

---

# ALTURAS DEL PICO BOLÍVAR Y OTRAS CIMAS ANDINAS

---

## VENEZOLANAS A PARTIR DE OBSERVACIONES GPS

---

Omar J. Pérez, Melvyn Hoyer, José N. Hernández, Carlos Rodríguez, Víctor Márques, Nicolás Sué, José R. Velandia y Diego Deiros

### RESUMEN

A partir de una serie de mediciones realizadas en 2002 con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en las cimas de los picos Bolívar, Piedras Blancas, Toro y Mucuñuque, así como en otros cuatros sitios cercanos a esas montañas, todas localizadas en los Andes de Venezuela, y usando un modelo Geoidal local venezolano recientemente obtenido, fueron determinadas las alturas sobre el nivel del mar de dichos picos. La altura obtenida

para el Pico Bolívar,  $4978,4 \pm 0,4m$ , la montaña más alta de Venezuela, es 23,6m menor que la altura obtenida (5002m) por Alfredo Jahn en 1912, la cual fue calculada a partir de una triangulación geodésica y observaciones barométricas realizadas en la aldea ciudad de Mérida, y es 28,6m menor que la altura oficial vigente (5007m) desde 1928.

### SUMMARY

Based on a series of GPS measurements made in 2002 on top of peak Bolívar, the highest Venezuelan mountain, and on seven other nearby sites along the Venezuelan Andes, including three other of the highest peaks of the country; and using a recently derived local geoid for Venezuela, the orthometric height of Peak Bolívar,  $4978.4 \pm 0.4 m$ , and of other nearby mountains

were determined. This height is 23,6m less than that obtained (5002m) by Alfredo Jahn in 1912, calculated by geodesic triangulation and barometric measurements in the nearby town of Mérida, and it is 28.6m less than the current official height of 5007m established in 1928.

---

### Introducción

El propósito de este trabajo fue determinar la altura sobre el nivel del mar (altura ortométrica) del Pico Bolívar, la mayor altura venezolana emblema de la geografía del país, y de otros picos localizados en los Andes de Venezuela, a partir de observaciones dentro del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). La altura oficial vigente del Pico Bolívar, de 5007m, data de 1928 (MOP, 1928), pero el origen del número en sí es incierto. El cálculo de mayor calidad científica realizado a principios del siglo XX se debe a Jahn (1912). Este famoso explorador y científico combinó observaciones barométricas realizadas en la ciu-

dad de Mérida (Figura 1) y en la costa norte de Venezuela, con una triangulación geodésica realizada desde Mérida, y concluyó que la altura del Pico Bolívar era de 5002m. Estimaciones anteriores habían sido hechas por Codazzi (1840), 4850m, y Sievers (1886), 4700m, pero sus cálculos fueron realizados a partir de estimaciones visuales desde sitios alejados al pico, una vez que las alturas de esos sitios habían sido estimadas a partir de observaciones barométricas.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) provee alturas elipsoidales referidas al WGS84 (*World Geodetic System* 1984) con una exactitud centimétrica. Si dichas alturas son combinadas con un

buen modelo de geoide local entonces se pueden obtener alturas ortométricas (Li y Götze, 2001) con una exactitud decimétrica o mejor, dependiendo de la calidad del modelo geoidal local (Dodson, 1995; Featherstone *et al.*, 1998). El GPS se ha convertido en la mejor herramienta para calcular las alturas de montañas donde el difícil acceso impide realizar mediciones convencionales de nivelación geodésica, tal como es el caso del Pico Bolívar. Por ejemplo, el Sistema ha sido usado en años recientes para determinar las alturas de montañas tales como el Everest ([www.nationalgeographic.com/features/99/everest/dispatches\\_start.html](http://www.nationalgeographic.com/features/99/everest/dispatches_start.html)), Kilimanjaro (Saburi *et al.*, 2000), Aconcagua ([www.leica-geosystems.com/news/2001/aconcagua\\_results\\_es.htm](http://www.leica-geosystems.com/news/2001/aconcagua_results_es.htm)) y Mont Blanc ([www.ign.fr/telechargement/Pi/C\\_PRESSE/CP\\_Mt\\_Blanc\\_2003.pdf](http://www.ign.fr/telechargement/Pi/C_PRESSE/CP_Mt_Blanc_2003.pdf)). Las alturas así obtenidas difieren por metros o más de las alturas oficiales menos precisas calculadas a partir de triangulaciones geodésicas con teodolitos, instrumentos que son seriamente afectados por la refracción atmosférica y la gravedad local, en la década de 1950 (Gulatee, 1952; Pugh, 1954).

