

## **Identificación de lagunas de Alta Montaña en el Perú mediante técnicas de Teledetección Espacial y Modelos de Elevación Digital.**

Tulio Chávez Espíritu  
Daniel Colonia Ortiz  
Edwin Loarte Cadenas  
Iván Albornoz Albornoz  
Alex Zambrano Ramírez

Autoridad Nacional del Agua – ANA  
Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, Av. Confraternidad Internacional Oeste N°167 -  
Huaraz, Perú  
glaciologia@ana.gob.pe

**Abstract.** This research shows the main applications of the different techniques of remote sensing from space for the identification of water bodies in high mountain areas. The use of different indexes such as the EVI (Enhanced Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index), determine certain precision in the delimitation. However, both indexes show major and minor small distortions because to topographic shadow effect, which creates confusion in the identification of pixels representing water bodies, therefore some misclassification of them. To improve the accuracy of the application of thresholds of water through rates, it has been generated an Digital Elevation Model (DEM), subsequently was established auxiliary layers in raster formats of hillshade and slope, which were placed as a condition within a classification and finally, it has been discriminated information that does not correspond (shadows) automatically in the processing of satellite images. Through these applications it is possible to eliminate misclassified pixels, avoiding devote more time editing and focus in correcting and validating the lakes coverage.

**Keywords:** EVI, NDWI, DEM, remote sensing, slope, hillshade.

### **1. Introducción**

En las zonas de alta montaña del Perú, principalmente donde se encuentra las cordilleras nevadas, se albergan una gran cantidad de lagunas, que son de gran aporte hídrico y de importancia económica en el país. La Oficina Nacional de Evaluación de los Recursos Naturales, ONERN (1980) realizó los primeros inventarios de lagunas a nivel nacional; y actualmente la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), vienen realizando la actualización del Inventario Nacional de Lagunas Altoandinas. Debido a los diferentes procesos de deglaciación ocurridos en los últimos periodos, se ha dado la formación de nuevas lagunas con gran potencial hídrico para la planificación. Se determinarán los índices espectrales como EVI (Enhanced vegetation Index) por Huete et al. (1994) y NDWI (Normalized Difference Water Index) por Gao Bo-Cai (1996), para la identificación de las lagunas, a partir de imágenes Landsat 5TM, se mejorará la clasificación mediante la aplicación del Modelo de Elevación Digital (DEM), con la extracción de sombras topográficas, que limitan realizar una buena clasificación de los índices espectrales. Estas aplicaciones definirán con mayor exactitud los límites de los espejos de agua. Así mismo la aplicación de otros métodos que usualmente son muy complicados como la corrección topográfica desarrollado por Teillet et al. (1982) para imágenes de satélite, solo alcanzan a tener leves mejoras, que finalmente implica un trabajo netamente manual para su edición y corrección. Para el presente trabajo se ha tratado disminuir estos errores y se ha aplicado técnicas de procesamiento más viables y rápidas. A continuación se muestran los diferentes procesos de corrección de imágenes y el uso del DEM como ayuda a la clasificación de lagunas en zonas de alta montaña. La utilización de los índices apropiados juega un papel importante para una clasificación automatizada. El trabajo fue realizado en la cordillera Chonta, que está constituida por cinco grupos de montañas nevadas, bastante distanciados entre sí, ubicados en el ramal occidental de los Andes del Centro, formando la divisoria de

aguas continentales; entre los paralelos 12°36' - 13°13' y meridianos 75°00' - 76°00'. Se extiende con una orientación noreste en aproximadamente 90Km, destacando como el pico más elevado el nevado Palomo con 5290 m.s.n.m. Se seleccionaron estas zonas porque concentran la mayor cantidad de lagunas en las cordilleras nevadas centrales.

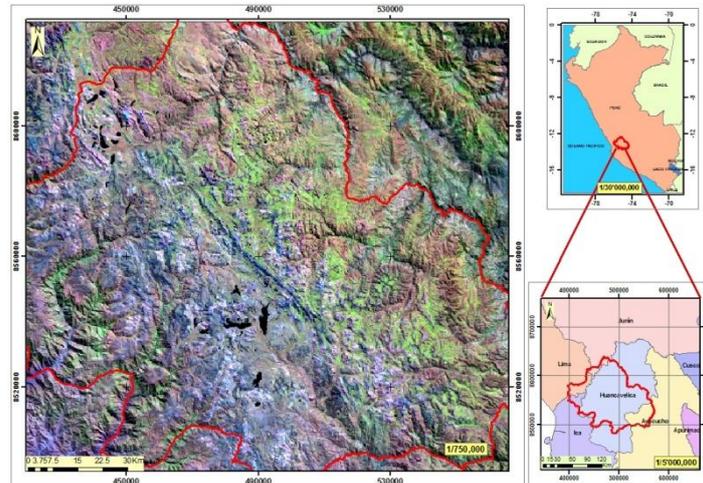


Figura 1. Mapa de ubicación de la cordillera Chonta.

