

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE DOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN EN LA ISLA 25 DE MAYO (KING GEORGE ISLAND), ISLAS SHETLAND DEL SUR, ANTÁRTIDA

ANALYSIS AND COMPARISON OF TWO DIGITAL ELEVATION MODELS IN THE 25 DE MAYO ISLAND (KING GEORGE ISLAND), SHETLAND DEL SUR ISLANDS, ANTARCTICA

Hernán Sala¹, Claudio Matko¹, Ulrike Falk² y Francisco Grings³

¹ Instituto Antártico Argentino - Dirección Nacional del Antártico, Balcarce 290, 2° piso (C1064AAF) CABA, Argentina

² Zentrum für Fernerkundung der Landoberfläche (ZFL), Universität Bonn, Walter-Flex-Str. 3, (53113) Bonn, Germany

³ Instituto de Astronomía y Física del Espacio, Ciudad Universitaria (1428), CABA, Argentina

RESUMEN

En este trabajo se analizan y comparan los dos únicos Modelos Digitales de Elevación (MDE) elaborados de manera independiente y de acceso público, que existen al presente, para el área de la Isla 25 de Mayo/King George Island (I25M), Islas Shetland del Sur, Antártida. Uno de ellos, el Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2 (RAMPv2) cubre exclusivamente la Antártida, mientras que el otro, el Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEMv2), es de alcance cuasi-global. Para comparar ambos modelos se tuvieron en cuenta, entre otras variables, la resolución espacial, la escala de trabajo, los rangos y las diferencias de elevaciones. El objetivo final consistió en determinar cuál de los dos MDE representa con mayor fidelidad la topografía de la I25M y, en consecuencia, resulta más apropiado para la generación de nuevos productos digitales derivados. Los resultados de los análisis indican que, a pesar de tener menor resolución espacial (200 m), el modelo RAMPv2 es el más adecuado de los dos. Esta selección se fundamenta sobre la base de que el modelo RAMPv2 posee mayor coherencia en cuanto a las características topográficas y morfológicas de la isla, no presenta valores aberrantes y posee una diferencia de ~40 m con respecto a la cota máxima de la isla, según indican otras fuentes independientes. Por último, se proponen algunas sugerencias con respecto a la generación y futura disponibilidad de MDE para la I25M.

Palabras clave: modelo digital del terreno, topografía digital, ASTER GDEM, RAMP, Antártida.

ABSTRACT

In this paper we have analyzed and compared two Digital Elevation Models (DEM) for the area of the 25 de Mayo/King George Island (I25M), South Shetland Islands, Antarctica. At the moment of writing this paper, these were the only independent DEM available freely to the public. One DEM is the Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2 (RAMPv2), which covers Antarctica exclusively, while the other DEM, the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEMv2) has a quasi-global coverage. In order to compare both models we have considered, among other variables, the spatial resolution, the scale and the elevation differences. The main objective of this work was to determine which of these two DEMs represents more accurately the topography of the I25M. The results of the analyses indicate that RAMPv2 is the most appropriate, even when it has a lower spatial resolution (200 m). This conclusion was based on RAMPv2's higher coherence regarding the topography and the morphology of the island, it showed no outliers and it had a maximum elevation difference of ~40 m with respect to the highest reported altitude of the area according to independent sources. Finally, some suggestions were proposed on the development and future availability of digital elevation models for I25M.

Key words: Digital Terrain Models, Digital Topography, ASTER GDEM, RAMP, Antarctica.

INTRODUCCIÓN

Disponer de información topográfica de alta calidad es un requisito imprescindible para la elaboración de cartografía de base, mapas temáticos y demás productos derivados. En caso que los productos a desarrollar estén orientados a la conservación y administración de recursos hídricos y/o glaciológicos, la dependencia de la calidad de los datos es aún más crítica. Esto se debe a que el proceso de determinación de cuencas, necesario para el estudio de dichos recursos, es extremadamente dependiente de la información topográfica y, en consecuencia, resulta muy sensible a la precisión con que la misma se encuentre expresada.

Actualmente, la información topográfica se puede almacenar en forma digital, pudiéndose definir un Modelo Digital del Terreno como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994). Se reserva el término Modelo Digital de Elevación (MDE) para referirse, en particular, a una representación digital de la altura del terreno en una región determinada.

En el marco de la geomática, un MDE es susceptible de ser sometido a una amplia variedad de procesamientos y análisis. Sin embargo, por las razones recién indicadas, antes de iniciar la elaboración de un producto derivado, es fundamental consistir los datos y, preferentemente, evaluarlos en presencia de una fuente de información independiente, siempre que esta exista y/o se encuentre disponible.

En general, se acepta que un MDE cumple con las condiciones de calidad necesarias si este permite reproducir una porción de la realidad del terreno a una escala determinada y con un error despreciable para dicha escala; permitiendo simular digitalmente procesos reales del medio físico. Según Felicísimo (1994), la magnitud del error puede ser razonable si se generan modelos matriciales donde el error cuadrático medio sea aproximadamente un 10% del tamaño entre filas y columnas de la matriz.

En la actualidad, existen diversos modelos digitales de elevación disponibles en forma pública, de alcance global (o cuasi-global) y con calidad suficiente para ser utilizados en estudios de escala regional, e incluso local. Por ejemplo, el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Farr et al. 2007) goza de amplia aceptación en diversas disciplinas y ha sido utilizado en un muy importante número de trabajos. Sin embargo, en altas latitudes la disponibilidad de MDE es muy limitada, debido no sólo a la ubicación geográfica per se, sino también a las dificultades que supone la detección y el análisis de la elevación en superficies cubiertas de hielo o nieve, sobre las cuales es muy frecuente la presencia de nubes y donde las condiciones de luz son escasas durante gran parte del año. La conjunción de estos factores complica el uso de sensores remotos para la elaboración de modelos digitales de elevación, en particular mediante instrumentos que trabajan en el rango del espectro visible. Por otra parte, y en especial en lo que respecta a la Antártida, la extensión de estas regiones, sus condiciones meteorológicas y el carácter remoto de las mismas, impone limitaciones de orden logístico y económico que dificultan la obtención de datos in situ, ya sea para la elaboración y/o validación de modelos digitales de elevación.

Desde hace algunos años, se ha puesto a disposición del público una serie de modelos que incluyen total o parcialmente a la Antártida. Por ejemplo, Korona et al. (2009) han elaborado un MDE que cubre distintos sectores de la Antártida, mientras que Cook et al. (2012) han generado otro MDE que cubre exclusivamente la Península Antártida. Ambos modelos representan un significativo avance para el estudio de estas áreas; no obstante, su extensión es relativamente acotada. De hecho, ninguno de los dos incluye al archipiélago de las Islas Shetland del Sur, al cual pertenece la Isla 25 de Mayo/King George Island (I25M), donde parte de los autores realizan investigaciones de campo.

En función de lo expuesto anteriormente, en este trabajo se analizan y comparan, para el área correspondiente a la I25M los dos únicos modelos digitales de elevación independientes que cubren la superficie completa de la isla, y que se encuentran disponibles al público a la fecha de redacción de este artículo. Cabe destacar, que ambos modelos se utilizan con cierta frecuencia en trabajos de glaciología, climatología y otras disciplinas científicas.

El objetivo fundamental del presente estudio consistió en determinar y evaluar cuál de los dos modelos independientes provee la representación topográfica más fidedigna y adecuada para la elaboración de distintos productos digitales derivados. Siendo de particular interés, por ejemplo, la obtención de los límites y las características de las cuencas hídricas y/o glaciarias, a los fines de desarrollar nuevas investigaciones .

ÁREA DE ESTUDIO

La I25M se encuentra ubicada entre los 61°50' y los 62°16' de latitud S y entre los 57°34' y los 59°02' de longitud O. Constituye la isla de mayor extensión del archipiélago de las Islas Shetland del Sur, una de las regiones antárticas más septentrionales, situada al N de la Península Antártica. Su eje mayor tiene una orientación OSO-ENE y sus costas se encuentran bañadas al N por el Pasaje de Drake (Mar de Hoces) y al S por el Mar de La Flota

(Bransfield Strait), en donde abundan fiordos y bahías. Aproximadamente, el 90% de los 1250 km² de su superficie se encuentran englazados (Rückamp et al., 2011) y el espesor del hielo alcanza un máximo de ~326 m (Turner y Pendlebury, 2004). No obstante, cuenta con numerosas áreas libres de hielo en donde se emplazan estaciones permanentes de diversos países, entre las cuales se encuentra la Base Carlini (ex Jubany, <http://www.dna.gov.ar>); también hay un número considerable de bases temporarias y refugios. Las actividades científicas, logísticas y turísticas, determinan que la I25M sea una de las regiones con mayor actividad y más densamente pobladas de todo el continente antártico.



