

Detección remota del NO₂ en la zona troposférica de América del Sur y su distribución espacial

Remote detection of NO₂ in the tropospheric zone of South America and its spatial distribution

Alfonso Alberto Romero Baylón ¹, Silvia del Pilar Iglesias León ²

Recibido: 01/07/2020 - Aprobado: 30/10/2020 - Publicado: 30/11/2020

RESUMEN

Los elementos contaminantes en la atmosfera terrestre, específicamente a lo largo del espacio que corresponde a la tropósfera, el NO₂ se dispersan cada vez a mayores altitudes cubriendo desde 0 metros sobre el nivel del mar hasta los diez mil metros de altitud, este estudio analiza el comportamiento de este elemento contaminante en altitudes de 10 metros, 5 mil metros y 10 mil metros donde el comportamiento de este contaminante muestra las áreas de saturación de este elemento en la tropósfera de América del Sur, el NO₂ entre otros gases que afectan estas zonas atmosféricas se pueden encontrar a altitudes mayores de los mil metros que corresponde a la zona externa de la capa límite en la atmosfera afectando espacios aéreos incluso más allá del rango de la tropósfera, en este trabajo analizamos en la zona baja, media y alta de la tropósfera que en altitudes significa a los 10, 5000 y 10000 metros. El estudio visualiza las concentraciones del NO₂ a través de las imágenes de satélite LANDSAT 8 correspondiente al año agosto 2020, en la extensión del área superficial de América del Sur, estas imágenes son adquiridos de la USG Survey de los EE, UU, Institución que pertenece a la NASA y que posee una constelación de satélites como Terra, Noaa, Aster y LandSat dedicados a diferentes estudios del espacio aéreo del Planeta. A partir de las imágenes multiespectrales de satélite se muestran en las diferentes zonas del espacio aéreo de la zona en estudio, pudiendo observar la variación de la presencia de este elemento contaminante, el análisis se realizó con el Global Mapper, software de libre acceso. Los resultados obtenidos del análisis de las imágenes del satélite indican el comportamiento y nivel de saturación del espacio aéreo de la zona por el NO₂, indicando que, a altitudes mayores de los mil metros; este elemento contaminante permanece en concentraciones relevantes que se debe tener en cuenta para proveer los efectos al cambio climático. La detección remota del NO₂ a altitudes mayores a los mil metros muestra la nube de distribución de este gas e indica que en un mediano plazo, afectaran a la temperatura y con ello hacer variar el clima. Por este motivo, es necesario realizar más estudios en estas zonas para observar los parámetros relacionados con el clima en la zona superficial de la tierra.

Palabras clave: Detección remota; imagen de satélite; distribución aérea del NO₂.

ABSTRACT

The polluting elements in the Earth's atmosphere, specifically throughout to the troposphere space that corresponds, NO₂, are increasingly dispersed at higher altitudes, ranging from 0 meters above sea level to 10,000 meters above sea level, this study analyzes the behavior of this pollutant element at altitudes of 10 meters, 5 thousand meters and 10 thousand meters where the behavior of this pollutant shows saturation areas with this element in South America troposphere area, the NO₂ among other gases that affect these atmospheric zones can be found at altitudes greater than one thousand meters that corresponds to the outer zone of boundary layer in the atmosphere, affecting air spaces even beyond the range of the troposphere, in this work, We analyze the lower, middle and upper areas of the troposphere, which in altitudes means at 10, 5,000 and 10,000 meters. The study visualizes the NO₂ concentrations through the LANDSAT 8 satellite images corresponding to the year August 2020, in the extension of the surface area of South America, these images are acquired from the USG Survey of the USA, an Institution that belongs to NASA and that it has a constellation of satellites such as Terra, NOAA, Aster and LandSat dedicated to different studies of the planet's airspace. From the multispectral satellite images they are shown in the different areas of the airspace of the study area, being able to observe the variation of the presence of this polluting element, the analysis was carried out with the Global Mapper, free access software. The results obtained from the analysis of the satellite images indicate the behavior and level of saturation of the airspace in the area for NO₂, indicating that, at altitudes greater than one thousand meters; This pollutant element remains in relevant concentrations that must be taken into account to provide the effects of climate change. The remote detection of NO₂ at altitudes greater than a thousand meters shows cloud distribution of this gas and indicates that in the medium term, they will affect

1 Egresado del Doctorado en Ciencias Ambientales, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. Autor para correspondencia: aromerob@unmsm.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4433-0111>

2 Docente de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería. Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.
E-mail: siglesiasl@unmsm.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4616-8178>

the temperature and thus make the climate vary. For this reason, it is necessary to carry out more studies in these areas to observe the parameters related to the climate in the surface area of the earth.

