



EMPLEO DE IMÁGENES SATELITALES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE EN EL MUNICIPIO HABANA DEL ESTE, LA HABANA, CUBA.

USE OF SATELLITE IMAGES FOR THE ESTIMATION OF THE EARTH SURFACE TEMPERATURE IN THE MUNICIPALITY HABANA DEL ESTE, HAVANA, CUBA.

MS.c Javier Alejandro Corcho Amador. (1)

Ing. Joel Bryan Zayas Iglesias. (2)

Ms.c Armando Díaz Rodríguez. (3)

1. Academia Naval “Granma”. Cuba. javico0511@gmail.com
2. Agencia GEOCUBA Camagüey. Cuba. zayasiglesias@gmail.com.
3. Geocuba Investigación y Consultoría. Cuba. mandy890713@gmail.com

RESUMEN: El empleo de imágenes satelitales se ha convertido, en las últimas décadas, en una de las formas más habituales para estimar la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST), una de ellas es mediante el uso de los modernos satélites de la familia Landsat. El propósito de este estudio es evaluar las posibilidades de empleo de la inversión de la ecuación de transferencia radiativa para la estimación de la TST en el Municipio de Habana del Este, utilizando imágenes satélites de Landsat-8 y 9. En esta investigación se emplearon imágenes de las plataformas mencionadas anteriormente y parámetros atmosféricos (τ_λ , $L_{atm\lambda}^\downarrow$, $L_{atm\lambda}^\uparrow$) para obtener la TST en la zona de trabajo a través de la ecuación de transferencia radiativa. Luego se evaluó la relación que existía, a través de análisis de regresión, entre los valores de TST obtenidos y un conjunto de muestras en campo de Temperatura ambiente cerca del suelo, recolectadas entre septiembre y noviembre de 2023. Se obtuvo un buen ajuste entre los valores estimados y medidos, que se manifiesta en un coeficiente de correlación lineal de 0,72 y un error medio cuadrático de 1,43°C. En base a esto, se confeccionó un mapa temático que refleja la TST de la zona de trabajo para el 10 de noviembre de 2023.

Palabras clave: Temperatura de la Superficie Terrestre, imágenes satelitales, Landsat-8 y 9, ecuación de transferencia radiativa.

ABSTRACT: The use of satellite images has become, in recent decades, one of the most common ways to estimate the Earth's Surface Temperature (TST), one of them is through the use of modern Landsat family satellites. The purpose of this study is to evaluate the possibilities of using the inversion of the radiative transfer equation for the estimation of TST in the Municipality of Habana del Este, using images from Landsat-8 and 9 satellites. In this research, images were used of the platforms mentioned above and atmospheric parameters (τ_λ , $L_{atm\lambda}^\downarrow$, $L_{atm\lambda}^\uparrow$) to obtain the TST in the work area through the radiative transfer equation. Then, the

relationship that existed was evaluated, through regression analysis, between the TST values obtained and a set of field samples of ambient temperature near the ground, collected between September and November 2023. A good fit was obtained between the estimated and measured values, which are manifested in a linear correlation coefficient of 0.72 and a mean square error of 1.43°C. Based on this, a thematic map was prepared that reflects the TST of the work area for November 10, 2023.

Keywords: Earth Surface Temperature, satellite images, Landsat-8 and 9, radiative transfer equation.

1. INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra está cambiando con una intensidad y velocidad sin precedentes. Por un lado, está el cambio climático impulsado por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero y, por otro lado, los humanos modifican directamente su entorno mediante la tala de bosques, la urbanización y las actividades agrícolas (Reiners et al., 2023). El aumento de las olas de calor está afectando a miles de millones de personas en todo el mundo y provocando cambios potencialmente irreversibles en los ecosistemas mundiales, lo cual lo convierte en un dilema global, recogido en el Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de 2022 (Naciones Unidas, 2022), de las Naciones Unidas. En Cuba específicamente, el clima está cambiando, con manifestaciones evidentes en el aumento de la temperatura, de acuerdo con el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, 2023), la temperatura media anual aumentó en 0,9°C desde mediados del siglo pasado. Una de las consecuencias del aumento de las temperaturas, unido a las sequías extremas, radica en la ocurrencia de incendios forestales. Desde 2020 hasta la fecha se han sucedido más de 1307 incendios forestales en el país, con más de 12 000 hectáreas de bosques dañadas, afectando por consiguiente la biodiversidad y la calidad del aire y generando problemas humanos, naturales y económicos.

