



EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DIGITALES DE TERRENO Y GEOPOTENCIALES EN EL ECUADOR

EVALUATION OF DIGITAL LAND AND GEOPOTENTIAL MODELS IN ECUADOR

Oscar Portilla^{*1} , César Leiva² , Marco Luna² , e Izar González³ 

¹Geoint CÍA. LTDA, Quito, Ecuador.

²Grupo Geoespacial, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.

³ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur UPM, Autovía de Valencia Km 7,5, E-28031 Madrid, España.

*Autor para correspondencia: oskrportilla94@gmail.com

Manuscrito recibido el 23 de octubre de 2022. Aceptado, tras revisión, el 06 de junio de 2023. Publicado el 1 de septiembre de 2023.

Resumen

Los trabajos de ingeniería utilizan los modelos digitales de elevación para realizar cálculos y modelar fenómenos, conocer su precisión permite determinar la escala de uso y la calidad de los subproductos que se obtienen. Existen modelos libres que son muy utilizados en la práctica, como es el caso de los modelos digitales del terreno (MDTs): Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), ASTER Global Digital Elevation Map (ASTER GDEM), ALOS PALSAR, el MDT generado por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM) y los modelos geopotenciales (MGs): EGM96, EGM08 y el MG creado por el IGM. Se evaluaron los modelos utilizando los puntos de nivelación geométrica y altura elipsoidal levantados por el IGM. Se determinaron los valores atípicos, se compararon las alturas entre los MDTs para conocer su diferencia, se calculó el error cuadrático medio (RMSE) y se definió la precisión y escala a la que se pueden emplear los diferentes modelos. Se concluyó que los MDTs SRTM 30, ALOS PALSAR e IGM pueden utilizarse para trabajos que requieran una precisión inferior a los 10 metros. El MG EGM08 junto con alturas elipsoidales de alta precisión podrían generar modelos de elevación que alcancen una precisión de 1.25 metros, mientras que los MGs EGM96 e IGM pueden generar modelos que alcancen una precisión de 2.5 metros. Las alturas elipsoidales de los MDTs SRTM 30, ALOS PALSAR e IGM obtenidos con los MGs EGM 96 y EGM 08 se pueden utilizar si se requiere una precisión inferior a los 10 metros.

Palabras clave: SRTM, ASTER GDEM, ALOS PALSAR, EGM 96, EGM 08

Abstract

Engineering uses digital elevation models to perform calculations and modeling phenomena, since it allows determining the scale at which they can be used and the quality of the by-products obtained. Two groups of models were

evaluated, the digital terrain models (DTMs): Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), ASTER Global Digital Elevation Map (ASTER GDEM), ALOS PALSAR and the DTM generated by the Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM), and the geopotential models (GMs): EGM96, EGM08 and the GM created by the IGM. For the evaluation, the geometric leveling points and ellipsoidal height raised in one of the IGM projects were used to determine atypical values, calculate the mean square error (RMSE) and define the precision and scale at which the different ones can be used. The heights between the DTMs were compared to know their difference. It was determined that the SRTM 30, ALOS PALSAR and IGM DMTs can be used for jobs that require an accuracy of less than 10 meters. The GM EGM08 together with high precision ellipsoidal heights could generate elevation models that can reach an accuracy of 1.25 meters, while the GMs EGM96 and IGM can generate models that achieve an accuracy of 2.5 meters. The ellipsoidal heights of the SRTM 30, ALOS PALSAR and IGM DTMs obtained with the EGM 96 and EGM 08 GMs can only be used in jobs that require an accuracy of less than 10 meters.

Keywords: SRTM, ASTER GDEM, ALOS PALSAR, EGM 96, EGM 08, orthometric height, ellipsoidal height.

Forma sugerida de citar: Portilla, O., Leiva, C., Luna, M. y González, I. (2023). Evaluación de los modelos digitales de terreno y geopotenciales en el Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 38(2):59-81. <http://doi.org/10.17163/lgr.n38.2023.05>.

IDs Orcid:

Oscar Portilla: <https://orcid.org/0000-0001-5023-9333>

César Leiva: <https://orcid.org/0000-0002-3332-6029>

Marco Luna: <https://orcid.org/0000-0003-1433-2658>

Izar González: <https://orcid.org/0000-0001-8540-7974>

1 Introducción

Las características del terreno limitan las actividades que el ser humano pueda realizar. Por esta razón, los trabajos de ingeniería analizan las características del terreno y determinan las precisiones específicas que deben tener los modelos para realizar los estudios. Por ejemplo, los ingenieros civiles analizan el terreno antes de construir, los geomorfólogos se encargan de conocer la forma y los procesos que le dieron origen, los topógrafos miden y describen la superficie terrestre. Dependiendo del sistema de referencia vertical que necesite el estudio, existen diferentes modelos digitales que pueden utilizarse para los estudios. Los modelos digitales de terreno, conocidos como MDT, tienen sus alturas referidas a las características naturales del territorio en estudio. Mientras que los modelos digitales de superficie, conocidos como MDS, refieren sus alturas sobre el suelo (Li, Zhu y Gold, 2004).

La importancia de contar con modelos digitales de elevación de alta calidad radica en la numerosa cantidad de aplicaciones que existen. Entre las más actuales y que más precisión exigen está, la agricultura (Sinde-González y col., 2021), la obra civil (Abbondati y col., 2020), la arqueología (Villaseñín, Gil-Docampo y Ortiz-Sanz, 2017; Gil-Docampo y col., 2023), la gestión ambiental (McClean, Dawson y Kilsby, 2020) o la planificación territorial (Zafar y Zaidi, 2019), entre otras. Sin embargo, a escala planetaria, no se requieren precisiones a nivel del centímetro y por eso se utilizan modelos globales. Las aplicaciones se enfocan en ese caso a estudios de geodinámica (Luna y col., 2017) y geodesia (Orejuela y col., 2021).

La definición del Sistema de Referencia Vertical SIRGAS es idéntica a la definición del Sistema Internacional de Referencia de Alturas (IHR), ya que ambas señalan la importancia de utilizar alturas físicas para el desarrollo de los trabajos de ingeniería (Sánchez, 2015). La altura ortométrica es la altura física más utilizada en la práctica y se obtiene al dividir la cota geopotencial para un valor medio de gravedad (Drewes y col., 2002). La ondulación geoidal depende del elipsoide que se utilice, pero aproximadamente su variabilidad está dentro de los ± 100 (m) (Seeber, 1993). Como es conocido, el posicionamiento GNSS proporciona alturas elipsoidales de alta precisión de una forma eficiente, pero pa-

ra obtener alturas ortométricas de alta precisión es necesario generar MGs de alta precisión (Martínez y Bethencourt, 2012).

1.1 MDT Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Se creó por una iniciativa de la Administración Nacional Aeronáutica y Espacio (NASA), el Centro Aeroespacial Alemán, DLR, y la Agencia Espacial Italiana, ASI. Este es un MDT con dos niveles de resolución, uno de 1 (30 metros) y otro de 3 segundos de arco (90 metros), que abarca el 80% de la superficie terrestre desde los 60° norte hasta los 57° sur. La precisión horizontal del MDT es superior a los ± 20 (m), mientras que la precisión vertical cumple con los ± 16 (m) para el 90% de los datos en toda la misión (Rabus y col., 2003). El tipo de alturas que tiene el MDT SRTM son alturas ortométricas, ya que se utilizó el MG EGM 96 para transformar las alturas elipsoidales (Lemoine y col., 1998).

1.2 MDT generado por el Instituto Geográfico Militar (IGM)

Se generó a partir de las curvas de nivel obtenidas por restitución del proyecto de generación de cartografía 1:5 000. Dichas curvas fueron generalizadas e interpoladas para obtener un MDT con una resolución de 30 (m). El tipo de alturas que tiene el MDT del IGM es ortométrica generada con el MG EGM96 y es recomendada para la generación de cartografía 1:50 000.

1.3 MDT ASTER GDEM

Obtenido por esfuerzos de la NASA y METI a mediados de octubre de 2011. Este modelo cubrió la superficie terrestre desde los 83° norte a los 83° sur; su resolución espacial alcanzó 1 segundo de arco (30 metros) y la precisión vertical es de alrededor de 20 metros con un nivel de confianza del 95%. Las alturas ortométricas del MDT ASTER GDEM se obtuvieron mediante el uso del MG EGM 96 (Tachikawa y col., 2011).

1.4 MDT ALOS PALSAR RTC

Distribuido por Alaska Satellite Facility (ASF), convirtió las alturas ortométricas de los MDTs SRTM

o NED en alturas elipsoidales utilizando la herramienta ASF MapReady geoid_adjust. Esta herramienta aplica una corrección de geoide para que el MDE resultante se relacione con el elipsoide (Alaska Satellite Facility, 2021).

En la Tabla 1 se detalla las características técnicas de los MDTs que se utilizaron en la investigación.

Tabla 1. Características técnicas de los MDTs.

MDT	Precisión vertical	Resolución espacial	Tipo de altura
SRTM	± 16,0 m	30 m	Ortométrica
IGM	± 12,5 m	30 m	Ortométrica
ASTER GDEM	± 20,0 m	30 m	Ortométrica
ALOS	-	30 m	Elipsoidal

1.5 MG EGM 96

Posee una resolución espacial de aproximadamente 56 kilómetros, donde se incorporaron datos de gravedad superficial, anomalías de la gravedad de ERS-1 y de la Misión Geodésica GEOSAT, datos satelitales de posición y altimetría de diversos sistemas. El modelo está definido hasta 360 grados, permitiendo calcular 131000 coeficientes armónicos (Lemoine y col., 1998).

1.6 MG EGM 08

Posee una resolución espacial de aproximadamente 9 kilómetros. Fue desarrollado por la combinación de mínimos cuadrados del modelo gravitacional ITG-GRACE03S y su matriz de covarianza de error. Para su generación se utilizó información gravitacional extraída de una cuadrícula equiangular de 5 minutos de arco. Este conjunto de anomalías de gravedad se obtuvo de la fusión de datos de sensores terrestres y aerotransportados con valores derivados de la altimetría. El ajuste por mínimos cuadrados se realizó en términos de armónicos elipsoidales; esta conversión conservó el orden, pero no el grado, lo que da lugar a coeficientes de grado 2190 y orden 2159 (Pavlis y col., 2012).

1.7 MG generado por el IGM

Utilizó técnicas GPS y nivelación geométrica para estructurar y entrenar una red neuronal artificial del tipo Radial Basis Functions (RBF) que permite

calcular la ondulación geoidal en cualquier punto mediante interpolación. El MG del IGM obtuvo errores menores de 40 cm y un error medio cuadrático de 15 cm (Tierra y Acurio, 2014).

Los trabajos de ingeniería requieren que los modelos y productos cartográficos cumplan con una determinada precisión, pues desconocer la precisión puede ocasionar problemas económicos y de logística en los trabajos. Los MDTs y MGs empleados en la presente investigación, a excepción del MDT y el MG generado por el IGM, han sido generados a nivel mundial y cuentan con documentación científica que respalda su precisión a nivel mundial, pero ¿la precisión que se ha determinado a nivel mundial se cumple en el Ecuador Continental? De esta manera el presente trabajo busca determinar la precisión de los modelos y la escala máxima que pueden ser implementados para la elaboración de productos cartográficos en el Ecuador Continental.

