cdot (1+L)$	$((b8-b4)/(b8+b4+L)) \cdot (1+L)$
NDWI	Índice de agua de diferencia normalizada (McFeeters, 1996)	$NDWI=(NIR-GREEN)/(NIR+GREEN)$	$(b5-b3)/(b5+b3)$	$(b8-b3)/(b8+b3)$
WDRI	Índice de vegetación de rango dinámico amplio (Gitelson, 2004)	$WDRI=((0,05 \cdot NIR)-R)/((0,05 \cdot NIR)+R)$	$((0,05 \cdot b5)-b4)/(0,05 \cdot b5+b4)$	$((0,05 \cdot b8)-b4)/(0,05 \cdot b8+b4)$
EVI2	Índice de vegetación mejorado 2 (Jiang <i>et al.</i> , 2008).	$EVI2=2.5 \cdot (NIR -R) / (NIR + 2.4 \cdot R + 1.0)$	$2.5 \cdot (b5 -b4) / (b5 + 2.4 \cdot b4 + 1.0)$	$2.5 \cdot (b8 -b4) / (b8 + 2.4 \cdot b4 + 1.0)$
Red Edge	Red Edge model (Gitelson <i>et al.</i> , 2005)	$RE= NIR/ Red\ Edge-1$		$(B8/B5-1)$



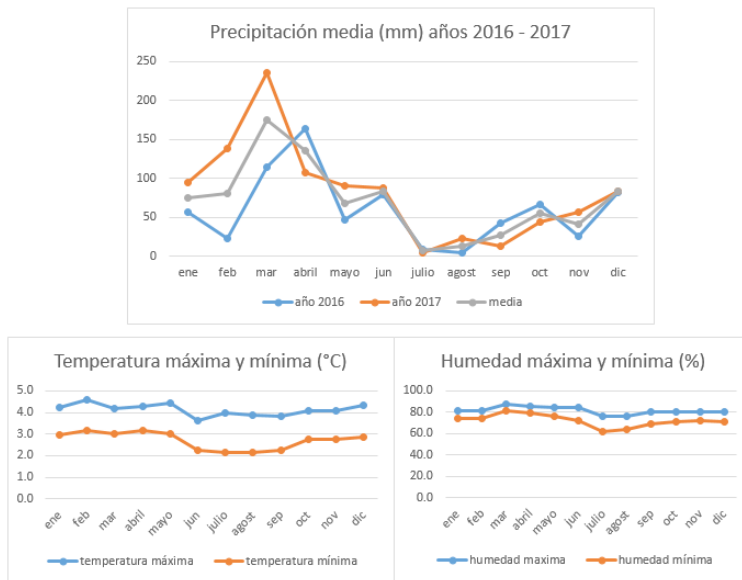


Figura 2. Condiciones climáticas del área de estudio.

salidas de campo del 27 de Julio al 8 de Agosto de 2017 (Tabla 2).

### 2.2.2. Obtención y tratamiento de imágenes Landsat-8 y Sentinel-2

Se utilizaron imágenes satelitales, Landsat-8 (Figura 3) y Sentinel-2 (Figura 4): a) Landsat-8 con un nivel de procesamiento L1T, que se descargó del visualizador global EarthExplorer de la USGS de los Estados Unidos; esta imagen fue analizada y procesada con ENVI (ENVI - Environment for Visualizing Images v5.1. 2019), y b) Sentinel-2, se obtuvo de Copernicus Open Access Hub 2018, fue corregida con SNAP (SNAP - ESA Sentinel Application Platform v2.0.2. 2019).

La imagen Landsat-8 pasó por un proceso de calibración radiométrica (restauración de líneas o píxeles perdidos y la corrección del bandeo de la imagen) y corrección atmosférica (conversión de los niveles digitales a valores de radiancia) a través del software ENVI 5.1 (Figura 3), en donde se pudo rectificar las unidades de radiancia de los archivos multiespectrales, pasando su información espectral de micrómetros y metros cuadrados a nanómetros y centímetros cuadrados aplicando la herramienta *FLAASH Atmospheric Correction*. Este proceso fue necesario para eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen

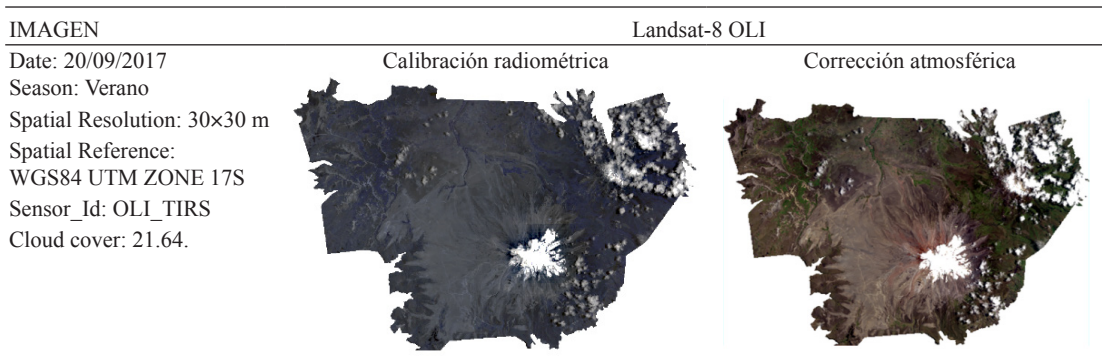


Figura 3. Obtención y tratamiento de la imagen Landsat-8.

**Tabla 2.** Zonas de muestreo.

Intervenidos (11 bofedales)				
Bofedales		Cuenca hidrográfica	Perímetro (m)	Área (m <sup>2</sup> )
Casa Cóndor		Río Llangana	1.388,68	10.150,04
Coop. Santa Teresita		Río Chambo	1.049,82	2.414,22
Culebrillas		Río Llangana	2.236,07	13.405,38
Portal Andino		Río Chambo	2.120,53	11.424,18
Puente Ayora 2		Río Chimbo	240,25	331,48
Cóndor Samana		Río Chambo	3.280,02	24.486,50
Cruz del Arenal 2		Río Llangana	3.174,47	12.037,37
Puente Ayora 3		Río Chimbo	2.895,55	13.864,70
Pachancho		Río Chimbo	1.635,40	10.410,41
Lazabanza		Río Pastaza	3.029,66	30.118,92
Puente Ayora 1		Río Chimbo	2.388,60	13.803,74
Medianamente conservados (5 bofedales)				
Bofedales		Cuenca hidrográfica	Perímetro (m)	Área (m <sup>2</sup> )
Los Hieleros		Río Chambo	3.152,01	30.089,07
Cruz del Arenal 1		Río Llangana	7.598,06	30.004,90
Pampas Salasaca		Río Pastaza	9.379,44	141.243,01
Río Blanco		Río Pastaza	5.484,35	12.820,08
Mechahuasca		Río Pastaza	5.103,60	38.670,65
Conservados (20 zonas)				
Bofedales	zona	Cuenca hidrográfica	Perímetro (m)	Área (m <sup>2</sup> )
Cruz del Arenal 1 (Bolívar)	CA1	Río Llangana	492,4	5.548,70
	CA2	Río Llangana	138,2	1.136,5
	CA3	Río Llangana	545,9	5.467,9
	CA4	Río Llangana	704,8	18.523,2
	CA5	Río Llangana	312,7	2.676,00
	CA6	Río Llangana	908,1	10.920,10
	CA7	Río Llangana	255,8	1.991,30
	CA8	Río Llangana	486,3	4.879,70
Los Hieleros (Chimborazo)	LH	Río Chambo	217	561,7
Pampas Salasaca (Tungurahua)	PS1	Río Pastaza	847,7	10.412,30
	PS2	Río Pastaza	110,3	477
	PS3	Río Pastaza	559,9	9.765,00
	PS4	Río Pastaza	132,6	1.010,40
	PS5	Río Pastaza	480,3	10.098,10
	PS6	Río Pastaza	147,5	1.106,20
	PS7	Río Pastaza	305,7	3.780,60
Río Blanco (Tungurahua)	RB1	Río Pastaza	1.231,6	48.043,60
	RB2	Río Pastaza	362,2	5.886,00
	RB3	Río Pastaza	425,6	6.925,70
Mechahuasca (Tungurahua)	MCH	Río Pastaza	157,5	1.197,50

como producto de la interacción del sensor con la atmósfera (Ahmed y Akter, 2017).

