



Evaluación de métodos de corrección atmosférica y sombreado topográfico en imagen *Landsat 8 OLI* sobre un área montañosa semiárida

Assessment of atmospheric and topographic correction methods in Landsat 8 OLI imagery on a semi-arid mountainous area

Cristopher Edgar Camargo Roa¹, Carlos Eduardo Pacheco Angulo², Roberto López Falcón³

Para citar este artículo: Camargo, C.E. Pacheco, C.E. & López, R. (2021). Evaluación de métodos de corrección atmosférica y sombreado topográfico en imagen *Landsat 8 OLI* sobre un área montañosa semiárida. *UD y la Geomática* (16), 23-39.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448407.17040>

Fecha de envío: 01 de septiembre de 2020

Fecha de aceptación: 21 de diciembre de 2020

RESUMEN

Una variedad de correcciones atmosféricas (CA) y de sombreado topográfico (CST) fueron aplicadas a una imagen satelital Landsat 8 OLI, las cuales fueron evaluadas visual y estadísticamente con el fin de encontrar la combinación más deseable de ambas, aumentar su calidad visual y, con ello, posibilitar mejores análisis de interpretación y posprocesamiento digital. Los resultados para las primeras correcciones mostraron que la imagen con LaSRC resulta una buena opción, debido posiblemente a su consideración de los ángulos cenitales y azimutales de cada uno de los píxeles, en contraste a los otros métodos desarrollados (*MODTRAN* y *QUAC*); aunado a ello, su escogencia significa ahorro de tiempo en la ejecución de algún otro proceso de corrección de este tipo. En cuanto a las segundas correcciones, el método que mostró un resultado superior fue Minnaert, al preservar mejor los valores de reflectancia y disminuir la desviación estándar con respecto a las imágenes con solo correcciones atmosféricas usadas como referencia de partida (excluyendo *QUAC*), lo cual fue confirmado por la baja infraestimación o sobrestimación mostrada en el análisis visual. Por último, C-Corrección aplicado sobre *QUAC* denotó el peor resultado al presentar un elevado valor de media y una elevada varianza, por lo que hace descartable a dicha combinación.

Palabras clave: Coseno, *C-Corrección*, *LaSRC*, Minnaert, *MODTRAN*, *QUAC*.

ABSTRACT

A variety of atmospheric (AC) and topographic shading (TSC) corrections were applied to a Landsat 8 OLI satellite image, which were visual and statistically evaluated in order to find the most desirable combination of both, to increase its visual quality and thus enable better interpretation analysis and digital post-processing. The results for the first corrections showed that the image with LaSRC is a good option, possibly due to its consideration of the zenithal and azimuthal angles of each of the pixels, in contrast to the other methods developed (*MODTRAN* and *QUAC*); in addition, its choice means timesaving in the execution of some other correction process of this type. For the second corrections, the method that showed a superior result was Minnaert, preserving better the reflectance values and decreasing the standard deviation with respect to the images with only atmospheric corrections used as a starting reference (excluding *QUAC*), which was confirmed by the low underestimation or overestimation shown in the visual analysis. Finally, C-Corrección applied to *QUAC*, showed the worst result as it had a high average value and a high variance, making this combination unusable.

Keywords: Cosine, *C-Corrección*, *LaSRC*, Minnaert, *MODTRAN*, *QUAC*.

1 Universidad de los Andes (ULA). Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Edif. Principal, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: ccamargoroa@gmail.com

2 Universidad de los Andes (ULA). Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Edif. Principal, Mérida, Venezuela. Correo electrónico: carlosa@ula.ve

3 Universidad de Los Andes (ULA). Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Correo electrónico: rlopez@ula.ve.

Introducción

Para utilizar de forma confiable los productos de la tecnología satelital, resulta indispensable eliminar o disminuir los efectos perturbadores que se asocian con la información espectral que captan los sensores a bordo de las plataformas espaciales (Paz, 2018), las cuales son producidas por los gases y partículas existentes en la atmósfera que provocan la dispersión o absorción de la radiación solar (Aguilar, Mora y Vargas, 2014; Soares *et al.*, 2015; Palacios *et al.*, 2018), y por la influencia del relieve, que altera la estructura vertical de la atmósfera y por tanto de sus propiedades radiactivas con respecto a la reflexión y transmisión de la radiación solar que modifica las condiciones de iluminación del terreno (Grau, Vicent y Moreno, 2014; Ma, Jia, Schaeppman y Zhao, 2020). Ambas alteraciones ocurren en las trayectorias: descendente de la radiación desde el Sol a la superficie de la Tierra, y en la ascendente detectada por los sensores satelitales (Flood, Danaher, Gill y Gillingham, 2013; López *et al.*, 2016; Paz, 2018).

La eliminación eficaz de efectos atmosféricos y topográficos de las imágenes satelitales es un paso esencial de preprocesamiento para: i) cartografiar con precisión la cobertura terrestre en zonas montañosas (Themistocleous, Hadjimitsis, Retalis y Chrysoulakis, 2012; Pons, Pesquer, Cristóbal y González, 2014; Vanonckelen, Lhermitte, Balthazar y Van Rompaey, 2014); ii) realizar comparaciones entre imágenes de amplias regiones en diversos años (Hantson y Chuvieco, 2011; Goslee, 2012); iii) restaurar valores de radiancia obtenidos, para acercarlos a valores que hubieran tenido en condiciones de percepción ideal y ausencia del efecto atmosférico (Tristán, Wainschenker y Doorn, 2008); iv) eliminar posibles interferencias en la correlación suelo/datos del satélite, necesario para el estudio de procesos de erosión (Sobrino, García, Sobrino y Boluda, 1997); v) reducir la influencia de las sombras de áreas de alto relieve que puedan modificar la respuesta espectral de las coberturas (Hantson y Chuvieco, 2011; Grau, Vicent y Moreno, 2014; Pimple *et al.*, 2017; Dong *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2020), y vi) identificar las propiedades biofísicas de los objetos (reflectancia y temperatura) (Gomes *et al.*, 2012; Palacios *et al.*, 2018). Ejemplos de aplicación de correcciones han sido Carpintero *et al.* (2007); Alatorre y Beguería (2009); Pons *et al.* (2014); Pimple *et al.* (2017); Vázquez-Jiménez *et al.* (2017), y Dong *et al.* (2020), entre otros. La obtención de las propiedades biofísicas e imágenes radiométricamente corregidas requiere tomar en cuenta también aspectos inherentes al propio sensor (calibración de radiancia) y condiciones de observación (ángulos de iluminación y adquisición) (Chuvieco, 2016).

Para alcanzar tales objetivos se han desarrollado varios métodos de corrección atmosférica (CA) y de sombreado topográfico (CST), también conocido como corrección de la iluminación, corrección topográfica o normalización topográfica (Tan *et al.*, 2013). Los primeros tienen por

objetivo eliminar distorsiones causadas por la interacción entre la radiancia y la atmósfera (IGAC, 2007; Themistocleous *et al.*, 2012; Vanonckelen *et al.*, 2014), y obtener la reflectancia espectral de la superficie (Gomes *et al.*, 2012). Los segundos tienen como objetivo eliminar o reducir la distorsiones topográficas derivando la radiancia que se observaría en un terreno plano (Vanonckelen *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2020), debido a que en zonas montañosas las zonas de umbría tienden a presentar menor reflectividad de la que deberían, y las de solana, a denotar reflectividad más alta de la esperada (Riaño, Salas y Chuvieco, 2001); también buscan atenuar la variabilidad de las reflectancias ocasionadas por los efectos BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Factor*) del terreno (Tan *et al.*, 2010) y las sombras generadas por el relieve circundante, sobre todo para ángulos de iluminación solar bajos (Gonzales, 2008).

Existen cuatro métodos para realizar CA: 1) mediciones *in situ* estableciendo perfiles de la composición atmosférica por radiosondeos o mediciones de radiancia en el terreno; 2) a partir de otros sensores que proporcionen estimaciones de variables o propiedades atmosféricas; 3) modelos de transferencia radiactiva (MTR) basado en atmósferas estandarizadas, y 4) desde los datos y propiedades de la escena (Chuvieco, 2016). Por su parte los métodos de CST pueden ser clasificados como lambertianos (reflexión difusa) y no lambertianos (reflexión especular) (Teillet, Guindon y Goodenough, 1982; Füreder, 2010; IGAC, 2007; Pimple *et al.*, 2017).

En este estudio solo se aplicaron a una imagen Landsat 8 de un área montañosa semiárida, CA basados en MTR y desde los datos de la propia imagen como *MODerate resolution atmospheric TRANsmision* (MODTRAN) (Berk *et al.*, 2006) a partir del módulo FLAASH (*fast line-of-sight atmospheric analysis spectral hypercubes*) (Adler-Golden *et al.*, 1999) y *QUick Atmospheric Correction* (QUAC) (Bernstein *et al.*, 2005; Bernstein, Jin, Gregor y Adler-Golden, 2012). Adicionalmente se utilizó una imagen corregida y suministrada por el USGS (reflectancia de superficie, SR); ejemplos de su empleo para ejecutar sobre ellas CST, han sido Vázquez-Jiménez *et al.* (2017) y Dong *et al.* (2020). En lo que respecta a las CST, aplicadas sobre las imágenes con CA, se empleó el modelo físico del Coseno (Teillet, Guindon y Goodenough, 1982), y los modelos semiempíricos *C-Correction* (Teillet, Guindon y Goodenough, 1982) y Minnaert (1941). No se empleó método empírico alguno, porque estos suelen presentar mayores errores en sus correcciones (Ma *et al.*, 2020).

