

Comparación entre las temperaturas de superficie obtenidas con MODIS y las temperaturas *in situ* medidas en la península Hurd, isla Livingston, Antártida: Primeros resultados

Recondo, C. ⁽¹⁾, Peón, J. ⁽¹⁾, Pendás, E. ^(1,2), de Pablo, M. A. ⁽³⁾, Calleja, J. F. ⁽⁴⁾, Fernández, S. ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Grupo *Remote Sensing Applications* (RSApps). Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n, 33600 Mieres, Asturias, España. mrecondo@uniovi.es, juanjopeon@gmail.com

⁽²⁾ AEMET-Galicia. C/ Canceliña 8, 15011 A Coruña, Galicia, España. enrique@pendas.es

⁽³⁾ Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. Campus Científico-Tecnológico. Ctra. A-II Km 33.6, 28871 Alcalá de Henares, Madrid, España. miguelangel.depablo@uah.es

⁽⁴⁾ Grupo *Remote Sensing Applications* (RSApps). Departamento de Física. Universidad de Oviedo. Campus de Oviedo (Llamaquique). C/ Calvo Sotelo s/n, 33007 Oviedo, Asturias, España. jfcalleja@uniovi.es

⁽⁵⁾ Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. Campus de Oviedo (Llamaquique). C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo, Asturias, España. fernandezmsusana@uniovi.es

Resumen: En el marco del proyecto PERMASNOW estamos comparando los datos térmicos MODIS (*LST*, 1-km) con los obtenidos *in situ* (T_a y T_s) en las estaciones meteorológicas de la AEMET y las propias del proyecto en la península Hurd, isla Livingston (Antártida). Este trabajo muestra los primeros resultados obtenidos para las estaciones de la AEMET: Juan Carlos I (JCI), Glaciar Johnson (GJ) y Glaciar Hurd (GH) en el periodo marzo-2000/julio-2002 y febrero-2016. Se comparan los datos diarios *LST* con los valores medios diarios de T_a y T_s . Se observa una alta correlación lineal entre T_a y T_s , restringiéndose entonces la comparación a T_a . Se confirma también la tendencia lineal ligeramente decreciente de T_a en el periodo estudiado. Aunque la nubosidad limita la disponibilidad de datos *LST*, sin embargo, el mayor problema proviene de la calidad de los datos *LST*, observando que los que no son de “good quality” generalmente subestiman mucho *LST* y no son fiables. El producto MODIS-albedo diario (500-m) nos ayuda a mejorar el filtrado de datos de “other quality” y “cloud”, además de clasificar la cubierta en tierra (con/sin nieve) o agua (nieve/hielo fundido). El filtrado reduce a un 3-8% los días con datos disponibles en JCI y GJ y elimina todos en GH. Un ajuste lineal simple no explica bien la relación *LST* (tierra/agua)- T_a ($R^2=0,1-0,4$), recurriendo a regresiones lineales múltiples para tener en cuenta las variaciones anuales/estacionales en esta relación. Así R^2 sube a 0,3-0,6, siendo mejor en JCI ($R^2=0,6$ y $RSE\sim 2^\circ C$). Se concluye que los datos *LST*-MODIS sirven para estimar tendencias a largo plazo en T_a a nivel global en la isla Livingston. Mejorar la calidad de los datos *LST* en este tipo de ambientes fríos es esencial.

Palabras clave: Temperatura de la superficie terrestre (*LST*), MODIS, temperatura del aire (T_a) temperatura superficial del suelo (T_s), permafrost, Antártida.

Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with in situ temperatures measured in the Hurd Peninsula, Livingston Island, Antarctica: First results

Abstract: In the framework of the PERMASNOW project, we are comparing the MODIS thermal data (*LST*, 1-km) with those obtained *in situ* (T_a and T_s) at the AEMET meteorological stations and the project's stations in the Hurd Peninsula, Livingston Island (Antarctica). This article shows the first results obtained at the AEMET stations: Juan Carlos I (JCI), Glacier Johnson (GJ) and Glacier Hurd (GH) in the period of March-2000/July-2002 and February-2016. The daily *LST* data are compared with the daily mean values of T_a and T_s . A high linear correlation between T_a and T_s is observed, and thus, the comparison being restricted to T_a . The slightly decreasing linear trend of T_a in the studied period is also confirmed. Although the cloudiness limits the availability of *LST* data, however, the main problem proceeds from the quality of the *LST* data, observing that those with no “good quality” usually underestimate *LST* and are not reliable. The daily MODIS albedo product (500-m) helps us to improve the filtering of data with “other quality” and “cloud”, besides of classifying the cover in land (with/without snow) or water (melting snow/ice). The filtering reduces to 3-8% the days with available data at JCI and GJ, and eliminates all of them in GH. A simple linear fit does not explain well the relationship *LST* (land/water)- T_a ($R^2=0.1-0.4$), appealing to multiple linear regressions to take into account the annual/seasonal variations in this relationship. So, R^2 goes up to 0.3-0.6, being better at JCI ($R^2=0.6$ and $RSE\sim 2^\circ C$). It is concluded that the MODIS-*LST* data are useful for estimating long-term trends in T_a at a global level in the Livingston Island. Improving the quality of the *LST* data in this type of cold environments is essential.

Keywords: Land surface temperature (*LST*), MODIS, air temperature (T_a) soil surface temperature (T_s), permafrost, Antarctica.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático que sufre la Antártida es extremadamente complejo tanto a escala espacial como temporal. Medidas de la temperatura del aire (T_a) en 19 estaciones con largos periodos de registro de datos bajo el proyecto READER (*Reference Antarctic Data for Environmental Research*), mostraron que la Península Antártica (PA) se había calentado entre 1950-2000 a un ritmo de hasta 0,56 °C/década (estación Faraday/Vernadsky), mientras que el interior continental se había enfriado ligeramente y las estaciones costeras, unas se habían calentado y otras enfriado (Turner *et al.*, 2005). Steig *et al.* (2009) ampliaron el estudio a 107 estaciones con datos de T_a y usaron también datos térmicos (*Land Surface Temperature*, LST) NOAA-AVHRR para concluir que ambos tipos de datos mostraban resultados similares y un significativo calentamiento de la Antártida Oeste, que excedió los 0,1°C/década entre 1957-2006. Estudios recientes, sin embargo, muestran que la mayoría de las estaciones en la PA están enfriándose desde 1998/1999 (Oliva *et al.*, 2017). El seguimiento del comportamiento térmico (y del *permafrost* o suelo congelado, cobertura nival, etc.) es esencial para entender y prever los cambios en la Antártida. Y para ello se debe actuar tanto tomando datos de campo o *in situ* como datos desde satélites, ya que ambos tienen limitaciones (datos locales en el primer caso y falta de datos por nubosidad en el segundo) y ventajas (registros continuos de datos en el primer caso y amplia cobertura espacial en el segundo). Bajo esta perspectiva trabajamos en el proyecto PERMASNOW (de Pablo *et al.*, 2016) en las islas Livingston (penínsulas Byers y Hurd) y Decepción (Antártida). En estas islas (pertenecientes a las islas Shetland del Sur, situadas a unos 120 km de las costas de la PA y en su lado Oeste), se encuentran las bases antárticas españolas (BAE) Juan Carlos I (en la península Hurd de la isla Livingston) y Gabriel de Castilla (isla Decepción), y en el entorno de ambas el equipo de la Universidad de Alcalá trabaja desde 1991, y especialmente desde 2006, con la instalación de estaciones de monitorización incluidas en las redes de la Asociación Internacional del Permafrost. Además del trabajo de campo, en este nuevo proyecto (entre 2015-2019) se analizarán imágenes ópticas, radar (Jiménez *et al.*, 2017), y térmicas, siendo éstas últimas, en concreto los datos térmicos del sensor MODIS, con una serie ya larga de datos, los usadas en este trabajo.