Ante los problemas que genera el calentamiento global, es lógico buscar soluciones. En este sentido, es clave identificar, geolocalizar, cuantificar y monitorear este fenómeno (Sánchez-Aparicio et al., 2020) a través de mediciones de la TST. De acuerdo con Balka (2023), la TST se define como la temperatura superficial radiativa de la superficie terrestre, asimismo, Avdan y Jovanovska (2016), puntualizan que la TST es la temperatura que se siente cuando se toca la superficie terrestre con las manos o la temperatura de la piel del suelo. Este es uno de los parámetros más importantes en los procesos físicos de la energía superficial y el equilibrio hídrico a escala local y global (Li et al., 2013), su conocimiento proporciona información sobre las variaciones temporales y espaciales del estado de equilibrio de la superficie y es de fundamental importancia además en estudios medioambientales (Moncada & Willems, 2020), islas de calor urbano (Balka, 2023 y Manzanilla-Quiñones, 2023), geotermia (González-Acosta et al., 2015 y He et al., 2020), uso de la tierra (Binoy et al., 2022 y Choudhury et al., 2023) y geología (Asadzadeh & Souza Filho, 2023), entre otros.

Las mediciones de TST se pueden realizar mediante el muestreo puntual in situ en zonas específicas, el empleo de estaciones meteorológicas terrestres y modelos de simulación climática o imágenes satelitales. Según Anaya (2019), las primeras tienen el inconveniente de que la zona de trabajo sería mínima o de que, si se quisieran cubrir extensas áreas geográficas, esto conllevaría un alto coste económico. En cuanto a las estaciones meteorológicas, están distribuidas de manera desigual y solo proporcionan resoluciones espaciales gruesas (Reiners et al., 2023).

Con el desarrollo de la Teledetección desde el espacio, los datos satelitales ofrecen la única posibilidad de medir la TST en todo el planeta con una suficientemente alta resolución temporal (Li et al., 2013) y espacial.

La estimación de TST desde el espacio utilizando sensores remotos del infrarrojo térmico comenzó a ejecutarse a principios de la década de 1970 (McMillin, 1971). En la actualidad, se encuentran disponibles una variedad de plataformas espaciales para recuperar la TST, como el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), el conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles (VIIRS), Gaofen 4, el radiómetro espacial avanzado de emisión y reflexión térmica (ASTER), Sentinel-3, Landsat (Rosas et al., 2017). El lanzamiento de la serie Landsat ha permitido adquirir una base de datos histórica, desde 1982 hasta la actualidad, de imágenes térmicas de resolución espacial media, adecuada para diferentes estudios medioambientales (Jiménez-Muñoz et al., 2009), que hoy cuenta con los satélites Landsat-8 y 9.

Conociendo la emisividad de la superficie terrestre existen tres métodos para estimar la TST, los de canales simples, los multicanales y los métodos multiangulares (Pasapera, 2014). El método de canal simple utiliza la radiancia medida por el sensor satelital en un solo canal y la corrige a través de la atenuación y emisión atmosférica residual (Li et al., 2013). El uso de un solo canal es la principal ventaja de los métodos de canal simple, aunque posee como desventaja el empleo de algunos parámetros atmosféricos, generalmente estimados a través de sondeos (Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2003). De acuerdo con Jiménez-Muñoz et al (2009), el procedimiento más adecuado para recuperar la TST de un monocanal ubicado en la región del infrarrojo térmico, como es el caso de la serie Landsat, es mediante la inversión de la ecuación de transferencia radiativa. Varios autores como Yu et al. (2014), Pasapera (2014), He et al. (2020) y Sekertekin & Bonafoni (2020) han logrado emplear esta ecuación con éxito para obtener la TST utilizando datos del Landsat-8. La validación de los métodos empleados en la estimación de la TST se realiza habitualmente mediante mediciones in situ, método de la radiancia y referencia cruzada (Yang et al., 2017), aunque en los últimos años, la comparación con temperaturas ambientales in situ ha tomado fuerza, en investigaciones tales como Avdan y Jovanovska (2016), (Yang et al., 2017), Rongali et al. (2018), He et al. (2020) y Hidalgo-García (2021) se evidencia esto, la ventaja de dicho método es que es simple y preciso (Lei et al., 2019). Teniendo en cuenta estos elementos, el objetivo de la investigación es evaluar las posibilidades de empleo de la inversión de la ecuación de transferencia radiativa para la estimación de la TST en el Municipio de Habana del Este, provincia La Habana, utilizando los satélites Landsat-8 y 9.

2. METODOLOGÍA

2.1 Breve descripción del área de estudio.

La Habana del Este es un municipio de la provincia de La Habana, Cuba. Tiene una extensión territorial de 144,9 km². La Habana del Este limita al norte con las aguas del Estrecho de La Florida, al sur y al oeste, con los municipios de Regla y Guanabacoa, al sur también con San José de las Lajas, al este con los municipios de Jaruco y Santa Cruz del Norte y al oeste con el Canal de entrada de la Bahía que lo separa del municipio de Centro Habana. Sus límites geográficos se muestran en la Figura 1.