Dado al interés que reviste poseer imágenes satelitales corregidas, el objetivo de este trabajo consistió en primera instancia evaluar las CA MODTRAN y QUAC desarrolladas en conjunción a la imagen *LaSRC*. Dicho análisis se realizó a partir de la comparación visual de firmas espectrales de algunas coberturas significativas entre sí y con curvas espectrales procedentes de una biblioteca espectral (Kokali *et al.*, 2017), por medio de pruebas estadísticas

para muestras relacionadas, y análisis visual de imágenes, que permitieron determinar la mejor CA a utilizar. Por su parte, dado que recopilar datos de verdad-terreno resulta imposible para validar (Fan *et al.*, 2018), los resultados de CST fueron estudiados mediante una prueba estadística de homogeneidad y coeficiente de variación (CV), asociado al análisis visual, las cuales posibilitaron la definición de la mejor corrección de este tipo, en la búsqueda de establecer la mejor combinación de correcciones radiométricas (CA + CST).

Se seleccionó el área de la microcuenca Quebrada Seca, por presentar áreas montañosas con pendientes fuertemente ondulada a colinosa (8 % a 30 %) y fuertemente socavada a montañosa (> 30 %) (según clasificación de la pendiente FAO y Unesco, 1976), donde las respuestas espectrales de las coberturas y diversos procesos de erosión existentes pueden ser modificadas tanto por su posición en el relieve (zonas de solana y umbría) con respecto al sensor y el sol, como por la influencia de los componentes atmosféricos. La mencionada área se encuentra bajo una condición climática seca semiárida (Matteucci, 1986) que la convierte en un área susceptible a erosión (Tsegaye, Ad-dis y Hassen, 2020) y, por ende, a desertificación (Urbina, 2017), características que la ubican como área de interés para la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la agenda 2030 (United Nations General Assembly, 2015; UNCCD, 2015; Orr *et al.*, 2017).

Metodología

Área de estudio

Se encuentra al occidente del estado Táchira (Venezuela), entre 72°26'43" y 72°21'23" W y 7°58'29" y 7°54'11" N. Su altitud varía entre 260 m y 1622 m. Desde el punto de vista político-administrativo, pertenece al municipio Pedro María Ureña, y tiene una extensión de 37,31 km², con 12 km de largo por 3,9 km de ancho (Camargo, Pacheco y Jaimes, 2018). Presenta dos unidades de paisaje fácilmente distinguibles (figura 1), el montañoso de pendientes moderadas a fuertes y las áreas bajas del amplio valle del río Táchira (Alvarado, Sánchez, Rodríguez y Pereira, 1981).

Datos

Se empleó una imagen Landsat 8 OLI captada el 01 de octubre del año 2017 a las 11:06 a. m. (Path: 007, Row: 055), con nivel de corrección geométrica y radiométrica L1T (IGAC, 2013), cuyos ángulos solares de elevación y azimut son 64,51° y 113,95°, respectivamente. Cuenta con 9 bandas que recogen diferentes longitudes de onda (no se emplearon las bandas TIRS 1 y 2 en este estudio).

Adicionalmente, se utilizó un MDE ASTGTM 2 (ASTER Global Digital Elevation Model) (NASA JPL, 2009) con tamaño de pixel de 1 arco segundo (30 m). Ambos

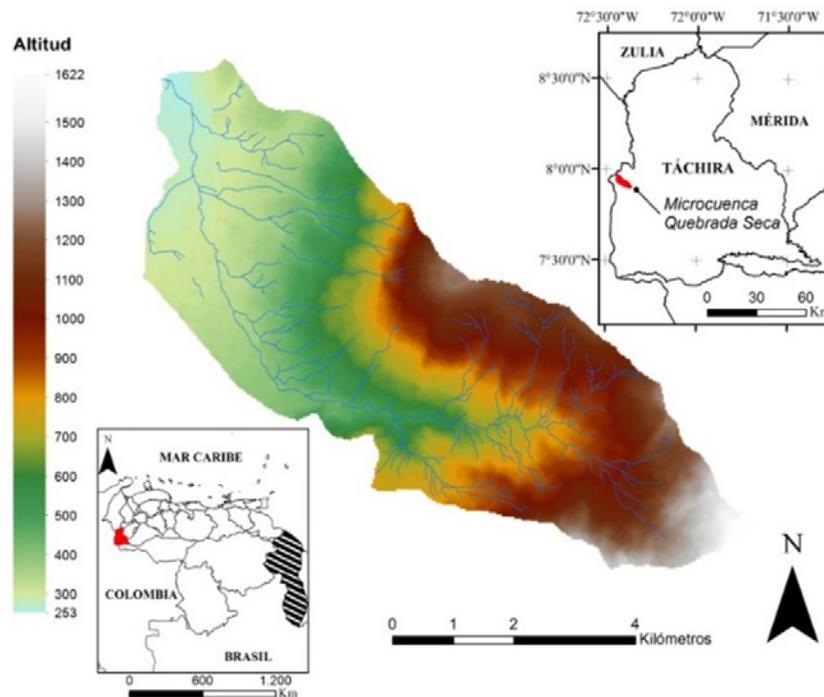


Figura 1. Ubicación de la microcuenca Quebrada Seca y modelo digital de elevación

Fuente: elaboración propia a partir del ASTER DEM y la cartografía oficial del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar.

productos de distribución gratuita fueron descargados de la colección del U.S. Geological Survey (USGS: <http://earthexplorer.usgs.gov/>). También se solicitó la misma imagen ya corregida y con valores de reflectancia de la superficie (SR).

De igual manera, se empleó una imagen *Digital Globe* (color natural), de fecha 7 de mayo de 2018, cedida por la organización Digital Globe, responsable de los satélites QuickBird y World View – 1 y 2, con resolución espacial de 50 cm (SIGIS, 2019), soportada en el *software Google Earth*, propiedad de Google, que permite su visualización y utilización para investigaciones y trabajos sin fines lucrativos (Soares y Mendes, 2014); dicha imagen permitió la correcta ubicación y selección de las muestras espectrales representativas (vegetación, suelo desnudo y urbanismo). Otros datos utilizados fueron tres firmas espectrales representativas similares a las previas mencionadas, descargadas de la librería espectral de la USGS versión 7 y remuestreadas a la respuesta espectral de las bandas Landsat 8 OLI (Kokali *et al.*, 2017) (<https://crustal.usgs.gov>).

Correcciones atmosféricas (CA) y de sombreado topográfico (CST)

Para las primeras, se recurrió a tres procesos, basados tanto en MTR como en propiedades de la propia imagen Landsat 8. En el primero, se convirtieron los niveles digitales (ND) de la imagen original a variables biofísicas de significancia estándar (reflectancia) (López *et al.*, 2016). Esto implicó, en primer lugar, la transformación de los ND a valores de radiancia, tomando en consideración los coeficientes de calibración del sensor (Chuvieco, 2016) y un factor de escala de 0,1 para poder obtener la imagen en $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \text{ sr nm}$ (Harris Geospatial Solution, 2018), dado a que los ND son proporcionales a la radiancia capturada originalmente por el sensor (Aguilar, Mora y Vargas, 2014). En segundo lugar, fueron normalizados, llevándolos de energía reflejada a valores de reflectividad (Tristán, Wainschenker y Doorn, 2008), que expresan en porcentaje, la relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie (IGAC, 2007; Chuvieco, 2008), alcanzado a partir de la aplicación del MTR *MODTRAN 4* (Berk *et al.*, 2006), el cual suele basarse en una serie de atmósferas estándar (en este caso tropical) que considera también los efectos de reflectividad bidireccional del terreno y de objetos cercanos (Chuvieco, 2016). Para la ejecución del modelo también se suministraron datos como altitud promedio del ASTGTM 2 del área (751 m), un modelo de aerosol rural, representativo de aerosoles en áreas no muy afectadas por fuentes urbanas o industriales (Abreu y Anderson, 1996), la asignación de las bandas SWIR 2 y roja para la recuperación de aerosoles y estimación de visibilidad promedio, método que define un pixel oscuro cuando la reflectancia es de 0,1 o menor

(Kaufman *et al.*, 1997), y una clara visibilidad inicial de la imagen (40 km). No se incluyó la recuperación de vapor de agua porque el sensor no cuenta con bandas adecuadas para realizar tal operación (rangos de $0,15 \mu\text{m}$ o superiores); tampoco se incluyeron datos de ángulo cenital y azimutal, dado al diseño de la arquitectura del plano focal del sensor, que está compuesto por cámaras de empuje constituido por 14 chips (con superposición entre sí) que miran ligeramente hacia adelante (impares) y hacia atrás (pares), que hace que cambie el ángulo de visión para cada línea (USGS, 2018a). Se escogió este modelo, pues al ser de base física, puede producir alta exactitud de los valores de reflectancia de la superficie y pueden ser usados en diferentes condiciones atmosféricas incluyendo variaciones geográficas y estacionales, dispersión atmosférica y absorción (Lu, Mausel, Brondizio y Moran, 2002).

El segundo proceso, denominado *QUAC*, consistió en la aplicación de un algoritmo que requirió solo una especificación aproximada de las ubicaciones de las bandas (longitudes centrales) y la calibración radiométrica de la escena, sin requerimiento de metadatos adicionales, lo que lo convierte en un método significativamente rápido, en contraste con los basados en principios físicos (Bernstein *et al.*, 2012), que le permite determinar los parámetros de compensación atmosférica directamente desde la información contenida dentro de la escena utilizando los espectros de píxeles observados (Bernstein *et al.*, 2005). *QUAC* está basado en el hallazgo empírico de que el promedio de la reflectancia de diversos materiales espectrales, como miembros finales espectrales en una escena, son esencialmente independientes de la imagen, siendo permitido también para cualquier ángulo de visión o elevación solar (ITT, 2009).

Para el tercer proceso, se solicitó la misma imagen con valores de reflectancia de superficie (SR) precisos y sólidos (Doxani *et al.*, 2018) al USGS, producida a partir de un código definido como *LaSRC* (Landsat 8 Surface Reflectance Code) (USGS, 2018a, 2018b), que genera en primer lugar, un producto de reflectancia en el techo de la atmósfera (TOA) usando parámetros de calibración de los metadatos (USGS, 2019), y que posteriormente es procesado con la banda aerosol costera (para realizar pruebas de inversión de aerosol), datos climáticos auxiliares de MODIS y un MTR único (algoritmo interno) para la generación de la reflectancia de superficie (USGS, 2018b) en el que se calculan, para cada pixel, los ángulos cenitales y azimutales del sensor (USGS, 2018d). También emplea un modelo de elevación digital derivado del ETOPO5 (USGS, 2019). Dicha imagen, fue necesario dividirla entre 10 000 para reescalar los datos y facilitar su lectura (Soares *et al.*, 2015) y posterior comparación con los modelos previos mencionados.