Keywords: Remote sensing; satellite image; NO₂ aerial distribution.

I. INTRODUCCIÓN

Las concentraciones del NO₂, en el espacio aéreo de la tropósfera de la Tierra es importante para medir el grado de saturación de la atmósfera en estas altitudes para establecer el comportamiento de este elemento contaminante y sus efectos que involucran en los aspectos de temperatura a las diferentes altitudes más allá de la capa límite que está considerado de altitud media de mil metros hasta los diez mil metros.

A diferencia de los estudios de los elementos contaminantes que se han realizado a la fecha donde dichos elementos son monitoreados a una altura que van desde los 0 metros hasta los 10 metros sobre el nivel del mar a nivel local, le presente trabajo de investigación enfoca su objetivo en el comportamiento del NO₂, en la tropósfera del espacio aéreo de la ciudad de Lima Metropolitana, no hay estudios en la actualidad que estudie la presencia del NO₂ en la atmósfera desde un punto de vista geoespacial.

La adquisición de datos se obtiene en formato digital y en su modalidad rasterizada para el NO₂ a partir de los sensores de los satélites, las mismas que abren un enorme campo para la aplicación de la geoestadística tridimensional aplicada a la detección de NO₂ en la tropósfera terrestre.

El algoritmo de Gillespie basado en la información contenida en las imágenes de satélite, permite la obtención de información del comportamiento del NO₂, así como la obtención de la nube de puntos en los niveles de altitud establecida en el presente estudio para el espacio aéreo de la zona estudiada. La estructura del espacio desde una altitud mayor a los 10 metros hasta los 10 mil metros, presenta anomalías frías y calientes. Éstas guardan estrecha relación con los demás parámetros climatológicos presentes, las direcciones de vientos, la presencia de otros elementos de efecto invernadero, el ciclo hidrológico y los movimientos de fluidos en general.

La densidad de la nube de NO₂ en la atmósfera así como su tratamiento espacial respecto a la superficie terrestre que presentamos en esta investigación tiene un alcance regional que cubre la superficie de América del Sur cubriendo la zona troposférica y permiten evaluar los niveles de saturación de la atmósfera en el espacio aéreo troposférico del continente, mientras que tradicionalmente, esta medición es en la superficie de la tierra a una altura promedio que va de 0 hasta 10 metros y no considera otros alcances como la capa límite y la zona exterior a esta capa en la atmósfera, con esta investigación con soporte de los imágenes de satélite mostramos la presencia de contaminantes en estas zonas.

II. MATERIAL Y METODO

El proceso de investigación comprende 3 fases:

- Revisión y recopilación de información
- Obtención remota de imágenes de satélite
- Estudio multispectral de imágenes
- Determinación de zonas de distribución de NO₂

El enfoque conceptual, para la determinación de los valores de concentración de NO₂ en la tropósfera que corresponde al espacio aéreo de Lima Metropolitana se realizó mediante los algoritmos aplicados a las bandas ultravioletas e infrarrojo.

Para la presente investigación, se eligió los satélites ASTER, TERRA Y LANDSAT 8, los cuales tiene sensores térmicos, UV y TIR que permiten medir el espectrómetro del NO₂, la data obtenida, a partir de los sensores de los satélites en forma remota, se graban en diferentes bandas del espectrales electromagnéticos, con esta data, se genera, inicialmente, una imagen monocroma que se visualiza en escala de grises de 256 tonos.

Cada pixel de la imagen contiene un valor en el rango de 0 a 256, siendo su equivalente 0=negro y 256=blanco. (ver Figura 1).