Figura 1: Croquis de la ubicación de la Isla 25 de Mayo/King George Island. (Fuente del croquis de la izquierda: COPLA)
Figure 1: Sketch of the location of the 25 de Mayo/King George Island. (Source of the sketch on the left: COPLA)

MATERIALES Y MÉTODOS

Los dos modelos digitales de elevación que se analizaron y compararon en el área de la I25M son: el Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2 (RAMPv2) y el Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEMv2).

El RAMPv2 resulta de la compilación de datos geospaciales, aéreos y de otras fuentes provistas por la Antarctic Digital Database (ADD), el United States Geological Survey (USGS) y la Australian Antarctic Division (AAD). En esta versión 2 del modelo RAMP, Liu et al. (2001) agregaron nuevos datos, corrigieron errores y realizaron otras mejoras sobre el modelo RAMP previo. Según estos autores, el RAMPv2 refleja detalles geomorfológicos que van desde rasgos locales, tales como valles de montaña, hasta rasgos de escala regional y/o continental, como son las amplias cuencas que ocupan los mantos de hielo antárticos. No obstante, advierten que el RAMPv2 no es apropiado para realizar estudios acerca de la variación de la altura del relieve, a menos que estos sean mayores a 15m.

El RAMPv2 cubre el área comprendida entre los 60° y 90° grados de latitud S, e incluye las islas que circundan el continente, entre las cuales se encuentra la I25M. El marco de referencia geodésico empleado para la información espacial es el World Geodetic System 1984 (WGS84), la proyección cartográfica adoptada es la Polar Estereográfica, utilizando como latitud de origen los 90° S y como paralelo estándar los 71° S, tomando como meridiano central al meridiano 0°. Las alturas de este modelo se encuentran expresadas en metros y están referidas al modelo geopotencial Ohio State University 1991a (OSU91a), desarrollado por Rapp et al. 1991. En lo que respecta al grado de generalización del RAMPv2, se dispone de las siguientes resoluciones: 1 km, 400 m y 200 m. En este trabajo se decidió utilizar la resolución más alta, entendiendo esta como la menor equidistancia entre puntos de la malla que componen el MDE (200 m). En cuanto a la precisión vertical, los desarrolladores del RAMPv2 estiman que es de +/- 100 m en áreas montañosas escarpadas, más de 2 m para las plataformas de hielo y de +/- 15 m en áreas costeras con pendiente pronunciada, siendo esta última la forma de relieve predominante en la I25M. Estos y otros detalles acerca del RAMPv2 pueden consultarse en:

http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0082_ramp_dem_v2.gd.html.

El Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEMv2), al igual que su versión previa (GDEMv1), ha sido elaborado por el Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) de Japón y la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados

Unidos. Los modelos GDEMv1 y GDEMv2 están elaborados a partir de estéreo-pares de imágenes obtenidas por el sensor VNIR del instrumento ASTER a bordo de la plataforma espacial Terra. Dicho instrumento obtiene información de la superficie terrestre utilizando 15 bandas diferentes distribuidas en el espectro visible y en el infrarrojo. Dos de estas bandas tienen el mismo rango espectral (0.76 μ m - 0.86 μ m) pero difieren en cuanto a su ángulo de observación; uno de ellos está orientado desde el nadir (Banda 3N), mientras que el otro está retro-dirigido (Banda 3B). Tal disposición de los telescopios permite la obtención de estéreo-pares de imágenes con una resolución espacial de 15 m, que son utilizadas para la generación de MDE. El GDEMv1 se elaboró a partir de 1.2 millones de estéreo-pares (ASTER GDEM Validation Team, 2009). El GDEMv2, publicado en 2011, incorporó 260 mil estéreo-pares adicionales, conjuntamente con una serie de correcciones y actualizaciones en los algoritmos de procesamiento que permitieron mejorar la precisión vertical, reducir el desplazamiento horizontal y el número de artefactos a escala global. La resolución geométrica final del GDEM en ambas versiones es de 1 segundo de arco meridiano (~30 m), mientras que la resolución "efectiva" es de 120 m para GDEMv1 y de 71 m a 82 m para GDEMv2 (Tachikawa et al., 2011). La malla de este MDE se encuentra expresada en coordenadas geográficas, en grados y fracción de grado correspondientes al marco de referencia WGS84 y su datum vertical corresponde al Earth Gravitational Model 1996 (EGM96). Debido a que el GDEMv2 abarca desde 83° N hasta los 83° S, sus desarrolladores han podido realizar comparaciones cuasi-globales y regionales con otros MDE, por ejemplo, con el SRTM y el National Elevation Dataset (NED) de los Estados Unidos. Entre otros aspectos, estos estudios indican que los MDE derivados en forma casi exclusiva de productos geoespaciales no son modelos que representen la Tierra desnuda, es decir, sin cobertura; a diferencia de otros MDE que utilizan una diversidad de fuentes (fotogrametría digital, LiDAR, cartografía de alta precisión, interferometría con radar de apertura sintética, etc.) tal como lo hace el NED. De allí, que las diferencias entre el GDEMv2 y el NED sean más importantes donde existen coberturas altas y sustancialmente menores donde son bajas, por ejemplo, bosque y pastizal, respectivamente (Gesch et al., 2011).

De acuerdo con Tachikawa et al. (2011), la exactitud vertical absoluta, expresada en términos de error lineal al 95% de confianza, es de 17.01 m y 18.31 m para GDEMv2 y GDEMv1, respectivamente. Sobre la base de estas y otras mejoras, los mencionados autores recomendaron la apertura del GDEMv2 al público, no obstante, advirtiendo acerca de la persistencia de ciertos errores y artefactos. Información adicional acerca de los modelos GDEM puede encontrarse en: <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>

Las diferencias y similitudes principales entre ambos modelos se resumen en la Tabla 1.

	RAMPv2	GDEMv2
Autor	Liu et al., 2001	METI-NASA, 2011
Origen de los datos	Altimetría radar satelital y aerotransportada, mapas topográficos, relevamientos GPS y sondeos radar in situ, etc.	Instrumento ASTER (bandas 3N y 3B), plataforma espacial Terra.
Sistema de coordenadas	Polar estereográfica	Coordenadas geográficas (lat/lon)
Límites	60° S a 90° S	83° N a 83° S
Marco de referencia geodésico	WGS84	WGS84
Superficie de referencia altimétrica	OSU91a	EGM96
Resolución horizontal	200 m (también disponible en 400 m y 1 km)	Nominal: 1 segundo de arco (~30 m) y "efectiva": 71 a 82 m
Exactitud vertical	100 m en áreas montañosas, 15 m en áreas costeras y 1 m en barreras de hielo.	17 m (global)

Tabla 1: Principales diferencias y similitudes entre los modelos RAMPv2 y GDEMv2.

Table 1: Main differences and similarities between the models RAMPv2 y GDEMv2.

Pre-procesamiento de los modelos de elevación

Debido a la necesidad de homologar las referencias de las superficies a comparar, se partió de la premisa de utilizar mismos orígenes de medidas tanto en el sistema de coordenadas planimétrico como altimétrico. El escenario final, a los fines prácticos de la comparación de los MDE, se sustenta en el marco geodésico WGS84, posteriormente llevado al plano, mediante la utilización de una proyección de uso común, tal como la Universal Transversa Mercator (UTM) huso 21 S. Todas las coordenadas basadas en otra proyección cartográfica, tales como las provenientes del RAMPv2, como así también, las coordenadas geográficas provenientes del GDEMv2, fueron transformadas mediante

sistemas de cálculo basados en parámetros de transformación estándar (Snyder, 1987, 48-65).

En cuanto a las alturas, se seleccionó al EGM96 como nivel de referencia y se expresaron todas las elevaciones con respecto al mismo. Se tomó esta decisión ya que el EGM96 es un modelo global (Lemonie et al., 1998) que es de uso frecuente en la comunidad científica. Sin embargo, y como se mencionó anteriormente, la versión disponible del RAMPv2 posee las alturas referidas al modelo de geoide OSU91a. Por lo tanto, como primera medida, se calculó la diferencia máxima y media entre los modelos OSU91a y EGM96 para la zona de estudio utilizando el servicio de cálculo de <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>; resultando ser estas de 0.14 m y 0.05 m, respectivamente. Teniendo en cuenta que la magnitud de las diferencias entre ambos modelos geopotenciales (OSU91a y EGM96) es despreciable para las precisiones utilizadas, como así también para los objetivos del presente análisis, se considerará a los mismos como idénticos.