En cuanto a los métodos de CST, se aplicó el lambertiano del Coseno (Teillet, Guindon y Goodenough, 1982) que ignora la irradiancia difusa y solo considera el ángulo

cenital y solar incidente para su cálculo, y métodos no lambertianos como la ecuación de Minnaert (1941), aplicando una constante empírica K (Ma *et al.*, 2020) de 0,5 (1 caracteriza una superficie lambertiana ideal) y C -*Correction* (Teillet, Guindon y Goodenough, 1982), calculando el parámetro empírico C (Ma *et al.*, 2020), a partir de la regresión lineal entre el coseno del ángulo de incidencia solar i (iluminación) como variable independiente y los datos espectrales (reflectancia) como variable dependiente (Vázquez-Jiménez *et al.*, 2017), los cuales tratan de modelar la irradiancia difusa mediante constantes de BDRF, que describen las características de reflexión de las superficies (Füreder, 2010) (tabla 1). Previamente se suministró el ASTGTM 2 para generar el modelo de iluminación ($Cos\ i$) requerido por cada uno de los modelos de CST a partir de la ecuación (1):

$$Cos\ i = \cos\ e\ \cos\ z + \sin\ e\ \sin\ z\ \cos\ (a - a') \quad (1)$$

Donde, i es el ángulo solar local incidente; e , el ángulo de la pendiente; z , el ángulo cenital; a , el ángulo azimutal, y a' , el ángulo de orientación (Teillet, Guindon y Goodenough, 1982). $Cos\ i$ es un parámetro comprendido entre -1 y 1, indicadores de mínima y máxima iluminación, respectivamente (Pimple *et al.*, 2017). De modo más específico, el ángulo cenital (z) fue calculado a partir de la ecuación (2):

$$\text{Ángulo cenital} = 90^\circ - \theta_{SE} \quad (2)$$

En el que θ_{SE} es la elevación solar, proveída por los metadatos de la imagen (USGS, 2018c). Tanto CA como CST fueron ejecutadas en el *software ENVI 5.3* (Harris Geospatial Solution, 2015), aplicando además el método C -*Correction* en IDL, desarrollado por Canty (2009) de licencia pública.

Evaluación de correcciones atmosféricas

Para verificar el resultado de una CA, se deben observar las curvas de firmas espectrales de objetos conocidos presentes en una imagen (Soares *et al.*, 2015), a su vez, la comparación de gráficos espectrales de una misma cobertura, derivada de diferentes modelos, puede ser usada para analizar cuál método es el más razonable de acuerdo con la distribución espectral en las diferentes longitudes de onda (Lu *et al.*, 2002). Ejemplos de análisis comparativos han sido Lu *et al.* (2002); Kruse (2004); Gomes *et al.* (2012); Soares *et al.* (2015), y Araujo, Bruno, Ritcher y Rubim (2017).

Basado en estos preceptos, se realizó una comparación entre curvas de tres muestras de firmas espectrales representativas de la imagen (vegetación, suelo desnudo y urbanismo), obtenidas por los tres métodos de CA. Ello, aunado a su comparación con tres curvas espectrales de muestras de referencia para las bandas de Landsat 8, adquiridas de la librería espectral de la USGS versión 7 (Kokali *et al.*, 2017), dado a que en Venezuela no se dispone de una biblioteca espectral (Primera, 2011).

Las muestras fueron seleccionadas a partir de su visualización y localización (coordenadas XY) en la imagen satelital Landsat 8 OLI, cotejadas con una imagen Digital Globe (de mayor resolución). Dicha imagen proveyó una mejor discriminación de las coberturas presentes. En cuanto a las curvas espectrales de la librería, estas fueron seleccionadas a partir de su similitud espectral con las muestras obtenidas por los métodos de CA.

Posteriormente, se aplicó una prueba t de *Student* solo sobre la banda del IRC (Banda 5) de cada una de las CA, debido a que esta es una de las que contiene el mayor porcentaje de la información espectral de la vegetación (Baret, Guyot y Major, 1989; IBGE, 2001), que conduce a realizar

Tabla 1. Métodos de corrección topográfica

Corrección de Coseno (Teillet <i>et al.</i> , 1982)	Corrección de Minnaert (Minnaert, 1941)	C - <i>Correction</i> (Teillet <i>et al.</i> , 1982)
$L_H = L_T \times \frac{\cos z}{\cos i}$ L_H = reflectancia de una superficie horizontal. L_T = reflectancia de una superficie inclinada z = ángulo cenital solar i = ángulo local incidente	$L_H = L_T \times \left(\frac{\cos z}{\cos i}\right)^k$ L_H = reflectancia de una superficie horizontal. L_T = reflectancia de una superficie inclinada z = ángulo cenital solar i = ángulo local incidente k = constante de Minnaert	$L_H = L_T \times \frac{\cos z + c}{\cos i + c}$ L_H = reflectancia de una superficie horizontal. L_T = reflectancia de una superficie inclinada z = ángulo cenital solar i = ángulo local incidente k = constante de Minnaert $c = \frac{b}{m}$ para $L_T = m \times \cos i + b$ m = gradiente de regresión lineal: L_T -cos i b = intercepción de regresión lineal: L_T -cos i

Fuente: modificado de Füreder (2010).

una mejor discriminación de esta con el suelo y también a disminuir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de las distintas coberturas (Soria y Granados, 2005).

Exhibidas así las mayores diferencias entre valores reflejados en las curvas espectrales para ambas coberturas (suelo y vegetación, principalmente), sumado a la no practicidad de realizar este análisis para cada una de las bandas, la prueba se utilizó para comparar si entre las correcciones existía homogeneidad (Salinas, 2011) a un intervalo de significancia del 95 %, estableciéndose un valor p asociado al estadístico de contraste menor que alfa (0,05) para rechazar como hipótesis nula ($\mu_D = 0$), que las correcciones presentan diferencias ($\mu_D \neq 0$). El estadístico T se define como (ecuación (3)):

$$T = \frac{d}{S_D / \sqrt{n}} \quad (3)$$

Donde, d es la media de las variables (para cada par de comparación); n , el tamaño de la muestra, y S_D es la desviación estándar (Tapia, 2007). Se estableció un grado de libertad constituyendo además un modelo balanceado (mismo número de datos en cada muestra). Ejemplo del uso de esta prueba con igual nivel de significancia es Sanches, Andrade, Quartaroli y Rodrigues (2011).

Para realizar esta prueba, se comprobó que las muestras presentaran distribución normal, sumado al conocimiento de sus medias y desviaciones estándar (Berthouex y Brown, 2002); también se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov, con un nivel de corrección de Lilliefors de contraste de normalidad (Tapia, 2007). La prueba compara la función de distribución teórica con la observada y calcula un valor de discrepancia, representado habitualmente como D (Arana y Gaona, 2010; Zelterman, 2015). Así, D es una medida de distancia entre las distribuciones, donde valores cercanos a 1 indican alta separabilidad y valores cercanos a 0, semejanza (Gerstmann, Möller y Gläßer, 2016); por su parte, el nivel de corrección estima los parámetros de la distribución normal a partir del conjunto de datos (Ketelaar, 2009). Se determinaron 41 447 observaciones para cada una de las correcciones, definidas por los píxeles del área de estudio. Los resultados de esta prueba también sirvieron para conocer la influencia de cada una de las CA en los resultados de las CST.

Evaluación de correcciones de sombreado topográfico

Se realizó a partir de la inspección de las medias y desviaciones estándar sobre las imágenes con solo CA y combinada con CST respectivamente (Dong *et al.*, 2020; Füreder, 2010; Goslee, 2012; Hantson y Chuvieco, 2011; Law y Nichol, 2004; Meyer *et al.*, 1993; Pimple *et al.*, 2017; Vázquez-Jiménez *et al.*, 2017).

Las diferencias espectrales entre la imagen con CA y las de CST deben ser bajas, de lo contrario sería un signo de corrección excesiva o insuficiente (Füreder, 2010). De manera más específica, una CST efectiva debería reducir las variaciones espectrales y la desviación estándar aunado a una retención de la media (Law y Nichol, 2004), lo que significaría una reducción del impacto de la iluminación (Hantson y Chuvieco, 2011) o, en otras palabras, la remoción del efecto de sombreado (Pimple *et al.*, 2017). De manera detallada, las medias, fueron examinadas usando valores originales menos los corregidos, siendo solo de interés la magnitud y no la dirección de su diferencia (Goslee, 2012).

Inmediatamente, se planteó la relación de la desviación y la reflectancia media, expresada en porcentaje, la cual se espera disminuya después de una CST exitosa (Pimple *et al.*, 2017). Ejemplo de su uso han sido Richter, Kellenberger y Kaufmann (2009); Goslee (2012), y Pimple *et al.* (2017). Su formulación se expresa de la siguiente manera (ecuación (4)):

$$CV (\%) = \sigma / \mu \times 100 \quad (4)$$

Donde, CV es el coeficiente de variación, σ es la desviación estándar y μ es la media, de los valores de reflectancia. Para una mejor evaluación de los cambios de la corrección, la diferencia de CV entre las imágenes con CST y las sin corregir (CA), ha sido calculada a partir de su resta (Vanonckelen *et al.*, 2014), expresada de la forma (ecuación (5)):

$$CV \text{ Diferencia} = CV \text{ pre-corrección} - CV \text{ post-corrección} \quad (5)$$

Análisis visual de correcciones

En cuanto al análisis visual en ambos tipos de correcciones, dado a que el efecto visual es más impresionante en la banda del IRC que en una banda visible (Law y Nichol, 2004; Grau *et al.*, 2014), esta se realizó en una composición falso color, basado en tres aspectos: i) la efectividad de la remoción de las sombras; ii) la consistencia del color antes y después, y si hay corrección excesiva, y iii) características de las texturas de las imágenes (Dong *et al.*, 2020). Muestras del empleo de este criterio se presentan en Meyer *et al.* (1993); Law y Nichol (2004); Füreder (2010); Hantson y Chuvieco (2011); Pimple *et al.* (2017); Vázquez-Jiménez *et al.* (2017); Yan *et al.* (2019), y Dong *et al.* (2020).