Se trabajó con imágenes Sentinel-2 con un nivel de preprocesamiento 1C que tiene correcciones radiométricas y geométricas, incluida la ortorrectificación y registro espacial en un sistema de referencia global (ESA, 2015). Mediante el módulo de corrección atmosférica Sen2Cor,

se llevaron las imágenes del nivel 1C al nivel 2A dando lugar a la imagen con sus valores de reflectividad bajo la atmósfera –BOA. La clasificación resultante del producto nivel 2A generado permitió eliminar las nubes y las sombras de nubes en las imágenes. Mediante el software ENVI 5.1 se construyó un mosaico con 3 imágenes con coberturas de nubes de: 1) 8,5% en la imagen de

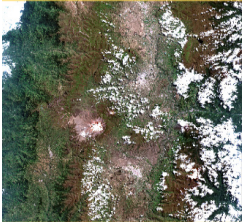
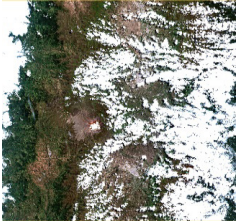
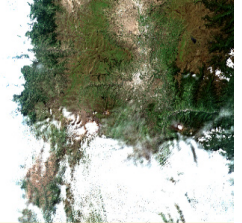

IMAGEN		Sentinel-2	
Date:	Spatial Resolution:	Spatial Reference:	Cloud cover:
1) 2017-07-16 T15:40:39	10x10 m	WGS84 UTM ZONE 17S	1) 8,5%
2) 2017-08-15 T15:42:43			2) 32%
3) 2017-12-13 T17:11:05			3) 32,4%
1) Imagen de referencia nivel 2 a través de Sen2Cor	2) Primera imagen para relleno nivel 2	3) Segunda imagen para relleno nivel 2	Imagen resultante del mosaico recortada con el área de estudio
			

Figura 4. Obtención y tratamiento de la imagen Sentinel-2.

referencia, 2) 32% en la primera imagen de relleno y 3) 32,4% en la segunda imagen de relleno (Figura 4), debido a que la zona de estudio posee un alto porcentaje de nubosidad. Es importante indicar que según García y Llellish (2012), la clasificación de imágenes utilizando distintas fechas no mostró diferencias estadísticamente significativas para el cartografiado de bofedales.

### 2.2.3. Cálculo de índices

Para Landsat-8 se calcularon cinco índices espectrales de vegetación cuyas referencias y formulación se muestra en la Tabla 1: NDVI, SAVI (L=0,5), NDWI, WDRI y EVI 2, mientras que para Sentinel-2 se trabajó con los mismos índices más el Red Edge, calculados con el software ENVI 5.1; se seleccionaron estas variables basándonos en el estudio de Ayala *et al.* (2017), debido a la similitud de las zonas en cuanto a sus rasgos vegetales y climatológicos.

### 2.2.4. Clasificación de las imágenes Landsat-8 y Sentinel-2 aplicando un algoritmo de autoaprendizaje

Se utilizó la clasificación de imágenes satelitales mediante *Random Forest*, un algoritmo de aprendizaje automático basado en árboles de decisión (Liang *et al.*, 2018). Se extrajo el archivo en formato raster de las zonas de muestreo de Landsat-8 y Sentinel-2. Este raster se transformó a archivo vectorial (*shapefile*) georreferenciado con el valor calculado de cada uno de los índices espectrales de

vegetación, además de una variable denominada *USO*, a la que se le asignó valores en una escala del 1 al 4 de acuerdo a la categoría: bofedal que incluye tres niveles: bofedal intervenido [1], medianamente conservado [2], conservado [3] y a la categoría Otros [4]. Posteriormente se convirtió el archivo raster de la RPFCH a archivo vectorial (*shapefile*), se extrajo la información georreferenciada de los índices generados y finalmente se añadió la categoría *USO* con valores en blanco para ser llenados de manera automática a través de los entrenamientos de *Random Forest*.

## 3. Resultados

Una vez que las imágenes satelitales fueron procesadas, sobre la imagen Landsat-8 se calcularon los valores de 5 índices de vegetación espectral y en el mosaico de Sentinel-2 además de los 5 índices se incluyó los valores calculados de *Red Edge*.