En cuanto a la dificultad que ocasionaba para la comparación, la diferente resolución espacial de los modelos de elevación GDEMv2 y RAMPv2, de 30 m y 200 m, respectivamente, se resolvió realizar un remuestreo de los mismos con el objetivo de obtener una única resolución común a ambas superficies de comparación. Para ello, utilizando el método de kriging, se generó una nueva malla de 100 m de resolución espacial, conteniendo un total de 112721 puntos para cada uno de los MDE. Se asumió que debido a la elevada densidad de puntos sobre el terreno y al ser todos ellos equidistantes, la elección del método de kriging o de cualquier otro de los utilizados de manera más recurrente, conduciría a resultados similares .

Se seleccionó una equidistancia de 100 m como una solución de compromiso (y por cierto un tanto arbitraria) a los fines de lograr un equilibrio entre la densidad de información y el tamaño de los archivos resultantes y, por otra parte, de evitar una excesiva pérdida de datos en el caso del modelo GDEMv2 (que como ya se mencionó, posee una resolución nominal de 30 m, aunque la resolución “efectiva” varía de 71 a 82 m).

Si bien el GDEMv2 y el RAMPv2 constituyen modelos estadísticos de la topografía, debido a diferencias en cuanto a los métodos de adquisición de datos, como así también al tipo de procesamiento y consecuente nivel de generalización, los mismos no presentan exactamente la misma descripción de los límites del área de estudio. Por tal razón, resultó necesario delimitar dicha área mediante la línea de costa de la I25M. Para ello, se vectorizó el perímetro de la isla mediante imágenes satelitales SPOT-5 HRG1 suministradas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) con fecha de adquisición 30 de septiembre de 2012 y con una resolución espacial de 5 m (ver Apéndice). Para verificar el resultado de este procedimiento, se comparó el vector obtenido a partir de las imágenes SPOT-5 HRG1, con una fuente independiente, como es la base de datos provista por la ADD, la cual brinda, entre otros aspectos y en diversos formatos, vectores de distintos rasgos geográficos de la Antártida, entre ellos, líneas de costa. Se pudo constatar que las diferencias entre ambos polígonos perimetrales (~50 m) eran aceptables para los objetivos de este trabajo y compatibles con la resolución espacial de los modelos. No obstante, en algunos sectores costeros particulares y puntuales se encontraron diferencias relativamente importantes (>100 m) que corresponden, fundamentalmente, al retroceso reciente de algunos frentes glaciares en contacto con el mar (Simões et al., 2004; Braun y Gossmann, 2002; Park et al., 1998). Teniendo en cuenta los aspectos recién mencionados, se decidió utilizar como perímetro de costa al vector obtenido a partir de las imágenes satelitales provistas por la CONAE.

Una vez finalizada la homologación del área y de la estructura de datos de ambos modelos, se procedió a realizar el análisis y la comparación propiamente dicha.

Análisis y comparación de los modelos de elevación

Inicialmente, se obtuvieron y compararon algunos de los parámetros más importantes de las elevaciones de cada modelo: mediana, media, rango, desvío estándar y coeficiente de variación. Los valores se muestran en la Tabla 2.

MDE	Mediana (m)	Media (m)	Rango (m)	Desvío Estándar (m)	Coefficiente de Variación (%)
GDEMv2	340.0	495.8	0.0 - 7682.0	648.0	130.7
RAMPv2	300.8	301.8	0.0 - 664.8	179.4	59.4

Tabla 2: Estadísticos de tendencia central y de dispersión para ambos modelos (n=112721).
Table 2: Statistics of the first and second central moments of the analyzed models (n=112721).

Las discrepancias entre los dos modelos ya se hacen evidentes en los estadísticos de tendencia central, pero son aún mayores en los estadísticos de dispersión. En particular, el GDEMv2 muestra una diferencia muy importante con respecto a la máxima elevación de la I25M brindada por dos trabajos independientes: según Braun y Hock (2004) la misma es de 705 m y según Rückamp et al. (2011) es de 720 m. Este último aspecto acerca de la elevación máxima de la isla será tenido en cuenta más adelante para hacer un filtrado de las elevaciones de los modelos. Para ahondar el análisis, se compararon ambos MDE utilizando histogramas y un diagrama de dispersión para representar las elevaciones de cada uno de ellos, ver Figura 2.

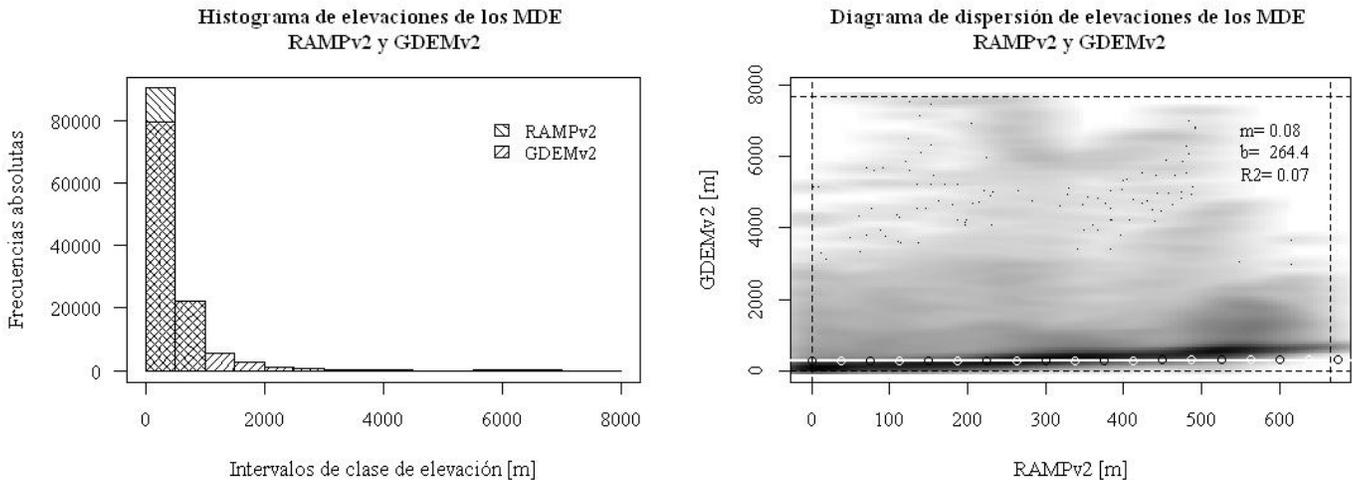


Figura 2: Histogramas (izquierda) y diagrama de dispersión (derecha) de elevaciones de los modelos RAMPv2 y GDEMv2. En los histogramas se utilizaron intervalos de clase de 500 m para representar la totalidad de las alturas de ambos modelos. En el gráfico de dispersión el tono oscuro es proporcional a la densidad de puntos. Los valores m , b y R^2 corresponden a la recta de color blanco obtenida por cuadrados mínimos.

Figure 2: Histograms (left) and scatterplot (right) of elevations from models RAMPv2 y GDEMv2. The histograms have class intervals of 500 m to represent all the values from both models. In the scatterplot the black intensity is proportional to the density of points. The values m , b and R^2 correspond to the white line obtained by the least square method.

Como puede observarse en la parte izquierda de la Figura 2, si bien los histogramas concentran la mayor parte de las elevaciones en los dos intervalos de clase más bajos (<500 m), en el caso del GDEMv2, los valores se extienden a intervalos mucho más altos. En correspondencia con los histogramas, el diagrama de dispersión de la derecha de la Figura 2 muestra que si bien existen puntos donde ambos modelos relativamente coinciden (nube de puntos alargada con tono más oscuro), existe también un número importante de puntos (nube difusa) que indica una fuerte disparidad entre las elevaciones. Con un propósito ilustrativo, se trazó una recta obtenida por cuadrados mínimos a partir de la totalidad de las elevaciones de ambos modelos. Como puede observarse en la misma figura, dicha recta coincide aproximadamente con la nube de puntos alargada. Sin embargo, el R^2 de la misma es muy bajo (0.07), lo cual se explica debido a la fuerte dispersión de las elevaciones en el modelo GDEMv2, y que en definitiva, hace que el ajuste a un modelo lineal no sea bueno. Las líneas punteadas horizontales y verticales que aparecen en esta figura (y también en la Figura 4), indican los rangos dentro de los cuales se encuentran los datos utilizados, los sombreados que las exceden son un artefacto del algoritmo utilizado para generar la imagen y, en consecuencia, no deben ser tenidos en consideración. Por otra parte, y en sintonía con estos resultados, el coeficiente de correlación de Pearson obtenido entre las elevaciones de ambos modelos es bastante bajo (0.27).