Resultados

Evaluación de correcciones atmosféricas

La comparación de las curvas espectrales obtenidas por los diversos métodos sobre las tres muestras seleccionadas entre sí para diferentes coberturas permitió constatar la

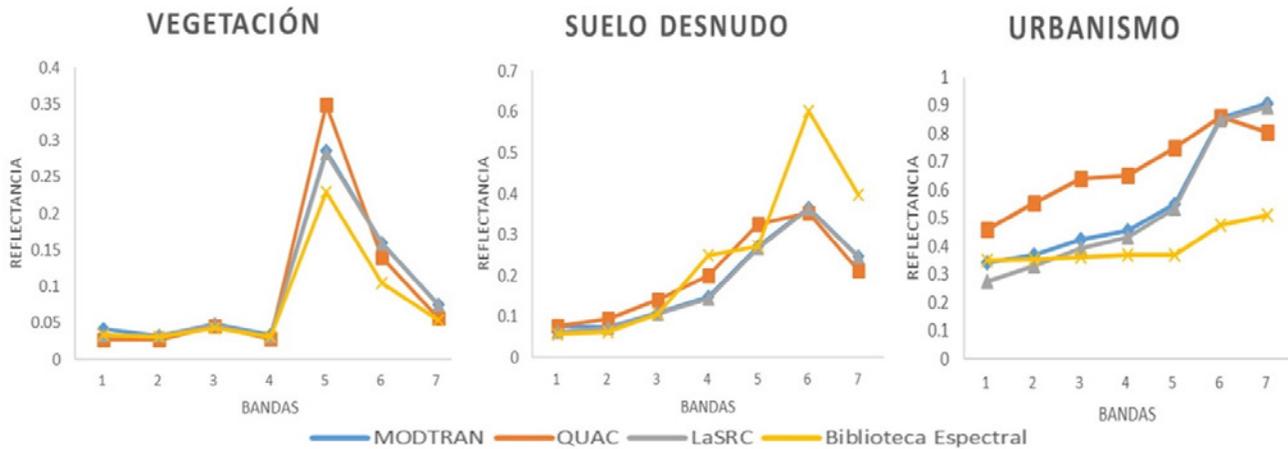


Figura 2. Comparación de valores de reflectancia en cada banda de Landsat 8 corregida por los métodos atmosféricos y de referencia de la biblioteca espectral

Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de cada una de las correcciones atmosféricas y de Kokali et al. (2017).

similitud entre los métodos *MODTRAN* y *LaSRC*, observándose una diferencia notable entre éstos y *QUAC*, principalmente en lo que respecta a suelo desnudo y urbanismo (figura 2). No se incluyó muestra referida a agua, debido a que los pocos píxeles existentes (pertenecientes al río Táchira) presentaban altos contenidos de sedimentos en un ancho oscilante o menor a 30 m de longitud, lo que ocasiona mezcla de reflectancias de diferentes cubiertas.

En cuanto a la escogencia de las curvas de referencia existentes en la biblioteca espectral, se seleccionaron: vegetación perenne siempre verde (*Pseudotsuga menziesii*), suelo desnudo con contenidos de hematita y otras fases minerales y lo concerniente a láminas de aluminio (empleada en techo en galpones y viviendas).

A partir de la comparación entre las curvas obtenidas y las de referencia, se pudo constatar que tanto las correcciones obtenidas por *MODTRAN* como *LaSRC* fueron las que más guardaron similitud con respecto a estas; por su parte, resultados arrojados por *QUAC* denotaron, para el caso de la vegetación, un comportamiento homólogo pero con un valor mayor de reflectancia en la banda 5 y menor en las restantes; de igual modo, este método presentó valores elevados en las bandas 1 a 6 y levemente menor en la 7 para suelo desnudo y urbanismo (mucho más marcado para este último). Finalmente, aunque existen diferencias muy marcadas en los valores de reflectancia para estas dos últimas clases en las curvas de referencia (bandas 6 y 7), su comportamiento es muy aceptable para establecer puntos de partida de comparación en las bandas del visible y el IRC.

Pasando ahora a la evaluación estadística, previamente a la aplicación de la prueba *t* de *Student*, se conocieron las medias y desviaciones estándar de las 41 447 observaciones extraídas de la banda 5 de cada una de las CA, siendo para *MODTRAN* μ 0,25539 y σ 0,044798; *QUAC* μ 0,30119 y σ 0,069430, y *LaSRC* μ 0,25081 y σ 0,043993,

respectivamente, las cuales expresan la similitud entre los métodos *MODTRAN* y *LaSRC*; por su parte, *QUAC* evidenció diferencias con respecto a estas. En cuanto al estadístico Kolmogorov-Smirnov (con corrección de la significación de Lilliefors), el *p*-valor asociado fue menor a 0,05 (0,027 para *LaSRC* y 0,028 para *MODTRAN* y *QUAC*); por tanto, se acepta la normalidad de las muestras en cada una de las CA desarrolladas.

Comprobada la normalidad de las observaciones en cada una de las CA desarrolladas, se aplicó la prueba de *t* de *Student* para muestras relacionadas. La tabla 2 señala, en primer lugar, que las correcciones son diferentes entre sí ($P < 0,05$) y, en segundo lugar, que *MODTRAN* y *LaSRC* son las que más se parecen al presentar la desviación estándar por par más baja; por cuanto *QUAC* comparado con los otros métodos (bajo este criterio) lo haría descartable de ser utilizado.

Evaluación de correcciones de sombreado topográfico

Previo a la evaluación de los resultados de CST, fue generado el modelo de iluminación requerido para la ejecución de estos, obteniéndose uno comprendido entre valores mínimo y máximo: de 0,21 y 0,99 (correspondientes a un ángulo de incidencia de 12,12° y 81,89° respectivamente), con una media de 0,83 (56,09°) y una desviación estándar de 0,09 (5,16°). Estos valores denotaron en primer lugar, el cálculo correcto del modelo, al hallarse entre el rango -1 y 1; en segundo lugar, la inexistencia de valores menores a 0 que significaría áreas totalmente ocultas al sensor y que se mostrarían totalmente oscuros, producto de los ángulos solares de elevación y azimut (64,51° y 113,95°) al momento de adquisición de la imagen (11:06 a.m.), que por el contrario permitieron una buena iluminación del área, y

Tabla 2. Prueba de muestras relacionadas de la banda 5 para cada una de las CA

		μ	σ	Desv. error prom.	95 % de intervalo de confianza de la diferencia		T	GL	Sig*
					Inferior	Superior			
Par 1	B5_MODTRAN - B5_LaSRC	0,0046	0,0011	0,0000	0,0046	0,0046	860,5850	41 446	0
Par 2	B5_MODTRAN - B5_Quac	0,0458	0,0246	0,0001	0,0460	0,0456	378,4200	41 446	0
Par 3	B5_Quac - B5_LaSRC	0,0504	0,0254	0,0001	0,0501	0,0506	403,0250	41 446	0

Fuente: elaboración propia.

tercero, a partir de los valores de media y desviación estándar, un ángulo de incidencia cercano al ángulo solar con poca variación, salvo en áreas muy específicas del modelo.

Obtenidas las diferentes combinaciones de CA y CST, se extrajeron las propiedades de las reflectancias (medias y desviaciones estándar) (tabla 3). La observación de las medias evidenció la mejor preservación de los valores de reflectancia por el método de Minnaert en las CA MODTRAN y LaSRC, siendo esta última la que presentó el menor valor entre ambas. Estos resultados fueron seguidos por C-Correction aplicado sobre MODTRAN y LaSRC.

En el mismo orden de ideas, C-Correction aplicado sobre la CA QUAC denotó el peor resultado al presentar un elevado valor de media, por lo que hace a dicha combinación, descartable. Por otra parte, el método del Coseno (excluyendo su combinación con LaSRC), presentó la mayor variación con respecto a esta medida en las tres CA. Resultados numéricamente soportados por la diferencia entre los valores de medias de reflectancia en bruto (imagen con solo CA) y medias de las imágenes con CST, siendo estos para MODTRAN-Minnaert 0,037; LaSRC-Minnaert 0,035; QUAC-Minnaert 0,037; LaSRC-Coseno 0,064; LaSRC-C-Correction 0,092; MODTRAN-C-Correction 0,094; QUAC-C-Correction 0,115; MODTRAN-Coseno 0,173, y QUAC-Coseno 0,173.

En cuanto a la comparación de las varianzas, solo el método de Minnaert sobre las CA MODTRAN y LaSRC disminuyeron las desviaciones estándar originales, siendo esta última combinación la que presentó el menor valor de ambas. Estos resultados nuevamente fueron seguidos por C-Correction sobre estas CA en el mismo orden jerárquico. En cuanto al resto de desviaciones, tendieron a aumentar, siendo el peor valor generado, el proporcionado por C-Correction sobre QUAC. Similarmente, los resultados para el método del Coseno no fueron satisfactorios (basados en este criterio). En cuanto a Minnaert sobre QUAC, presentó una varianza más cercana a la de la imagen original, mucho mejor a las presentadas por los métodos lambertianos en todas las CA (tabla 3).