2 Materiales y métodos

En la Figura 1 se puede observar los datos que se utilizaron: uno de los cuatro MDTs y los puntos de nivelación geométrica y altura elipsoidal levantados en uno de los proyectos del IGM. Si bien es cierto que las alturas niveladas, al ser del tipo geométrico, no servirían para evaluar a las alturas ortométricas de los MDTs que son de tipo físico; por evaluaciones previas realizadas a los MDTs, las cuales fueron expuestas en la introducción, se determinó que en el mejor de los casos, la precisión de los MDTs alcanza los 15 metros y como en el Ecuador Continental se ha determinado que la diferencia entre la altura nivelada y la altura ortométrica llega al orden del metro (Cañizares, 2015).

En la presente investigación se optó por despreciar la diferencia entre altura nivelada y la altura ortométrica, ya que la precisión de los MDTs absorberían la diferencia. Existieron puntos que contaban con la altura elipsoidal que sirvieron para evaluar la transformación de las alturas ortométricas de los MDTs en alturas elipsoidales, y en los puntos donde se tenía el dato de altura nivelada y altura elipsoidal se calculó una pseudo ondulación geoidal para evaluar los MGs.

La ecuación fundamental de la geodesia física

(Ecuación 1) considera a la ondulación geoidal (N), como la separación vertical entre la altura elipsoidal (h) y la altura ortométrica (H). Esta consideración es empleada en la práctica por la facilidad que tiene para transformar las alturas elipsoidales en ortométricas y viceversa. De esta manera, se evita emplear

modelo gravimétricos y medidas de gravedad para obtener alturas físicas, las cuales encarecen los costos de los proyectos.

$$N = h - H \quad (1)$$

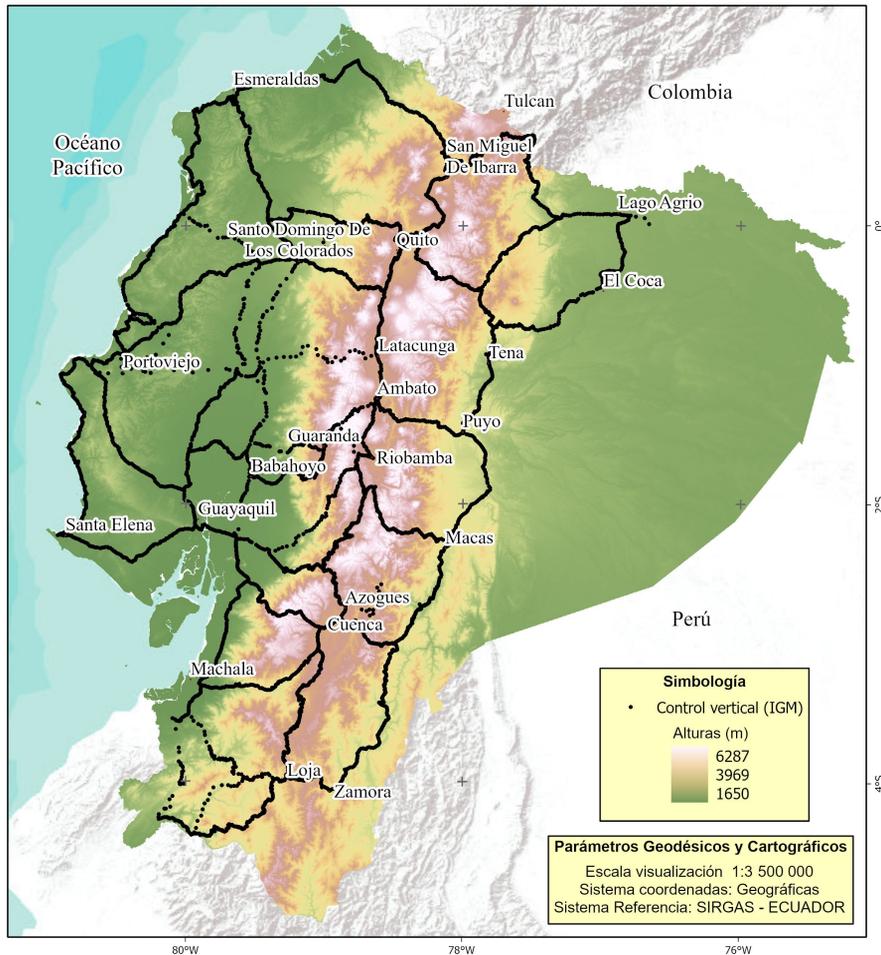


Figura 1. Elementos utilizados para la evaluación de los MDTs y MGs.

El modelo cartográfico que se observa en la Figura 2 detalla los pasos empleados para evaluar los MDTs con sus diferentes tipos de alturas y los MGs. Se generó una tabla espacial para evaluar los distintos MDTs y MGs, y para ello se georreferenció el levantamiento de alturas niveladas y elipsoidales rea-

lizado por el IGM. En cada punto del levantamiento se extrajo el valor de la altura presente en cada píxel de los distintos MDTs, sin recurrir a ningún método de interpolación para la extracción, debido a que cada punto del levantamiento se ubicaba dentro de un solo píxel.

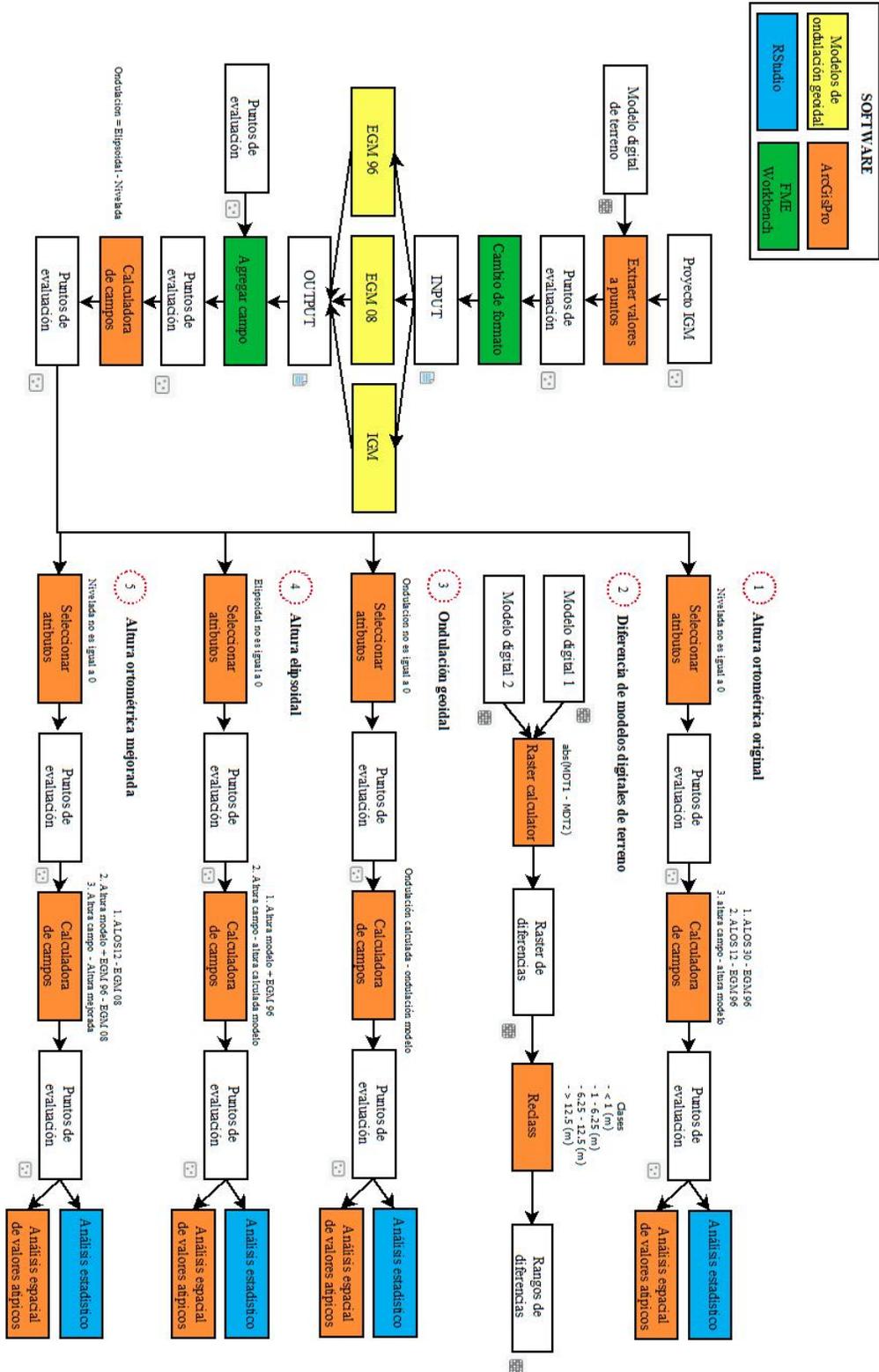


Figura 2. Modelo cartográfico de la evaluación de los MDTs y MGs.

Se calcularon las coordenadas geográficas de cada punto del levantamiento y se transformó la tabla espacial en un archivo formato .dat que sirvió de insumo para calcular las ondulaciones geoidales con los MG EGM 96, EGM 08 e IGM. Con el software ETL se añadió el valor de las ondulaciones geoidales presentes en cada uno de los archivos .dat, a la tabla espacial de puntos. Con el Sistema de Información Geográfica (SIG) se calculó la pseudo ondulación geoidal para cada punto del levantamiento en donde existiera la altura nivelada y altura elipsoidal al mismo tiempo. Para ello se empleó la Ecuación 1, donde se restó la altura nivelada de la altura elipsoidal.

Posteriormente se evaluó la altura ortométrica original de los MDTs. Las alturas ortométricas de todos los modelos a excepción del MDT ALOS PALSAR, fueron obtenidas mediante el uso del MG EGM 96. Las alturas originales del MDT ALOS PALSAR son alturas elipsoidales, razón por la cual se utilizó la ecuación 1 para transformar las alturas elipsoidales en alturas ortométricas, empleando el MG EGM 96. Se utilizaron 3931 puntos que contaban con alturas niveladas del proyecto IGM para evaluar la precisión vertical de los MDTs. Para ello se calculó la diferencia del valor capturado en campo respecto al valor del MDT. Posteriormente se procedió a analizar la distribución de las diferencias con diagramas de cajas; se graficó la dispersión de las diferencias respecto a la altura a la que fueron calculadas las diferencias y se calculó el RMSE de cada MDT. La precisión reportada con el RMSE refleja todas las incertidumbres, incluyendo los errores en la adquisición de los datos, en la compilación y en el cálculo final de las alturas (Federal Geographic Data Committee, 1998).