## 2. Metodología de Trabajo

### 2.1 Corrección de imágenes de satélite Landsat 5/TM

En la corrección radiométrica de imágenes, se realizó la calibración es sus niveles de radiancia y reflectancia propuestos por Chander y Markham (2003), obteniendo de las imágenes la reflectancia aparente según la siguiente ecuación:

$$\rho^* k = \frac{\pi L_{senk} D}{E_{sunk} \cos \theta_i} \quad (1)$$

Donde:  $\rho^* k$  = Reflectancia planetaria o reflectividad aparente;  $L_{senk}$  = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k en  $mw/(cm^2.sr.\mu m)$ ;  $D$  = Es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas;  $E_{sunk}$  = Irradiancia solar media fuera de la atmósfera en  $mWsr^{-1}cm^{-2}\mu m^{-1}$ ,  $\theta_i$  = Ángulo cenit del Sol.

Cuadro 1. Datos de la imagen utilizada en la investigación.

DATOS	LANDSAT 5 TM
Fecha	2009-06-30
Azimut Solar	41.0673
Elevación del sol	42,1454

La corrección geométrica se realizó con un promedio de 100 puntos de control obtenidos de la cartografía base del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1/100 000, con sistema de Proyección cilíndrica (Transversal Mercator), sistema de coordenadas UTM, zona 18 Sur con Datum WGS84.

## 2.2 Generación del DEM

El Modelo de Elevación Digital (DEM) fue generado a partir de la información cartográfica del Instituto Geográfico Nacional (IGN), a una resolución espacial de 30m, y una escala de salida de 1/100 000, la información cartográfica incluye: curvas de nivel, ríos y lagunas; y mediante un Software ArcGis se han obtenido el DEM, con el mejor detalle posible.

## 2.3 Generación de modelos de sombras

A partir del DEM se ha generado modelos de sombras, usando un Software ENVI, en el cual se usó un umbral menor al 0.60 (60%), como se muestra en la sección A (Figura2). Por la tanto han permitido extraer los efectos de sombra en las zonas de alta montaña o convexas, que usualmente su respuesta espectral se comportan igual como los cuerpos de agua, por consiguiente presenta confusiones al momento de su identificación.

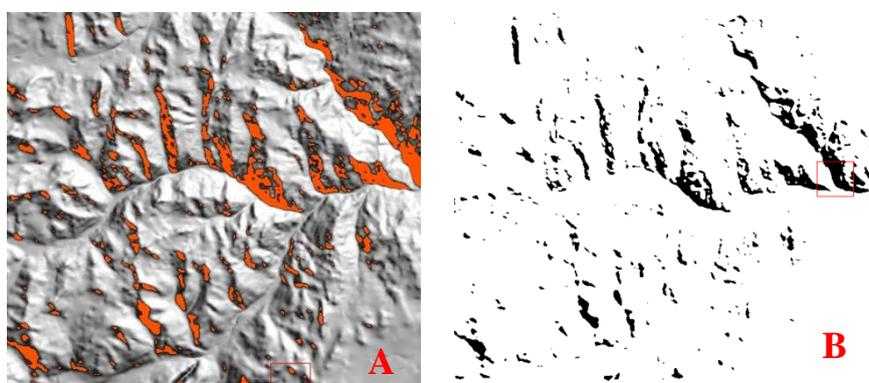


Figura 2. Identificación de sombras (color anaranjado) (A) y Mascara de sombra (color negro) que serán excluido del procesamiento y de color blanco incluidos en el procesamiento (B).