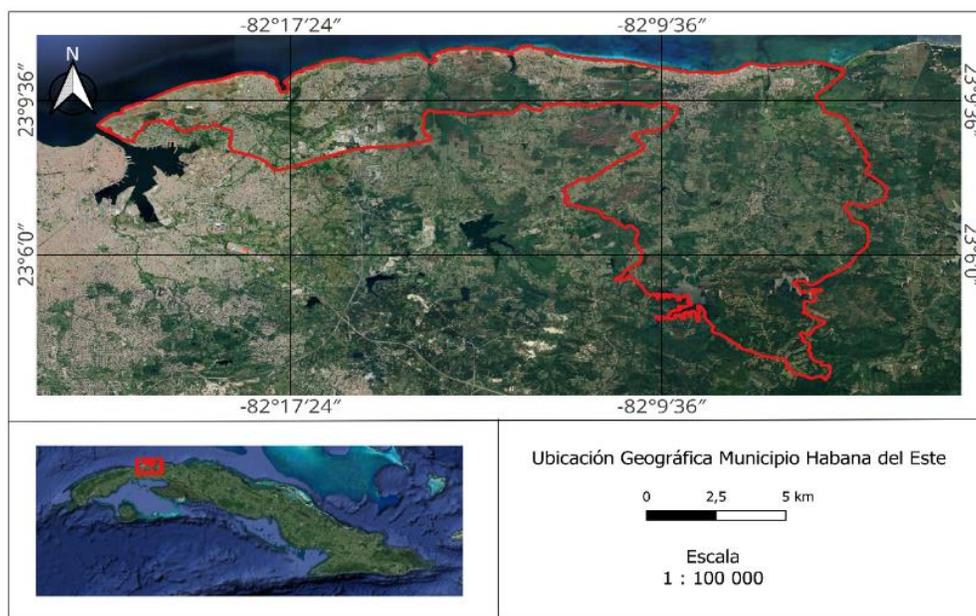


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

2.2 Toma de muestras en campo.

El muestreo in situ se comenzó a realizar desde el 7 de septiembre de 2023 hasta el 10 de noviembre de 2023, fueron en total 7 muestreos, los cuales se hicieron coincidir con la fecha y hora del paso del satélite. Los puntos de muestreo fueron 6, las coordenadas geográficas de las estaciones se determinaron mediante la ayuda de un receptor GPS (Garmin). Las coordenadas y la ubicación geográfica de los puntos anteriores se muestran en la Tabla 1 y la Figura 2 respectivamente.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo.

Puntos de muestreo	Coordenadas de los puntos	Sistema Geodésico de Referencia
1	23°10'20,7''N y 82°11'13,9''O	WGS-84
2	23°10'03,5''N y 82°12'12,5''O	
3	23°10'21,2''N y 82°14'59,1''O	
4	23°09'26,4''N y 82°16'17,4''O	
5	23°09'27,6''N y 82°18'24,8''O	
6	23°09'20,7''N y 82°20'48,4''O	