Se analizaron espacialmente las diferencias utilizando el valor I local de Morán con la finalidad de entender cómo la diferencia de un punto se relaciona con las diferencias que lo rodean, llegando a determinar conglomerados espaciales y valores atípicos que existan (Anselin, 1995). El valor I local de Morán emplea una puntuación z , un pseudo valor P para representar la significancia estadística de los valores de índice calculados. Un valor negativo para I indica que una entidad tiene entidades vecinas con valores diferentes; esta entidad es un valor atípico. En ambas instancias, el valor P para la entidad debe ser lo suficientemente pequeño para que el

valor atípico sea considerado estadísticamente significativos. Un valor atípico puede ser de dos tipos, un valor alto rodeado principalmente por valores bajos (alto- bajo) y un valor bajo que esté rodeado principalmente por valores altos (bajo- alto). La importancia estadística está establecida en un nivel de confianza del 95% (ESRI, 2020).

Una vez que se analizó estadística y espacialmente a los MDTs, el segundo paso consistió en la determinación de la diferencia existente entre cada MDT. Como ya se mencionó, el MDT ALOS PALSAR cuenta con alturas elipsoidales, mientras que los otros MDTs tienen alturas ortométricas, razón por la cual no se generó un raster de diferencias con el MDT ALOS PALSAR. El raster de diferencias sirvió para clasificar las diferencias, visualizar su comportamiento espacial, analizar el porcentaje de cobertura de cada rango de diferencia y poder determinar hasta qué punto pueden considerarse similares los MDTs para poder emplearlos en conjunto y suplir sus puntos débiles.

Se evaluaron los MGs, donde se emplearon 1253 puntos del proyecto IGM que contaban con el valor de la pseudo ondulación geoidal. Se procedió a determinar la diferencia existente entre la pseudo ondulación geoidal capturada en campo respecto a la ondulación calculada con los MGs EGM 96, EGM 08 y modelo del IGM. Una vez calculadas las diferencias, se analizó la distribución de las diferencias, se graficó la dispersión de las diferencias respecto a la altura a la que fueron calculadas, se calculó el RMSE de cada modelo y se analizaron espacialmente los valores atípicos utilizando el valor I local de Morán.

Se utilizaron 1253 punto del proyecto IGM para evaluar la altura elipsoidal de los MDTs. Para ello se transformaron las alturas ortométricas de los MDTs SRTM, ASTER GDEM e IGM en alturas elipsoidales empleando la ecuación 1 y el MG EGM 96; no fue necesario transformar las alturas del MDT ALOS PALSAR, porque como ya se mencionó, las alturas originales del MDT son alturas elipsoidales. Se procedió a determinar la diferencia entre la altura elipsoidal capturada en campo respecto a la altura elipsoidal de los MDTs, analizar su distribución, graficar su dispersión respecto a la altura a la que fueron calculadas las diferencias, calcular el RMSE y determinar espacialmente los valores atípicos uti-

lizando el valor I local de Morán.

El último paso consistió en determinar si el uso de MG EGM 08 con las alturas elipsoidales calculadas en el anterior paso podría conseguir MDTs de alturas ortométricas más precisas. En los 3931 puntos que contaban con la altura nivelada del proyecto IGM, se transformó las alturas ortométricas originales de los MDTs en alturas elipsoidales, utilizando la ecuación 1 y el MG EGM 96. Luego se transformó las alturas elipsoidales en alturas ortométricas, empleando de nuevo la ecuación 1 y el MG EGM 08. Como en los pasos anteriores, se determinó la diferencia entre el valor obtenido en campo respecto al valor del modelo, se analizó su distribución, se graficó la dispersión de las diferencias respecto a la altura a la que fueron calculadas, se calculó el RMSE y se determinó espacialmente los valores atípicos utilizando el valor I local de Morán.

3 Resultados

3.1 Evaluación de la altura ortométrica con el MG EGM 96 de los MDTs

Se analizó la distribución de las diferencias de las alturas niveladas capturadas en campo respecto a

las alturas ortométricas de los MDTs obtenidas con el MG EGM 96; en la Figura 3 y 4 y en la Tabla 2 se observa la influencia de la resolución espacial en la distribución de las diferencias para los modelos que han sido distribuidos con dos resoluciones. En el caso del MDT SRTM, se observa que las diferencias obtenidas con el modelo de resolución de 30 metros son mejores que las diferencias obtenidas con el modelo de 90 metros, ya que presentan un mejor agrupamiento de los datos, un estrechamiento y mejor ubicación de la caja. En el caso del MDT ALOS PALSAR, las diferencias entre el modelo de 30 metros respecto al 12,5 metros apenas se logran identificar, ya que sus cajas son del mismo tamaño y se encuentran en la misma posición.

Tabla 2. Valores del diagrama de caja de la evaluación de las alturas ortométrica con el MG EGM 96.

MDTs	Max	Q3	Med	Q1	Min
SRTM 90	13,58	1,32	-1,96	-6,94	-19,30
SRTM 30	14,22	4,92	1,61	-1,33	-10,56
ASTER	24,03	7,24	1,88	-3,99	-20,83
ALOS 30	10,95	1,48	-1,45	-4,88	-14,41
ALOS 12.5	10,59	1,46	-1,48	-4,70	-13,94
IGM	10,26	0,98	-1,81	-5,26	-14,58

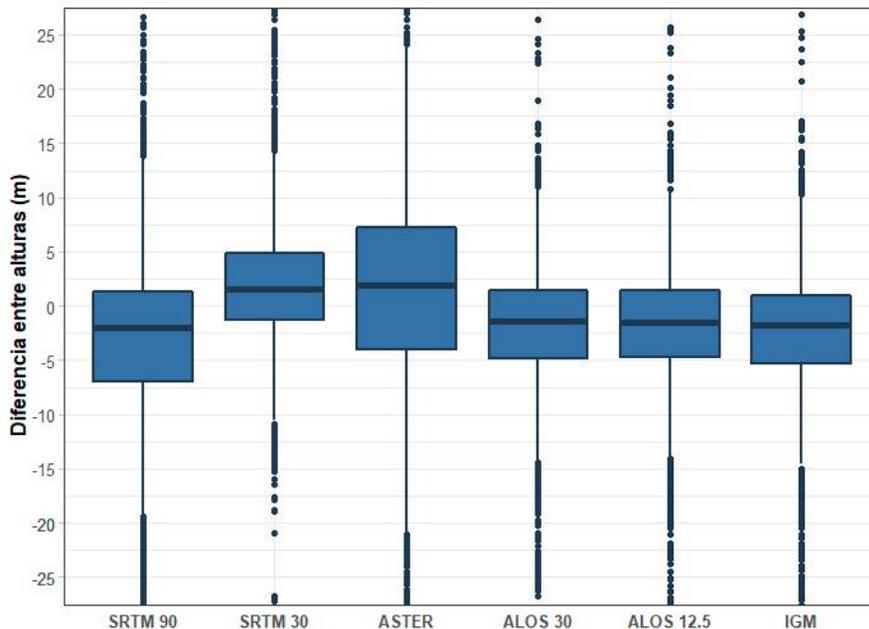


Figura 3. Diagrama de caja de la diferencia de alturas ortométrica con el MG EGM 96.

Al comparar la caja de todos los MDTs, se observa que la caja del MDT ASTER GDEM es la más ancha y por ende la que tiene peor distribución de las diferencias. A su vez se observa que la mediana de este modelo es similar a la mediana del MDT SRTM de 30 metros. Las cajas de los MDT ALOS PALSAR e IGM tienen características estadísticas similares tan-

to en ancho de la caja como en su ubicación. Todas las cajas, a excepción de la caja del modelo SRTM de 90 metros, muestran una similar distribución de datos tanto arriba y abajo del valor de la mediana en las cajas, como a la derecha y a la izquierda del valor medio en el histograma (simetría).

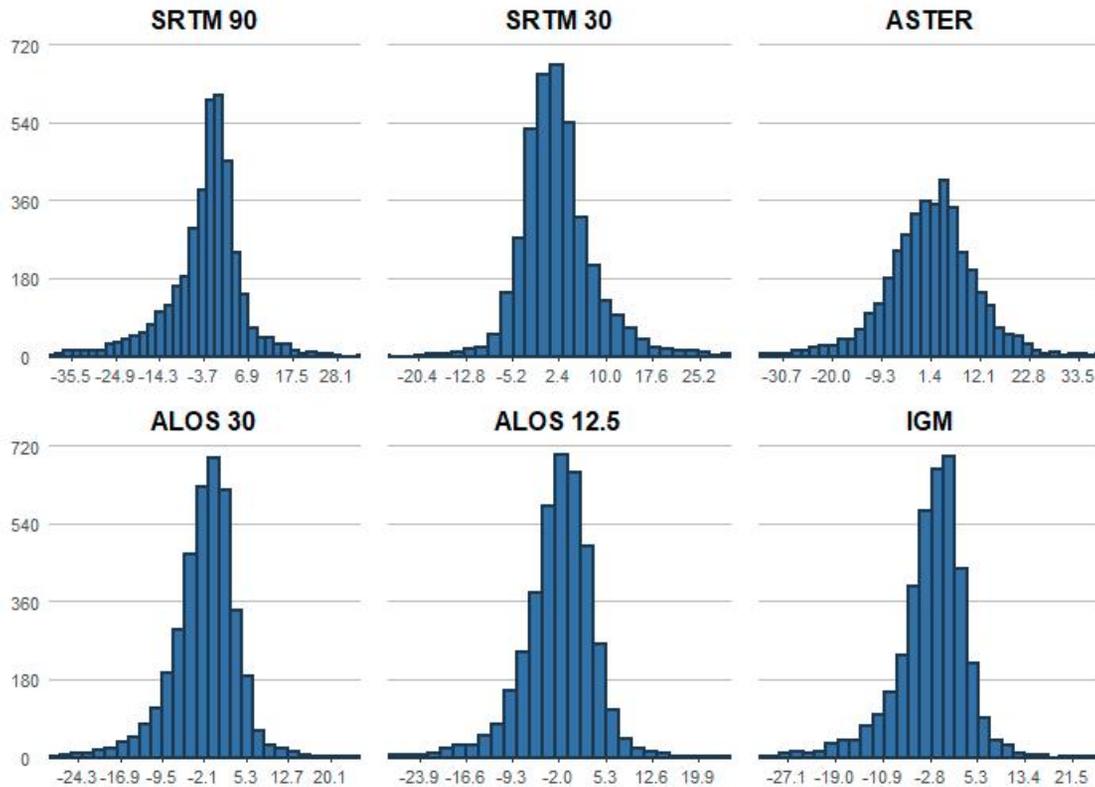


Figura 4. Histograma de la diferencia de alturas ortométrica con el MG EGM 96.

En la Figura 5 se observa que la dispersión de las diferencias respecto a la altura del punto de evaluación se agrupa alrededor de los 0 metros, donde los MDTs SRTM de 30 metros, ALOS PALSAR de 30 y 12,5 metros e IGM tienden a estar mejor agrupados que los MDTs ASTER GDEM y SRTM de 90 metros. Se observa que el MDT SRTM de 30 metros tiene una mayor cantidad de diferencias positivas, mientras que en los MDTs SRTM de 90 metros, ALOS PALSAR 30 y 12,5 metros e IGM tienden a tener

una mayor cantidad de diferencias negativas.