Pasando al tema del coeficiente de variación (CV), se obtuvo que C-Correction sobre LaSRC seguido por

C-Correction sobre MODTRAN y Minnaert sobre LaSRC y MODTRAN consecutivamente, redujeron el CV. Por su parte, C-Correction sobre QUAC incrementó severamente el CV, debido a su alto valor en su desviación estándar en las bandas 1, 2 y 4 principalmente (figura 3). Finalmente, el método del Coseno sobre cualquiera de las CA presentó pocas variaciones. Estos resultados comparativos pueden vislumbrarse de mejor manera a partir de la comparación entre las diferencias existentes de CV entre las CA y las CST aplicadas sobre ellas, estas fueron: MODTRAN-Coseno 5,15 %; QUAC-Coseno 9,40 %; LaSRC-Coseno 9,97 %, MODTRAN-Minnaert 10,71 %; QUAC-Minnaert 11,87 %; LaSRC-Minnaert 12,18 %; MODTRAN-C-Correction 16,30 %; LaSRC-C-Correction 18,20 % y QUAC-C-Correction 5662,68 %.

Análisis visual de correcciones

Las figuras 4, 5 y 6 son composiciones en falso color (543), tanto para CA (literal a) como para CST aplicados sobre estas (literales b, c y d), que cuentan, además, con pequeñas subescenas ampliadas en áreas críticas para evidenciar los diferentes resultados. Literales a denotan la presencia de áreas sombreadas generadas por el efecto del relieve; los b, c y d evidencian los diferentes resultados de reducción de estas, preservando la respuesta espectral; sin embargo, dichas correcciones resultaron insuficientes para muchos sectores de las imágenes.

Un análisis visual sobre las CST realizadas en la imagen con CA por el método MODTRAN, denotó un exceso de corrección por el método C-Correction (áreas demasiado brillantes); de igual modo, el método del Coseno generó, aunque en menor grado, exceso de CST. El mejor resultado visual lo presentó la CST de Minnaert (mantenimiento del color, textura y sin sobrecorrección). Resultados similares presentaron los diversos métodos de CST aplicados a la imagen corregida por el método LaSRC (figura 4).

En cuanto a las CST sobre QUAC, visualmente no presentaron un resultado adecuado, debido a que estas imágenes exhibieron tonalidades oscuras en sus píxeles que

Tabla 3. Medias y desviaciones estándar para cada CA y posterior combinación con las CST

BANDA	MODTRAN		MODTRAN-Coseno		MODTRAN-Minnaert		MODTRAN-C-Correction	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
1	0,051	0,022	0,062	0,027	0,053	0,022	0,058	0,023
2	0,043	0,022	0,053	0,027	0,045	0,022	0,051	0,024
3	0,063	0,024	0,077	0,029	0,066	0,024	0,072	0,026
4	0,058	0,031	0,070	0,037	0,060	0,032	0,070	0,037
5	0,255	0,045	0,314	0,062	0,269	0,046	0,270	0,046
6	0,194	0,049	0,237	0,056	0,204	0,048	0,219	0,049
7	0,112	0,049	0,136	0,055	0,117	0,048	0,132	0,052

BANDA	QUAC		QUAC-Coseno		QUAC-Minnaert		QUAC-C-Correction	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
1	0,042	0,032	0,050	0,038	0,043	0,032	0,041	2.149
2	0,046	0,035	0,055	0,042	0,048	0,036	0,059	0.214
3	0,069	0,039	0,084	0,046	0,072	0,039	0,085	0,049
4	0,066	0,047	0,079	0,054	0,068	0,047	0,085	0,272
5	0,301	0,069	0,370	0,089	0,316	0,070	0,324	0,072
6	0,176	0,051	0,215	0,058	0,184	0,050	0,201	0,052
7	0,090	0,044	0,109	0,049	0,094	0,044	0,109	0,049

BANDA	LaSRC		LaSRC-Coseno		LaSRC-Minnaert		LaSRC-C-Correction	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
1	0,036	0,016	0,044	0,018	0,038	0,016	0,042	0,016
2	0,039	0,018	0,048	0,021	0,041	0,018	0,046	0,019
3	0,060	0,022	0,073	0,026	0,062	0,022	0,068	0,024
4	0,053	0,030	0,064	0,035	0,055	0,030	0,065	0,037
5	0,251	0,044	0,309	0,061	0,264	0,045	0,265	0,045
6	0,193	0,049	0,235	0,056	0,202	0,048	0,217	0,049
7	0,110	0,048	0,134	0,054	0,115	0,048	0,130	0,052

Fuente: elaboración propia.

dificultarían un análisis discriminativo de coberturas (sobrecorrección, cambios de color y textura en algunos sectores). En este caso, *C-Correction* evidenció una corrección excesiva en algunas áreas, seguido del método del Coseno; de modo semejante, la mejor corrección se estableció para el método de Minnaert (figura 5).

Finalmente, las CST aplicadas sobre la imagen con el tratamiento *LaSRC* señalaron nuevamente una excesiva corrección por el método *C-Correction*. Por su parte, Coseno sobreestimó de forma mínima algunos sectores. El mejor resultado fue presentado por Minnaert (mantenimiento de los criterios visuales de evaluación) (figura 6).

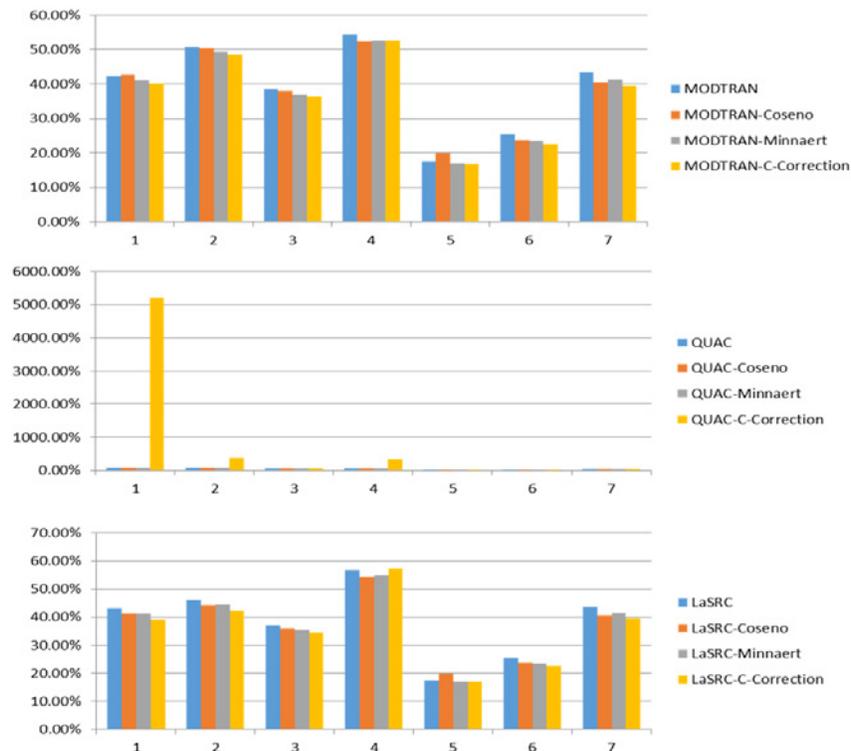


Figura 3. Coeficientes de variación de las CA y CST

Fuente: elaboración propia.

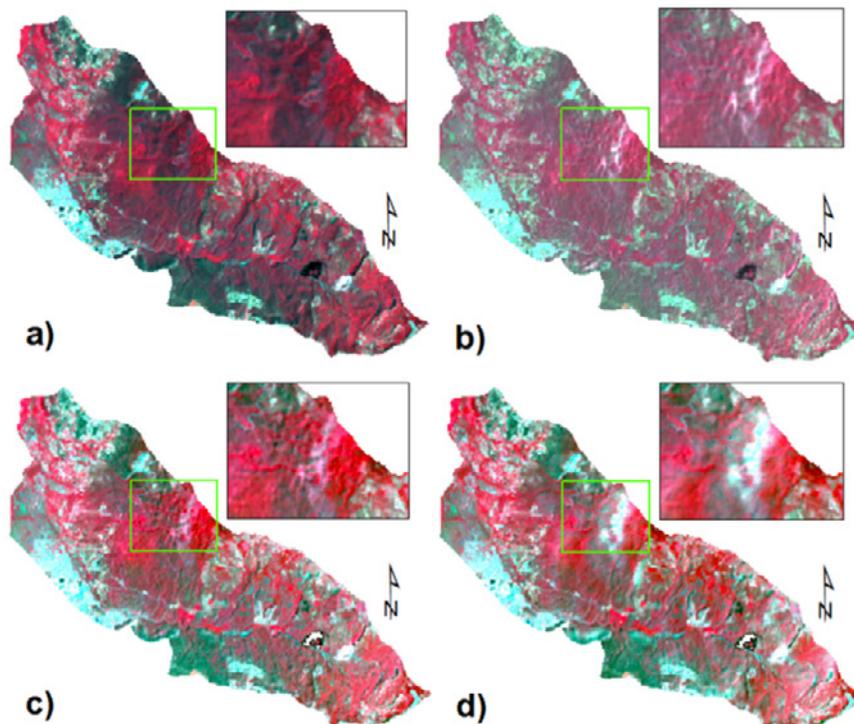


Figura 4. CST a partir de CA por el método MODTRAN: a) MODTRAN b) Coseno sobre MODTRAN, c) Minnaert sobre MODTRAN y d) C-Correction sobre MODTRAN

Fuente: elaboración propia.