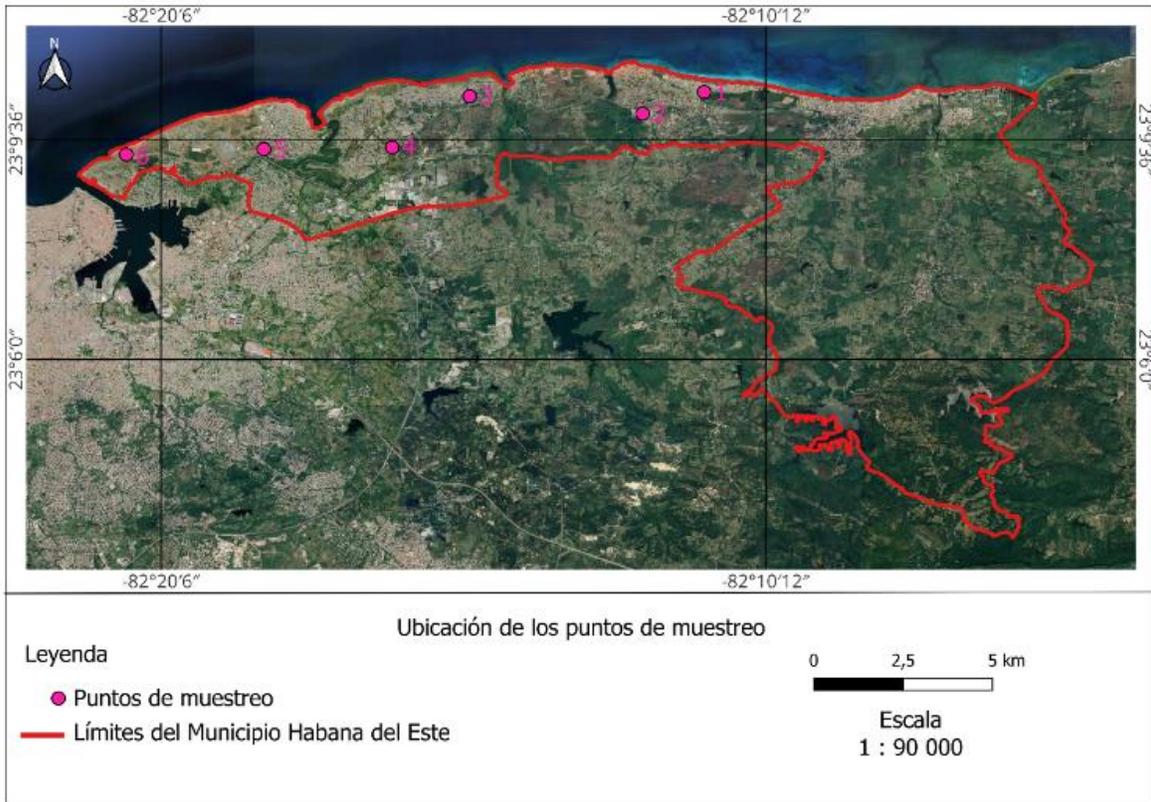


Figura 2. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo.

La temperatura ambiente se midió con un Testo 625, a una distancia de no más de 0,5 m de la superficie terrestre, los valores de temperatura medidos oscilaron entre los 26°C y los 34,33°C, estos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Temperaturas medidas en campo.

Fecha	Temperatura (°C)					
	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
7/9/23	33,06	32,67	33,93	34,33	33,63	33,9
15/9/23	32,33	32,33	33,66	32,9	33,4	33,33
23/9/23	32,2	32,1	33,5	32,93	33,03	33,26
1/10/23	32,63	32,2	33,67	32,57	33	33,37
09/10/23	28,53	28,23	31,2	28,73	29,33	29,66
17/10/23	25,86	26,23	26	29,23	33,46	30,93
10/11/23	31,23	31,5	31,97	32,3	32,5	32,9

2.3 Descarga y procesamiento de las imágenes satelitales.

Las imágenes de los satélites Landsat 8 y 9 se descargaron de forma gratuita a través de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov>). La cantidad de imágenes está relacionada con las fechas del trabajo de campo, por lo que se preveía emplear una imagen por cada fecha de muestreo, 7 en total, de las cuales solo se pudieron utilizar 3 y las restantes se vieron afectadas por las condiciones climatológicas. A las imágenes multiespectrales (Bandas 1-7) se les realizó la corrección atmosférica utilizando el módulo FLAASH del software ENVI 5.3, que emplea el modelo de transferencia radiativa MODTRAN 4 (Aguilar et al., 2014) y la Banda 10 se convirtió de niveles digitales a valores de radiancia empleando la herramienta Radiometric Calibration de dicho software.

2.4 Cálculo de la temperatura de la superficie terrestre.

De modo esquemático, el proceso para el cálculo de temperatura se inicia con los niveles digitales detectados por el sensor, en este caso correspondiente al infrarrojo térmico. Aquí el objetivo es encontrar la relación entre el flujo emitido por el suelo y el recibido por el sensor. Entre ambas magnitudes se interponen los componentes de la atmósfera, que también emiten su propia energía, distorsionando la radiancia recibida por el sensor (Chuvienco, 1996). Para poder recuperar la radiancia que proviene de la superficie a partir de la radiancia medida por el sensor, es necesario conocer la relación que existe entre ellas, y esta relación nos la ofrece la ecuación de transferencia radiativa (Anaya, 2019), la cual es descrita por Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) y se observa en la ecuación (1).

$$L_{\lambda}^{sen} = \tau_{\lambda} \left[\varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon) L_{atm\lambda}^{\downarrow} \right] + L_{atm\lambda}^{\uparrow} \quad (1)$$

Siendo $B_{\lambda}(T_s)$ la radiancia medida si la superficie fuera un cuerpo negro a la temperatura de la superficie T_s , τ_{λ} la transmisividad total de la atmósfera para la banda del canal λ del sensor, ε_{λ} la emisividad de la superficie, $L_{atm\lambda}^{\downarrow}$ la radiancia atmosférica ascendente, $L_{atm\lambda}^{\uparrow}$ es la radiancia atmosférica descendente y L_{λ}^{sen} la radiancia recibida por la banda i del sensor, en esta investigación se trabaja con la Banda 10 de ambos satélites porque, de acuerdo con Jiménez-Muñoz et al. (2014), esta banda está localizada en una región de inferior absorción atmosférica.

Para calcular la radiancia que proviene de la superficie se despeja la ecuación (1) y se obtiene la inversión de la ecuación de transferencia radiativa, que se muestra a continuación.

$$B_{\lambda}(T_s) = \frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{atm\lambda}^{\uparrow}}{\tau * \varepsilon_{\lambda}} - \frac{1 - \varepsilon_{\lambda}}{\varepsilon_{\lambda}} * L_{atm\lambda}^{\downarrow} \quad (2)$$

Se necesita contar con los datos atmosféricos τ_{λ} , $L_{atm\lambda}^{\downarrow}$ y $L_{atm\lambda}^{\uparrow}$, para su descarga se emplea la calculadora de parámetros atmosféricos desarrollada por Barsi et al. (2003), disponible en <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>, además de la radiancia captada por el sensor y la emisividad de la superficie.