Con el fin de investigar de manera cualitativa la distribución espacial de las diferencias entre ambos modelos, se realizaron perfiles longitudinales y transversales cada 5000 m, cubriendo la totalidad de la isla. Dichos perfiles (ver Apéndice) se graficaron en una serie de planos cartesianos cuyos ejes representan los valores de altura en función de la distancia recorrida en cada corte. De este modo, se procuró identificar la presencia de algún patrón espacial en la distribución de las diferencias entre ambos modelos. En total se realizaron ocho perfiles en sentido O - E y quince en sentido N - S; siendo este último número más grande debido al mayor desarrollo que posee la I25M en dicho eje. La inspección visual de los mencionados perfiles, indica que las grandes diferencias (>100 m) no tienen una distribución espacial aleatoria ni regular, sino que se aglutinan en un número reducido de grupos. En relación con esta observación, Lencinas (2011) al estudiar la propagación de errores provenientes de MDE de regiones montañosas en

productos derivados, indica que la distribución de los mismos no es uniforme debido a que estos suelen estar asociados a características o particularidades del terreno (pendiente, orientación, etc.).

Para investigar con mayor profundidad la distribución de las diferencias entre ambos modelos, y como se explicó anteriormente, se remuestraron los datos a dos mallas de iguales dimensiones y se calculó, punto a punto, las diferencias altimétricas entre los mismos. Luego, con el objeto de representarlas gráficamente, se elaboró un “modelo de diferencias” asociado a una escala de grises. Los valores de dicha escala fueron determinados teniendo en cuenta los niveles de generalización y las precisiones de cada MDE. La Figura 3 muestra una vista en planta de las diferencias altimétricas entre los modelos GDEMv2 y RAMPv2. Allí se puede apreciar, tal como se mencionó en el párrafo anterior, que la distribución de las grandes diferencias no es aleatoria ni regular, sino que se concentra en unas pocas áreas ubicadas en la región occidental de la I25M. Por el contrario, en la porción oriental de la isla las diferencias entre los modelos son relativamente moderadas o, incluso, pequeñas. Este patrón también se refleja en el perfil de elevaciones de ambos modelos, ubicado al pie de la misma figura, y que corresponde a la línea punteada de máximas elevaciones que aparece en la vista en planta.

Continuando con la Figura 3, el gráfico circular (derecha) muestra las diferencias altimétricas porcentuales en relación al total de puntos comparados, y el histograma (ángulo superior izquierdo) ilustra la distribución de las diferencias entre los dos modelos. Como puede apreciarse en el gráfico circular, las diferencias iguales o menores a 100 m representan el 66% del total. Por otra parte, si se observan conjuntamente el gráfico circular y la vista en planta, se hace evidente que las diferencias que superan los 100 m (34%) se concentran fundamentalmente en dos sectores de la porción occidental de la isla; en particular en la cuenca de Bahía Lasserre (Admiralty Bay, indicada como BL y adyacente a la costa austral de la isla). En cuanto al histograma, allí se observa que el 84% de las diferencias se concentra en los primeros cinco intervalos de clase (<250 m).

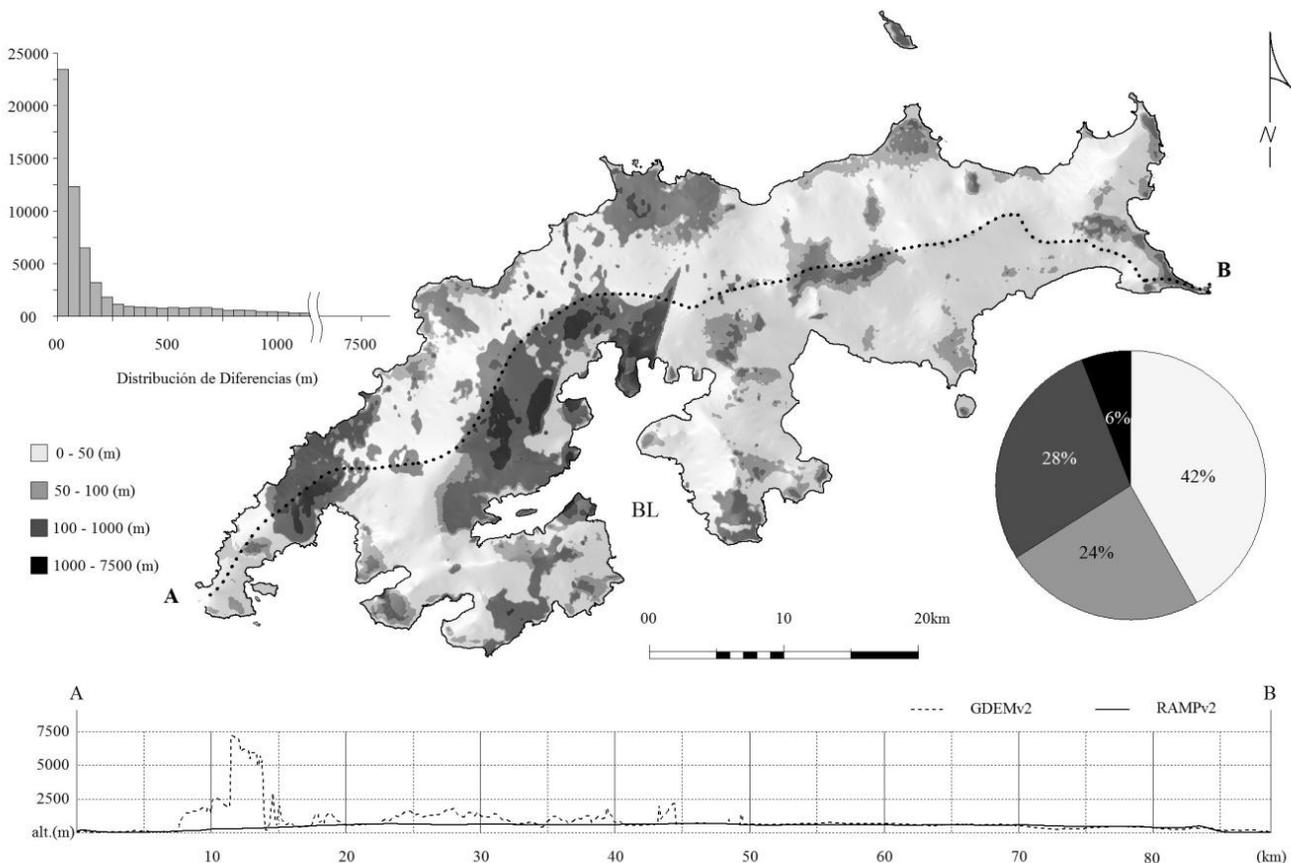


Figura 3: Modelo y distribución de diferencias altimétricas entre GDEMv2 y RAMPv2 para la Isla 25 de Mayo (King George Island). Vista en planta (centro), histograma de elevaciones (izquierda) y estadísticas (derecha). Al pie de la figura, el perfil de elevación a lo largo de la línea de puntos de la vista en planta. BL: Bahía Lasserre (Admiralty Bay).

Figure 3: Model and distribution of elevation differences between GDEMv2 and RAMPv2 in 25 de Mayo/King George Island. View from the zenith (center), histograms of elevations (left) and statistics (right). At the bottom of the figure, the profile of elevations along the dotted line shown in the view from the zenith. BL: Lasserre Bay (Admiralty Bay).

La vista en planta de la Figura 3 permite visualizar y corroborar lo mencionado previamente al analizar los perfiles. Los cálculos arrojan una diferencia media de 194.0 m entre el GDEMv2 y el RAMPv2, no obstante, algunos valores superan los 7000 m (ver Tabla 4), lo cual no es factible para la I25M ni para ninguna otra región de la Antártida (cuya elevación máxima es el Monte Vinson con ~4897 m). Para sintetizar estas diferencias en un único valor, se calculó la media de las diferencias absolutas, obteniéndose como resultado 238.8 m.

Debido a que las diferencias observadas entre los dos modelos excedieron ampliamente los valores esperados y, asumiendo que esto es producto de la presencia de artefactos o valores aberrantes (entendiendo por tales aquellos valores que van más de lo admisible o de lo “razonable” para una determinada variable) en el modelo GDEMv2, se decidió filtrar en este último todos los valores que estuviesen por encima de la elevación máxima de la isla. Se tomó esta decisión sobre la base de que era preferible perder algunos datos posiblemente válidos a cambio de no incluir otros definitivamente aberrantes (ya que no son compatibles con ninguna otra fuente independiente de información topográfica para la I25M).