### 3.1. Entrenamientos aplicando *Random Forest* para Landsat-8

Las variables utilizadas en los entrenamientos corresponden a los índices espectrales de vegetación seleccionados. En la Tabla 3 se muestra la matriz de confusión obtenida con la imagen Landsat-8. Con este grupo de variables predictoras el porcentaje global de categorizaciones correctas realizadas con el subconjunto de datos OOB (Porcentaje promedio de correctas) fue de 77,90%. Este valor es bastante aceptable si se considera las dificultades

**Tabla 3.** Matriz de confusión entrenamientos con Landsat-8.

Descripción		Total de píxeles	Porcentaje de correctas	Predicción – Categoría /Nivel			
Categoría	Nivel			1 N=1.937	2 N=2.378	3 N=1.015	4 N=983
Bofedal	Bofedal intervenido [1]	1.252	72,76%	<b>911</b>	270	50	21
	Medianamente conservado [2]	1.175	58,38%	322	<b>686</b>	136	31
	Conservado [3]	57	68,42%	5	13	<b>39</b>	0
Otros	(4) Otros [4]	1.733	95,15%	35	49	0	<b>1549</b>
Total puntos (píxeles)		4.217					
Porcentaje promedio de correctas				73,68%			
Porcentaje global de correctas				77,90%			

que ofrece la región de estudio y que se usa 4217 píxeles para el entrenamiento del algoritmo.

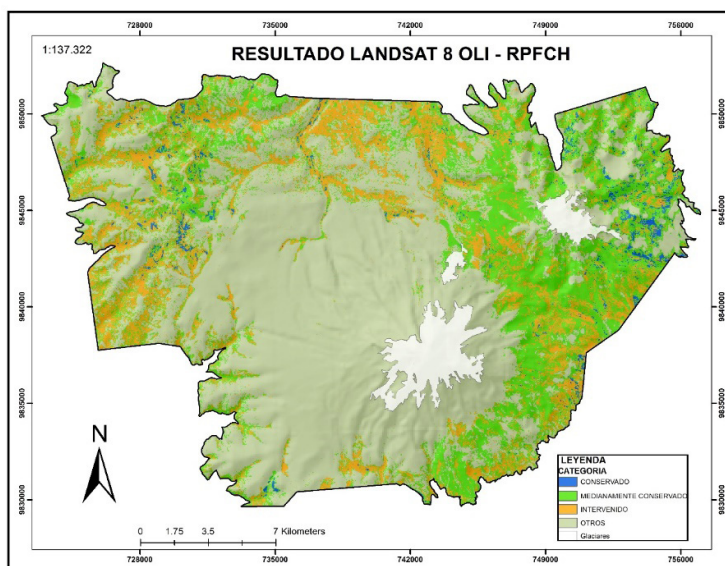
En la Tabla 3 se observa que dentro de la categoría [bofedal] el mejor clasificado es el bofedal intervenido (72,76%), mientras que en la categoría [otros] se clasifican bien casi todos los píxeles (95,15%).

A través de los resultados de *Random Forest* se puede obtener la importancia de cada una de las variables, que se muestran en la Tabla 4, en la que EVI2 es el índice de mayor importancia y NDWI el menor. En la Figura 5 se muestra la clasificación obtenida con la imagen Landsat-8, donde se puede apreciar la distribución de la categoría [bofedal] y la categoría [otros]. Respecto a la categoría “bofedal”, esta se distribuye en tres niveles: bofedal intervenido 8.120,16 ha (15,41%), medianamente conservado 12.836,07 (24,36%) y conservado

que corresponde a 752,31 ha (1,43%), colores verde, mostaza y azul respectivamente, dando un sumatorio total de 21.708,54 ha (41,21%), mientras que para la categoría “otros” (color marrón) corresponde a un área de 30.975,66 ha (58,79%), del total de 52.684 ha de la RPFCH.