En todos los MDTs se observa una distribución uniforme de las diferencias conforme incrementa la altura de evaluación. En función de lo observado en las Figura 3, Figura 4 y Figura 5, se decidió escoger los MDTs SRTM de 30 metros y ALOS PALSAR de 12,5 metros para continuar con los siguientes pasos de la evaluación, ya que presentaban mejores resultados estadísticos.

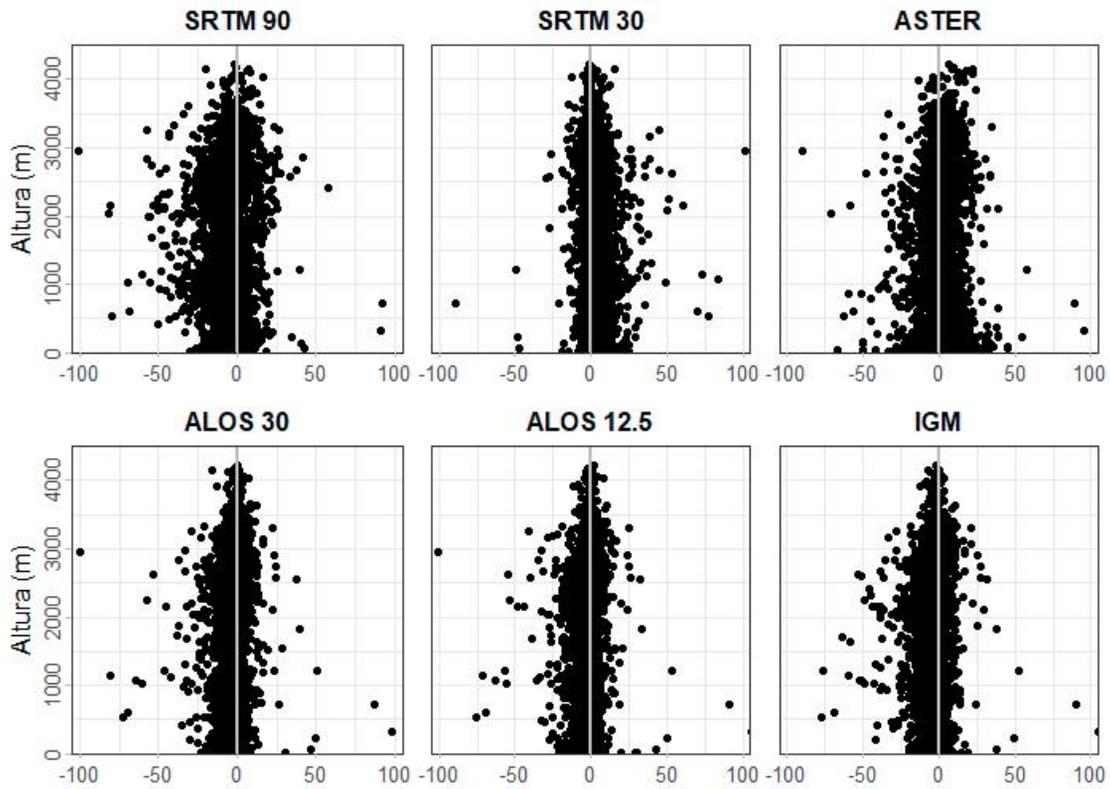


Figura 5. Dispersión de la diferencia de alturas ortométrica con el MG EGM 96.

En el análisis espacial de valores atípicos con el método I local de Moran que se observa en la Figura 6. Se identifica un comportamiento similar en la tipología y ubicación de los valores atípicos en los MDTs SRTM, ALOS PALSAR e IGM, donde la mayor cantidad de valores atípicos están presentes en la cordillera de los Andes. El MDT ASTER GDEM se

caracteriza por tener una cantidad considerable de diferencias con un valor alto rodeadas de diferencias con un valor bajo en la zona noreste del Ecuador. Todos los MDTs presentaron un 3% de valores atípicos altos- bajos y un 2% de valores atípicos bajos- altos.

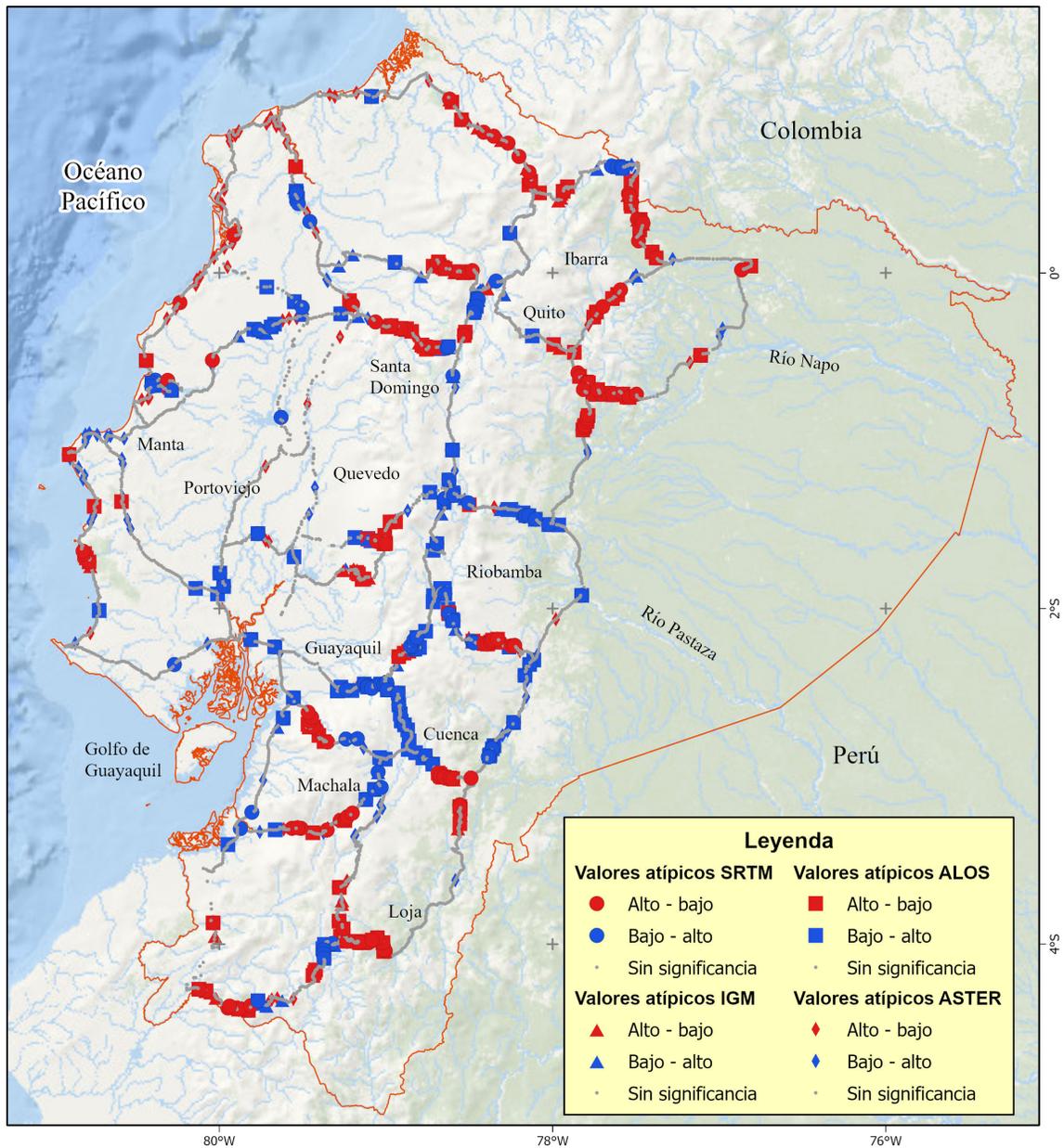


Figura 6. Análisis de valores atípicos de las diferencias de las alturas ortométricas con el MG EGM 96.

Se determinó la distribución espacial de las diferencias entre los MDTs que tenían como altura original a la altura ortométrica, por esta razón se excluyó al MDT ALOS PALSAR del análisis. En la Figura 7 se observa la diferencia entre los MDTs IGM y SRTM, donde se destaca una zona de altas dife-

rencias ubicada entre las provincias de Sucumbíos y Orellana. Al analizar los modelos por separado, se descubrió que esta diferencia es causada debido a que el MDT del IGM tiene zonas con un valor constante de altura.

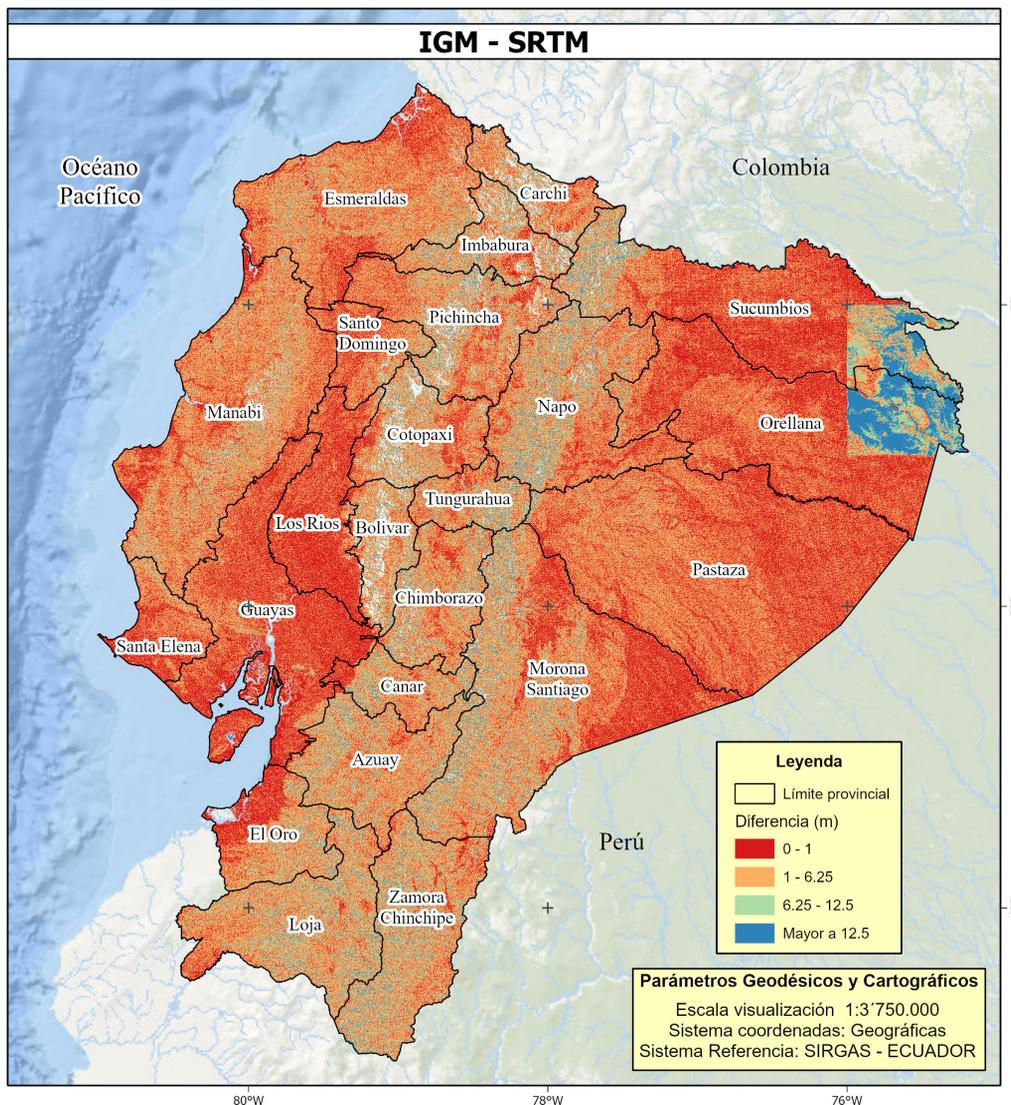


Figura 7. Diferencia entre los MDTs IGM y SRTM.