Como se mencionó con anterioridad, dos estimaciones independientes sitúan la altura máxima de la I25M en 705 y 720 m. La diferencia entre estas dos cotas (15 m) es igual o menor a las precisiones de los modelos estudiados y, por lo tanto, es despreciable en cuanto a los objetivos de este trabajo. De este modo, para realizar el análisis que sigue a continuación se excluyeron todos los datos del modelo GDEMv2 que excediesen la cota de 705 m y sus correspondientes valores en el modelo RAMPv2 (independientemente de su elevación). Como consecuencia del filtrado se produjo una reducción de ~14% sobre el total de datos originales.

Una vez que los datos fueron filtrados, se volvieron a calcular los estadísticos de tendencia central y de dispersión para ambos MDE, los cuales se muestran en la Tabla 3.

MDE	Mediana (m)	Media (m)	Rango (m)	Desvío Estándar (m)	Coefficiente de Variación (%)
GDEMv2	293.0	309.3	0.0 - 705.0	177.5	57.4
RAMPv2	292.1	289.7	0.0 - 664.8	175.0	60.4

Tabla 3: Estadísticos de tendencia central y de dispersión para ambos modelos luego de haber sido filtrados con la cota máxima de la isla (705 m) (n=96535).

Table 3: Statistics of the first and second central moments for both models after being filtered using the highest altitude of the island (705 m) (n=96535).

Puede observarse que los estadísticos obtenidos a partir de los datos filtrados, guardan ahora mayor similitud. De alguna manera, esto es lo que se esperaba encontrar tratándose de dos modelos que representan la misma porción de la superficie terrestre.

En la Tabla 4 se resumen algunas de las principales diferencias entre ambos modelos (GDEMv2-RAMPv2) antes y después de haber sido filtrados.

Diferencias GDEMv2 - RAMPv2	Máxima (m)	Media (m)	Media de las diferencias absolutas (m)
Elevaciones sin filtrar	7609.2	194.0	238.8
Elevaciones filtradas (*)	704	19.7	72.0

Tabla 4: Diferencias altimétricas entre los modelos GDEMv2 y RAMPv2 antes y después (*) de haber excluido las cotas superiores a 705 m del GDEMv2 y sus valores correspondientes en el modelo RAMPv2.

Table 4: Elevation differences between the models GDEMv2 and RAMPv2 before and after (*) excluding altitudes higher than 705 m from GDEMv2 and its corresponding values in RAMPv2 model.

De manera similar a la utilizada en forma previa, se obtuvieron histogramas y un diagrama de dispersión para los datos filtrados de ambos MDE, los cuales se muestran en la Figura 4. En este caso, los histogramas (izquierda) son aproximadamente similares y el gráfico de dispersión (derecha) indica que las elevaciones se corresponden

relativamente bien. Este aspecto también se refleja al obtener un coeficiente de correlación de Pearson más alto (0.83) y, al mismo tiempo, el ajuste de la recta obtenida por cuadrados mínimos es bastante más alto ($R^2=0.68$) que el obtenido con los datos sin filtrar ($R^2=0.07$).

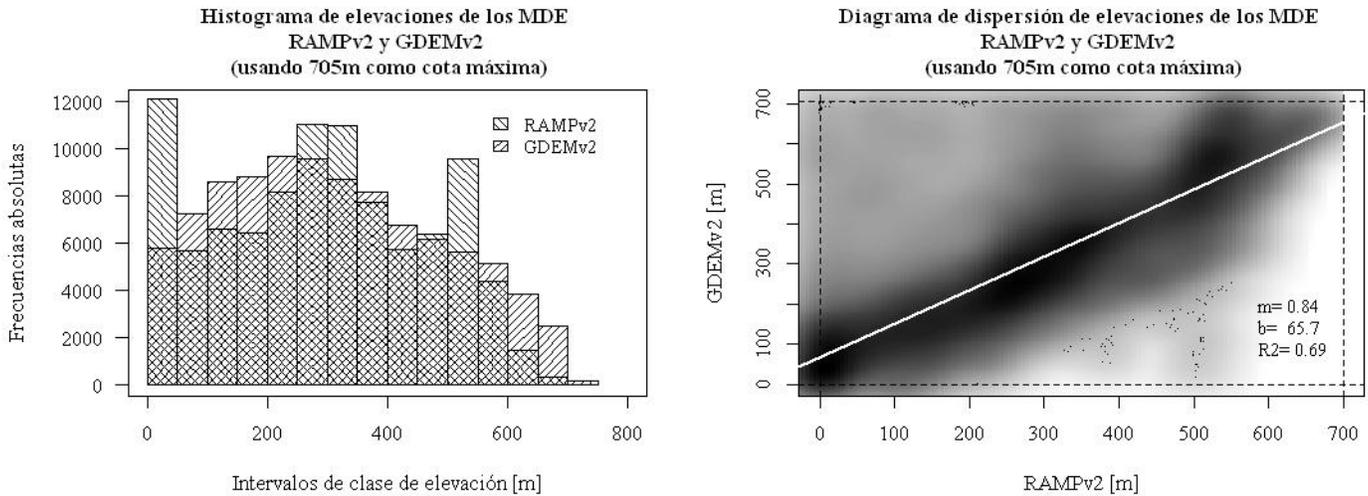


Figura 4: Histogramas (izquierda) y diagrama de dispersión (derecha) para el subconjunto de elevaciones de los modelos RAMPv2 y GDEMv2 menores a 705 m. En los histogramas se utilizaron intervalos de clase de 50 m para representar la totalidad de las alturas de ambos modelos luego de haber sido filtrados. En el gráfico de dispersión el tono oscuro es proporcional a la densidad de puntos. Los valores m, b y R2 corresponden a la recta de color blanco obtenida por cuadrados mínimos.

Figure 4: Histograms (left) and scatterplot (right) for the subset of elevations from models RAMPv2 and GDEMv2 lower than 705 m. Class intervals of 50 m were used in the histograms in order to represent the complete subset of elevations after the filtering. In the scatterplot the black intensity is proportional to the density of points. The values m, b and R2 correspond to the white line obtained by the least square method.

Tras haber obtenido una correlación elevada luego del filtrado de los datos, se procuró evaluar con mayor profundidad el efecto del mismo. Para investigar si la remoción de los valores aberrantes o artefactos presentes en el GDEMv2, conducía a dos conjuntos de datos “equivalentes” (GDEMv2 y RAMPv2 filtrados), se obtuvieron las correspondientes funciones de distribución empírica acumulada (también conocida como -ecdf- debido a su nombre en inglés Empirical Cumulative Distribution Function). Ambas funciones están ilustradas en la Figura 5, y muestran que tras haber eliminado las elevaciones ciertamente aberrantes del GDEMv2 y sus correspondientes valores en el RAMPv2, las funciones de distribución acumulada pasan a ser relativamente similares, si bien persisten algunas diferencias.

Para completar el análisis de estas funciones y evaluar objetiva- y cuantitativamente el efecto de la remoción de los valores aberrantes, se realizó el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (R Core Team, 2013; NIST/SEMATECH, 2012) para cada par de conjuntos de datos, antes y después del filtrado. Cabe recordar que el test K-S tiene como hipótesis nula que ambas muestras (modelos, en este caso) poseen la misma distribución. Además, por tratarse de un test no paramétrico, cuenta con la ventaja de que no exige asumir ninguna distribución en particular. Al realizar esta prueba, en ambos casos (datos sin filtrar y filtrados) se rechazó la hipótesis nula, es decir, que de acuerdo al test K-S las elevaciones del GDEMv2 y el RAMPv2 no poseen la misma distribución de elevaciones ni antes ni después del filtrado. A su vez, esto se manifiesta gráficamente en los dos paneles de la Figura 5, en donde se observa que las ecdf de ambos modelos son diferentes, tanto antes (izquierda) como después (derecha) del filtrado. No obstante, si se tiene en cuenta el cambio de escala realizado en el eje de abscisas de un panel a otro, se pone de manifiesto que el filtrado hace que las ecdf de los modelos se asemejen más.