La distribución para la visión ocular de las bandas en las imágenes de satélite, se realizan a través de los canales básicos: rojo, verde y azul. Las diferentes tonalidad en el rango de 0-256, ocurren al paso de cada banda por estos canales e indicando la presencia de elementos contaminantes, dependiendo de su longitud de onda (Gibson & Bruck, 2000).

Cuando hacemos el compositado de los colores, la imagen captada por un satélite es más representativa, y visible para el ojo humano, ya que este órgano sensitivo es capaz de percibir mejor las diferencias de color en lugar de tonalidades grises, a esta imagen se le denomina "imagen compuesta" a color.

2.1. Selección y almacenamiento de información

Esta investigación nace; con una etapa previa de selección de la información para efectos de análisis del presente artículo, sirviendo de soporte en la formulación de las hipótesis.

En relación a las fuentes bibliográficas, hemos navegado en la Base de Datos de la Universidad, en la sección de recursos electrónicos y repositorios, encontrando las fuentes bibliográficas, se inició con la búsqueda en todas las

áreas, luego, secuencialmente con sus debidas restricciones especializadas, investigaciones institucionales, asesoría de diferentes profesionales de diversas instituciones, trabajos de investigación (Artículos y Tesis), además de los recursos especializados como ARDI, Agora, ProQuest, ScienceDirect, Scopus, entre otros (Ver Tabla 1).

2.2. Adquisición de imágenes

Para las imágenes LANDSAT 8 accedemos a la plataforma del Servicio Geológico de EE. UU. (USGS, Science for a Changing World), y adquirimos de esta plataforma de los lugares que deseamos cuya elección del área de estudio se puede hacer a través de polígono o coordenadas, en este caso de estudio elegimos a través de un polígono, tal como mostramos en la Figura 2.

Como se visualiza en la Figura 2, seleccionamos el área de Lima Metropolitana mediante un polígono rectangular para el presente estudio.

Para la imagen ASTER, similar al anterior accedemos a la misma plataforma, pero esta vez seleccionamos en lugar de LandSat 8 la opción ASTER + EMT, que es la imagen que contiene bandas de infrarrojo y las bandas térmicas, así como de emisividad de los elementos.

2.3. Análisis multi-espectral

Para este estudio hacemos uso del aplicativo libre Global Mapper donde los algoritmos de discretización de pixeles de Gillipie donde según las longitudes de onda de espectro de las bandas se establecen las cantidades de NO₂, presentes en el espacio correspondiente a la tropósfera en la zona del continente de América del Sur, en la Figura 3, mostramos el espectro infrarrojo del sensor FIR del satélite Aster del USGS de la NASA.

Al aplicar el algoritmo de separación de reflectancia, en la Figura 4. Mostramos la emisividad del NO₂, en el espacio de la zona de análisis, indicando la presencia de NO₂, en la zona Baja, la Figura 5, muestra en la zona Media y el Figura 6. La distribución del NO₂ en la zona alta, correspondiente a los rangos 10, 5000 y 10000 metros sobre el nivel del mar. La nube de color azul representa la densidad NO₂ y distribución del NO₂.

2.4. Determinación de Nivel de saturación acumulada en la superficie continental

La Figura 7, muestra la nube de acumulación total de este elemento contaminante en la superficie representado por el color azul y blanco que corresponde al NO₂.