Para el cálculo de la emisividad se asume la ecuación (3), descrita por Sobrino et al. (2004) para la Banda 6 del Landsat-5, debido a que esta y la Banda 10 del Landsat-8 y 9 tienen un rango espectral similar (He et al., 2020).

$$\varepsilon = 0.004 * P_v + 0.986 \quad (3)$$

Siendo P_v la Porción de vegetación, la cual se calcula como indican Sekertekin & Bonafoni (2020):

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (4)$$

El $NDVI$ es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, de forma extendida se usan los valores de 0,2 y 0,5 para $NDVI_{min}$ y $NDVI_{max}$ respectivamente, pero para generalizar el caso de estudio se usará el valor real de $NDVI$ mínimo y $NDVI$ máximo. El $NDVI$ se calcula según la ecuación (5) (Valor & Caselles, 1996):

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (5)$$

Siendo R_{NIR} la reflectancia en longitudes de onda del infrarrojo cercano y R_{RED} la reflectancia en la región del rojo, los cuales corresponden a las Bandas 5 y 4 de los Landsat-8 y 9.

Una vez conocida la radiancia que proviene de la superficie, $B_\lambda(T_s)$, es posible calcular la TST a partir de la ecuación (6):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B_\lambda(T_s)} + 1\right)} \quad (6)$$

Donde K_1 y K_2 son las constantes térmicas de la Banda 10 del satélite Landsat-8, $K_1=774.8853 \text{ Wm}^2\text{sr}^{-1}\text{um}^{-1}$ y $K_2=1321.0789 \text{ K}$ y del Landsat 9, $K_1=799.0284 \text{ Wm}^2\text{sr}^{-1}\text{um}^{-1}$ y $K_2= 1329.2405 \text{ K}$. La temperatura se obtiene en grados Kelvin, por lo que se debe llevar a grados Celsius restando 273,15 al valor obtenido.

2.5 Análisis estadístico.

En este apartado se procede a evaluar la relación que existe entre los parámetros de temperatura ambiental medidos en campo y los valores de TST obtenidos mediante las imágenes satelitales, con el objetivo de validar estos últimos. Este análisis se realiza con el software STATGRAPHICS y el empleo de técnicas de regresión. Para evaluar el ajuste de ambos datos mediante regresión se utilizan dos indicadores: el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) y la raíz del error medio cuadrático (RMSE). De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de regresión se elaboran los mapas temáticos, empleando el software QGIS, versión 3.16.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el análisis estadístico se emplearon un total de 18 muestras de Temperatura ambiente y Temperatura superficial obtenida mediante la inversión de la ecuación de transferencia radiativa (ETR). Se obtuvo un P-valor de 0.0007, por lo que se puede afirmar que existe una relación estadística significativa entre las variables superior a un 95% de nivel de confianza, el coeficiente de correlación lineal fue de 0,72, esto demuestra que existe una correlación fuerte entre las variables (Hernández et al., 2018), además, se alcanzó un error medio cuadrático de 1,43°C,

como se muestra en la Figura 3, que es bastante similar a los obtenidos por Lamaro et al. (2013) y Basit et al. (2023) para la estimación de la temperatura superficial del agua, por tanto, es evidente que los valores estimados mediante las imágenes se ajustan en gran medida a los valores medidos en campo. La precisión obtenida se debe fundamentalmente a que se logró planificar la coincidencia en fecha y hora del muestreo en campo y el paso del satélite, aunque se ha de señalar que en estos trabajos se debe contar con un número mayor de muestras para el análisis estadístico, con el objetivo de elevar la confiabilidad del ajuste logrado mediante la regresión.

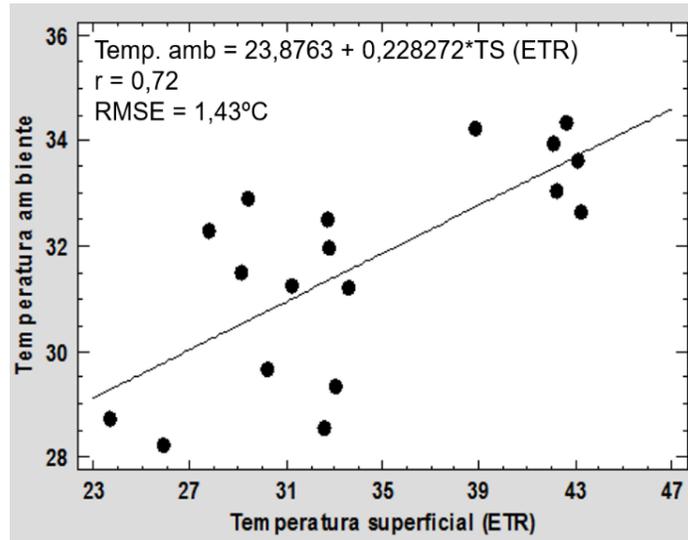


Figura 3. Gráfico que evalúa la correlación entre los datos de campo y las imágenes satelitales.