## 2.4 Generación de capas de pendientes

Las capas de pendientes se han generado a partir del DEM, usando un Software ENVI. Así mismo se obtuvieron capas con superficie < 20% de pendiente que fueron incluidos en el procesamiento como una condición para agrupar los cuerpos de agua, como se observa en la sección A (Figura 3). Posteriormente a este procesamiento, se han generado una máscara con superficies >20% de pendiente, cuya información permitirá sobre la imagen satelital (Landsat 5 TM) discriminar información que no corresponde a los cuerpos de agua, por efecto del sombreado topográfico. En este proceso no se han podido descartar en su totalidad el sombreado, pero mejora los limites de los espejos de agua.

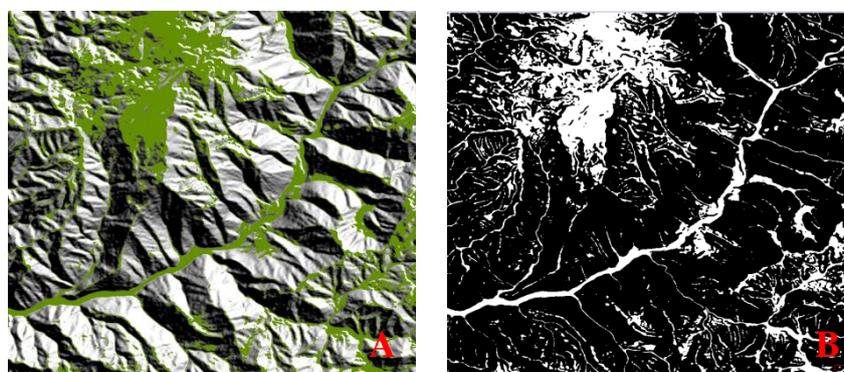


Figura 3. Visualización de capas pendientes (color verde) menores al 20% (A), y Mascara (color negro) de pendiente mayores al 20% excluidos del procesamiento, y de color blanco incluidos en el procesamiento (B).

## 2.5 Determinación de índice

Existen diferentes métodos, que son aplicados para ciertos trabajos específicos. En este estudio se ha evaluado la aplicaciones de dos índices: En primer lugar el EVI (Enhanced vegetation Index) por Huete et al (1994) y por último el NDWI (Normalized Difference Water Index) por Gao Bo-Cai (1996), para la discriminación automatizada de lagunas que se encuentran localizadas en zonas de alta montaña, que frecuentemente presentan confusión con la sombra por el efecto de la topografía (pendientes fuertes). Posteriormente se ha utilizado imágenes Landsat 5TM, con fecha de 30 de Junio del 2009, después que fueron corregidas geométrica y radiométricamente para la obtención de los índices espectrales. La utilización de ambos índices muestra ciertas mejoras de identificación de agua en comparación con otros métodos. También se contrasto con otros métodos alternativos de clasificación supervisada, cuyos resultados no son satisfactorios al momento de definir los límites de los espejos de aguas.

1. Enhanced Vegetation Index (EVI):

$$EVI = 2.5 * \frac{TM4 - TM3}{TM4 + 6 * TM3 - 7.5 * TM2 + 1} \quad (2)$$

2. Normalized Difference Water Index (NDWI):

$$NDWI = \frac{TM2 - TM4}{TM2 + TM4} \quad (3)$$

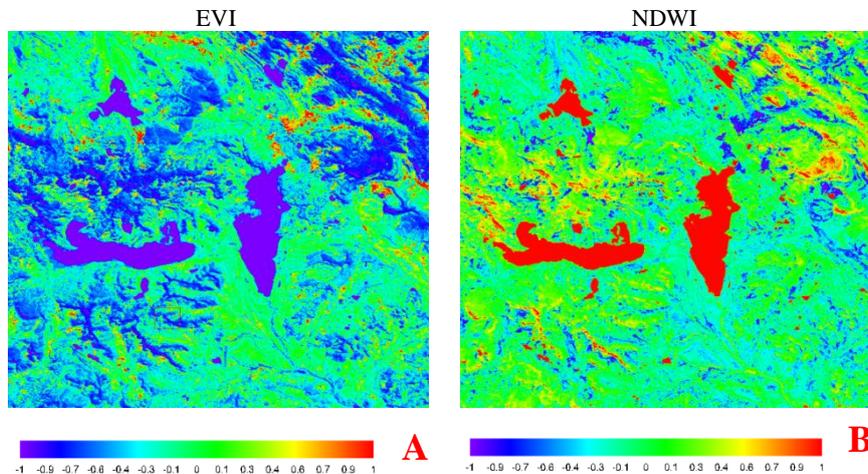


Figura 4. Representación gráfica de valores de una imagen Landsat 5TM en EVI (A) y NDWI (B)