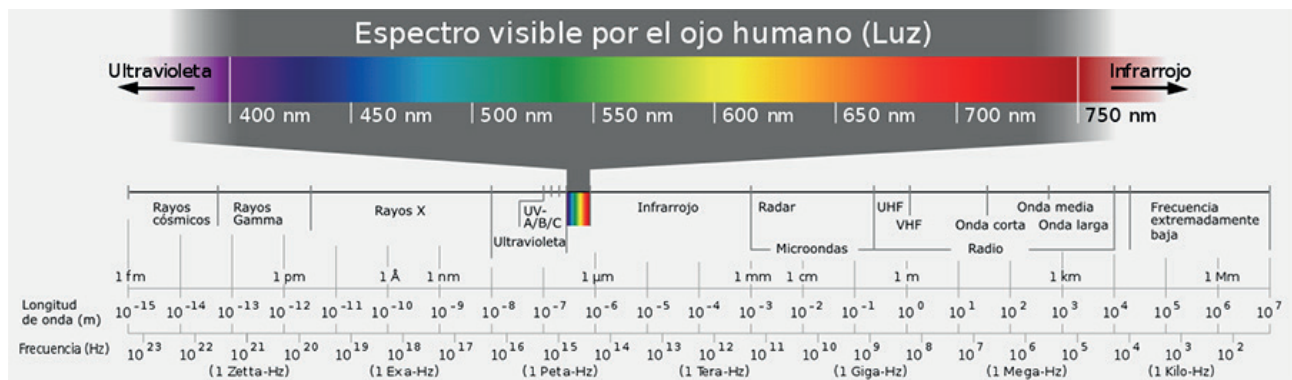


Figura 1. Espectrometría de la luz. Fuente: Gillespie (1977)

Tabla 1. Proceso metodológico de la investigación

	Pasos de la Descripción
Selección de sensores remotos	Identificación de sensores en los satélites, como: VNIR, SWIR y TIR; es importante porque, cada uno, presenta características particulares relacionadas a las bandas en el espectro del visible e infrarrojo cercano (VNIR), la única que tiene una resolución espacial de 15 metros; 6 bandas en el espectro del infrarrojo en onda corta (SWIR), cuya resolución espacial es de 30 metros, asimismo, 5 bandas en el infrarrojo térmico cuya resolución espacial es de 90 metros (ERSDAC, 2001).
Elección de imágenes de satélite	Al obtener la información de la radiación solar (imagen IR térmica), que representa el calor emitido por los distintos elementos en este caso del NO ₂ , la imagen resultante lo analizamos con la fórmula que corresponde a la radiancia y emisividad una escala de 90x90 metros de resolución de las imágenes LANDSAT 8 Y ASTER.
Análisis espectral basado en frecuencias no visibles	Aunque la imagen puede arreglarse en una matriz tridimensional, para realizar el análisis utilizamos la matriz bidimensional. Matemáticamente, el análisis genera nuevas variables o componentes, con una combinación lineal de bandas. Asimismo, reemplazando las bandas por los componentes, reducimos la dimensionalidad del problema conservando casi la totalidad de la información.
Determinación de nivel de saturación con NO ₂ .	Obtención de imágenes con la distribución de NO ₂ , en la superficie continental luego del análisis multiespectral de las imágenes seleccionadas de imagen ASTER e imagen LANDSAT 8. Basado en TIR de las bandas infrarrojas.



Figura 2. Selección de imagen LandSat 8.
Fuente: Servicios geológico de los Estados Unidos (USGS).