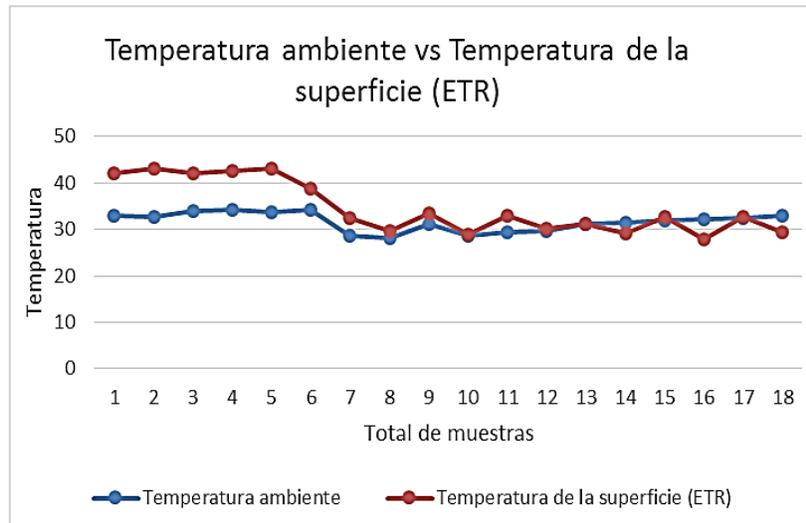


Figura 4. Comparación entre los valores de Temperatura ambiente y Temperatura de la superficie para las 18 muestras empleadas en la investigación.

De acuerdo con el gráfico representado en la Figura 4, solamente en los primeros cinco puntos correspondientes al muestreo realizado el 15.09.23 existe una diferencia marcada entre las temperaturas obtenidas por uno y otro método, debido a que los niveles de radiancia captados por el sensor en la Banda 10 para estas muestras son mayores en comparación con los valores de otras que poseen similar temperatura ambiente, los números de las demás muestras son bastante similares y en casi la totalidad de estas, excepto tres, los valores la Temperatura de la superficie

obtenidos de las imágenes satelitales son mayores a los de Temperatura ambiente, algo similar a lo obtenido por Pasapera [19].

Teniendo en cuenta entonces lo mencionado hasta aquí, se puede aseverar que es factible el empleo de este método para la estimación continua y a largo plazo de la TST mediante imágenes de los satélites Landsat 8 y 9.

En base a la ecuación de transferencia radiativa se obtuvo un mapa temático sobre el comportamiento de la TST en °C en el municipio de Habana del Este para el 10 de noviembre de 2023, como se observa en la Figura 5.