**Tabla 4.** Importancia de cada índice en la clasificación de bofedales con Landsat-8.

Variable	Porcentaje	Imagen
EVI2	37,72%	
SAVI5	30,97%	
WDRI	13,96%	
NDVI	13,75%	
NDWI	3,59%	



**Figura 5.** Clasificación obtenida a partir de la imagen Landsat-8.



**Tabla 5.** Matriz de confusión entrenamientos con Sentinel-2.

Descripción		Total de píxeles	Porcentaje de correctas	Predicción – Categoría /Nivel			
Categoría	Nivel			1 N=14.741	2 N=27.673	3 N=4.884	4 N=1.242
Bofedal	Bofedal intervenido [1]	12.845	95,00%	<b>12.203</b>	129	382	131
	Medianamente conservado [2]	33.294	82,60%	2.509	<b>27.501</b>	3.115	169
	Conservado [3]	1.441	96,25%	18	36	<b>1.387</b>	0
Otros	Otros [4]	960	98,13%	11	7	0	<b>942</b>
Total puntos (píxeles)		48.540					
Porcentaje promedio de correctas			93,00%				
Porcentaje global de correctas			86,59%				

### 3.2. Entrenamiento aplicando Random Forest para Sentinel-2

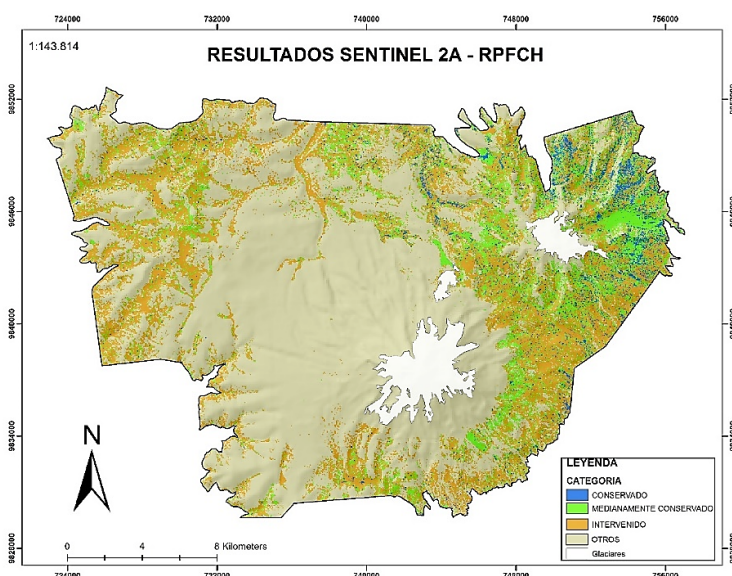
En la Tabla 5 se muestra la matriz de confusión obtenida con Sentinel-2. El porcentaje global de categorizaciones correctas realizadas con el subconjunto de datos OOB (Porcentaje promedio de correctas) fue de 93,00%. Este valor es bastante aceptable considerando las dificultades que ofrece la región de estudio y que se usaron 48.540 píxeles para el entrenamiento del algoritmo. En la tabla se observa que dentro de la categoría [bofedal] el mejor clasificado es el bofedal conservado (96,25%), mientras que en la categoría [otros] se clasifican un total de 98,13% de los píxeles.

A través de los resultados de *Random Forest* se puede obtener la importancia de cada una de las variables, que se muestran en la Tabla

**Tabla 6.** Importancia de cada índice en la clasificación de bofedales con Sentinel-2.

Variable	Porcentaje	Imagen
RED EDGE	38,54%	
WDRI	27,06%	
SAVI5	12,05%	
EVI2	9,60%	
NDWI	6,79%	
NDVI	5,97%	

6, observándose el *Red Edge* con la mayor y el NDVI con la menor importancia. En la Figura 6 se muestra la clasificación obtenida a partir del mosaico generado con Sentinel-2. En esta imagen se puede apreciar la distribución de la categoría [bofedal] y de la categoría [otros]. Respecto a la categoría [bofedal], esta se distribuye en tres



**Figura 6.** Clasificación obtenida a partir del mosaico de Sentinel-2.

niveles: bofedal intervenido 12.818,69 ha (24%), medianamente conservado 6.112,05 ha (12%) y conservado, que corresponde a 1.587,29 ha (3%), colores verde, mostaza y azul respectivamente, dando una suma total de 20.518,03 ha (38,95%), mientras que la categoría [otros] (color marrón) corresponde a un área de 32.165,61 ha (61,05%) del total de 52.683,64 ha de la RPFCH.