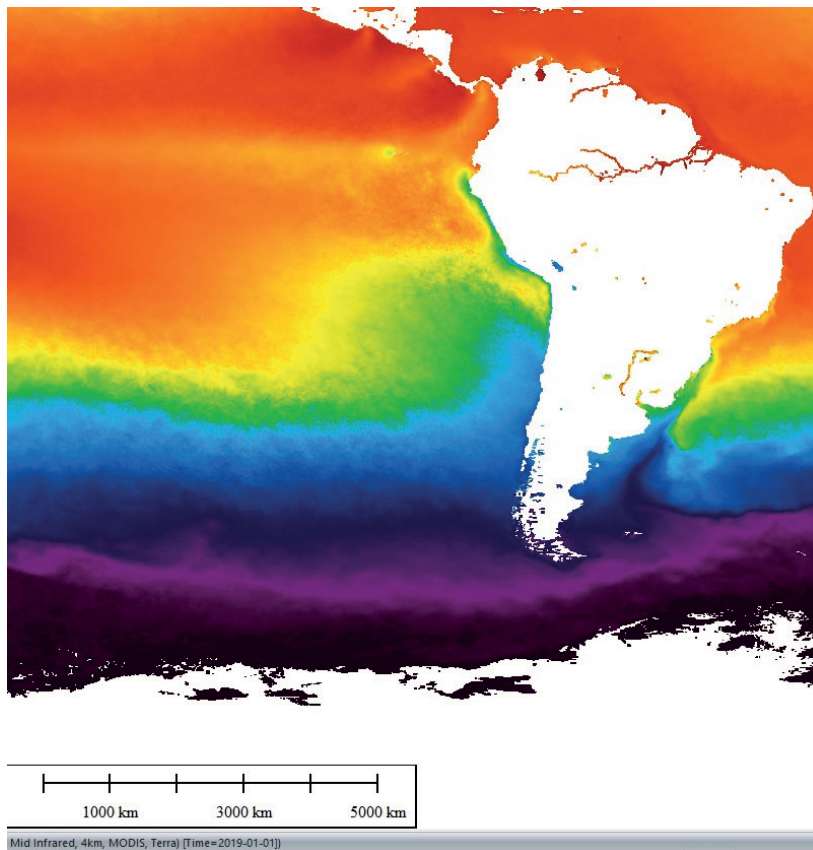


Figura 3. Imagen espectral LandSat 8 de América del Sur.
Fuente: Elaborado por el autor

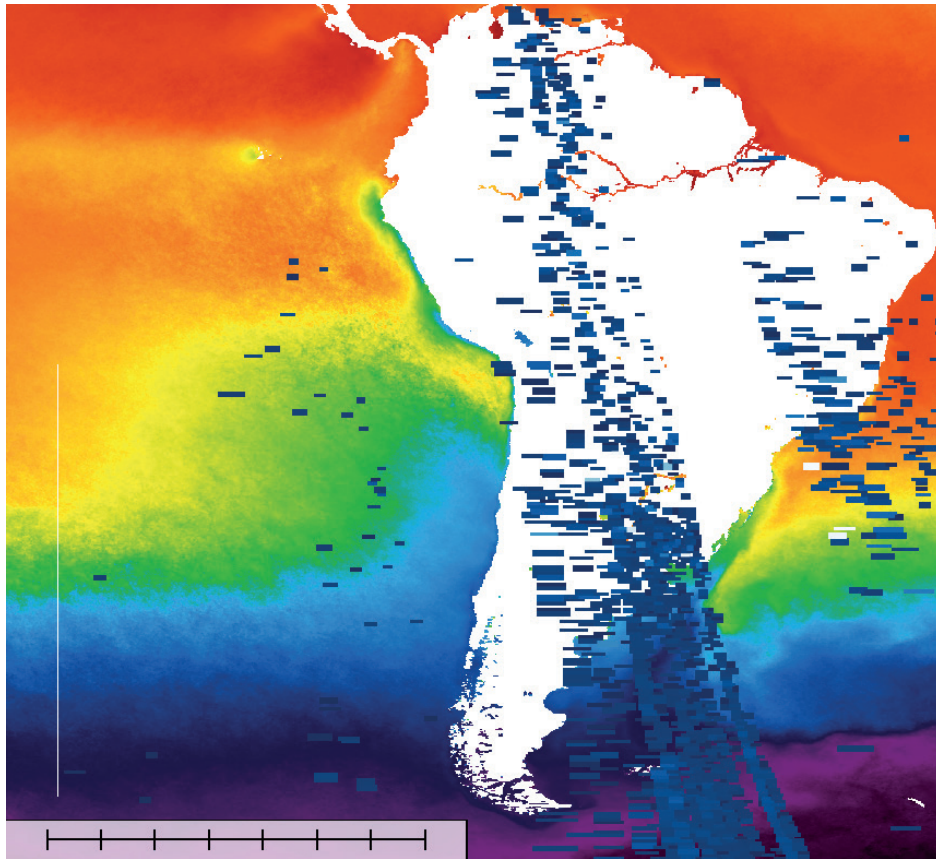


Figura 4. Imagen LandSat 8 mostrando la densidad de nube de distribución NO_2 a los 10 m.s.n.m.
Fuente: Elaborado por el autor