En la década de 1990 Saler y Abad (1993) estimaron la altura del Pico Bolívar en 4980,8m a partir de observaciones GPS en el pico y en la ciudad de Mérida. El resultado, sin embargo, no fue validado oficialmente por el Insti-

---

### PALABRAS CLAVE / Altura Ortométrica / Andes Venezolanos / GPS / Pico Bolívar /

---

Recibido: 10/09/2004. Aceptado: 02/03/2005.

Omar J. Pérez. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Simón Bolívar (USB), Caracas, Venezuela

Melvyn Hoyer. Laboratorio de Geodesia Física y Satelital, la Universidad del Zulia, Venezuela

José N. Hernández. Departamento de Geodesia, Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

Carlos Rodríguez. Departamento de Ciencias de la Tierra, USB, Venezuela.

Víctor Márques. Departamento de Ciencias de la Tierra, USB, Venezuela.

Nicolás Sué. Departamento de Ciencias de la Tierra, USB, Venezuela.

José R. Velandia. Departamento de Ciencias de la Tierra, USB, Venezuela.

Diego Deiros. Departamento de Ciencias de la Tierra, USB, Venezuela.

Com base em uma série de medições realizadas em 2002 com o Sistema de Posicionamento Global (GPS) nos cumes dos picos Bolívar, Piedras Blancas, Toro e Mucuñuque, assim como em outros quatros lugares perto dessas montanhas, todas localizadas nos Andes da Venezuela, e usando um modelo Geoidal local venezuelano recentemente obtido, foram determinadas as alturas sobre o nível do mar de ditos picos. A altura obtida

para o Pico Bolívar,  $4978,4 \pm 0,4m$ , a montanha mais alta da Venezuela, é 23,6m menor que a altura obtida (5.002 m.) por Alfredo Jahn em 1912, a qual foi calculada a partir de uma triangulação geodésica e observações barométricas realizadas na vizinha cidade de Mérida, e é 28,6 m. menor que a altura oficial vigente (5.007m.) desde 1928.

tuto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), antigua Dirección General de Cartografía Nacional, porque la antena del receptor GPS no fue colocada en el tope de la cima y debido a que no se utilizó un modelo geoidal apropiado en los cálculos. El resultado, sin embargo, fuertemente sugería que la altura oficial del pico, de 5007m, era errada. Más aún, al revisar los planos de ingeniería originales utilizados para la construcción del Teleférico de Mérida en 1956 se encontró que al Bolívar se le asignó una altura de 4976m, lo cual no fue hecho de conocimiento público.

En 2002 el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad Simón Bolívar, el Laboratorio de Geodesia Física y Satelital de la Universidad del Zulia y el Departamento de Geodesia del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar llevaron a cabo una campaña de mediciones GPS destinada a determinar la altura del Pico Bolívar y otras montañas aledañas. La campaña GPS, bautizada con el nombre Bolívar 2002, fue diseñada para obtener las alturas elipsoidales referidas al Sistema WGS84 de las elevaciones en cuestión. Dichas alturas serían posteriormente combinadas con un Modelo Geoidal recientemente obtenido para Venezuela (Hoyer *et al.*, 2004) para así deducir las alturas ortométricas correspondientes. El principal resultado indica que el Pico Bolívar está a  $4978,4 \pm 0,4m$  sobre el nivel del mar, unos 28,6m por debajo que lo oficialmente establecido en 1928. A continuación se describe la "Campaña GPS Bolívar 2002", es de-

cir, la manera cómo se obtuvieron los datos así como las técnicas utilizadas en el procesamiento geodésico, y luego se presentan los resultados finales del trabajo.