## 2.6 Determinación de cuerpos de agua

Mediante la aplicación de umbrales, se procedió la extracción de los cuerpos de agua para ambos índices, con valores  $<0.019$  para el EVI y valores  $>0.2$  para el NDWI. Posteriormente está información fue modelada con los mapas de sombras y pendiente, para el filtrado de los píxeles mal clasificado. Finalmente la información ráster, es transformada en formato vectorial, y luego es integrada a los Sistemas de Información Geográfica, para una evaluación más detallada de su geometría y el ajuste de los polígonos mediante superposición de las capas vectoriales sobre la imagen satelital.

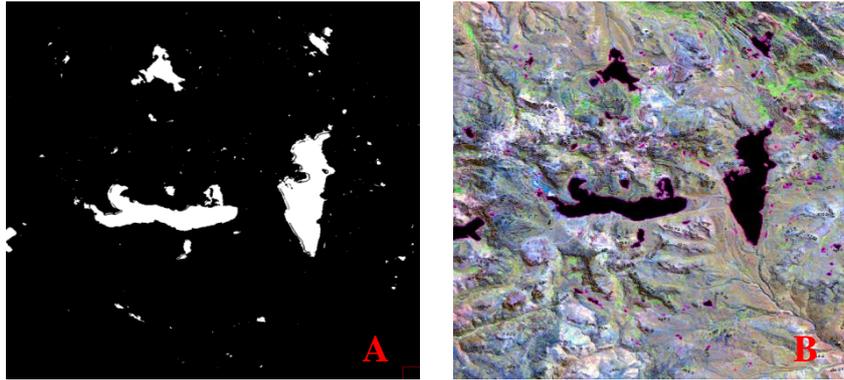


Figura 5. Extracción de lagunas mediante máscaras (A) y posicionamiento de capas vectoriales de lagunas sobre una imagen de satélite Landsat 5TM (B).

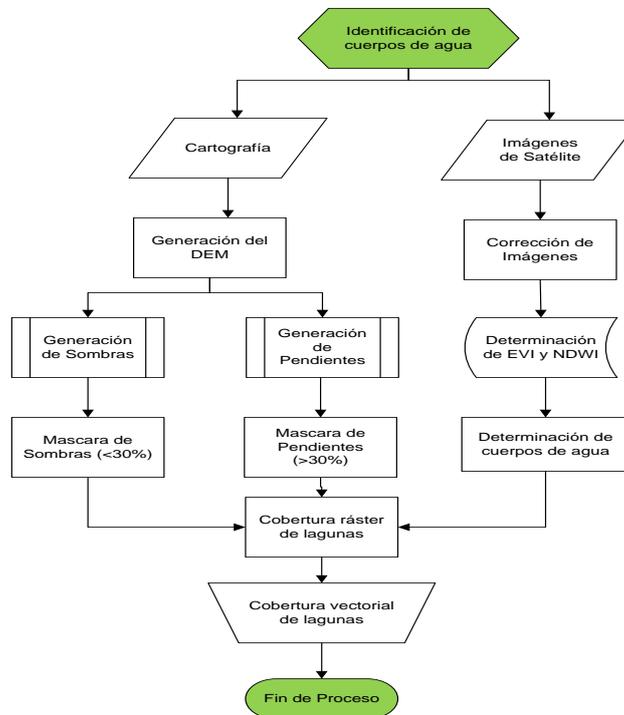


Figura 6. Diagrama de Identificación de lagunas

### 3. Resultados y Discusión

La utilización de EVI por Huete et al.(1994) y el NDWI por Gao Bo-Cai (1996) para la identificación de lagunas mediante imágenes de satélite Landsat 5 TM, muestran buenos resultados en la delimitación de los espejos de agua. Sin embargo se ven limitadas en zonas donde existe presencia de sombras topográficas. Existe otros procesos de corrección de imágenes de satélite, como es la corrección topográfica que se basan en las modificaciones de los valores de reflectancia, en el contexto de superficies lambertiana y no lambertiana según Teillet et al. (1982) y Meyer et al. (1993); Sin embargo estos procedimientos resultan muy complicados debido que solamente se puede conseguir una leve mejora, no muy significativo en la caracterización de lagunas. Por esta razón, se aplicó otros métodos directos, prácticos y sencillos, como la generación de capas de sombras y pendientes a partir del DEM, de esta manera se pudo excluir otra información teniendo en cuenta las condiciones topográficas de las lagunas. Finalmente la generación de modelos sombras y pendientes ayudan a mejorar la calidad de información mediante un proceso automatizado. En consecuencia, se disminuye el tiempo en el proceso de corrección y ajustes de la cobertura de lagunas. Según Matsushita et

al. (2007), el EVI muestran ser más sensibles a los efectos de la topografía, como se puede observar en la figura 7 en la sección A, las sombras de topografía crean confusiones con los cuerpos de agua, y en la sección B, se muestra la corrección mediante capas de sombras y pendiente, que reflejan una buena corrección.