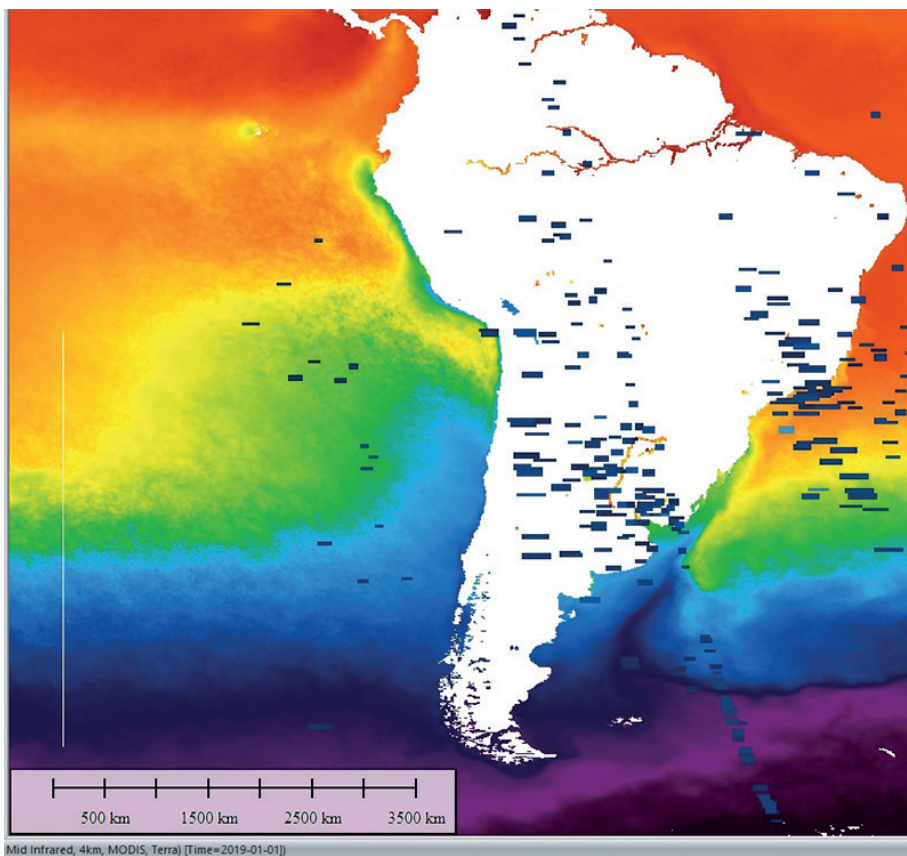


Figura 5. Imagen LandSat 8 mostrando la densidad de nube de distribución NO_2 a los 5000 m.s.n.m.
Fuente: Elaborado por el autor