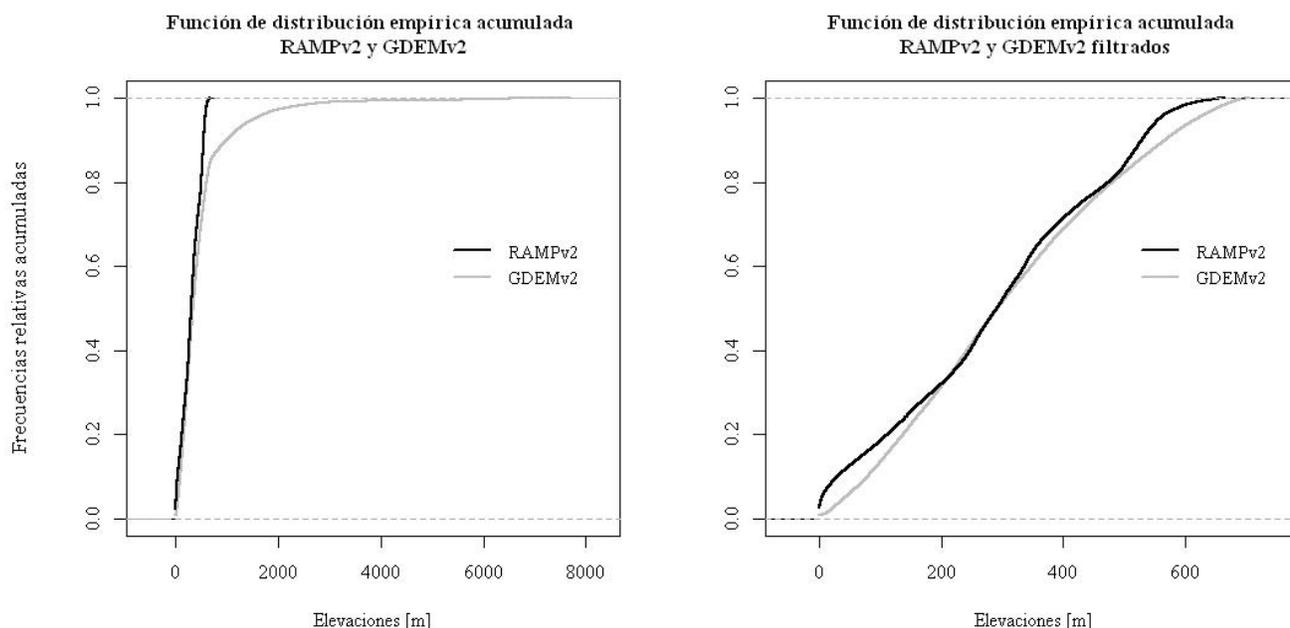


Figura 5: Función de distribución empírica acumulada (ecdf) para ambos modelos, antes y después de haber sido filtrados (izquierda y derecha, respectivamente) con la cota máxima de la isla (705 m).

Figure 5: Empirical Cumulative Density Functions (ecdf) for both models before and after the filtering (left and right, respectively) using the highest elevation of the island (705 m).

DISCUSIÓN

Al observar los resultados de la comparación utilizando los datos iniciales de ambos modelos (Tabla 2), se encuentran diferencias relativamente importantes en los estadísticos de tendencia central. Sin embargo, las diferencias son aún mucho más marcadas si se comparan los estadísticos de dispersión. Por ejemplo, los rangos de elevaciones son extremadamente distintos, siendo el del GDEMv2 (0.0 - 7682.0 m) casi doce veces más amplio que el del RAMPv2 (0.0 - 664.8 m). En cuanto al desvío estándar, el valor obtenido para el GDEMv2 (648.0 m) es casi cuatro veces mayor que el valor correspondiente al RAMPv2 (179.4 m). Y, con respecto al coeficiente de variación, el GDEMv2 (130.7%) es algo más que el doble que el RAMPv2 (59.4%). En definitiva, las fuertes diferencias halladas en: i) los estadísticos obtenidos a partir de los datos iniciales (Tabla 2), ii) los histogramas y el gráfico de dispersión de elevaciones (Figura 2), iii) la vista en planta, el gráfico circular y el histograma de diferencias (Figura 3) y, iv) en los cortes de terreno (Apéndice), hacen que resulte difícil aceptar que ambos modelos representan la misma porción de la superficie terrestre. Se interpreta que tales diferencias surgen a partir de la presencia, en el modelo GDEMv2, de artefactos o valores aberrantes.

A partir de la distribución de las grandes diferencias altimétricas entre los dos modelos, las cuales se agrupan en tres sectores de la I25M, siendo cuali- y cuantitativamente más importante el que ocupa casi la totalidad de la cuenca de la Bahía Lasserre, se puede inferir que los valores aberrantes del GDEMv2 también tienen la misma distribución. Ya que son los valores extraordinariamente elevados del GDEMv2, los que originan las grandes diferencias entre ambos modelos.

Al tratar de formular alguna hipótesis que explique el origen de estos valores aberrantes, se tuvieron en cuenta los dos siguientes aspectos. El primero, está en relación con la presencia de fuertes irregularidades topográficas en el área de estudio. En un trabajo realizado sobre áreas montañosas, Eckert et al. (2005) determinaron que los MDE obtenidos a partir de estéreo-pares de imágenes obtenidas por ASTER, son muy precisos en áreas casi planas o con pendientes muy suaves y que, contrariamente, en valles profundos, acantilados abruptos y en áreas sombreadas, los errores ascienden a varios centenares de metros. En principio, esto podría ayudar a explicar la distribución de los valores aberrantes en la I25M, ya que las laderas orientadas al N son relativamente suaves, mientras que las orientadas al S suelen ser más abruptas. En particular, la cuenca de la Bahía Lasserre, reúne todas las características

antes mencionadas, sumado a la presencia de glaciares descarga que presentan una elevada densidad de grietas y de bloques de hielo en sus porciones terminales. Probablemente, la conjunción de estos rasgos del relieve hace que la respuesta espectral de las pendientes en dicha cuenca sea difícil de interpretar y procesar, favoreciendo así la aparición de valores aberrantes y/o artefactos.

No obstante, en el marco de la interpretación anterior, persisten algunos aspectos que no pueden ser completamente explicados. Por ejemplo, los valores aberrantes del GDEMv2 que conducen a que aproximadamente un 6 % de las diferencias con el RAMPv2 se encuentre en el rango 1000-7500 m (Figura 3), son un orden de magnitud superior a los señalados por Eckert et al. (2005). Además, en el modelo GDEMv2 se detectó la presencia de valores aberrantes sobre el mar, en áreas cercanas, aunque externas a la línea de costa (razón por la cual no fueron consideradas en el análisis precedente). En particular, en las caletas y las bahías de la costa sur de la I25M, con frecuencia se concentra una cantidad considerable de hielo producto del desprendimiento (calving) de los glaciares adyacentes. Considerando que esta es una “superficie plana”, habría que tener en cuenta, entonces, que no sólo una topografía compleja podría ser causal de valores aberrantes. En este último caso, estos podrían ser resultado de un complejo contraste espectral generado por la presencia de hielo, nieve y agua marina.

El segundo aspecto, está relacionado con la presencia de nubes durante la captura de los estéreo-pares de imágenes realizada por el instrumento ASTER. De hecho, el archipiélago de Islas Shetland del Sur, del cual forma parte la I25M, se ubica en el hemisferio y en la zona de máxima de nubosidad de Antártida según indican cuatro bases de datos climáticas diferentes. Por otra parte, las alturas anómalas tienen valores compatibles con la altura de las nubes en Antártida (Bromwich et al., 2012). De allí, que los valores aberrantes hallados en el GDEMv2 podrían también estar asociados a las dificultades que supone la detección de nubes sobre cubiertas de nieve y/o hielo mediante instrumentos pasivos que trabajan en el rango del visible y el infrarrojo, tal como sucede con el ASTER.

Independientemente del origen de los valores aberrantes o artefactos, el uso de la cota máxima de la isla (705 m) como valor umbral para el filtrado, permitió (a expensas de una reducción del 14 % del volumen inicial de datos) que las distribuciones de las altimetrías entre ambos modelos se aproximaran más. Situación que se observa en el histograma y el diagrama de dispersión de la Figura 4 y en las funciones de distribución empírica acumulada (ecdf) de la derecha de la Figura 5. Además, el filtrado de los datos permitió reducir el valor de la media de las diferencias absolutas de ~238.8 m a ~72.0 m (ver Tabla 4). No obstante la similitud encontrada entre ambas funciones ecdf, el test K-S determinó que no tenían la misma distribución y, en consecuencia, no fue posible asumir que ambos conjuntos de datos proviniesen de la misma “población” o porción de la superficie terrestre, en nuestro caso.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron y compararon los dos únicos MDE independientes y de acceso público existentes (hasta la fecha de elaboración de este estudio) para la I25M, Islas Shetland del Sur, Antártida; siendo uno de ellos de cobertura cuasi-global (GDEMv2), mientras que el otro cubre únicamente la Antártida (RAMPv2). Por otra parte, se trata de dos modelos que son fácilmente accesibles a través de Internet y que, con frecuencia, son utilizados en diversas investigaciones glaciológicas, climáticas, etc. En el caso de este trabajo en particular, el objetivo principal consistió en determinar cuál de los dos resultaba más apropiado para la elaboración de nuevos productos digitales para la mencionada isla.