### La Campaña GPS Bolívar 2002

La Figura 1 muestra los ocho sitios GPS que conformaron la Campaña. Dichos sitios fueron ocupados (Figura 2) el 01 de Febrero de 2002, de la siguiente manera: Observatorio, Aguada, Loma Redonda y Toro fueron medidos simultáneamente durante lapsos de ~1 a ~5 horas entre las ~13:00 y las ~18:00 horas GMT, mientras que en los otros sitios se midió simultáneamente con Observatorio a partir de las ~18:00 horas GMT, durante lapsos de ~1.5 a ~4 horas. Las dificultades en el acceso a las más altas cimas impidieron lapsos de observación mayores en ellas, pero esto no afecta en modo alguno los resultados.

Los datos fueron obtenidos usando receptores GPS Ashtech Z-Surveyor de doble frecuencia, muestreando cada 10s con una máscara de elevación de  $15^\circ$ . Las antenas receptoras fueron colocadas sobre roca fresca en el tope de cada una de las cimas (Figura 3), en ninguna de las cuales había nieve. El software utilizado en el procesamiento geodésico fue el Bernese versión 4.2 de la Universidad de Berna (Rothacher *et al.*, 1993). El punto Observatorio fue seleccionado como el punto de referencia local a partir del cual se calcularían las coordenadas geodésicas y alturas elipsoidales (*International Terrestrial Reference Frame ITRF2000*,



Figura 1. Sitios GPS (triángulos) que conformaron la Campaña GPS Bolívar 2002 para determinar las elevaciones del Pico Bolívar y otras cimas aledañas en los Andes Venezolanos. El sitio Observatorio es el punto de referencia local utilizado para derivar las coordenadas precisas y alturas elipsoidales de los demás puntos, en el sistema ITRF2000, época 2002.1, WGS84. Las antenas receptoras fueron colocadas en cada uno de los topos de las cimas estudiadas.

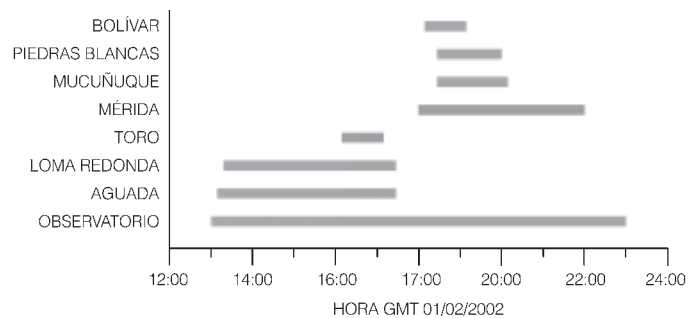


Figura 2. Diagrama que muestra los lapsos de observación GPS en los sitios medidos durante la Campaña GPS Bolívar 2002, el 01 Febrero 2002. Para procesar los datos la campaña fue dividida en dos sub-campañas, una antes y otra después de las 18:00 horas GMT, y luego se combinaron las ecuaciones normales correspondientes utilizando técnicas estándar en geodesia GPS, para así producir las coordenadas precisas y alturas elipsoidales que se dan en la Tabla I, utilizando a Observatorio como punto local de referencia.



Figure 3. Antena receptora GPS colocada en el tope del Pico Bolívar el 01-02-2002.

Epoca 2002.1) de los demás puntos, usando técnicas estándar (Blewitt *et al.*, 1992; Rothacher *et al.*, 1993; Zumberge *et al.*, 1997; Dixon *et al.* 1998; Heflin *et al.*, 1999; Pérez *et al.*, 2001). Las coordenadas precisas de Observatorio fueron previamente obtenidas a partir de tres días de observación simultánea con cuatro estaciones GPS del Servicio Internacional GPS para Geodinámica (IGS) localizadas (Figura 4) en Maracaibo, Venezuela, Islas Galápagos costa afuera de Ecuador, Fortaleza en Brasil y la Isla de St. Croix en el Caribe norte. Asimismo, se utilizaron los correspondientes archivos de efemérides satelitales y correcciones de reloj provistos por el IGS. Cabe señalar que procesamientos totalmente independientes efectuados con el mismo software pero con vinculaciones diferentes al punto Observatorio arrojaron resultados prácticamente idénticos.