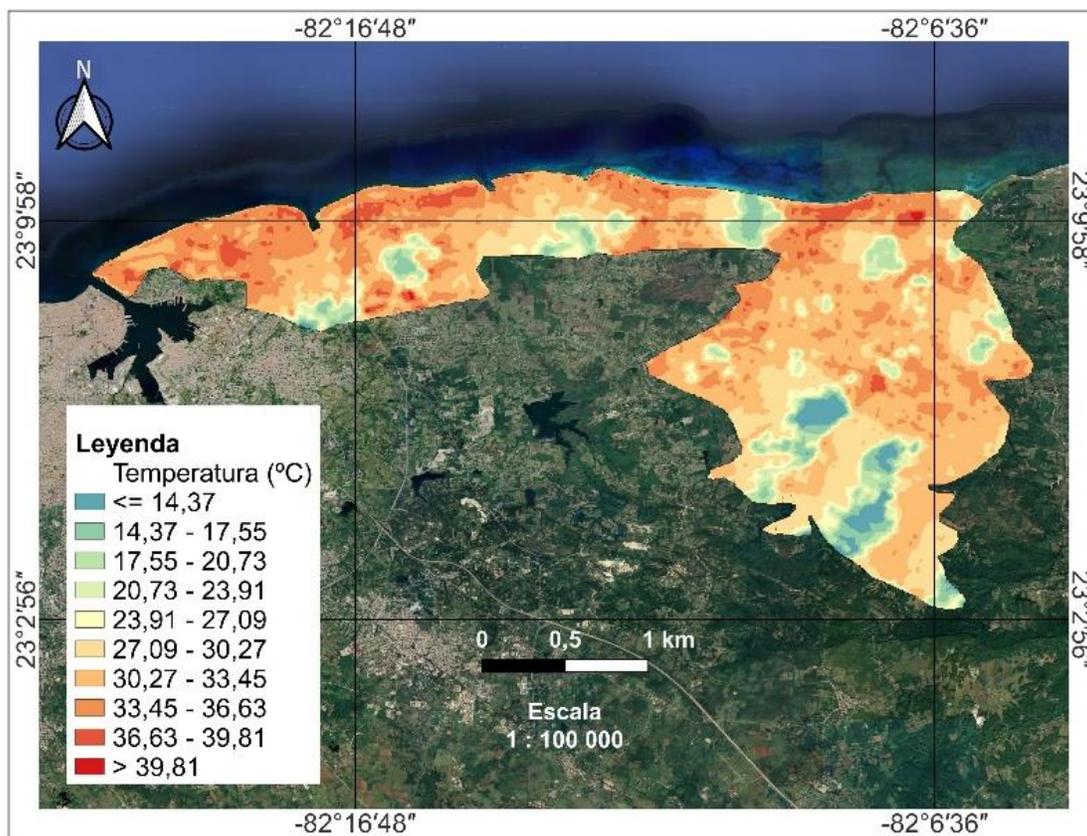


Figura 5. Mapa temático de la TST del municipio de Habana del Este.

Los valores más bajos de temperatura corresponden a franjas de nubes y sombras a su alrededor, que no fueron eliminadas del área de trabajo, y los mayores corresponden a los asentamientos urbanos. Este mapa permite analizar el comportamiento de la TST en esta zona, para este día, pero la aplicación del trabajo es mucho mayor, pudiéndose realizar análisis multitemporales sobre la variación de los valores de este parámetro en un período de tiempo determinado y que permita estudiar su evolución con el paso de los años. Conjuntamente a los resultados mostrados es válido destacar que el método de estimación de temperaturas superficiales que emplea imágenes satelitales es sumamente eficiente, pues permite obtener los datos logrando una reducción considerable del tiempo de trabajo y de los especialistas involucrados en esta tarea, otro factor a su favor es la humanización de las labores, reduciendo al mínimo el trabajo en campo, posibilita además que se observe el parámetro analizado en la totalidad de la zona de estudio, no siendo así el resultado del muestreo puntual en campo, todo lo cual trae consigo una disminución del costo económico del trabajo en general y una mejora en la calidad de los datos obtenidos.

4. CONCLUSIONES

1. Se comprobó que la utilización de imágenes satelitales en la determinación de la TST es una solución viable, debido a las ventajas que supone con respecto a los métodos directos de medición.
2. Se logró validar con buen nivel de precisión el uso de la inversión de la ecuación de transferencia radiativa en la estimación de la TST en una pequeña porción del territorio nacional, en este caso, el municipio Habana del Este.
3. Se constató la factibilidad de empleo de los satélites Landsat-8 y 9 para su uso en estos trabajos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Reiners, P., Sobrino, J. & Kuenzer, C. (2023). Satellite-Derived Land Surface Temperature Dynamics in the Context of Global Change—A Review. *Remote Sens.*, 15, 1857. <https://doi.org/10.3390/rs15071857>.
2. Naciones Unidas. (2022). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022>.
3. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. (5 de mayo de 2023). Estrategia ambiental 2016/2020. <https://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/2727/1/Estrategia%20Ambienta%20Nacional%202016-2020.pdf>.
4. Sánchez-Aparicio, M., Andrés-Anaya, P., Del Pozo, S. & Lagüela, S. (2020). Retrieving Land Surface Temperature from Satellite Imagery with a Novel Combined Strategy. *Remote Sens.*, 12, 277. doi:10.3390/rs12020277. 2020.
5. Balka, Y. (2023). Analysis of Land Surface Temperatures with Remote Sensing and Geographic Information Systems: The Case of Amasya City Center. *Journal of Protected Areas Research*, 2 (1), 01-13. <https://mimarlikbilimleri.com/ojs/index.php/journalofprotectedareasresearch>.
6. Avdan, U. & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*. <https://www.researchgate.net/publication/296414003>.
7. Li, Z., Tang, B., Wu, H., Ren, H., Yan, G. Wan, Z., Trigo, I. & Sobrino, J. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>.
8. Moncada, W. & Willems, B. (2020). Análisis espacial y temporal de la temperatura superficial en la microcuenca Apacheta mediante datos térmicos Landsat. *REVISTA DE TELEDETECCIÓN*, 57, 51-63. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13855>.
9. Manzanilla-Quiñones, U. (2023). Estimación de islas de calor urbanas en la ciudad de Uruapan, Michoacán, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1): e3495. DOI: 10.19136/era.a10n1.3495.
10. González-Acosta, V., Torres-Zafra, J.L. & González-Rodríguez, E.M. (2015). Datos satelitales ASTER L1B aplicados a la geotermia en Cuba. *REVISTA DE TELEDETECCIÓN*, 44, 15-30. <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3815>.
11. He, J., Luan, Y., Li, W., Ma, N. & Sun, H. (2020). Retrieval of Land Surface Temperature From Landsat 8 Data of the Dandong-liaoyang Geothermal Area. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-80651/v1>.