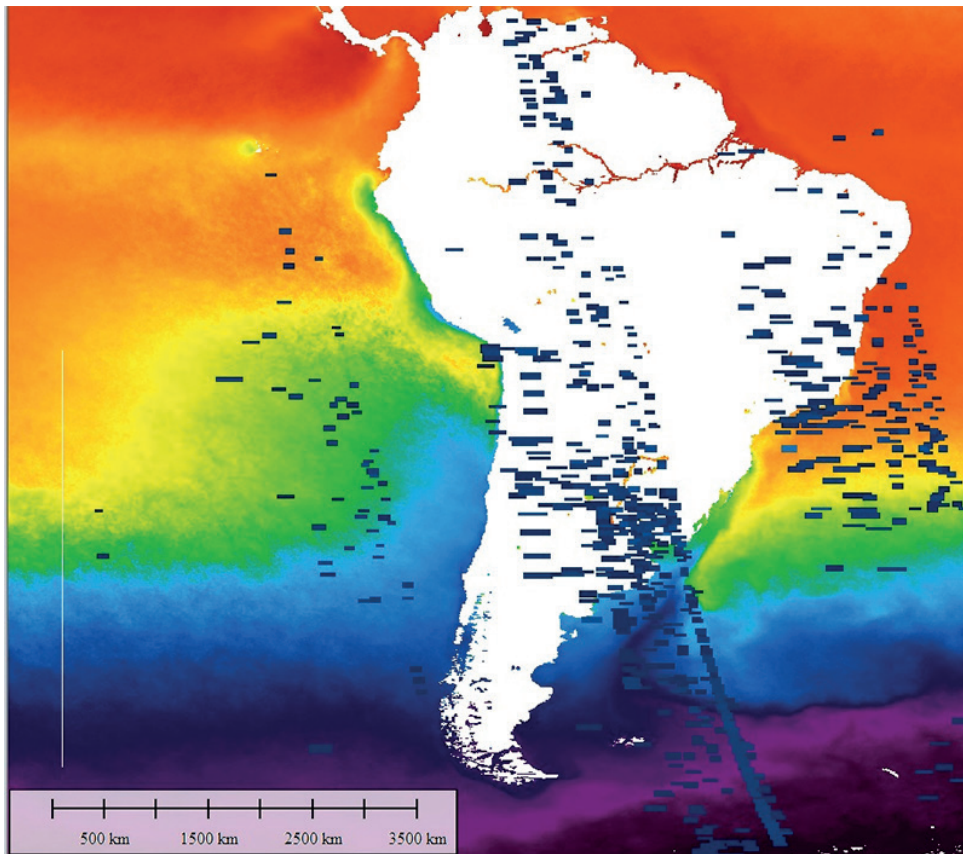


Figura 6. Imagen LandSat 8 mostrando la densidad de nube de distribución NO_2 a los 10000 m.s.n.m.
Fuente: Elaborado por el autor

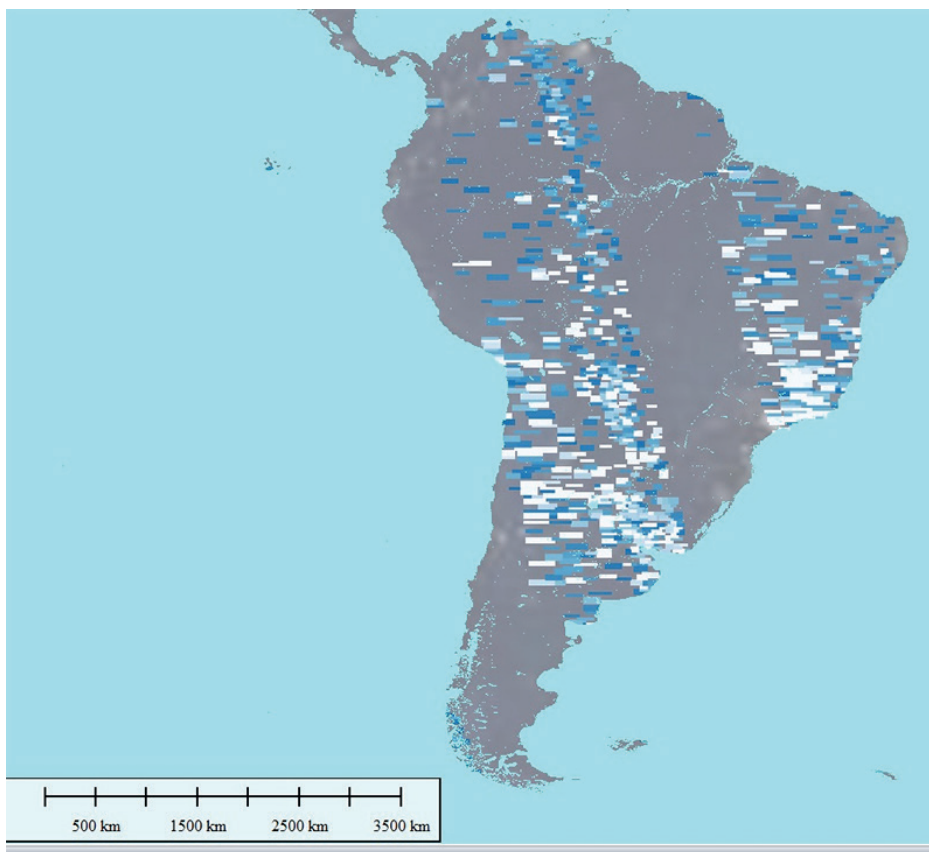


Figura 7. Imagen LandSat 8 mostrando la densidad de distribución NO_2 acumulados en la tropósfera.
Fuente: Elaborado por el autor

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente investigación se comprueba la efectividad del análisis espectral de las imágenes de satélite ASTER, NOAA y Landsat del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS).