#### 4. Discusión

Para caracterizar los bofedales, además de trabajos *in situ*, se utilizaron imágenes satelitales Landsat-8 y Sentinel-2, pues se consideran una potente herramienta para el análisis de ecosistemas (Orimoloye et al., 2018). Los resultados de la clasificación de las imágenes Landsat-8 y Sentinel-2, muestran una serie de diferencias, lo que concuerda con Zhang et al. (2018), principalmente porque Sentinel-2 cuenta con bandas en el *Red Edge* que han sido utilizadas en análisis como el de Zarco et al. (2018).

Además, la aplicación de *Random Forest* ha permitido la obtención de datos relevantes, ya que es un algoritmo de ventajas notables por su capacidad para manejar tanto datos continuos como categóricos, de alta dimensión (O'Neil et al., 2018). De esta forma la variable con mayor importancia en la clasificación de Landsat-8 fue el índice EVI 2, con una importancia de 37,72%, ya que es un índice de vegetación sensible a la fracción de vegetación y con los errores cuadráticos medios más bajos de 0,21 obtenidos por Li et al. (2017), y de 0,60 por Liu et al. (2012). En segundo lugar se encuentra SAVI ( $L=0,5$ ) (Qi et al. 1994), mientras que el NDWI con 3,59% se muestra como el índice con el menor porcentaje. Con Sentinel-2, los índices que aportan más información corresponden al *Red Edge index*, con 38,54% de importancia debido a que tiene una influencia significativa sobre humedales con vegetación intensiva como los pantanos (Kaplan y Avdan, 2019), seguido del WDRI con una importancia relativa del 27,06%, mientras que el NDVI reflejó un porcentaje de 5,97%.

De esta forma con Landsat-8, la variable categorizada como bofedal corresponde a 21.708,54 ha (41,21%), y con Sentinel-2 el bofedal corresponde a 20.518,03 ha (38,95%), es decir que existe una diferencia de 2,26% entre ellos. Esta

diferencia se debe a que las imágenes Sentinel presentan una mejor resolución espacial y radiométrica, sobre todo al incorporar nuevas bandas en el *Red Edge* (Delegido et al., 2016), por lo que en este estudio se evidencia una mejor resolución en cuanto a la superficie de la RPFCH pues los datos obtenidos son de mayor precisión respecto a Landsat. De esta forma los datos generados a partir de Sentinel-2 con respecto a estudios como el de Andrade (2016) reflejan una mayor área de identificación espacial de la ubicación del ecosistema bofedal por categorías y niveles, con mayor presencia en la provincia de Tungurahua, siendo esto resultado de las condiciones climáticas que presenta el lugar. Los datos obtenidos con Sentinel-2 resultan de mayor precisión en comparación a Landsat-8 concordando con otros trabajos como el de Delegido et al. (2018).

#### 5. Conclusiones

A través de los resultados obtenidos con *Random Forest* se puede observar que las variables con mayor importancia que sirvieron para la cuantificación e identificación de bofedales en la RPFCH son el índice EVI 2, con una importancia de 37,72% para Landsat-8, mientras que con Sentinel-2 el índice *Red Edge* fue el que aportó más información con 38,54%; sin embargo como Landsat-8 no dispone de las bandas del *Red Edge* no se pudo realizar una comparación con la información que aporta esta banda.

Debido a la diferencia de resoluciones de 30×30 m de Landsat-8 y de 10×10 m de Sentinel-2 y a las 13 bandas con las que trabaja Sentinel-2 para la cuantificación e identificación de bofedales, se concluye que los resultados derivados de Sentinel-2 (con un porcentaje global de correctas de 86,59%) resultaron más precisos frente a los datos obtenidos con Landsat-8 (con un porcentaje global de correctas de 77,90%).

En comparación a Landsat-8 que muestra los siguientes porcentajes: 15,41% bofedal intervenido, 24,36% medianamente conservado y 1,43% conservado, en Sentinel-2 se evidencia que el 24% del ecosistema bofedal se encuentra en la categoría intervenido (12.818,69 ha), el 12% se encuentra medianamente conservado (6.112,05 ha), mientras que el 3% se encuentra conservado (1.587,29 ha), dando un total de

20.518,03 ha de bofedales, es decir el 39% del área total de la Reserva.