Para cuantificar lo observado en la Figura 7, se generó un diagrama de barras con la clasificación de diferencias entre los MDTs. Según la Figura 8, el 96% de las diferencias son menores a la tolerancia de la escala 1:50.000 (12,5 metros), de esta manera se puede considerar que estos modelos pueden complementarse para suplir sus deficiencias, por ejemplo, la falencia del modelo SRTM es la cobertura del 93% del territorio continental, mientras que el MDT IGM cubre el 100%.

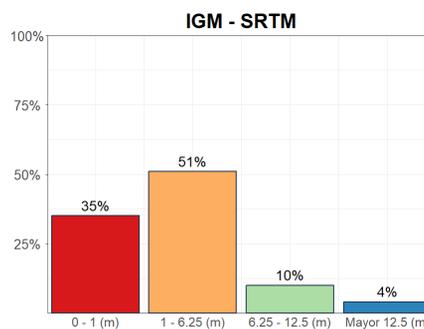


Figura 8. Diagrama de barras de diferencia entre los MDTs IGM y SRTM.

En la Figura 9 se observa que las tonalidades que prevalecen en el mapa de diferencias entre los MDTs IGM y ASTER se encuentran en los intervalos comprendidos entre 1 y 12,5 metros. Con el diagrama de barras de la Figura 10, se demues-

tra que el 63% de las diferencias se encuentran en el rango entre 1 y 12,5 metros, y aunque existe una reducción considerable del porcentaje de diferencias que son menores a la tolerancia de la escala 1:50.000, apenas el 70% de las diferencias son menores.

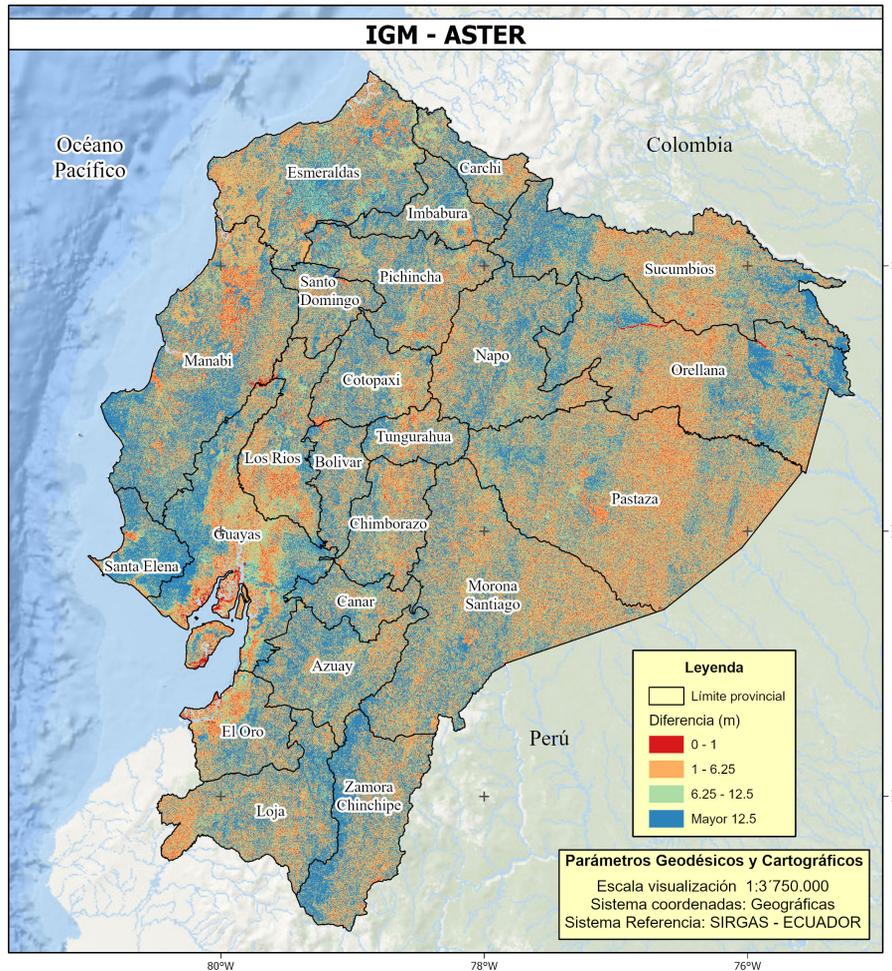


Figura 9. Diferencia entre los MDTs IGM y ASTER.

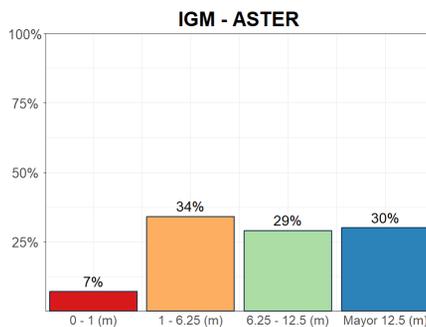


Figura 10. Diagrama de barras de diferencia entre los MDTs IGM y ASTER.

En el mapa de diferencias de la Figura 11 se observa un comportamiento similar al mapa de diferencias de la Figura 9. Al analizar el diagrama de barras de la Figura 12 se constata que el comportamiento es el mismo, ya que los porcentajes de los rangos de diferencias son iguales al de la Figura 9. Cuando se analizaron las diferencias entre los MDTs IGM y SRTM se destacó una zona de altas diferencias entre las provincias de Sucumbios y Orellana. En la Figura 11 se observa unos rastros de esa zona, mientras que en la Figura 12 esta zona desaparece.

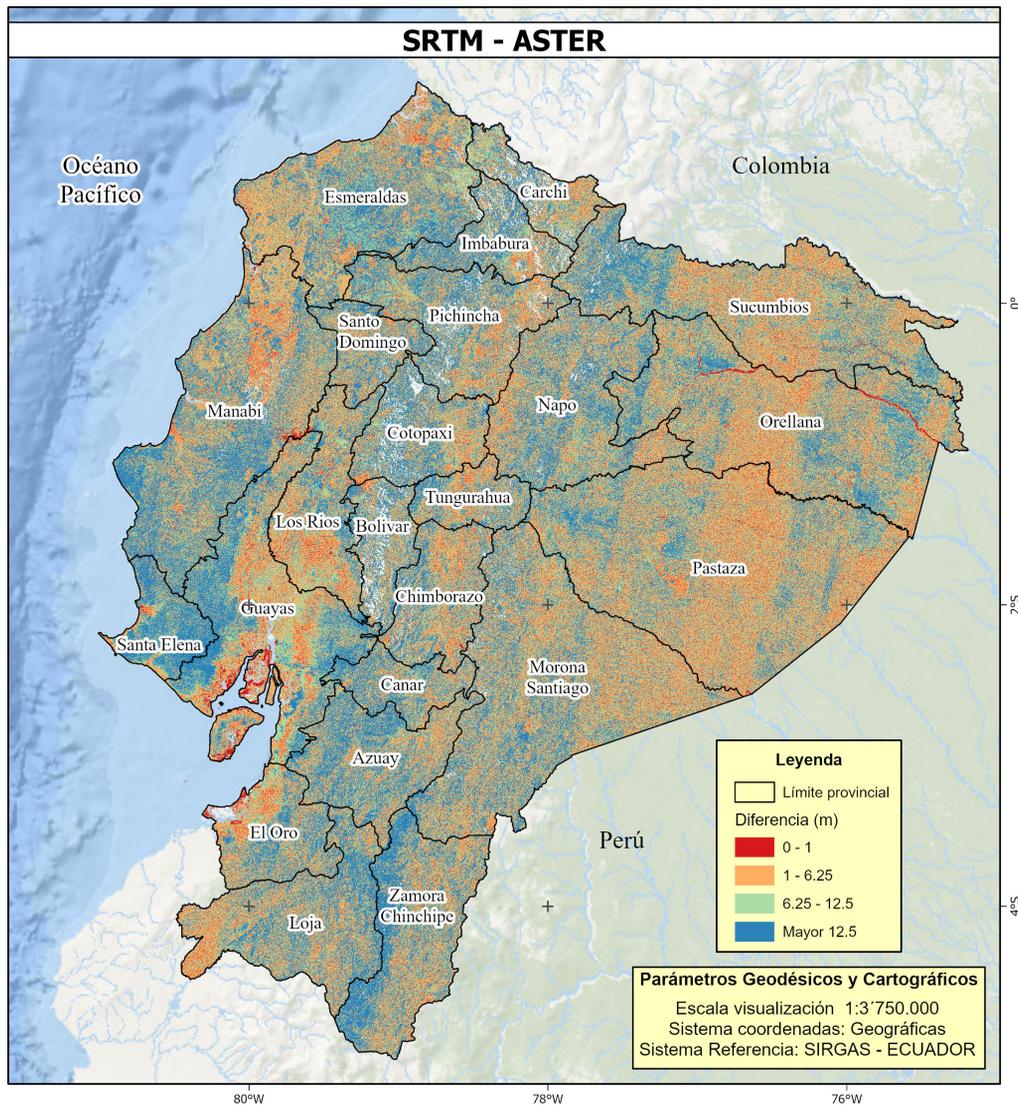


Figura 11. Diferencia entre los MDTs SRTM y ASTER.

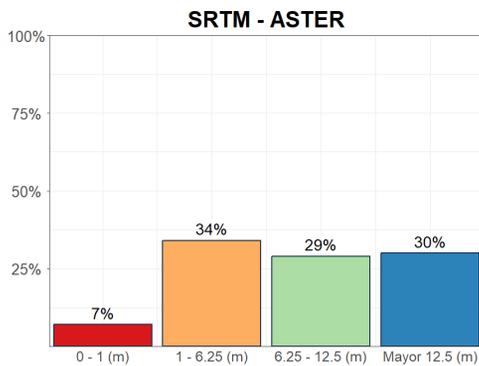


Figura 12. Diagrama de barras de diferencia entre los MDTs SRTM y ASTER.

3.2 Evaluación de los MGs

Se analizó la distribución de las diferencias entre las pseudo ondulaciones geoidales calculadas a partir de la información capturada en campo respecto a las ondulaciones geoidales obtenidas de los MGs. En las Figuras 13 y 14 y en la Tabla 3 se observa que la caja del MGs tiene simetría respecto a la mediana, el MG EGM 96 tiene una mediana similar a la del MG EGM 08 y la caja del MG IGM tiene la menor extensión de todas.