12. Binoy, B., Lazar, N. & Joshima, V. (2022). Impact of Land Cover on Land Surface Temperature A Remote Sensing Perspective. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 9, 16-22. <https://www.researchgate.net/publication/363653742>. 2022.
13. Choudhury, U., Singh, S.K., Kumar, A., Meraj, G., Kumar, P. & Kanga, S. (2023). Assessing Land Use/Land Cover Changes and Urban Heat Island Intensification: A Case Study of Kamrup Metropolitan District, Northeast India (2000–2032). *Earth*, 4, 503–521. <https://doi.org/10.3390/earth4030026>.
14. Asadzadeh, S. & Souza Filho, C.R. (2023). Numerical Modeling of Land Surface Temperature over Complex Geologic Terrains: A Remote Sensing Approach”. *Remote Sens*, 15, 4877. <https://doi.org/10.3390/rs15194877>.
15. Anaya, P. (2019). *Temperatura superficial terrestre a partir de imágenes satelitales: Herramienta para su cálculo*. [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Salamanca].
16. McMillin, L. (1971). *A method of determining surface temperatures from measurements of spectral radiance at two wavelengths*. [Degree of Doctor of Philosophy, Iowa State University]. <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/77211>.
17. Rosas, J., Houborg, R. & McCabe, M.F. (2017). Sensitivity of Landsat 8 Surface Temperature Estimates to Atmospheric Profile Data: A Study Using MODTRAN in Dryland Irrigated Systems. *Remote Sens*, 9, 988. doi:10.3390/rs9100988.
18. Jiménez-Muñoz, J.C., Cristóbal, J., Sobrino, J.A. Sòria, G., Ninyerola, M. & Pons, X. (2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 47(1). <https://www.researchgate.net/publication/224353816>.
19. Pasapera, J.J. (2014). *Validación de la emisividad y temperatura de la superficie del suelo usando datos del satélite Landsat 8*. [Magister en aplicaciones espaciales de alerta y respuesta temprana a emergencias, Universidad Nacional de Córdoba].
20. Jiménez-Muñoz, J. C. & J. A. Sobrino. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data”. *J. Geophys. Res.*, 108(D22), 4688, doi:10.1029/2003JD003480.
21. Yu, X., Guo, X. & Wu, W. (2014). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sens.*, 6, 9829-9852; doi:10.3390/rs6109829.
22. Sekertekin, A. & Bonafoni, S. (2020). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation. *Remote Sens.*, 12, 294. doi:10.3390/rs12020294.
23. Yang, C., He, X., Wang, R., Yan, F., Yu, L., Bu, K., Yang, J., Chang, L. & Zhang, S. (2017). The Effect of Urban Green Spaces on the Urban Thermal Environment and Its Seasonal Variations. *Forests*, 8(5), 153. <https://doi.org/10.3390/f8050153>.
24. Rongali, G., Kumar, A., Kumar Gosain, A. & Khosa, R. (2018). Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Estimation from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data: A Case Study of the Beas River Basin, India. *Sci. & Technol.*, 26(2), 829–840. <https://www.researchgate.net/publication/324982810>.
25. Hidalgo-García, D. (2021). Determinación de la temperatura de la superficie terrestre mediante imágenes Landsat 8: Estudio comparativo de algoritmos sobre la ciudad de Granada. *REVISTA DE TELEDETECCIÓN*, 58, 1-21. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.14538>. 2021.

26. Lei Wang, L., Lu, Y. & Yao, Y. (2019). Comparison of Three Algorithms for the Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat 8 Images. *Sensors*, 19, 5049; doi:10.3390/s19225049.
27. Aguilar, H., Mora Zamora, R. & Vargas Bolaños, 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*, 53, 39-59. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>.
28. Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de Teledetección espacial. Madrid: Ediciones RIALP, SA.
29. Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A. Skoković, D., Mattar, C. & Cristóbal, J. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 11 (10). DOI: 10.1109/LGRS.2014.2312032.
30. Barsi, J., Barker, J. & Schott, J. (2003). An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1294665>.
31. Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C. & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90, 434 – 440. doi:10.1016/j.rse.2004.02.003.
32. Valor, E & Caselles, V. Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. *REMOTE SENS. ENVIRON.*, 57:167-184.
33. Hernández, J., Espinosa, F., Rodríguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S. & Bermúdez, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55963207025>.
34. Lamaro, A., Mariñelarena, A., Torrusio, S. & Sala, S. (2013). Water surface temperature estimation from Landsat 7 ETM+ thermal infrared data using the generalized single-channel method: Case study of Embalse del Río Tercero (Córdoba, Argentina). *Advances in Space Research*, 51, 492–500. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.032>.
35. Basit, A., Khalil, R., Khan, I., Zia, I. & Sadiq, S. (2023). Comparing radiative transfer equation method (rtem) and the generalized single-channel method (gscm) for retrieving sea surface temperature along the Karachi coast, Pakistan. *FUUAST Journal of Biology*, 13(1), 27-37. <https://fuuastjb.org/index.php/fuuastjb/article/view/724>.