A partir de los datos generados en el presente estudio se puede aprovechar de forma sostenible el ecosistema bofedal, debido a que la información proporcionada de los distintos índices resulta científicamente relevante para generar estrategias de manejo, a fin de prevenir el deterioro de los recursos existentes y, consecuentemente, contribuir a la calidad de vida de los pobladores locales y a la permanencia de biodiversidad.

## Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), por financiar el proyecto “Evaluación de los servicios ecosistémicos de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo”.

## Referencias

Ahmed, K., Akter, S. 2017. Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-Means cluster with Landsat multi-Spectral surface reflectance satellite data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8, 168-181. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.08.010>

Amin, M., Riza, N. 2018. Machine learning enhanced optical distance sensor. *Optics Communications*, 407, 262-270. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.09.028>

Andrade, J. 2016. *Determinación del estado de conservación de los bofedales de La Reserva de Producción de Fauna Chimborazo*. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.

Ayala, J., Márquez, C., García, V., Recalde, C., Rodríguez, M., Damián, D. 2017. Land Cover Classification in an Ecuadorian Mountain Geosystem Using a Random Forest Classifier, Spectral Vegetation Indices, and Ancillary Geographic Data. *Geosciences*, 7(2), 34. <https://doi.org/10.3390/geosciences7020034>

Bansal, S., Katyal, D., Saluja, R., Chakraborty, M., Garg, J. 2018. Remotely sensed MODIS wetland components for assessing the variability of methane emissions in Indian tropical/subtropical wetlands. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 64(0303-2434). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.011>

Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Reyes, A., Lourenço, P., Requena, J.M., Bonache, J., Serrada, J. 2016. Sistema para el Seguimiento del funcionamiento de ecosistemas en la Red de Parques Nacionales de España mediante Teledetección. *Revista de Teledetección*, 46, 119-131. <https://doi.org/10.4995/raet.2016.5731>

Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz, A., Pereira, M., Pasqualotto, N., Gibaja, G., Verrelst, J., Peña, R., Urrego, E., Borràs, J., Sanchis, J., Pezzola, A., Mosquera, Z., Quinto, Z., Gómez, J., Moreno, J. 2016. Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales. *Conference: XVII Simposio Internacional En Percepción Remota Y Sistemas de Información Geográfica (SELPER)*.

Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E.P., Jimenez, J.C., Soria, G., Sobrino, J.A., Moreno, J. 2018. Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-8. *Revista de Teledetección*, 51, 47-60. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8934>

Di Vittorio, C., Georgakakos, A. 2018. Land cover classification and wetland inundation mapping using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 204, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.001>

Dwire, K., Mellmann, S., Gurreri, J., 2018. Potential effects of climate change on riparian areas, wetlands, and groundwater-dependent ecosystems in the Blue Mountains, Oregon, USA. *Climate Services*, 10, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.10.002>

ESA. 2015. SENTINEL-2 User Handbook. (1),1-64.

García, E., Llellish, M.A. 2012. Cartografiado de bofedales usando imágenes de satellite Landsat en una cuenca altoandina del Perú. *Revista de Teledetección*, 38, 92-108. Disponible en: [http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38\\_09.pdf](http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_09.pdf) Últim acceso: junio de 2019.

García, E., Otto, M. 2015. Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del río Santa, Ancash, Perú. *Ecología Aplicada*, 14(2):115-125. <https://doi.org/10.21704/rea.v14i1-2.88>

Gitelson, A. 2004. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161(2), 165-173. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176>

Gitelson, A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D., Arkebauer, T. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8), 1-4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>