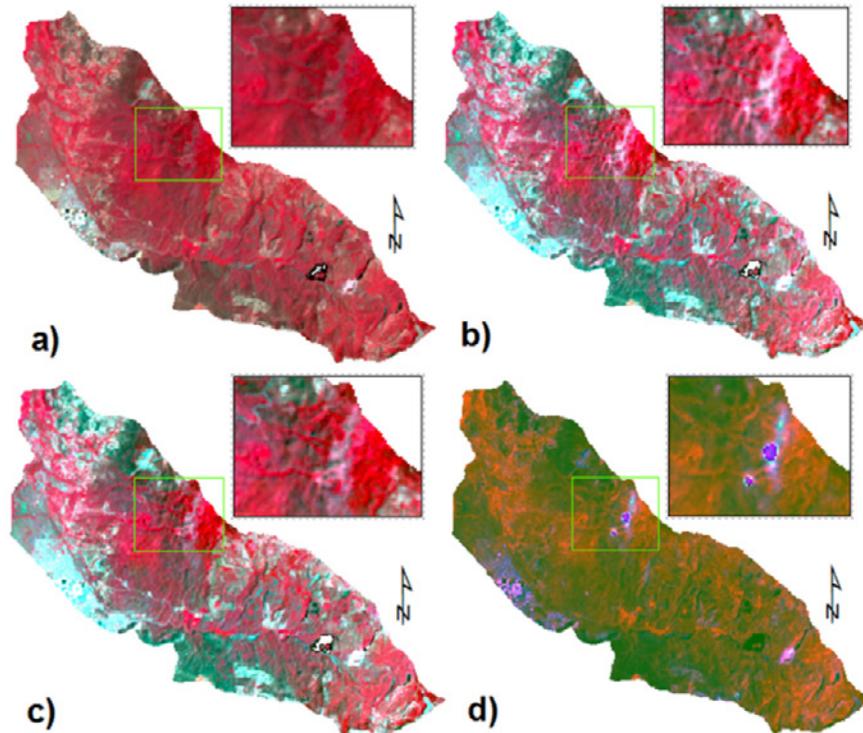


Figura 5. CST a partir de CA por el método QUAC: a) QUAC b) Coseno sobre QUAC, c) Minnaert sobre QUAC y d) C-Correction sobre QUAC
Fuente: elaboración propia.

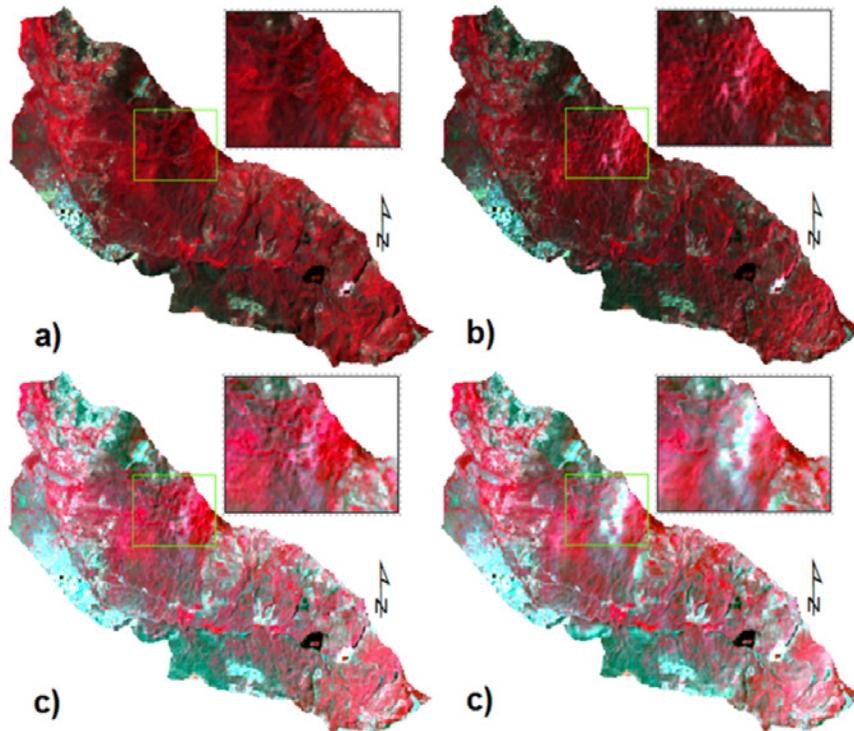


Figura 6. CST a partir de CA por el método LaSRC: a) LaSRC b) Coseno sobre LaSRC, c) Minnaert sobre LaSRC y d) C-Correction sobre LaSRC
Fuente: elaboración propia.

Discusión

En la comparación de gráficas de curvas de reflectancia, cabe señalar previamente que no resulta adecuado comparar el resultado de una CA con una imagen con solo reflectividad aparente calculada, pues esta última, aunque cambia la escala de medición a un parámetro físico de los ND, no corrige efectos atmosféricos o la influencia debida a cubiertas vecinas, a ángulos de observación, o condiciones de iluminación (Chuvieco, 2016), razones por la que en este estudio no fue cometida tal comparación. La no utilización de la reflectancia aparente también se puede demostrar, si se compara con valores teóricos (Araujo *et al.*, 2017).

En lo que respecta a la comparación de curvas entre sí y con curvas de reflectancia de referencia (bibliotecas espectrales), estas han resultado ser muy útiles con el fin de determinar el mejor método de corrección sobre otros planteados, ejemplos de ello ha sido Brizuela, Aguirre y Velasco (2007); Sanches *et al.* (2011), y Araujo *et al.* (2017). No obstante, en algunos casos, la escogencia de un método de CA amerita un análisis más detallado, debido a la infraestimación o sobrestimación de reflectancias en algunas bandas, como el reseñado por Chuvieco (2016) para los métodos ATCOR y de Chávez (objeto oscuro) aplicados a una imagen Landsat ETM.

Ahora bien, las imágenes obtenidas tanto por el método MODTRAN como LaSRC, bajo el criterio de la comparación de curvas de reflectancia, las hacen seleccionables (a partir de los patrones similares a las curvas espectrales de referencia), por encima del obtenido por QUAC. De este modo se corrobora que MODTRAN y LaSRC constituyen los resultados más acordes, por ser productos de modelos basados en principios físicos y absolutos que, aunque más complejos, son más precisos que aquellos basados en métodos de calibración para normalizar la variación, como los ajustes de histogramas, la substracción del pixel oscuro y los modelos de regresión (Lu *et al.*, 2002).

Del análisis integrado de las medias y desviaciones estándar de los métodos de CST, se obtuvo que el método de Minnaert aplicado sobre LaSRC constituyó el mejor resultado, seguido por esta misma CST sobre MODTRAN (diferencia generada posiblemente por el cálculo de ángulos cenitales y azimutales para la imagen en LaSRC). La determinación de Minnaert como mejor método fue también encontrada por Meyer *et al.* (1993) y Goslee (2012) en sus comparaciones de modelos. Por su parte C-Correction sobre QUAC representó el peor resultado, seguido del método del Coseno sobre cualquier CA planteada, que presentó, además, la menor reducción del efecto topográfico; resultado también encontrado por Gonzales (2008), Füreder (2010) y Pimple *et al.* (2017) en sus respectivos análisis.

En este sentido, Minnaert sobre QUAC presentó un resultado intermedio entre valores adecuados e inadecuados, lo que da poca consistencia a la combinación de ambos métodos. Por último, aunque C-Correction fue el peor

resultado, no resulta descartable del todo, pues este método podría ser utilizado solo para clasificar píxeles boscosos (Pimple *et al.*, 2017).

En este estudio no se aplicó CST por el método SCS + C (*Sun Canopy Sensor + C-Correction*) propuesto por Soenen, González y Álvarez (2005), el cual toma en consideración aparte de los ángulos cenital ($\cos z$) y de iluminación ($\cos i$) y el parámetro C, la pendiente del terreno y el gravitropismo de la vegetación (Ma *et al.*, 2020), debido a que este fue desarrollado para mejorar la iluminación de escenas boscosas (Sola *et al.*, 2016) y no tanto de las que presentan suelos desnudos; así lo reconocieron Vázquez-Jiménez *et al.* (2017), quienes hallaron la poca corrección de esta cobertura por este método, y que los conllevaron además a corroborar su no recomendación para áreas no forestales. Tampoco se desarrolló el modelo empírico de rotación (Tan *et al.*, 2010; Tan *et al.*, 2013), debido a que fue diseñado para un fin similar, es decir, su aplicación en áreas forestales de imágenes Landsat.

Por otro lado, aunque los valores de las medias cercanas a 0 restan utilidad al CV, debido a que cualquier cifra de desviación refleja altos coeficientes de dispersión (% de variación) (Salinas, 2011), esta medida resultó útil para establecer comparaciones sobre el porcentaje de correcciones realizadas en cada una de las imágenes, como la excesiva corrección de C-Correction sobre QUAC o la baja reducción del efecto topográfico del método del Coseno.

Cabe destacar que el impacto de la atmósfera es mucho más fuerte en la parte visible del espectro electromagnético que en el IRC, por lo que la influencia de la irradiancia difusa es mucho más importante, especialmente en píxeles escasamente iluminados, donde el efecto de la corrección de la iluminación se reduce por el efecto de manchado de la atmósfera, de modo que la evaluación de una CST solo podría examinarse correctamente después de una CA (Meyer *et al.*, 1993). Sin embargo, la interpretación de este tipo de resultados dependerá en gran medida de la habilidad del analista de imágenes u observador (Sola *et al.*, 2016; Pimple *et al.*, 2017; Fan *et al.*, 2018), por lo que se debe procurar evaluar cada imagen con detenimiento.

Finalmente, los resultados de las CST han demostrado que son complejos y que solo pueden llegar a corregir hasta cierto punto el problema de la iluminación, evidenciando así, la inexistencia de un método único eficaz de realizarla completamente sobre una imagen (Yan *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2020). Por ello, las CST han sido analizadas a través de diferentes estadísticos sobre el efecto generado en diversos estratos de usos y coberturas de la tierra, pendientes, orientaciones, altitudes y ángulos de elevación solar e iluminación, en contraste a CST sin estratificación alguna, para definir sus efectividades (Goslee, 2012; Pimple *et al.*, 2017). Tales evaluaciones sectorizadas no resultan muy convenientes de realizar debido a que requieren información auxiliar como cartografía de usos y coberturas (en muchos casos inexistente), no muestran mejoras drásticas,

suelen ser inestables, poco claras en cómo determinarse, difíciles de comparar e imprácticas de establecer en cadenas de procesamiento automatizado, para que sean aplicables de forma rutinaria a grandes áreas (Sola *et al.*, 2016) o con amplia heterogeneidad (de los aspectos señalados), como lo es el caso de la microcuenca quebrada Seca, por cuanto este tipo de análisis no fue planteado o recomendado.