### Resultados

La Tabla I muestra las coordenadas geodésicas y alturas elipsoidales calculadas para los picos investigados en 2002. Usando estas alturas elipsoidales y las ondulaciones geoidales (separación geoido-elipsoide WGS84) pro-

vistas por el Modelo Combinado del Geoide para Venezuela MGCV04 de Hoyer *et al.*, (2004), las alturas ortométricas son fácilmente calculadas (Dodson, 1995; Li y Götze, 2001). Dichas alturas aparecen en la Tabla I. Con la excepción del Pico Bolívar, las alturas calculadas para los picos Toro, Mucuñuque y Piedras Blancas son casi idénticas a sus alturas oficiales, las cuales en el caso de las últimas tres montañas datan de 1951 (MOP, 1951).

El Modelo MGCV04 fue computado a partir de un gran número de mediciones terrestres de gravedad, de nivelación geométrica diferencial y observaciones GPS en

territorio venezolano, junto con el Modelo Geopotencial Global EGM96 (Lemoine *et al.*, 1998) y un modelo digital del terreno para la corrección topográfica, usando (Hoyer *et al.*, 2004) el Método de Colocación por Cuadrados Mínimos. Esta técnica ha sido recomendada y utilizada para conseguir geoides locales en otras partes del mundo (Featherstone *et al.*, 1998).

### Discusión y Conclusiones

Aunque el Modelo MGCV04 es un excelente modelo geoidal para Venezuela, no deja de ser fuente importante de error en la determinación de las alturas ortométricas. Sin embargo, las discrepancias entre las ondulaciones observadas y las generadas por el modelo no sobrepasan los  $\pm 0,2\text{m}$  en el 92% de los casos de una muestra de 235 sitios analizados (Hoyer *et al.*, 2004), mientras que los errores asociados a las alturas elipsoidales calculadas en este trabajo están en el rango de  $\pm 0,01$  a  $\pm 0,22\text{m}$  (Tabla I). Por ello, el error final en el cálculo de nuestras alturas ortométricas está en el orden de los  $\pm 0,2$  a  $\pm 0,4\text{m}$ , siendo esta última cifra el caso del Pico Bolívar (Tabla I).

Como un último chequeo de las bondades de los resultados se llevó a cabo un experimento independiente adicional. La altura ortométrica del punto

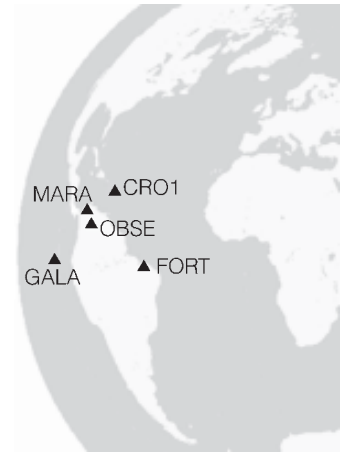


Figure 4. Estaciones IGS medidas simultáneamente durante tres días con Observatorio para calcular las coordenadas precisas y altura elipsoidal de este punto local de referencia en ITRF2000, época 2002.1. MARA: Maracaibo, Venezuela; GALA: Islas Galápagos, Ecuador; FORT: Fortaleza, Brasil; CRO1: Isla de St. Croix, EEUU.