Tras haber estudiado ambos modelos, podemos concluir que: a) antes de elaborar cualquier producto derivado a partir de un MDE, es de máxima importancia evaluar la calidad de la información y comparar la misma con alguna fuente independiente, b) también, es fundamental conocer los principios físicos y los métodos utilizados en la obtención y el procesamiento de los datos, ya que, en general, los MDE son el resultado de complejos algoritmos (de hecho, es factible que a partir de un mismo conjunto de datos “crudos” u originales se generen distintos MDE según cuales sean los criterios adoptados) y, c) por último, y desde una perspectiva operativa, se seleccionó el modelo RAMPv2 para la elaboración de productos derivados para la I25M. Esta última decisión se fundamenta en los siguientes aspectos: 1) resulta más coherente con las características topográficas y morfológicas del área de estudio, 2) no se le detectaron datos aberrantes y, 3) de los dos modelos estudiados es el que presenta la menor diferencia (~40 m) entre la máxima elevación del modelo (~665 m) y la cota máxima de la I25M (705 m).

Posiblemente, en una instancia futura, resulte favorable utilizar datos provenientes del RAMPv2 conjuntamente con otros del GDEMv2, en especial, en aquellos sectores donde ambos modelos se aproximan altimétricamente (por ejemplo, donde las diferencias son inferiores a 50 m). También es de esperar que se obtengan buenos resultados generando modelos híbridos (tal como es el caso del RAMPv2) utilizando información altimétrica obtenida in situ mediante técnicas de GPS diferencial. Con respecto a este último punto, algunos de los autores hemos estado trabajando durante tres campañas antárticas de verano (CAV 2011, 2012 y 2013) en proximidades de

la Base Carlini, I25M, con el objetivo de complementar y optimizar los escasos recursos disponibles en materia de información altimétrica y topográfica para el sector de las Islas Shetland del Sur, Antártida.

Agradecimientos: Al Instituto Antártico Argentino de la Dirección Nacional del Antártico y al Programa IMCONet (FP7-PEOPLE-2012-IRSES) de la Unión Europea. A los colegas R. del Valle, D. López y O. Zambrano por sus útiles sugerencias. A la comunidad de desarrolladores y usuarios de los programas R (<http://cran.r-project.org>) e IrfanView (<http://www.irfanview.com>).

REFERENCIAS

- Antarctic Digital Database Version 6.0, Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR ADD). Disponible en: <http://www.add.scar.org/>
- ASTER GDEM Validation Team, 2009. ASTER Global DEM Validation Summary Report. METI – NASA. Disponible en: https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/aster/docs/ASTER_GDEM_Validation_Summary_Report.pdf
- Braun, M. and H. Gossmann, 2002. Glacial Changes in the Areas of Admiralty Bay and Potter Cove, King George Island, Maritime Antarctica. En: *Geoecology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes*. Beyer, L. and M. Bölker (Eds.). Ecological Studies, 154, Springer Berlin Heidelberg, 75-89.
- Braun, M. and R. Hock, 2004. Spatially distributed surface energy balance and ablation modelling on the ice cap of King George Island (Antarctica). *Global and Planetary Change*, 42 (1-4), 45-58. doi 0.1016/j.gloplacha.2003.11.010.
- Braun, M., J. C. Simões, S. Vogt, U. F. Bremer, N. Blindow, M. Pfender, H. Saurer, F. Aquino and F. Ferron, 2001. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook. *Antarctic Science*, 13(1), 41-52.
- Bromwich, D., J. Nicolas, K. Hines, J. Kay, E. Key, M. Lazzara, D. Lubin, G. McFarquhar, I. Gorodetskaya, D. Grosvenor, T. Lachlan-Cope and N. van Lipzig, 2012. Tropospheric Clouds in Antarctica. *Reviews of Geophysics*, 50, RG1004. Disponible en: http://polarmet.osu.edu/PolarMet/PMGFulldocs/bromwich_nicolas_revgeophys_2012.pdf, CONAE, Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Disponible en: <http://www.conae.gov.ar>
- Cook, A.J., T. Murray, A. Luckman, D.G. Vaughan and N.E. Barrand, 2012. A new 100-m Digital Elevation Model of the Antarctic Peninsula derived from ASTER Global DEM: methods and accuracy assessment. *Earth Syst. Sci. Data*, 4, 129–142. Disponible en: www.earth-syst-sci-data.net/4/129/2012/
- COPLA, Comisión Nacional del Limite Exterior de La Plataforma Argentina, 2009. Resumen Ejecutivo del documento Límite Exterior de la Plataforma Continental Argentina. Disponible en: http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/submissions_files/arg25_09/arg2009e_summary_esp.pdf, Dirección Nacional del Antártico - Instituto Antártico Argentino. Disponible en <http://www.dna.gov.ar>
- Eckert, S., T. Kellenberger and K. Itten, 2005. Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from ASTER data in mountainous terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 9, 1943–1957. Disponible en: http://www.geo.unizh.ch/~hoelzle/E%26M/emuebung3/p4a_ijrs05_eckert.pdf
- Farr, T.G., P. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank and D. Alsdorf, 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. Disponible en: http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf
- Felicísimo, A., 1994. Modelos digitales del terreno. Curso de introducción. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad de Oviedo, España. Disponible en: http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_3.pdf
- Gesch, D., M. Oimoen, Z. Zhang, J. Danielson and D. Meyer, 2011. Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) Version 2 over the Conterminous United States. Report to the ASTER GDEM Version, 2. Disponible en: http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Appendix_B_CONUS%20_GDEMv2_validation_report.pdf
- Korona, J., E. Berthier, M. Bernard, F. Rémy and E. Thouvenot, 2009. SPIRIT. SPOT 5 stereoscopic survey of Polar Ice: Reference Images and Topographies during the fourth International Polar Year (2007-2009). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 64, 2: 204–212. Disponible en: http://etienne.berthier.free.fr/download/Korona_et_al_ISPRS_2009.pdf
- Lemoine, F.G., S. C. Kenyon, J. K. Factor, R. G. Trimmer, N. K. Pavlis, D. S. Chinn, C. M. Cox, S. M. Klosko, S. B. Luthcke, M. H. Torrence, Y. M. Wang, R. G. Williamson, E. C. Pavlis, R. H. Rapp and T. R. Olson, 1998. The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM 96, Technical Paper NASA/TP-1998-206861. Disponible en: http://bowie.gsfc.nasa.gov/697/staff/lemoine/EGM96_NASA-TP-1998-206861.pdf

- Lencinas, J. y G. Díaz, 2011. Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM. *GeoFocus*, 11, 431-454. Disponible en: http://geofocus.rediris.es/2011/Articulo18_2011.pdf
- Liu, H., K. Jezek, B. Li, and Z. Zhao, 2001. Radarsat Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital media. Disponible en: http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0082_ramp_dem_v2.gd.html
- National Elevation Dataset (NED). United States Geological Survey (USGS). Disponible en: <http://ned.usgs.gov/index.asp>
- NIST/SEMATECH, 2012. e-Handbook of Statistical Methods. Disponible en: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>
- Park, B-K., S-K Chang, H. I. Yoon and H. Chung. 1998. Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 27:633–635.
- R Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <http://www.R-project.org/>
- Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model Version 2 (RAMPv2). Disponible en: <http://nsidc.org/data/nsidc-0082.html>
- Rapp, R.H., Y. M. Wang and N. K. Pavlis, 1991. The Ohio State 1991 Geopotential and Sea Surface Topography Harmonic Coefficient Models. The Ohio State University, Department of Geodetic Science. Report No. 410, Columbus. Ohio.
- Rückamp, M., M. Braun, S. Suckro and N. Blindow, 2011. Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade. *Global and Planetary Change* 79, 99–109.
- Sievers, J. and H. Bennat, 1989. Reference Systems of Maps and Geographic Information Systems of Antarctica, *Antarctic Science*, 1 (4), 351-362.
- Simões, J., H. Gossmann, R. Delmas and M. Moskalevsky, 2004. Glaciological research in King George Island: missions and developments in the 1990s. *Pesquisa Antártica Brasileira*, 4, 1-8.
- Snyder, J. P., 1987. Map Projection and Working Manual. Professional Paper, 1395. U.S. Geological Survey. Washington D.C., Estados Unidos.
- Tachikawa, T., M. Kaku, A. Iwasaki, D. Gesch, M. Oimoen, Z. Zhang, J. Danielson, T. Krieger, B. Curtis, J. Haase, M. Abrams, R. Crippen and C. Carabajal. D. Meyer (comp.), 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. Disponible en: http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf
- Turner, J. and S. Pendlebury. 2004. The International Antarctic Weather Forecasting Handbook. Disponible en: http://www.antarctica.ac.uk/met/momu/International_Antarctic_Weather_Forecasting_Handbook/