Conclusiones y recomendaciones

Basado solo en la deducción de la menor retención de la media, se podría asegurar que todas las CST aplicadas sobre una imagen con CA por el método *QUAC* son descartables considerando este enfoque. En este sentido, se logró apreciar una muy leve diferencia entre los resultados de CST obtenida sobre una imagen corregida por *MODTRAN* como *LaSRC*, siendo esta última la más baja entre ambas. Ello la haría, bajo este criterio, seleccionable para posteriores análisis basados en una variable física como la reflectancia. Exclusivamente se sugeriría el uso de *QUAC*, si el objeto de estudio implica simplemente realizar una valoración rápida de la cobertura vegetación, caso contrario con los suelos desnudos y urbanismo, donde la reflectancia es sobreestimada.

Ahora, si bien es cierto que *MODTRAN* y *LaSRC* fueron los resultados más satisfactorios en las CA, *LaSRC* representa la mejor opción, al calcular el ángulo cenital y azimutal para cada píxel, determinando, por ende, un resultado más acorde al esperado.

Sobre los métodos CST, se determinó que el método de Minnaert cumplió de mejor manera con los requerimientos propuestos a la hora de definir la escogencia del mejor método, como fue la preservación de la reflectancia, la retención de la varianza y la poca sobrestimación o subestimación de la iluminación en la imagen.

Si bien es cierto que el uso de los sensores remotos, y en especial, las imágenes satelitales ópticas electrónicas, permiten realizar investigaciones sobre coberturas, procesos de erosión y muchos otros fenómenos ambientales, tanto de forma cualitativa como cuantitativa al derivarse productos como índices de vegetación, de suelos, entre otros procesamientos digitales de imágenes (PDI), su utilización debe implicar un especial cuidado, ya que, sin cautela, pueden conducir a análisis y conclusiones sobrestimadas o subestimadas de los fenómenos involucrados, razón por lo que realizar CA y CST resulta imperante.

Uno de los aspectos que contribuye a la efectividad de una CST es la calidad del MDE empleado en la obtención de un modelo de iluminación, por lo que este debe ser previamente evaluado y corregido (si fuere el caso), a fin de que no contenga píxeles vacíos o valores negativos (ejemplo: -9999), los cuales pueden influir negativamente en el resultado. De igual modo, la resolución espacial del MDE afecta la precisión de las CST. Li *et al.* (2015) y

Dong *et al.* (2020) encontraron que un aumento de esta puede mejorarlas, debido a que el modelo de iluminación, requiere la derivación de la pendiente y orientación del mismo. Por ello, se sugiere desarrollar CST considerando MDE de mayor resolución, por ejemplo, Alos Palsar cuyo tamaño de píxel es de 12,5 m, lo que permitiría mejorar la precisión de los análisis de pendiente (Camargo, Calderón, Lobo y Ovalles, 2020), y de igual modo de la orientación, no obstante, este aspecto debe ser investigado de forma sistemática para evaluar su influencia sobre las CST.

Finalmente, el tema de las CA y CST resultan un campo de estudio amplio en los cuales hay que seguir investigando y considerar otros enfoques y variables, en procura de obtener la combinación de métodos más efectivos en áreas de suelos desnudos o erosionados de zonas montañosas donde se deseen desarrollar estudios de orden cuantitativo.

Agradecimientos

Al Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado (CEFAP) de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de los Andes (Mérida, Venezuela) y a su programa de Doctorado en Ciencias Forestales y Ambientales, al cual se vincula este documento. Y al Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT-ULA, Mérida).

Referencias bibliográficas

- Abreu, L. y Anderson, G. (1996). The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model. *Contract, 19628(91-C)*, 0132.
- Adler-Golden, S., Matthew, M., Bernstein, L., Levine, R., Berk, A., Richtsmeier, S., Acharya, P., Anderson, G., Felde, G., Gardner, J., Hoke, M., Jeong, L., Pukall, B., Mello, J., Ratkowski, A. y Burke, H. (1999). Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN4. *SPIE Proceedings, Imaging Spectrometry, 3753*, 61-9.
- Aguilar, H., Mora, R. y Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central, 2(53)*, 39-59.
- Alatorre, L. y Beguería, S. (2009). Identification of eroded areas using remote sensing in a badlands landscape on marls in the central spanish pyrenees. *Catena, 76*, 182-190.
- Alvarado, O., Sánchez, V., Rodríguez, M. y Pereira, A. (1981). *Estudio de la cuenca internacional del río Táchira Evaluación física. Algunos aspectos humanos e implicaciones fronterizas*. San Cristóbal: Corpoandes.

- Arana, J. y Gaona, F. (2010). Análisis y modelamiento espacial de la contaminación sonora en la localidad de Engativá mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas. *UD y la Geomática*, 4(1), 67-87.
- Araujo, M., Bruno, N., Ritcher, M. y Rubim, I. (2017). Modelos de correção atmosférica aplicados em imagens do sensor OLI/ Landsat 8 a partir do uso de programas gratuitos: uma análise comparativa. En *Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (pp. 4888-4895). Santos: INPE.
- Baret, F., Guyot, G. y Major, D. (1989). TSAVI: A Vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. En *12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'89* (pp. 1355-1358). Vancouver, Canada: IEEE.
- Berk, A., Anderson, G., Acharya, P., Bernstein, L., Muratov, L., Lee, J., Fox, M., Adler-Golden, S., Chetwynd Jr, J. y Hoke, M. (2006). MODTRAN5: 2006 update. En *Defense and Security Symposium* (pp. 62331F-62338F). Orlando: International Society for Optics and Photonics.
- Bernstein, L., Adler-Golden, S., Sundberg, R., Levine, R., Perkins, T., Berk, A., Ratkowski, A., Felde, G. y Hoke, M. (2005). A new method for atmospheric correction and aerosol optical property retrieval for VIS-SWIR multi- and hyperspectral imaging sensors: QUAC (Quick Atmospheric Correction). *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5, 3549-3552.
- Bernstein, L., Jin, X., Gregor, B. y Adler-Golden, S. (2012). Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades. *Optical Engineering*, 51(11), 111719-1-111719-11.
- Berthouex, P. y Brown, L. (2002). *Statistics for environmental engineers*. Boca Ratón: CRC Press LLC Lewis Publishers.
- Brizuela, A., Aguirre, C. y Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. En *Teledetección. Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional* (pp. 207-214). Madrid: Ed. Martin.
- Camargo, C., Calderón, A., Lobo, J. y Ovalles, Y. (2020). Identificación de conflictos y propuesta de asignación de usos de la tierra en la subcuenca quebrada Mejías, municipio Antonio Pinto Salinas, estado Mérida, Venezuela. *Revista de Topografía Azimut*, 11, 46-65.
- Camargo, C., Pacheco, C. y Jaimes, M. (2018). Determinación del uso de la tierra en la microcuenca torrencial Quebrada Seca, Estado Táchira, Venezuela 2013. *UD y la Geomática*, 13, 49-60.
- Canty, M. (2009). *Image analysis, classification, and change detection in remote sensing with Algorithms for ENVI/IDL*. Boca Ratón: CRC Press Taylor & Francis Group, LL.
- Carpintero, M., Chica, O., Rigol, J., Pardo, E. y Rodríguez, V. (2007). Aplicación de imágenes ASTER Y ETM+ para el estudio de la susceptibilidad a la erosión en una zona semiárida (SE España). *Revista de Teledetección*, 28, 13-23.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel Ciencia.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of satellite remote sensing an environmental approach*. Boca Ratón: Taylor & Francis Group.
- Dong, C., Zhao, G., Meng, Y., Li, B. y Peng, B. (2020). The effect of topographic correction on forest tree species classification accuracy. *Remote Sensing*, 12, 787.
- Doxani, G., Vermote, E., Roger, J., Gascon, F., Adriaensen, S., Frantz, D., Hagolle, O., Hollstein, A., Kirches, G., Li, F., Louis, J., Mangin, A., Pahlevan, N., Pflug, B. y Vanhellemont, Q. (2018). Atmospheric correction inter-comparison exercise. *Remote Sensing*, 10, 352.
- Fan, W., Li, J., Liu, Q., Zhang, Q., Yin, G., Li, A., Zeng, Y., Xu, B., Xu, X., Zhou, G. y Du, H. (2018). Topographic correction of forest image data based on the canopy reflectance model for sloping terrains in multiple forward mode. *Remote Sensing*, 10(5), 717.
- Flood, N., Danaher, T., Gill, T. y Gillingham. (2013). An operational scheme for deriving standardised surface reflectance from Landsat TM/ETM+ and SPOT HRG Imagery for eastern Australia. *Remote Sensing*, 5, 83-109.
- Füreder, P. (2010). Topographic correction of satellite images for improved LULC classification in alpine areas. En *10th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography* (pp. 187-194). Kathmandu, Nepal: ICIMOD.
- Gerstmann, H., Möller, M. y Gläßer, C. (2016). Optimization of spectral indices and long-term separability analysis for classification of cereal crops using multi-spectral RapidEye imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 115-125.
- Gomes, D., Vicente, L., Carvalho, S., Victoria, D., Guimarães, R., Agnese, M. y Bicudo, R. (2012). Avaliação comparativa de correção atmosférica de imagens Landsat utilizando MODTRAN e Dark Object Subtraction. En *Anais Symposium SELPER* (pp. 1-10). Cayenne: SELPER.
- Gonzales, G. (2008). Aplicación de la corrección del sombreado topográfico para la identificación y delimitación de cuerpos de agua en la región andina del Perú dentro de un SIG raster. *GeoFocus*, 8, 1-17.
- Goslee, S. (2012). Topographic corrections of satellite data for regional monitoring. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(9), 973-981.
- Grau, G., Vicent, J. y Moreno, J. (2014). Análisis del efecto topográfico en la corrección radiométrica de imágenes MERIS. *Revista de Teledetección*, 42, 99-110.