Observatorio fue determinada por nivelación geodésica diferencial a partir de un "benchmark" que pertenece a la Red Geodésica Venezolana de Control Vertical, localizado en la ciudad de Apartaderos (Figura 1), a unos pocos kilómetros de Observatorio. La altura resultante ( $3566,9 \pm 0,1\text{m}$ ) es muy similar a la obtenida en el presente trabajo ( $3566,3 \pm 0,2\text{m}$ ), pero difiere significativamente de la altura que se deduce a partir del Modelo Geopotencial Global EGM96

TABLA I  
RESULTADOS DE LA CAMPAÑA GPS BOLÍVAR 2002

Sitio	Lat (N)	Long (O)	$A_{WGS84}(\text{m})$	$N_{MGCV04}(\text{m})$	A(m)
Observatorio	8°47'7,7078" $\pm 0,3373\text{E}-6$ "	-70°52'5,3941" $\pm 0,5903\text{E}-6$ "	3567,17 $\pm 0,01$	0,91 $\pm 0,20$	3566,26 $\pm 0,21$
Toro	8°31'44,3997" $\pm 4,5540\text{E}-6$ "	-71°5'27,7375" $\pm 6,7207\text{E}-6$ "	4729,27 $\pm 0,11$	1,74 $\pm 0,20$	4727,53 $\pm 0,31$
Mucuñuque	8°45'33,1440" $\pm 4,9433\text{E}-6$ "	-70°48'2,3770" $\pm 11,8780\text{E}-6$ "	4609,47 $\pm 0,21$	0,49 $\pm 0,20$	4608,98 $\pm 0,41$
Piedras Blancas	8°51'31,0870" $\pm 10,4897\text{E}-6$ "	-71°57'6,3332" $\pm 14,3756\text{E}-6$ "	4737,57 $\pm 0,22$	-10,64 $\pm 0,20$	4748,21 $\pm 0,42$
Bolívar	8°32'27,9847" $\pm 6,6653\text{E}-6$ "	-71°2'53,9598" $\pm 9,9643\text{E}-6$ "	4980,31 $\pm 0,22$	1,88 $\pm 0,20$	4978,43 $\pm 0,42$

$A_{WGS84}$ : altura elipsoidal WGS84;  $N_{MGCV04}$ : ondulación geoidal obtenida a partir del modelo MGCV04 (Hoyer *et al.*, 2004); A: altura ortométrica. Las coordenadas geodésicas están en el sistema ITRF2000, época 2002.1

(3568,2m), lo cual aumenta la confianza en el modelo MGCV04.

En conclusión, en este trabajo fue determinada la altura ortométrica del Pico Bolívar (4978,4 ±0,4m), la mayor del país y emblema de la geografía nacional, así como de otras montañas aledañas, a partir de mediciones GPS y de un modelo de geoid local recientemente computado (Hoyer *et al.*, 2004). La altura del Pico Bolívar es 28,6m menor que la altura oficial que data de 1928 (MOP, 1928). Esta nueva altura será adoptada a partir de ahora por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar como la altura oficial de dicho pico y sustituye a aquella que preliminarmente fuera dada a conocer en el Diario El Universal de Caracas el 08/11/2002, la cual había sido obtenida tras el uso de un modelo Geoidal de menor precisión por Hoyer *et al.*, (2002), anterior al Modelo MGCV04 de Hoyer *et al.*, (2004).

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a J. Torres, O. García, R. Castellanos, D. Díaz, K. Malavé, C. Martínez y M. Guzmán, estudiantes de la Universidad Simón Bolívar; a C. Bravo y M. Muñoz, estudiantes de La Universidad del Zulia; y a A. Valera y J. G. Espinoza, del

Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, por operar los receptores GPS durante la Campaña GPS Bolívar 2002. Agradecemos a los guías del Instituto Nacional de Parques del Estado Mérida, quienes llevaron a los operadores a los picos Bolívar, Toro, Mucuñuque y Piedras Blancas. Este trabajo fue parcialmente financiado por la Universidad Simón Bolívar y el Laboratorio de Geodesia Física y Satelital de La Universidad del Zulia.

#### REFERENCIAS

Blewitt G, Heflin MB, Webb FH, Lindqwister UJ, Malla RP (1992) International Terrestrial Reference Frame using GPS. *Geophys. Res. Lett.* 19: 853-856.