No existen muchos trabajos de comparación entre los datos MODIS-LST y los de T_a y/o temperatura del suelo (T_s) en las zonas polares, especialmente en la Antártida. Wan (2014) incluyó la T_s del Polo Sur sólo en la evaluación de la versión 6 (V6) del producto MODIS-LST, obteniendo un error de -0,5°C. Fréville *et al.* (2014) evaluaron la V5 (sólo con datos “good quality”) en la meseta antártica y su costa NE, obteniendo $R^2=0,69-0,97$ y $RMSE=2,2-7,5^\circ\text{C}$, con los mejores resultados en la meseta, siendo, en general, $LST < T_s$ hasta en -3°C . La mayoría de los trabajos de comparación entre MODIS-LST y T_a en zonas polares encuentran correlación entre ambas temperaturas, aunque ésta es variable dependiendo

de las estaciones. En la Antártida Este, Wang *et al.* (2013) encontraron mayor correlación en las estaciones del lado este ($R^2=0,83-0,98$) que en las del oeste ($R^2=0,41-0,83$), usando Terra diurnas y nocturnas, indicando que los valores de R^2 eran similares para ambas. Obtuvieron errores entre $SD=1,3-8,5^\circ\text{C}$, siendo $LST < T_a$.

En lo que conocemos, trabajos similares con MODIS no se han realizado en las islas Shetland del Sur. Por ello abordamos este trabajo. El objetivo es comparar los datos MODIS-LST con los de T *in situ* (T_a y T_s) tanto de las estaciones propias del grupo como de las estaciones de la AEMET. La instrumentación del grupo se detalla en de Pablo *et al.* (2016) y la de la AEMET en Bañón y Vasallo (2015), aunque en ambos casos son estaciones automáticas de T , que se mantienen y cuyos datos se recogen en el verano antártico, cuando están activas las BAE. El error en T_a es 0,2°C en ambos casos, mientras que para T_s es 0,2°C en las de la AEMET y 0,5°C en las del grupo. Como no existen datos MODIS-LST en la isla Decepción ni en la península Byers de la isla Livingston (los píxeles son enmascarados como agua), nos ceñiremos a la península Hurd de la isla Livingston. El objetivo final pretendido es encontrar algoritmos de estimación de la T_a (o T_s) a partir de los datos LST en estos ambientes polares, como ha sido posible en otras zonas más cálidas, por ejemplo, en España (Recondo *et al.*, 2013; Peón *et al.*, 2014), para extrapolar los resultados espacialmente a toda la isla Livingston o incluso a otras islas y poder realizar mapas temporales de temperatura. Otro objetivo es aprender lo que aportan los datos LST de los sensores actuales, como MODIS, así como sus limitaciones en estos ambientes fríos, para ver cómo se pueden mejorar los sensores futuros.

Como primeros resultados mostramos aquí las comparaciones con los datos de la AEMET (T_a).

2. ÁREA DE ESTUDIO

Nuestro estudio se centra en la península Hurd de la isla Livingston, una de las áreas donde trabaja el equipo del proyecto PERMASNOW (Figura 1).

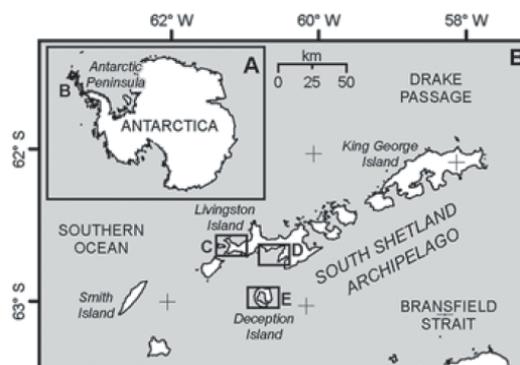


Figura 1. Área de estudio del proyecto PERMASNOW: penínsulas Byers (Área C) y Hurd (D) de la isla Livingston y la isla Decepción (E). Imagen de Pablo *et al.* (2016)