Tabla 3. Valores del diagrama de caja de los MGs.

	EGM 08	EGM 96	IGM
Máximo	1,38	2,65	-0,12
Q3	0,29	0,59	-0,75
Mediana	-0,12	-0,12	-0,94
Q1	-0,47	-0,90	-1,17
Mínimo	-1,48	-2,92	-1,81

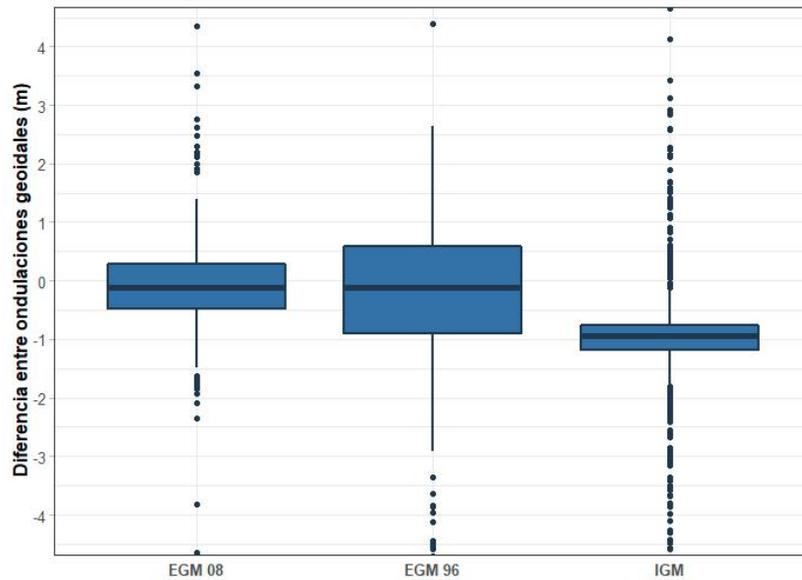


Figura 13. Diagrama de caja de la diferencia de los MGs.

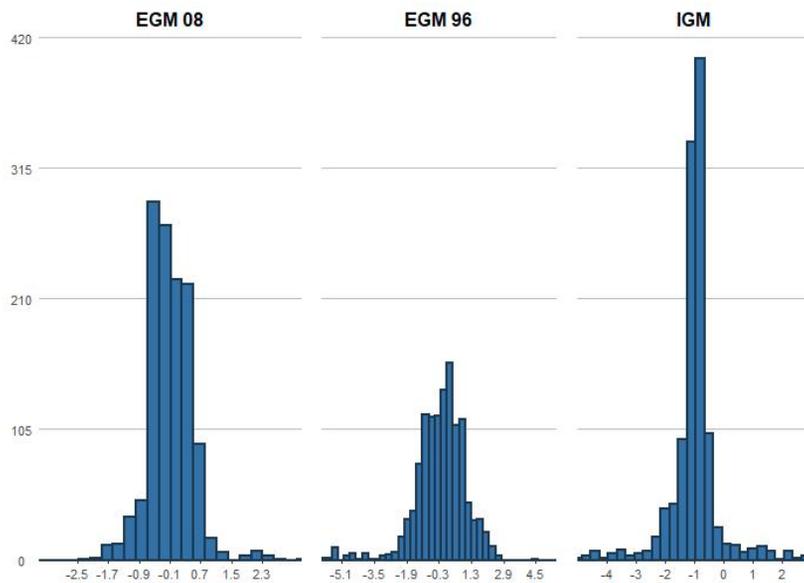


Figura 14. Histograma de la diferencia de los MGs.

En la Figura 15 se observa la dispersión de las diferencias de la ondulación geoidal respecto a la altura de evaluación, donde las diferencias de los MGs EGM 08 e IGM tienden a estar mejor agrupadas alrededor de los 0 metros. Los MGs EGM 08 e IGM

presentan una distribución uniforme de diferencias conforme va aumentando la altura, mientras que el MG EGM 96 muestra una alta dispersión de diferencia entre los 500 y 2000 metros de altura.

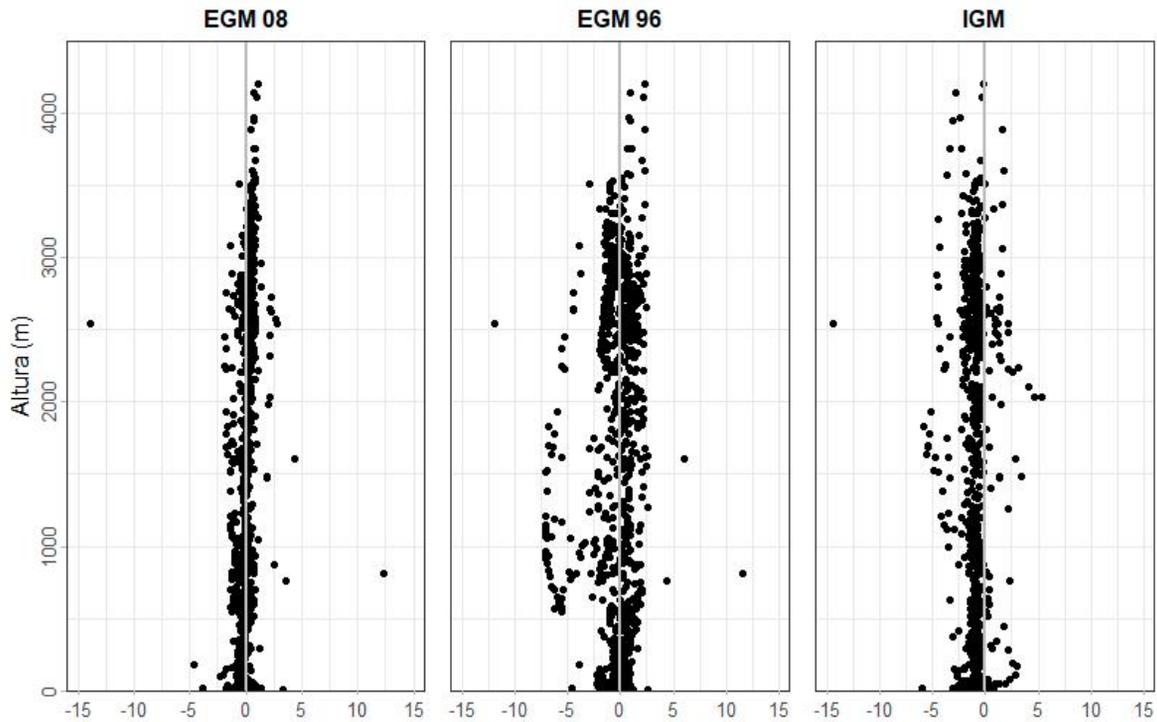


Figura 15. Dispersión de la diferencia de los MGs.

En la Figura 16 se destaca una baja cantidad de valores atípicos en los tres MGs. La evaluación espacial del MG EGM 08 muestra que existen diferencias con valores altos rodeadas de diferencias con valores bajos en la zona norte, mientras que los valores que en la zona sur existen diferencias con valores bajos rodeadas de diferencias con valores altos. El MG EGM 96 a pesar de tener una mínima cantidad de valores atípicos, estos mantienen el comportamiento observado en el MG EGM 08. El MG del IGM no presenta ningún patrón en la dis-

tribución de los valores atípicos.

En la Tabla 4 se muestra el RMSE de los MGs, donde se verifica que el MG EGM 08 tiene la mejor precisión.

Tabla 4. RMSE de los MGs.

MGs	RMSE (m)
EGM 08	0,82
EGM 96	1,67
IGM	1,43

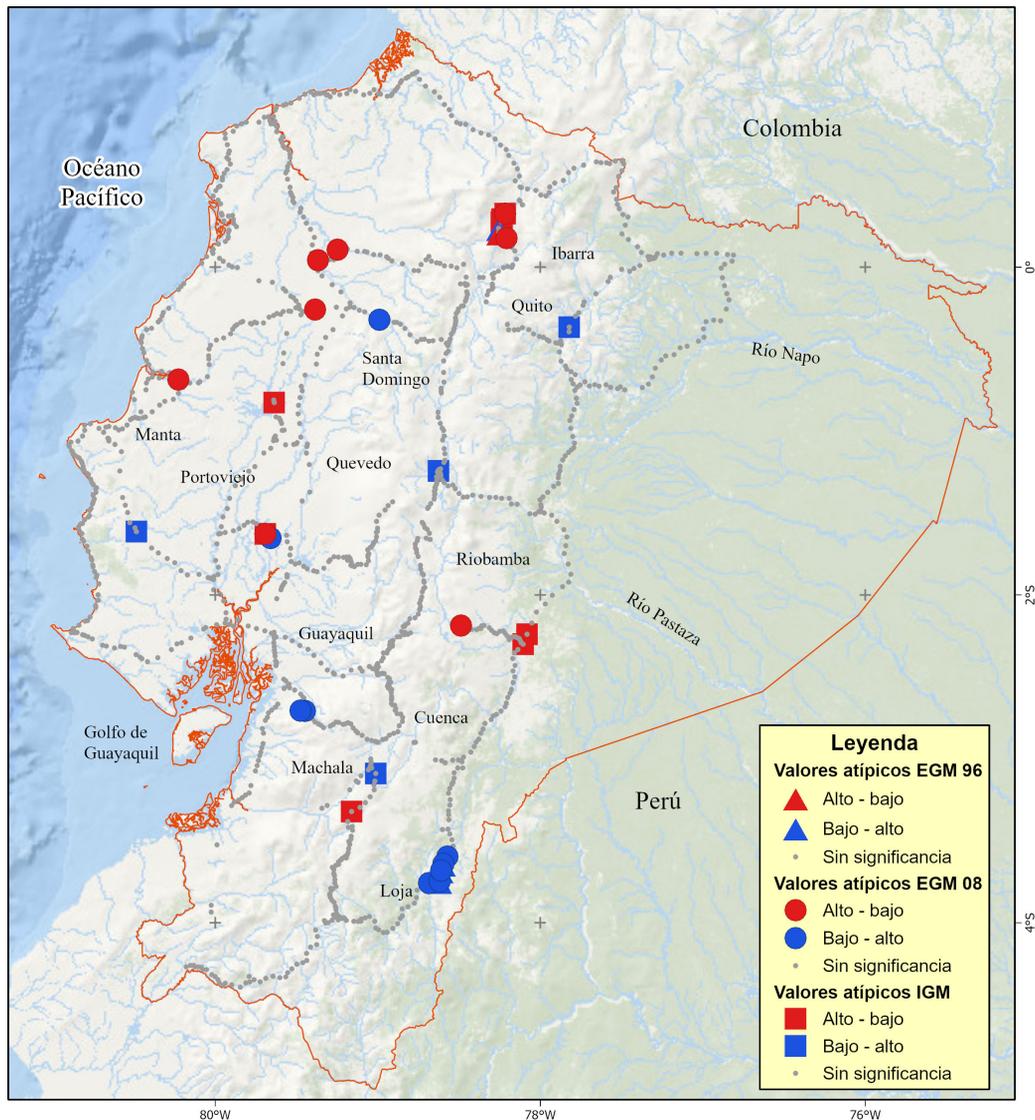


Figura 16. Análisis de valores atípicos de las diferencias de los MGs.