Codazzi A (1840) *Atlas de la República de Venezuela*. Lithographie de Thierry. Paris, Francia. 45 pp.

Dixon T, Farina F, DeMets Ch, Jansma P, Mann P, Calais E (1998) Relative motion between the Caribbean and North American plates and related boundary zone of deformation from a decade of GPS observations. *J. Geophys. Res.* 103: 15157-15182.

Dodson A (1995) The status of GPS for height determination. *Survey Rev.* 33: 66-76.

Featherstone W, Dentith M, Kirby J (1998) Strategies for the accurate determination of orthometric heights from GPS. *Survey Rev.* 34: 278-295.

Gulatee BC (1952) Heights of Himalayan snow peaks. *J.*

*Meteorol. Geophys.* (Delhi) 3: 165-172.

Heflin I, Bertiger W, Blewitt G, Freedman A, Hurst K, Lichten S, Lindqwister U, Vigue Y, Webb F, Yunnck T, Zumberge J (1999) Global geodesy using GPS without fiducial sites. *Geophys. Res. Lett.* 19: 131-134.

Hoyer M, Wildermann E, Acuña G, Hernández J, Nahmens A, Velandia J (2002) Determinación del Geoide en Venezuela mediante la colocación de cuadrados mínimos. *Mem. IV Congr. Int. de Geodesia y Cartografía*. Caracas, Venezuela, 7 pp.

Hoyer M, Wildermann E, Suárez H, Hernández J (2004) Modelo Geoidal Combinado para Venezuela (MGCV04). *Interciencia* 29: 660-666.

Jahn A (1912) Orografía de la cordillera venezolana de Los Andes. *Revista Técnica del Ministerio de Obras Públicas de Venezuela*, 2(19): 451-468.

Lemoine F, Kenyon S, Factor J, Trimer R, Pavlis N, Chinn D, Cox C, Kloslo S, Luthcke S, Torrence M, Wang Y, Williamson R, Pavlis E, Rapp R, Olson T (1998) *The development of the joint NASA GSFC and National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*. Technical paper NASA/TP-1998-206861. NASA. Greenbelt, MD, EEUU. 575 pp.

Li X, Götze H (2001) Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy and geophysics. *Geophysics* 66: 1660-1668.

MOP (1928) *Mapa Físico y Político de los Estados Unidos de Venezuela*. 1ª ed. Escala 1:1000000. Dirección de Cartografía Nacional, Ministerio

de Obras Públicas. Caracas, Venezuela.

MOP (1951) *Mapas Topográficos escala 1:100000*. Dirección de Cartografía Nacional, Ministerio de Obras Públicas. Caracas, Venezuela. Folios 5941, 5942, 6041 y 6042.

Pérez OJ, Bilham R, Bendick R, Hernández J, Hoyer M, Velandia J, Moncayo C, Kozuch M (2001) Velocidad relativa entre las placas del Caribe y Sudamérica a partir de observaciones dentro del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el norte de Venezuela, *Interciencia* 26: 69-74.

Pugh KT (1954) Height determination of Kilimanjaro. *Empire Survey Review*, XII(91): 194-206.

Rothacher M, Beutler G, Gurtner W, Brockmann E, Mervart L (1993) *Bernese GPS software version 4.0*. Astronomical Institute, University of Berne. Suiza. 418 pp.

Saburi J, Angelakis N, Jaeger R, Illner M, Jackson P (2000) Height measurement of Kilimanjaro. *Survey Rev.* 35: 552-562.

Saler H, Abad C (1993) La altura del Pico Bolívar. *Rev. Geogr. Venez.* 33: 277-287.

Sievers W (1886) Über Schneeverhältnisse in der Cordillere Venezuelas. *Jahresbericht der Geographischen Gesellschaft in München*. Munich, Alemania. pp. 54-57.

Zumberge JF, Heflin M, Jefferson D, Watkins M, Webb F (1997) Precise point positioning for efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.* 102: 5005-5017.