3. DATOS

Los datos de T_a y T_s son los obtenidos en las estaciones de la AEMET: Juan Carlos I (JCI), Glaciar Johnson (GJ) y Glaciar Hurd (GH) (Tabla 1). En realidad, la estación GJ estuvo operativa hasta el 24/01/2015, que fue trasladada al lóbulo Hurd y llamamos desde entonces GH. En JCI se obtienen datos cada 10 minutos (10^m) a lo largo de todo el año, mientras en GJ y GH son cada 10^m en el verano antártico (entre diciembre y febrero) y cada media hora ($0,5^h$) el resto del año.

Tabla 1. Localización, altitud y fechas de operatividad de las estaciones antárticas de la AEMET usadas.

Estación	Latitud	Longitud	h (m)	Fechas
JCI	62°39'47"S	60°23'16"W	12	16/02/1988 Actualidad
GJ	62°40'16"S	60°21'51"W	178	01/12/2006 24/01/2015
GH	62°41'48"S	60°24'44"W	93	25/01/2015 Actualidad

Los productos MODIS-LST son los diarios de 1 km de resolución espacial, tanto de Terra (desde el 05/03/2000) como de Aqua (desde el 08/07/2002) y tanto diurnos como nocturnos (MOD11/MYD11, V5). Además, se usaron los productos MODIS-albedo diarios de 500 m (MOD10/MYD10), con su clasificación de la cubierta de cada píxel en nieve, tierra (no nieve), agua y nube, para mejorar la discriminación de las nubes y comprobar si la cubierta influye en los resultados. Ambos productos tienen datos de calidad (QC o QA).

La comparación con los datos de la AEMET se hizo hasta el 21/02/2016, cuando terminó la campaña antártica 2015/2016, es decir, se han comparado 16/14 años de datos conjuntos MODIS-AEMET.

4. METODOLOGÍA

Se obtuvieron las T_a y T_s medias diarias para cada estación siempre que el registro de datos diarios estuviese completo ($n=144$ datos para los datos de 10^m y $n=48$ para los de $0,5^h$). Los datos MODIS usados fueron extraídos en la localización de cada estación a través de *Google Earth Engine* (<http://earthengine.google.org>) con su *Application Programming Interface* (API) (<https://code.earthengine.google.com/>). El análisis estadístico y los gráficos se realizaron con el software libre R (<http://www.r-project.org/>). La mayoría de las comparaciones T -LST están basadas en regresiones lineales simples o múltiples, en todos los casos usando regresiones robustas con la librería MASS en R. Se usan los parámetros estadísticos típicos de R^2 y RSE (*residual standard error*) para cuantificar la bondad del ajuste del modelo. En este artículo sólo se presentan los modelos obtenidos, que no se han validado todavía.

5. RESULTADOS

5.1. Comparación entre T_a y T_s

Aunque T_s y LST son medidas distintas que T_a , si existe una fuerte correlación entre T_s y T_a , significa que

también la habrá entre T_a y LST, y que podría estimarse T_a (medida más usual en las estaciones) a partir de LST. Para demostrar esto, hemos estudiado la correlación entre las T_a y T_s medias diarias de las estaciones (desde el 2000). La comparación muestra que ambas tienen un comportamiento similar de tipo sinusoidal, variando en fase y con similar amplitud. Se observa también en ambas una tendencia lineal ligeramente decreciente con el tiempo en la mayoría de las estaciones desde el año 2000 (p. ej., para T_a entre $-0,08t$ y $-1,1t$), confirmando lo observado ya por el equipo en proyectos anteriores. T_a y T_s están fuertemente correlacionadas ($R^2=0,80$ en JC y GH, y $R^2=0,66$ en GJ, con pendiente lineal, $a \sim -1$ y $RSE \sim 1^\circ C$ en todas ellas (Figura 2). En general $T_a < T_s$, aunque la diferencia entre ambas ($< 1^\circ C$) está dentro del error del ajuste (RSE). En GJ, el ajuste es mejor con sólo los datos de 10^m del verano antártico ($R^2=0,78$).