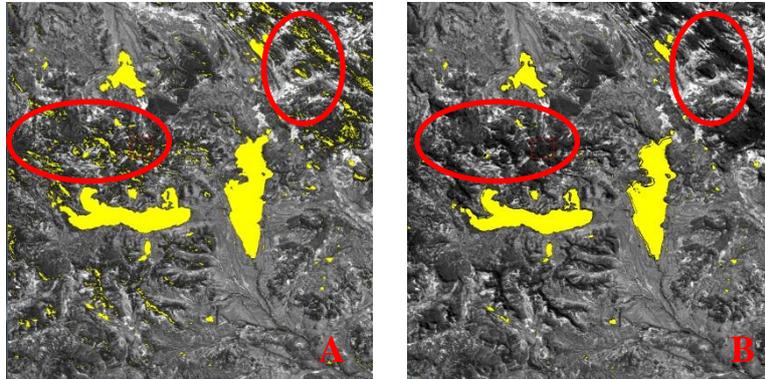


Figura 7. Comparación de dos imágenes en EVI, (A) aplicación de umbrales sin corrección de sombreado y pendiente, (B) con aplicación de corrección de sombra y pendiente.

Al evaluar de ambos índices, el NDWI muestra tener menores variaciones espaciales en zonas de alta montaña, como puede observar en la figura 8, sección A, presencia de pocos píxeles en zona de sombras. En la Sección B, muestra una corrección al aplicar las capas de sombra y pendiente. Se ha determinado que la aplicación de las capas auxiliares ayuda a realizar una mejor clasificación de los espejos de agua, discriminando los efectos de sombra.

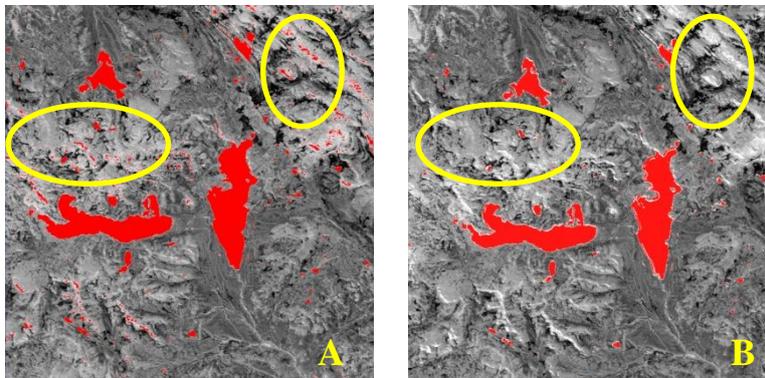


Figura 8. Comparación de dos imágenes en NDWI, (A) aplicación de umbrales sin corrección de sombreado y pendiente, (B) con corrección de sombra y pendiente.

En la figura 9, se muestra la imagen con corrección topográfica realizada por el método de corrección C por Teillet et al. (1982), obteniéndose casi los mismos resultados con las imágenes sin corrección. Por lo tanto no es relevante realizar la corrección topográfica para el tipo estudio. Lo importante en estos procesos es emplear métodos rápidos para discriminar píxeles mal clasificados. Según Matsushita et al. (2007), la aplicación de índices de alguna manera ayuda disminuir muchos errores en la imagen, como las condiciones atmosféricas, que son los determinantes para la identificación y evitar una confusión de píxeles.