La aplicación metodológica fue validada en el año 1998 por Dan Gillespie EUU (D. T. Gillespie, 1976), es un sistema que permite evaluar el algoritmo espectral de separación por temperatura y emisividad (TES) propuesto por A. Gillespie et al. (1998). Un algoritmo de separación de temperatura y emisividad para el radiómetro de reflexión y emisión térmica espacial avanzado ASTER IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, como un método simple para recuperar la emisividad de la superficie a partir de mediciones terrestres (Kolmogoroff, 1931). Primero, validamos diferentes relaciones empíricas para el módulo de Diferencia Mínima Máxima, en el que se basa el TES, con un gran conjunto de datos (alrededor de 500 superficies de la biblioteca espectral del Radiómetro de Emisión y Reflexión Térmica Avanzada del Espacio (ASTER) que incluye materiales artificiales) para datos multibanda en el infrarrojo de onda larga (LWIR: 7.5-14 μm), y datos multiespectrales en el infrarrojo de onda media (MWIR: 3,4–5,2 μm) y LWIR (Jacob L. Doob, 1945).

La precisión de TES, ampliamente evaluada por simulaciones, permanece para simulaciones multibanda (respectivamente para multiespectral) dentro de aproximadamente 0.03 (0.02) para emisividad y dentro de aproximadamente 1.2 K (0,3 K) para temperatura. Sin embargo, las superficies con emisividad máxima baja dan mayores errores. A excepción de estas superficies particulares, el enfoque TES, aplicado a las mediciones de un radiómetro térmico multibanda portátil, parece ser el método más eficiente y preciso para la determinación de la emisividad en el campo sin ninguna suposición a priori sobre la naturaleza de la superficie (J L Doob, 1942).

Los resultados indican la presencia del elemento contaminante estudiado en la zona correspondiente a la tropósfera, con diferentes acumulaciones de saturación, tal como se muestra en la Figura 7, correspondiente a las cifras acumuladas.

IV. CONCLUSIONES

- Los estudios de los elementos contaminantes en el aire, a la fecha están hechas a nivel de la superficie terrestre que van en el rango de 0 a 10 metros como zona de estudio sobre la superficie de la tierra, con el presente estudio, a través del soporte de los imágenes de satélite se demuestra que los elementos contaminantes del aire están en constante

distribución a través de la zona troposférica de la Tierra, llegando a establecerse a una altitud de los 10 mil metros, y su comportamiento es que en la zona baja de la tropósfera la acumulación es mucho más en relación a la zona media y alta, ya que en ambos extremos las saturaciones por estos elementos contaminantes son mayores a la zona media de la tropósfera.

- Esta investigación puede ser aplicada a cualquier en lugares regionales para ello solamente se debe elegir las coordenadas UTM del área a estudiar y adquirir las imágenes de satélite correspondiente a esa zona del USGS.

V. AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento mis colegas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, con quienes comparto nuevos temas de investigación, que se presentan según las tendencias y el avance tecnológico, así como el avance de la sociedad del conocimiento.

VI. REFERENCIAS

- Doob, J L. (1942). Topics in the Theory of Markoff Chains. *Transactions of the American Mathematical Society*, 52(1), 37. <https://doi.org/10.2307/1990152>
- Doob, Jacob L. (1945). *Markoff Chains--Denumerable Case*. *Transacciones de La American Mathematical Society* 58 (3). <https://www.jstor.org/stable/1990339>
- Gibson, M. A., & Bruck, J. (2000). Efficient exact stochastic simulation of chemical systems with many species and many channels. *Journal of Physical Chemistry A*, 104(9), 1876–1889. <https://doi.org/10.1021/jp993732q>
- Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Steven Cothorn, J., Hook, S., & Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1113–1126. <https://doi.org/10.1109/36.700995>
- Gillespie, D. T. (1976). A general method for numerically simulating the stochastic time evolution of coupled chemical reactions. *Journal of Computational Physics*, 22(4), 403–434. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(76\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0021-9991(76)90041-3)
- Gillespie, D. T. (1977). Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions. *Journal of Physical Chemistry*, 81(25), 2340–2361. <https://doi.org/10.1021/j100540a008>
- Kolmogoroff, A. (1931). Über die analytischen Methoden in der Wahrscheinlichkeitsrechnung. *Mathematische Annalen*, 104(1), 415–458. <https://doi.org/10.1007/BF01457949>