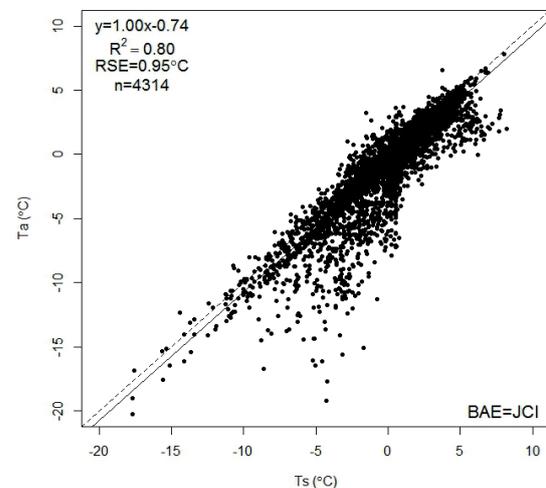


Figura 2. Ejemplo de ajuste lineal entre las T_a y T_s medias diarias: en JCI entre 01/01/2000 y 21/02/2016.

Dado este resultado, nos ceñiremos de momento a T_a para su comparación con la LST de MODIS.

5.2. Comparación entre T_a y LST

La disponibilidad de datos MODIS-LST en el área de estudio es limitada, debido a la frecuente cobertura nubosa. Así, sólo hay datos en un 24-35%, 18-28% y 3-13% de los días estudiados en JCI, GJ y GH, respectivamente (correspondiendo los menores valores a los datos nocturnos), frente a un 82-87%, 98% y 100% para T_a , respectivamente. Sin embargo, el mayor problema proviene de la calidad (QC) de los datos LST disponibles, ya que aquellos de peor calidad de acuerdo con Wan (2006) muestran que $LST \ll T_a$, de forma que sólo los datos de "good quality" son fiables y son los seleccionados (Figura 3). Además, la calidad (QA) y la clasificación del producto MODIS-albedo nos ayuda a filtrar los datos de "other quality" and "cloud", mientras que los datos de "snow-covered land", "snow-free land" and "open-water" (en nuestro caso nieve fundida) se han mantenido juntos en el análisis porque su relación T_a -LST es similar. Los filtros aplicados (especialmente el de la calidad de los

datos LST) reduce significativamente el número de datos considerados como “good”, en términos de porcentajes de días con datos, al 3-8%, 4% y 0% en JCI, GJ y GH, respectivamente. En GH se eliminan todos los datos.

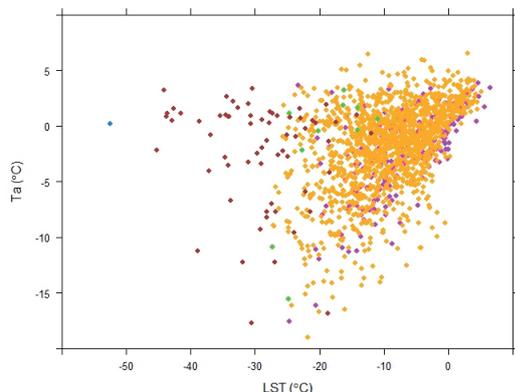


Figura 3. Ejemplo de relación T_a -LST para los datos Terra diurnos en JCI mostrando los distintos códigos de calidad (QC) en colores (color rosa: “good quality”)

Un ajuste lineal simple con los datos “good” no explica bien la relación T_a -LST ($R^2=0,1-0,4$) (Figura 4).