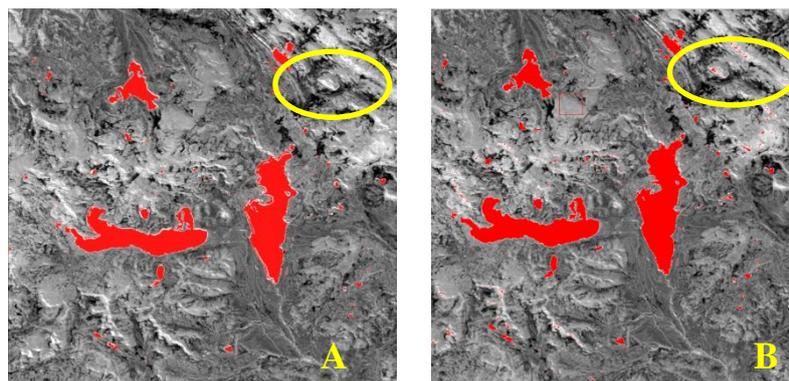


Figura 9. Comparación de dos imágenes en NDWI, (A) con corrección de sombra y pendiente y (B) con corrección topográfica.

Cuadro 2. Comparación de superficies identificadas mediante diferentes métodos de corrección

Corrección de sombra y pendiente	Corrección topográfica
94.55 Km <sup>2</sup>	199.93 Km <sup>2</sup>

Los resultados muestran que aplicando la corrección de sombra y pendiente se puede discriminar mayor cantidad de cuerpos de agua mal clasificados, determinándose una superficie de 94.55 Km<sup>2</sup> y con corrección topográfica se obtuvo un área de 199.93 Km<sup>2</sup>. Lo que indica que existe una diferencia de 105.38 Km<sup>2</sup> de área sobrestimada entre la corrección sombra-pendiente y la corrección topográfica.

#### 4. Conclusiones

La utilización de diferentes metodologías como la generación de máscara de sombras y pendientes, evita realizar trabajos muy complicados que requieren de tiempo de edición y con resultados que en pocos casos son mejorados, como los procesos de la corrección topográfica de las imágenes de satélite, es mejor corregir las imágenes de una manera práctica, que ayude recolectar información de una manera muy rápida a partir de la creación de capas auxiliares como máscaras de sombras y de pendientes para su una aplicación directa que ayudan a excluir píxeles que no correspondan a un umbral de agua.

Se ha determinado que el EVI presenta mayor distorsión por el efecto del sombreado de topografía, pero sin embargo presenta mejores resultados comparados con una clasificación supervisada, debido que existe una mayor confusión de píxeles con las sombras. En cambio el NDWI, mostraron los mejores resultados en la identificación de lagunas, porque se ven menos afectadas por la topografía del terreno. La calidad de la información obtenida puede mejorar con el uso de máscaras de sombras generados a partir del DEM, su ecuación sencilla permite ser más recomendable y aplicable cuando se trabaja con diferentes sensores espaciales.

La aplicación de ambos índices es una alternativa más viable cuando se pretenda inventariar lagunas en alta montaña a escalas regionales, de manera automatizada, en comparación con los métodos tradicionales que demandan mayor tiempo de edición y procesamiento, como la digitalización manual o la clasificación supervisada.

## **Agradecimientos**

Se agradece a la NASA por la disponibilidad gratuita de las imágenes de satélite Landsat, los que hacen posible realizar muchas investigaciones en el campo de la teledetección espacial, Así mismo se agradece a la iniciativa de Planet Action por la licencias otorgadas del software ENVI+IDL y ArcGIS, los cuales permitieron el procesamiento de los datos.

## **Referencias Bibliográficas**

- Bunkei Matsushita, Wei Yang , Jin Chen , Yuyichi Onda and Guoyu Qiu. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-Density Cypress Forest”, *Sensors* 2007, 7, p.2636-2651, 2007.
- Chander, G., Markham, B.I. Revised Landsat-5 TM Radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41(11), p. 2674-2677, 2003.
- Gao, B. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sens. Environ.*, 58, p.257–266, 1996.
- Huete, A., Justice, C., & Liu, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, 49, p.224– 234, 1994.
- Meyer, P., Itten, K. I., Kellenberger, T., Sandmeier, S. y Sandmeier, R. Radiometric correction of topographically induced effects on Landsat TM data in an Alpine environment, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.48, No. 4, pp. 17-28, 1993.
- Minnaert, J. L. The reciprocity principle in lunar photometry, *Astrophysics Journal*, Vol.93, p. 403-410, 1961.
- ONERN. Inventario nacional de lagos y lagunas y represamiento. Segunda Aproximación. Lima, 1980, 406p.
- Teillet, P.M., Guindon, B. y Goodenough, D.G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2), p. 1537-1540, 1982.