3.3 Evaluación de las alturas elipsoidales de los MDTs

Se analizó la distribución de las diferencias entre las alturas elipsoidales capturada en campo respecto a las alturas elipsoidales calculadas a partir de los de MDTs, a excepción del MDT ALOS PALSAR cuyas alturas originales son alturas elipsoidales. Como se

observa en las Figuras 17 y 18 y en la Tabla 5, existe un error: no se encontró el origen de la referencia comportamiento similar al de los diagramas de cajas y de distribución de las diferencias de alturas ortométricas con el MG EGM 96, donde se destaca la simetría y la similitud que existen en el tamaño, ubicación y valores estadísticos de los MDTs SRTM, ALOS PALSAR e IGM.

Tabla 5. Valores del diagrama de caja de las alturas elipsoidales.

MDTs	Max	Q3	Med	Q1	Min
SRTM 90	8,95	1,02	-1,50	-4,62	-12,98
ASTER	23,51	7,01	1,91	-4,12	-20,80
ALOS 12.5	8,97	1,05	-1,43	-4,26	-11,94
IGM	8,76	0,66	-1,76	-4,85	-13,10

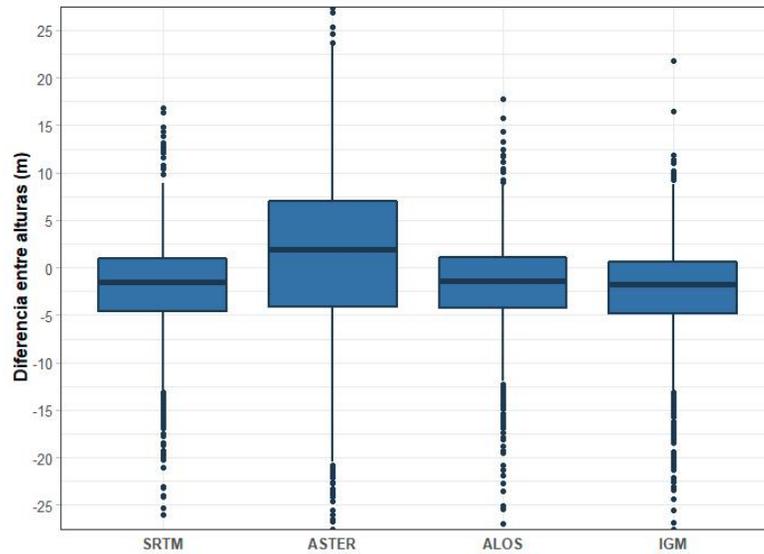


Figura 17. Diagrama de caja de la diferencia de las alturas elipsoidales.

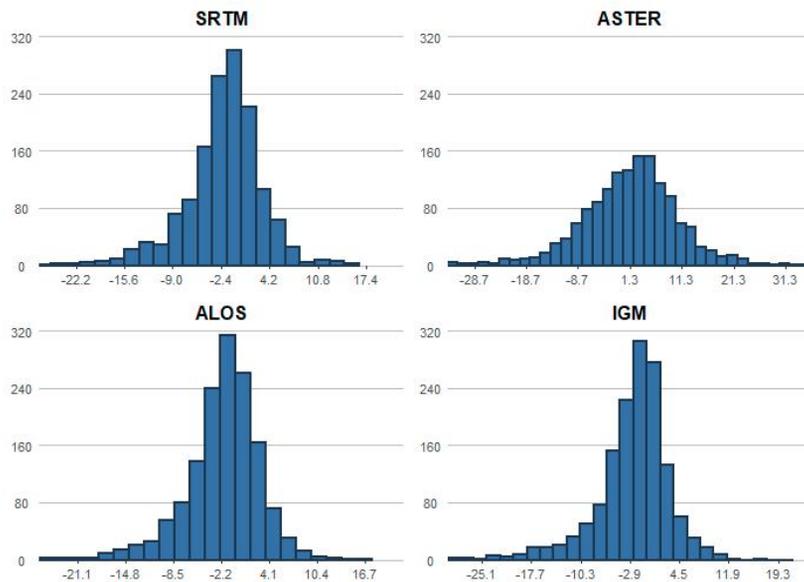


Figura 18. Histograma de la diferencia de las alturas elipsoidales.

En la Figura 19 se observa que la dispersión de las alturas elipsoidales presenta el mismo comportamiento que las diferencias de alturas ortométricas de la Figura 5, aunque las diferencias tienen un me-

nor rango de dispersión. En el caso de las alturas ortométricas, las diferencias alcanzan los 100 metros, mientras que con las alturas elipsoidales, las diferencias están en el orden de los 50 metros.

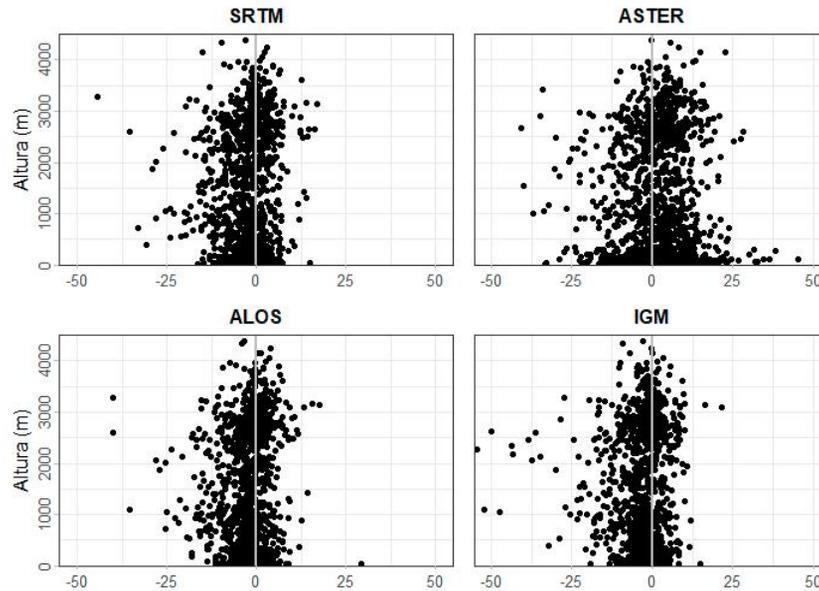


Figura 19. Dispersión de la diferencia de las alturas elipsoidales.

En la Figura 20 se identifica un comportamiento similar en la tipología y ubicación de los valores atípicos en los MDTs SRTM, ALOS PALSAR e IGM, donde la mayor cantidad de valores atípicos de diferencias con valores altos rodeadas de diferencias con valores bajos están presentes en el sur del Ecuador, mientras que existe una mayor presencia de valores atípicos de diferencias con valores bajos rodeadas de diferencias con valores altos en el centro y

norte del país. El MDT ASTER GDEM no presenta zonas en donde exista una predominancia de algún tipo de valor atípico. Los porcentajes de valores atípicos de las alturas elipsoidales respecto a los valores atípicos de las alturas ortométricas originales de los MDTs sufren una ligera reducción en el porcentaje de valores atípicos altos-bajos y sufren un ligero incremento en el porcentaje de valores atípicos bajos-altos.

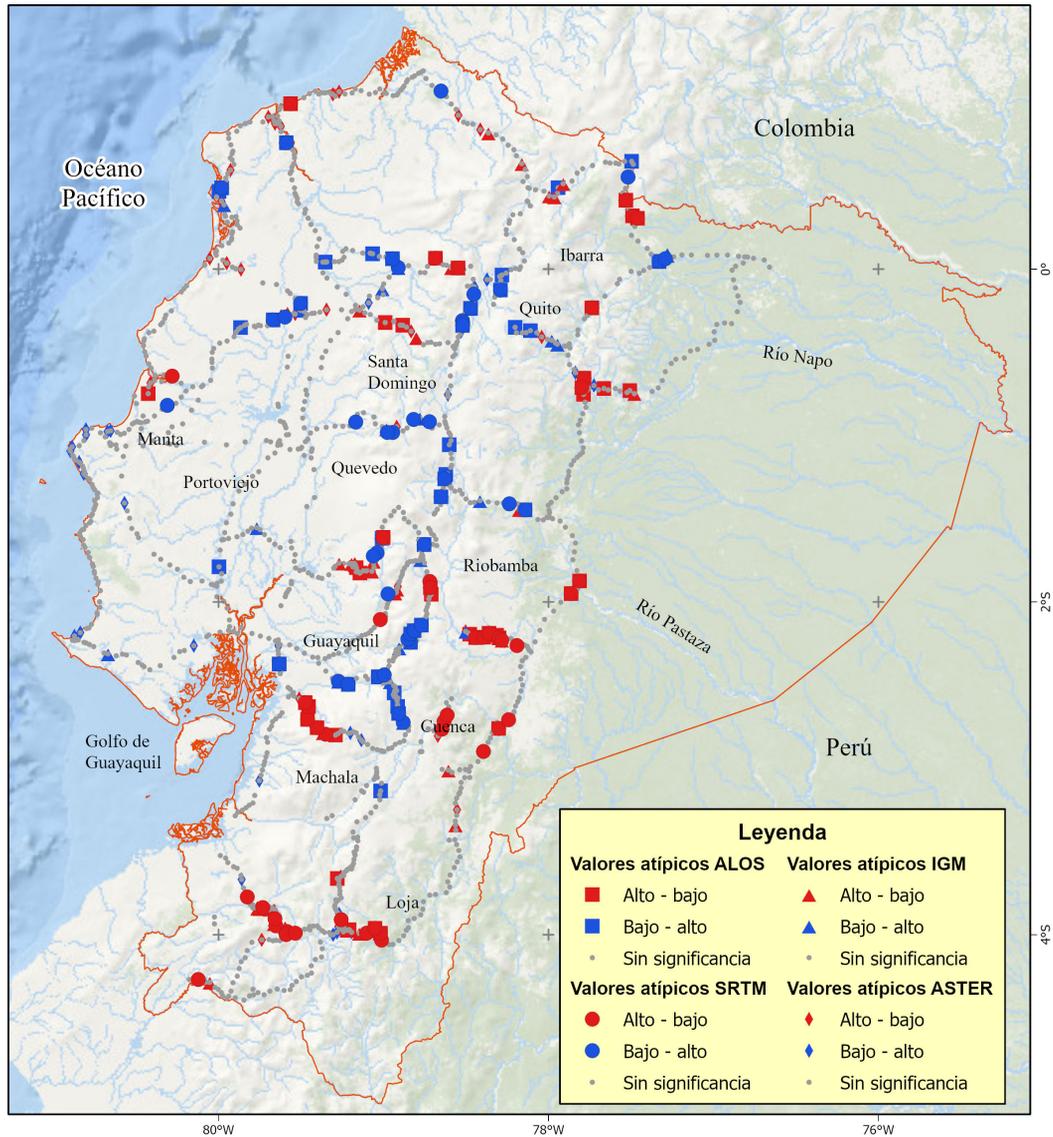


Figura 20. Análisis de valores atípicos de las diferencias de las alturas elipsoidales.