- Granizo, T., Molina, M., Secaira, E., Herrera, B., Benítez, S., Maldonado, O., Libby, M., Arroyo, P., Ísola, S., Castro, M. 2006. *Manual de Planificación Para La Conservación de Áreas, PCA*. edited by M. Cuvi. Quito- Ecuador: TNC y USAID.
- Halabisky, M., Moskal, L., Gillespie, A., Hannam, M. 2016. Reconstructing semi-arid wetland surface water dynamics through spectral mixture analysis of a time series of Landsat satellite images (1984-2011). *Remote Sensing of Environment*, 177, 171-183. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.040>
- ENVI - Environment for Visualizing Images v5.1. 2019. Harris Geospatial Solutions. Recuperado en mayo de 2019, disponible en: <https://www.harrisgeospatial.com/>
- Heynes, S., Gonzáles, M., Ruacho, L., Gonzáles, M., López, I. 2017. Vegetación de humedales del municipio de Durango, Durango, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 358-364. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.005>
- Houborg, R., Fisher, J., Skidmore, A. 2015. Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.001>
- Jiang, Z., Huete, A., Didan, H., Miura, T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 383-345. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>
- Kaplan, G., Avdan, U. 2019. Evaluating the utilization of the red edge and radar bands from sentinel sensors for wetland classification. *Catena*, 178, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.011>
- Lary, D.J., Faruque, F., Malakar, N., Moore, A. 2014. Estimating the global abundance of ground level particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) Since 1997. *Geospatial Health*, 9(1), 1-40. <https://doi.org/10.4081/gh.2014.292>
- Li, H., Zhong, X.C., Zhi, W.J., Wen, B.W., Jian, Q.R., Bin, L., Hasi, T. 2017. Comparative analysis of GF-1, HJ-1, and Landsat-8 data for estimating the leaf area index of winter wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(2), 266-285. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61293-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61293-X)
- Liang, L., Di, L., Huang, T., Wang, J., Lin, L., Wang, L., Yang, M. 2018. Estimation of Leaf Nitrogen Content in Wheat Using New Hyperspectral Indices and a Random Forest Regression Algorithm. *Remote Sensing*, 10(12), 1940. <https://doi.org/10.3390/rs10121940>
- Liu, J., Pattey, E., Jégo, G. 2012. Assessment of vegetation indices for regional crop green LAI estimation from Landsat images over multiple growing seasons. *Remote Sensing of Environment* 123, 347-358. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.002>
- Mahdianpari, M., Salehi, B., Mohammadimanesh, F., Brisco, B., Mahdavi, S., Amani, M., Granger, J. 2018. Fisher Linear Discriminant Analysis of coherency matrix for wetland classification using PolSAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 206, 300-317. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.005>
- McFeeters, S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Ministerio del Ambiente. 2014. *Actualización Del Plan de Manejo de La Reserva de Producción de Funa Chimborazo*. EcoCiencia. Riobamba.
- Nie, S., Wang, C., Xi, X., Lou, S., Li, S. 2018. Estimating the height of wetland vegetation using airborne discrete-return LiDAR data. *Optik*, 154, 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.10.016>
- O'Neil, G., Goodall, J., Watson, J. 2018. Evaluating the potential for site-specific modification of LiDAR DEM derivatives to improve environmental planning-scale wetland identification using Random Forest classification. *Journal of Hydrology*, 559, 192-208. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.009>
- Orimoloye, I.R., Kalumba, A., Mazinyo, S.P., Nel, W. 2018. Geospatial analysis of wetland dynamics: wetland depletion and biodiversity conservation of Isimangaliso Wetland, South Africa. *Journal of King Saud University - Science*. (in press). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.03.004>
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 48(2), 119-126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Ren, H., Zhou, G., Zhang, F. 2018. Using negative soil adjustment factor in soil-adjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 209, 439-445. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.02.068>
- Rouse, J. W., Hass, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1, 309-317.
- SNAP - ESA Sentinel Application Platform v2.0.2. 2019. STEP | Science Toolbox Exploitation Platform. Recuperado en mayo de 2019, de <http://step.esa.int/main/>



Secretaría de la Convención de Ramsar. 2013. Manual de La Convención de Ramsar , 6ª Edición. *Ramsar* 6, 118.

Wang, Y., Yésou, H. 2018. Remote Sensing of Floodpath Lakes and Wetlands: A Challenging Frontier in the Monitoring of Changing Environments. *Remote Sensing*, 10(12), 1955. <https://doi.org/10.3390/rs10121955>

Zarco, P., Hornero, A., Hernández, R., Beck, P. 2018. Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection using high-resolution hyperspectral and Sentinel-2a imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137, 134-148. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.01.017>

Zhang, H., Roy, D., Yan, L., Li, Z., Huang, H., Vermote, E., Skakun, S., Roger, J. 2018. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. *Remote Sensing of Environment* 215, 482-494. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.031>