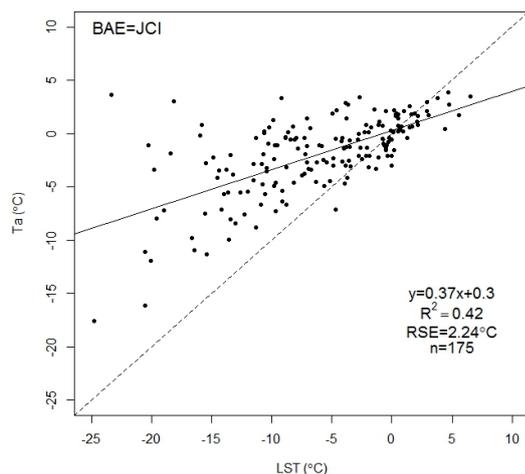


Figura 4. Ejemplo de ajuste lineal T_a -LST para los datos Terra diurnos “good” en JCI

Recurrimos entonces a regresiones lineales múltiples para tener en cuenta las variaciones anuales/estacionales en la relación T_a -LST. Así, para estimar T_a incluimos, además de LST, el tiempo (t) en forma lineal y con dos armónicos, en los primeros modelos probados. Con ellos R^2 sube a 0,3-0,6, con RSE entre 2-3 °C, siendo mejor los ajustes para JCI ($R^2=0,5-0,6$, $RSE=2,1-2,3^\circ\text{C}$, $n=125-355$) que para GJ ($R^2=0,3-0,5$, $RSE=1,7-2,7^\circ\text{C}$, $n=53-55$). Sobre todo para JCI no se observa gran diferencia en términos de R^2 y RSE entre los datos de Terra y de Aqua, ni entre los diurnos y los nocturnos.

6. CONCLUSIONES

En la zona y el periodo de estudio se observa una correlación moderada entre la T_a media diaria de las estaciones y la LST de MODIS. La falta de datos LST debido a la nubosidad es una limitación importante, pero

más aún el que la mayoría de los datos disponibles no sean de buena calidad, lo que debería mejorar en los sensores futuros. Aun así, los datos LST adecuados pueden servir para estimar tendencias a largo plazo y hacer mapas a escala global de la isla Livingston.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), a través del proyecto PERMASNOW (CTM2014-52021-R).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Bañón, M., Vasallo, F. 2015. *AEMET en la Antártida: Climatología y meteorología sinóptica en las estaciones meteorológicas españolas en la Antártida*. AEMET, 150 p. ISBN: 978-84-7837-093-1
- de Pablo, M.A., et al. 2016. Frozen ground and snow cover monitoring in the South Shetland Islands, Antarctica: Instrumentation, effects on ground thermal behaviour and future research. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(2), 475-495.
- Fréville, H., et al. 2014. Using MODIS land surface temperatures and the Crocus snow model to understand the warm bias of ERA-Interim reanalyses at the surface in Antarctica. *The Cryosphere*, 8, 1361-1373.
- Jiménez, J., et al. 2017. Imágenes Radar de alta resolución para la caracterización de la cobertura nival en la Isla Decepción (Antártida Marítima). *Nuevas plataformas y sensores de teledetección. Actas del XVI congreso científico de la AET*.
- Oliva, M., et al. 2017. Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere. *Sci Total Environ*, 580, 210-223.
- Peón, J., et al. 2014. Improvements in the estimation of daily minimum air temperature in peninsular Spain using MODIS land surface temperature”. *Int J Remote Sensing*, 35(13), 5148-5166.
- Recondo, C. et al. 2013. Empirical models for estimating daily surface water vapour pressure, air temperature, and humidity using MODIS and spatiotemporal variables. Applications to peninsular Spain”. *Int. J. Remote Sensing*, 34(22), 8051-8080.
- Steig, E.J. et al. 2009. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, 457, 459-463.
- Turner, J. et al. 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.*, 25, 279-294.
- Wan, Z. 2006. *Collection-5. MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide, Sep 2006*. http://www.ices.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/MODIS_LST_products_Users_guide_C5.pdf
- Wan, Z. 2014. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product Remote Sens. *Environ.*, 140, 36-45
- Wang, Y. et al. 2013. A comparison of MODIS LST retrievals with in situ observations from AWS over the Lambert Glacier Basin, East Antarctica, *Int. J. Geosci.*, 4, 611-617.