- Hantson, S. y Chuvieco, E. (2011). Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 691-700.
- Harris Geoespatial Solution (2015). *ENVI (Versión 5.3)* [software de procesamiento digital de imágenes satelitales]. Colorado: Exelis Visual Information Solutions, Inc.
- Harris Geoespatial Solution. (2018). *Radiance and Scale Factors Background, Calculate Confusion Matrices*. Recuperado de <https://www.harrisgeospatial.com/docs/home.html>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2001). *Introdução ao processamento digital de imagens. Primeira Divisão de Geociências do Nordeste*. Río de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2007). *Fundamentos físicos de teledetección*. Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2013). *Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) Versión 1.0*. Bogotá: Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas.
- International Telephone and Telegraph (ITT) (2009). *Atmospheric correction module: QUAC and FLAASH User's Guide*. Recuperado de http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf
- Kaufman, Y., Tanré, D., Remer, L., Vermote, E., Chu, A. y Holben, B. (1997). Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 17051-17067.
- Ketelaar, V. (2009). *Satellite radar interferometry: subsidence monitoring techniques*. Assen: Springer.
- Kokaly, R., Clark, R., Swayze, G., Livo, K., Hoefen, T., Pearson, N. Wise, R., Benzell, W., Lowers, H., Driscoll, R. y Klein, A. (2017). *USGS spectral library version 7 (No. 1035)*. Reston: US Geological Survey.
- Kruse, F. (2004). Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO. En *Summaries of 13th JPL Airborne Geoscience Workshop*. Jet Propulsion Lab, Pasadena.
- Law, K. y Nichol, J. (2004). Topographic correction for differential illumination effects on ikonos satellite imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35, 641-646.
- Li, A., Wang, Q., Bian, J. y Lei, G. (2015). An improved physics-based model for topographic correction of Landsat TM images. *Remote Sensing*, 7, 6296-6319.
- López, P., Corral, J., Díaz, R., Álvarez, J. y López, C. (2016). Evaluation of radiometric and atmospheric correction algorithms for aboveground forest biomass estimation using Landsat 5 TM data. *Remote Sensing*, 8(5), 369.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E. y Moran, E. (2002). Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research. *International Journal Remote Sensing*, 23, 2651-2671.
- Ma, Z., Jia, G., Schaepman, M. y Zhao, H. (2020). Uncertainty analysis for topographic correction of hyperspectral remote sensing images. *Remote Sensing*, 12, 705.
- Matteucci, S. (1986). Las zonas áridas y semiáridas de Venezuela. *Zonas Áridas*, 4, 39-48.
- Meyer, P., Itten, K., Kellenberger, T., Sandmeier, S. y Sandmeier, R. (1993). Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(4), 17-28.
- Minnaert, M. (1941). The reciprocity principle in lunar photometry. *The Astrophysical Journal*, 93, S.
- NASA JPL. (2009). *ASTER Global Digital Elevation Model [Data set]*. NASA JPL. DOI: <https://doi.org/10.5067/aster/astgtm.002>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco) (1976). *Mapa mundial de suelos 1:5.000.000*. París.
- Orr, B., Cowie, A., Castillo-Sánchez, V., Chasek, P., Crossman, N., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G., Minelli, S., Tengberg, A., Walter, S. y Welton, S. (2017). *Scientific conceptual framework for land degradation neutrality. A report of the science-policy interface*. Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- Palacios, L., Paz, F., Oropeza, J., Figueroa, B., Martínez, M., Ortiz, C. y Exebio, A. (2018). Corrector atmosférico en imágenes Landsat. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 309-321.
- Paz, F. (2018). Correcciones atmosféricas relativas de imágenes de satélite: patrones invariantes y modelos atmosféricos. *Terra Latinoamericana*, 36, 1-12.
- Pimple, U., Sitthi, A., Simonetti, D., PungkuL, S., Leadprathom, K. y Chidthaisong, A. (2017). Topographic correction of Landsat TM-5 and Landsat OLI-8 imagery to improve the performance of forest classification in the mountainous terrain of northeast Thailand. *Sustainability*, 9 (2), 258-XXX.
- Pons, X., Pesquer, L., Cristóbal, J. y González, O. (2014). Automatic and improved radiometric correction of Landsat imagery using reference values from MODIS surface reflectance images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 243-254.
- Primera, M. (2011). Reglas básicas para mediciones con el espectro-radiómetro de campo ASD. En *memorias de las IV Jornadas Nacionales de Geomática* (pp. 1 - 8). Baruta, Venezuela: CPDI.

- Riaño, D., Salas, J. y Chuvieco, E. (2001). Cartografía de modelos de combustible con teledetección: aportaciones a un desarrollo ambiental sostenible. *Estudios Geográficos, tomo LXII(62)*, 309-333.
- Richter, R., Kellenberger, T. y Kaufmann, H. (2009). Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing*, 1, 184-196.
- Salinas, P. (2011). *Estadística para investigadores*. Mérida: Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes (CDCHTA), ULA.
- Sanches, I., Andrade, R., Quartaroli, C. y Rodrigues, C. (2011). Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI. En *Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)* (pp. 7564-7571). Curitiba. São José dos Campos: INPE.
- SIGIS (2019). *DIGITALGLOBE*. Recuperado de <http://www.sigis.com.ve/index.php/imagenessatelitalesar/digitalglobe>
- Soares, F., Almeida, R., Rubim, I., Barros, R., Cruz, C., Mello, G. y Baptista, J. (2015). Análise comparativa da correção atmosférica de imagem do Landsat 8: o uso do 6S e do ATCOR2. En *Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (pp. 1821-1828). João Pessoa: INPE.
- Soares, H. y Mendes, S. (2014). O papel das geotecnologías no estudo de feições erosivas e de movimento de massa no Brasil. En A. Guerra y M. Jorge (eds.), *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas* (pp. 95-125). São Paulo: Oficina de Textos.
- Sobrino, P., García, A., Sobrino, J. y Boluda, R. (1997). Corrección atmosférica de imágenes Landsat-5 TM. Aplicación al estudio edafológico en La Comarca La Plana de Requena-Utiel. En C. Hernández y J. Rodríguez (eds.), *Teledetección aplicada a la gestión de recursos naturales y medio litoral marino. VII Congreso Nacional de Teledetección* (pp. 191-194). Universidad Santiago de Compostela, 26-28 de junio.
- Soenen, S. A., Peddle, D. R. y Coburn, C. A. (2005). SCS+C: A modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain. *IEEE Trans. Geosci. Remote*, 43, 2148-2159.
- Sola, I., González, M. y Álvarez, J. (2016). The added value of stratified topographic correction of multispectral images. *Remote Sensing*, 8, 131.
- Soria, J. y Granados, R. (2005). Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. *Ciencia Ergo Sum*, 1(2), 167-174.
- Tan, B., Masek, J., Wolfe, R., Gao, F., Huang, C., Vermote, E., Sexton, J. y Ederer, G. (2013). Improved forest change detection with terrain illumination corrected Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 136, 469-483.
- Tan, B., Wolfe, R., Masek, J., Gao, F. y Vermote, E. (2010). An illumination correction algorithm on Landsat-TM data. En *IGARSS 2010: International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1964-1967). Hawaii, USA: IEEE.
- Tapia, J. (2007). *Introducción al análisis de datos con SPSS para Windows*. Barinas: Ediciones de la Universidad Ezequiel Zamora.
- Teillet, P., Guindon, B. y Goodenough, D. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2), 84-106.
- Themistocleous, K., Hadjimitsis, D. G., Retalis, A. y Chrysoulakis, N. (2012). Development of a new image based atmospheric correction algorithm for aerosol optical thickness retrieval using the darkest pixel method. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1), 1-12.
- Tristan, P., Wainschenker, R. y Doorn, J. (2008). Normalización de imágenes satelitales en el análisis multitemporal. En *X Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación* (pp. 315-319). General Pico, Argentina: UNLPAM.
- Tsegaye, K., Addis, H. y Hassen, E. (2020). Soil erosion impact assessment using USLE/GIS approaches to identify high erosion risk areas in the lowland agricultural watershed of blue Nile basin, Ethiopia. *International Annals of Science*, 8(1), 120-129.
- United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) (2015). *Report of the Conference of the Parties on its twelfth session, held in Ankara from 12 to 23 October 2015. Part two: Actions taken by the Conference of the Parties at its twelfth session. ICCD/COP(12)/20/Add*. Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification.
- United Nations General Assembly (2015). *Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. Recuperado de http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E
- Urbina, C. (2017). *Superficie y población de Venezuela bajo climas secos semiáridos y subhúmedos secos*. Caracas: MINEA.
- USGS (2018a). Solar illumination and sensor viewing angle coefficient file. Recuperado de: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/solar-illumination-and-sensor-viewing-angle-coefficient-files?qt-science_support_page_related_con=1#qt-science_support_page_related_con
- USGS (2018b). *Landsat surface reflectance level-2 science products*. Recuperado de <https://landsat.usgs.gov/landsat-surface-reflectance-data-products>

- USGS (2018c). Using the USGS Landsat level-1 data product. Recuperado de <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
- USGS (2018d). *LaSRC release notes. U.S. Geological Survey (USGS). Earth Resources Observation and Science Center (EROS)*. Sioux Falls.
- USGS (2019). *Landsat 8 surface reflectance code (Lasrc) product guide. Earth Resources Observation and Science Center (EROS)*. Sioux Falls.
- Vanonckelen, S., Lhermitte, S., Balthazar, V. y Van Rompaey, A. (2014). Performance of atmospheric and topographic correction methods on Landsat imagery in mountain areas. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 13, 4952-4972.
- Vázquez-Jiménez, R., Romero-Calcerrada, R., Ramos-Bernal, R. N., Arrogante-Funes, P. y Novillo, C. J. (2017). Topographic correction to Landsat imagery through slope classification by applying the SCS+ C method in mountainous forest areas. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(9), 287.
- Yan, E., Zhao, Y., Lin, H., Wang, G. y Mo, D. (2019). Improving the estimation of forest carbon density in mountainous regions using topographic correction and Landsat 8 images. *Remote Sensing*, 11, 2619.
- Zelterman, D. (2015). *Applied Multivariate Statistics with R*. Suiza: Springer.