3.4 Evaluación de la altura ortométrica de los MDTs con el MG EGM 08

Se calcularon nuevas alturas ortométricas para los MDTs a partir del reemplazo del MG EGM 96 por el MG EGM 08. En el caso del MDT ALOS PALSAR, se utilizó la Ecuación 1 y el MG EGM 08 para obtener la nueva altura ortométrica. Los diagramas de

cajas, la dispersión de alturas respecto a la altura de evaluación y el análisis de valores atípicos no variaron visualmente respecto de la evaluación de alturas ortométricas de los MDTs con el MG EGM 96, pero existió una ligera mejora en el RMSE. En la Tabla 6 se observa los resultados del análisis de RMSE de los MDTs con alturas ortométricas con los MGs EGM 96, 08 y alturas elipsoidales.

Tabla 6. RMSE de los distintos sistemas de alturas de los MDTs.

MDTs	Ortométrica EGM 96 (m)	Ortométrica EGM 08 (m)	Elipsoidal (m)
SRTM 90	11,20	11,19	10,25
SRTM 30	7,97	7,92	7,06
ASTER	10,76	10,71	10,05
ALOS 30	7,75	7,67	6,87
ALOS 12.5	7,57	7,47	6,74
IGM	8,54	8,50	7,96

4 Discusión

Mancero y col. (2015) utilizaron 28 puntos para evaluar el MDT SRTM de 90 metros en las zonas de Carchi, Imbabura y Pichincha, las cuales se encuentran ubicadas en la parte norte del Ecuador. Como resultado se determinó que el modelo tiene un RMSE de 21 (m), destacando que los sitios con alta pendiente tienen una influencia sobre la precisión vertical, vacíos de datos y el signo de los errores, mientras que en los sitios de baja y media pendiente, los errores son menores. El RMSE obtenido en Mancero et al. (2015) difiere de los resultados obtenidos en la presente investigación, debido a que los puntos empleados en la presente investigación fueron capturados en las vías del Ecuador, y es por ello que las alturas se adaptaron mejor a la forma del terreno respecto a las alturas capturadas en zonas de alto relieve o donde prevalezca la vegetación.

Falorni y col. (2005) utilizaron 112 puntos para evaluar el MDT SRTM en las cuencas de los ríos Washita y Tolt, en Estados Unidos. Washita se caracteriza por tener una topografía con bajo relieve a excepción de las colinas más empinadas ubicadas en la parte central del norte de la cuenca. Tolt se caracteriza por una topografía cambiante desde las escarpadas montañas de la parte más oriental de la cuenca, con un alto relieve y pendientes pronunciadas hasta las llanuras tierras bajas. La diferencia con National Geodetic Survey (NGS) fue de 7,18 RMSE, mientras que con GPS fue de 8,94 RMSE. Hirt, Filmer y Featherstone (2010) determinaron que el MDT SRTM de 90 metros para Australia tiene un RMSE de 6 metros. Con todos los resultados expuestos, se demuestra que el RMSE obtenido del MDT SRTM en ambas resoluciones están dentro del rango esperado.

Tierra (2009) utilizó 144 puntos para evaluar la

precisión de los modelos geopotenciales globales (MGGs) EGM 96 y EGM 08 en el Ecuador continental y determinó que el MG EGM96 tiene una desviación estándar de 1,35 metros, mientras que el MG EGM08 tiene una desviación estándar de 0,93 metros. Los resultados obtenidos en Tierra (2009) concuerdan con los resultados obtenidos en la presente investigación, confirmando la mejora que existe entre el MG EGM 08 respecto al MG EGM 96, aunque en ambos casos se utilizaron pseudo ondulaciones geoidales para evaluar a los MGs. Debido a que en Tierra y Acurio (2014) no se detallan los procesos de evaluación del MG del IGM, es difícil definir el motivo de discrepancia con el resultado que obtuvo, pero la presente investigación mantiene el RMSE obtenido, ya que se presentó los estadísticos que los respaldan.

Kotsakis y col. (2010) usaron 1542 puntos que contaban con datos de GPS y nivelación de la red de triangulación nacional helénica para evaluar la precisión del MG EGM 08, determinando una desviación de 0,14 metros. Martínez y Bethencourt (2012) utilizaron la línea de nivelación geométrica de alta precisión existente en Puerto Rico, con una longitud de 160 kilómetros, para determinar la precisión de los MGs EGM 96 y EGM 08, determinando que la desviación estándar del MG EGM96 es de 0,055 metros, mientras que el EGM08 fue de 0,029 metros. Ambos estudios demuestran cómo el relieve tan pronunciado que tiene Ecuador influye en la pérdida de precisión.

5 Conclusiones

El MDT ALOS PALSAR mostró las mejores características estadísticas, tanto con las alturas ortométricas como con las alturas elipsoidales. Los MDTs SRTM 30, ALOS PALSAR de 30 y 12,5 metros e IGM

pueden ser empleados en proyectos que requieran una precisión vertical inferior a los 10 metros o generar cartografía a escala menor a 1:50 000, en cualquier sistema de altura, ya sea altura elipsoidal o altura ortométrica.

La resolución espacial es un factor que influye directamente en la precisión vertical de los MDTs. El MDT SRTM de 30 metros mejora alrededor de 3 metros el RMSE en todos los sistemas de alturas respecto al MDT SRTM de 90 metros, mientras que el MDT ALOS PALSAR de 12,5 metros mejora en el orden de los 20 centímetros el RMSE respecto al MDT ALOS PALSAR de 30 metros.

La evaluación de los MGs permite determinar que el MG EGM 08 se puede utilizar en proyectos que requieran alturas ortométricas con una precisión vertical inferior a los 1,25 metros o una escala menor a 1:5 000, siempre y cuando las alturas elipsoidales tengan una precisión centimétrica mayor a los 40 centímetros. Los MGs EGM 96 e IGM pueden ser utilizados en proyectos que requieran una altura ortométrica con precisión inferior a los 2,5 metros o una escala de trabajo menor a 1:10 000, siempre y cuando las alturas elipsoidales tengan precisión centimétrica mayor a los 80 centímetros.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Geoint CÍA LTDA por facilitar el acceso al software utilizado y al Instituto Geográfico Militar por facilitar la información del proyecto de nivelación geométrica y el modelo digital de elevación, insumos sin los cuales no se podría haber llevado a cabo esta investigación.

Referencias

Abbondati, F. y col. (2020). «Rural Road reverse engineering using bim: an italian case study». En: *Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering*. Ed. por Department of Construction Economics Property Vilnius Gediminas Technical University. Vol. 11, págs. 1-7.

Alaska Satellite Facility (2021). *ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction*.

Anselin, L. (1995). «Local indicators of spatial association-LISA». En: *Geographical analysis* 27.2, 93-115. Online: <https://n9.cl/buf79h>.

Cañizares, E. (2015). «Análisis del Sistema de Alturas para la Red de Control Básico Vertical del Ecuador». Tesis de maestría. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Drewes, H. y col. (2002). «Scientific foundations of the SIRGAS vertical reference system». En: *Vertical Reference Systems: IAG Symposium Cartagena, Colombia, February 20-23, 2001*, págs. 297-301.

ESRI (2020). *Cómo funciona Análisis de clúster y de valor atípico (I Anselin local de Moran)*.

Falorni, G. y col. (2005). «Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission». En: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 110.F2, Online: <https://n9.cl/xtg90>.

Federal Geographic Data Committee (1998). *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. U.S. Geological Survey.

Gil-Docampo, M. y col. (2023). *3D geometric survey of cultural heritage by UAV in inaccessible coastal or shallow aquatic environments*. Inf. téc. Archaeological Prospection.

Hirt, C., M. Filmer y W. Featherstone (2010). «Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia». En: *Australian Journal of Earth Sciences* 57.3, 337-347. Online: <https://n9.cl/2l9cp>.

Kotsakis, C. y col. (2010). «Gravity, Geoid and Earth Observation». En: *International Association of Geodesy Symposia*. Cap. Evaluation of EGM08 Using GPS and Leveling Heights in Greece, págs. 481-488.

Lemoine, F. y col. (1998). *The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96*. Inf. téc. National Aeronautics and Space Administration, Greenbelt.

Li, Z., C. Zhu y C. Gold (2004). *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC press.

Luna, M. P. y col. (2017). «Methodological approach for the estimation of a new velocity model for continental Ecuador». En: *Open Geosciences* 9.1, págs. 719-734.

Mancero, H. y col. (2015). «Evaluación de Modelos Digitales de Elevación obtenidos por diferentes sensores remotos». En: *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, págs. 107-111.

Martínez, E. y A. Bethencourt (2012). «Comparación de la precisión de los Modelos Geopotenciales EGM96 y EGM08 en la zona del Caribe». En: *X Topcart 2012. I Congreso Iberoamericano de Geomática y Ciencias de la Tierra*.

McClean, F., R. Dawson y C. Kilsby (2020). «Implications of using global digital elevation models for flood risk analysis in cities». En: *Water Resources Research* 56.10, e2020WR028241.

Orejuela, I.P. y col. (2021). «Geoid undulation modeling through the Cokriging method—A case study of Gua-

- yaquil, Ecuador». En: *Geodesy and Geodynamics* 12.5, págs. 356-367.
- Pavlis, N. y col. (2012). «The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)». En: *Journal of geophysical research: solid earth* 117. Online: <https://n9.cl/f0ntr7>.
- Rabus, B. y col. (2003). «The shuttle radar topography mission-a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar». En: *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 57.4, 241-262. Online: <https://n9.cl/hkgft>.
- Sánchez, L. (2015). «IAG Resolutions Adopted by the IAG Council at the XXVIth IUGG General Assembly». En: *XXVIth IUGG General Assembly*. Praga: IAG.
- Seeber, G. (1993). *Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications*. Walter de Gruyter GmbH y Co. KG.
- Sinde-González, I. y col. (2021). «Biomass estimation of pasture plots with multitemporal UAV-based photogrammetric surveys». En: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 101, pág. 102355.
- Tachikawa, T. y col. (2011). *ASTER global digital elevation model version 2-summary of validation results*. Inf. téc. NASA.
- Tierra, A. (2009). «Evaluación del EGM08 y EGM96 en el Ecuador a partir de datos de GPS y nivelación geométrica». En: *Revista Geoespacial* 6, 72-80. Online: <https://n9.cl/udlci>.
- Tierra, A. y V. Acurio (2014). «Modelo Neuronal Geoidal Geométrico del Ecuador Continental - MNGGE14». En: *Simposio SIRGAS 2014*.
- Villasenín, S. Peña, M. Gil-Docampo y J. Ortiz-Sanz (2017). «3-D modeling of historic façades using SFM photogrammetry metric documentation of different building types of a historic center». En: *International Journal of Architectural Heritage* 11.6, págs. 871-890.
- Zafar, S. y A. Zaidi (2019). «Impact of urbanization on basin hydrology: a case study of the Malir Basin, Karachi, Pakistan». En: *Regional Environmental Change* 19, págs. 1815-1827.