APÉNDICE

Perfiles de la Isla 25 de Mayo

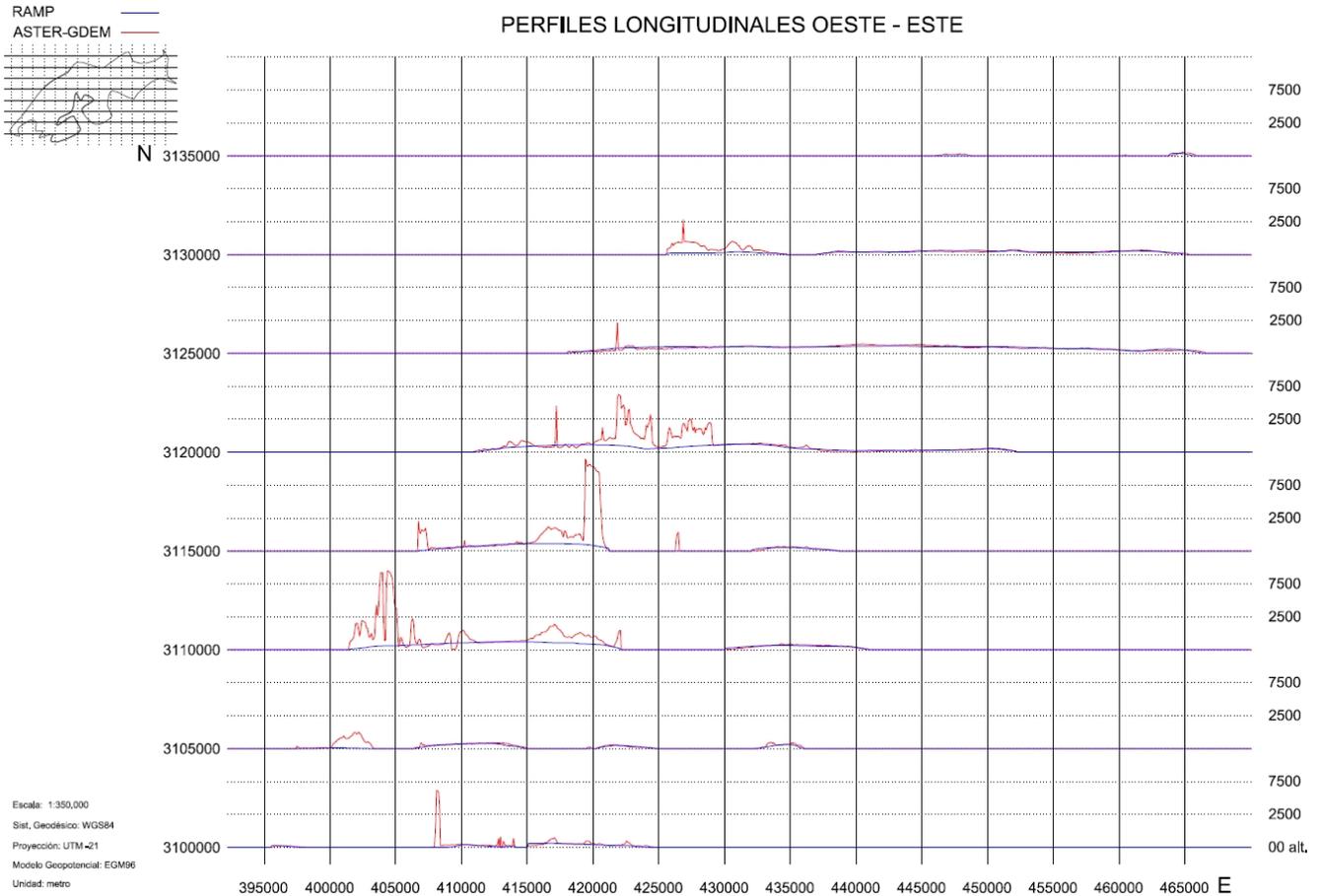


Figura A: En los perfiles O-E se observa que las diferencias entre los dos modelos estudiados no se distribuyen de forma regular ni aleatoria sino que se concentran en la mitad occidental de la Isla 25 de Mayo. En especial, esto se pone de manifiesto en los perfiles N3120000, N3115000 y N311000, que corresponden a la cuenca de la Bahía Lasserre (Admiralty Bay).

Figure A: The W-E profiles show that the differences between the two analyzed models are not distributed regularly nor randomly, instead they are concentrated in the western half of the 25 de Mayo/King George Island. In particular, this can be easily identified in the profiles N3120000, N3115000 and N311000, which correspond to the basin of Lasserre Bay (Admiralty Bay).

Líneas de costa para la Isla 25 Mayo

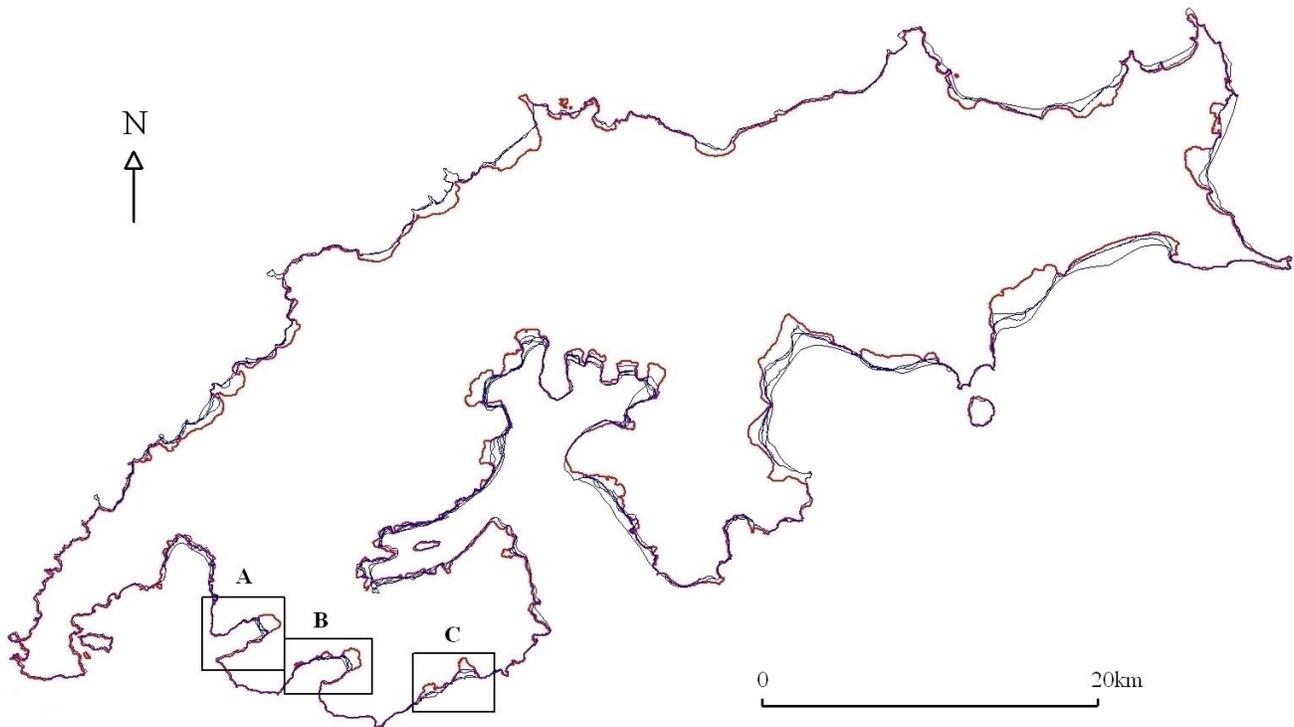


Figura C: La línea más interna (roja) se digitalizó a partir de una imagen SPOT-5 HRG1 (30-09-2012) y fue utilizada para delimitar los modelos estudiados. Las otras líneas (azules) fueron obtenidas de la Antarctic Digital Database (ADD) con el objeto de verificar la digitalización realizada a partir de la imagen citada y corresponden a distintos años previos (1956, 1975, 1979 y 1989). Las diferencias encontradas resultaron aceptables considerando la resolución espacial de los modelos y los cambios en los frentes glaciares registrados en las últimas décadas (por ejemplo, recuadros A, B y C).

Figure C: The inner line (red) has been digitalized from an image SPOT-5 HRG1 (30-09-2012) and it was used to delimitate the studied models. The other lines (blue) were obtained from the Antarctic Digital Database (ADD) with the aim of verifying the digitalization performed from the aforementioned image and they correspond to different past years (1956, 1975, 1979 y 1989). The observed differences are acceptable considering the spatial resolution of the models and the changes that have occurred on the retreating glacier fronts along the last decades (for instance, selected areas A, B and C).

Recibido: 04-02-2014
Aceptado: 15-05-2014