

Tropospheric propagation effects at GPS observations in Venezuela

Gustavo Acuña, Melvin Hoyer and Eugen Wildermann

*Departamento de Geodesia Superior, Escuela de Ingeniería Geodésica
Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Apdo. 526, Maracaibo 4011-A, Venezuela
E-mail: gacuna@luz.ve*

Abstract

Some principal aspects of modelling tropospheric refraction effects on GPS signal propagation are considered using data from three high quality measuring campaigns in Venezuela under different meteorological, instrumental and observational conditions.

GPS data from CASA'93, SIRGAS'95 y the geoid traverse around Maracaibo Lake have been processed by BERNESE v3.4 software using different meteorological modelling. The influence of tropospheric model selection, meteorological parameters, tropospheric zenith residual factor estimation, observation sessions, cut off angle, etc., have been studied resulting at coordinate changes from millimeters to centimeters at baselines ranging between 50 and 880 kilometers with height changes between 14 y 3500 meters.

Key words: GPS, tropospheric effect, Venezuela.

Efectos de propagación troposférica sobre mediciones GPS realizadas en Venezuela

Resumen

El trabajo presenta el estudio de los principales aspectos relacionados con el modelaje del efecto de refracción troposférica en el procesamiento de señales GPS medidas en Venezuela, a partir de los resultados obtenidos de una investigación donde se utilizó data proveniente de tres proyectos de alta exactitud llevados a cabo en diversas áreas geográficas del país, con distintos objetivos y bajo diferentes condiciones meteorológicas, instrumentales y observacionales.

La investigación comprende una gran cantidad de pruebas de procesamiento y análisis desarrolladas con el software BERNESE v3.4, utilizando observaciones GPS de los proyectos CASA'93, Perfil Geoidal alrededor del Lago de Maracaibo y SIRGAS'95, con data meteorológica estándar global, local y observada. Bajo diferentes modalidades de procesamiento se estudió la influencia de la variación de factores como: selección del modelo de corrección, parámetros meteorológicos, sesión de observación, estimación y número de factores troposféricos cenitales residuales y ángulo de elevación. La variación de estos factores produjo cambios de coordenadas en el orden de milímetros a centímetros para líneas base cuyas longitudes oscilan entre 50 a 880 kilómetros, con diferencias de altura entre 14 y 3500 metros.

Palabras clave: GPS, efecto troposférico, Venezuela.

Introducción

Las señales GPS al atravesar en su trayecto de propagación satélite-receptor las capas infe-

riores de la atmósfera (troposfera y otras regiones hasta una altura de 80 km aprox.) sufren cambios en velocidad y dirección, tal efecto es conocido como *retraso de propagación troposférico* [1].

Estas capas de la atmósfera se caracterizan por ser un medio no-dispersivo para las señales GPS (la velocidad de propagación es independiente de la frecuencia) debido a que son eléctricamente neutrales. Por esta razón, el retraso troposférico no puede determinarse directamente por mediciones de doble frecuencia (L1 y L2), por el contrario, su determinación depende de modelar adecuadamente la estructura de la atmósfera cercana a la superficie utilizando parámetros meteorológicos medios (estándar) o mediciones de temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, y ocasionalmente, del contenido de vapor de agua a lo largo del camino de propagación [2].

En la actualidad existen muchos modelos capaces de estimar en un 92% a 95% el retardo troposférico total, por ejemplo, Hopfield, Saastamoinen, Chao, Marini, Lanyi, etc. Sin embargo, inexactitudes en los modelos atmosféricos estándar, en la instrumentación meteorológica y efectos climáticos locales pueden no reflejar las condiciones de la atmósfera a niveles superiores de cada estación, trayendo como consecuencia la estimación errónea del efecto que conduciría a resultados equivocados.

En posicionamiento geodésico preciso con GPS, el efecto troposférico constituye una importante limitación de exactitud, especialmente en la componente vertical. Cuando existen grandes diferencias en los parámetros atmosféricos entre las estaciones, el retardo troposférico afecta predominantemente las diferencias de altura observadas. Este efecto es particularmente crítico en zonas montañosas y en zonas de bajas latitudes que muestran condiciones climáticas extremas (por ejemplo, Venezuela) debido a la presencia de cambios en los altos índices de humedad relativa y elevadas temperaturas [3], [4].

En Venezuela, la mayoría del procesamiento de mediciones GPS destinadas a labores de posicionamiento geodésico preciso, se lleva a cabo usando principalmente los modelos troposféricos convencionales de Saastamoinen y Hopfield, donde por lo general se utilizan como datos de entrada valores meteorológicos de una atmósfera estándar global. Además, la corrección troposférica se realiza en el modo de procesamiento diferencial sin considerar la estimación de factores troposféricos cenitales como incógnitas en el ajuste de la red GPS, indistintamente

de la distancia, diferencia de altura o características meteorológicas observadas en las líneas base involucradas [5].

Lógicamente, el procesamiento de mediciones GPS bajo las condiciones anteriormente señaladas, arroja errores significativos en la estimación de posiciones de alta exactitud. Estudiar los diferentes factores que inciden en el modelaje troposférico en Venezuela e implementar nuevas metodologías de cálculo de factible aplicación en el país que contribuyan a solventar la situación antes planteada, constituye la justificación principal de esta investigación.

En el trabajo, a partir de diversas pruebas y análisis, se evalúan las características del efecto troposférico en líneas base GPS medidas en Venezuela bajo diferentes condiciones. Claramente, los resultados de la investigación son válidos para espacios geográficos similares al venezolano, principalmente en cuanto a clima, topografía y bajas latitudes.

Datos utilizados

Se describen a continuación los diferentes conjuntos de datos utilizados en la investigación.

Mediciones GPS

Comprenden parte importante de las mediciones GPS realizadas en tres proyectos de alta exactitud desarrollados en el país con distintos fines y bajo diversas condiciones de observación. Las mediciones se caracterizan por haber sido ejecutadas con instrumental de doble frecuencia durante largas sesiones de día y/o noche. Se incluyen mediciones del proyecto geodinámico CASA'93 [6], del perfil de ondulaciones del geoide alrededor del Lago de Maracaibo [7], y del proyecto SIRGAS'95 [8].

Proyecto CASA'93: se eligieron 4 líneas base medidas con equipos Wild Leica 200 en la región occidental de Venezuela (Figura 1), cada una durante dos días, en sesiones de observación de 7 horas de duración. Las líneas presentan distancias que oscilan entre 50.4 a 194.5 km con diferencias de altura entre 14.7 y 3547.7 m.

Proyecto Perfil GPS-Nivelación'93 alrededor del Lago de Maracaibo: fue elegida sólo una parte del perfil, desde Paraguaipoa hasta La

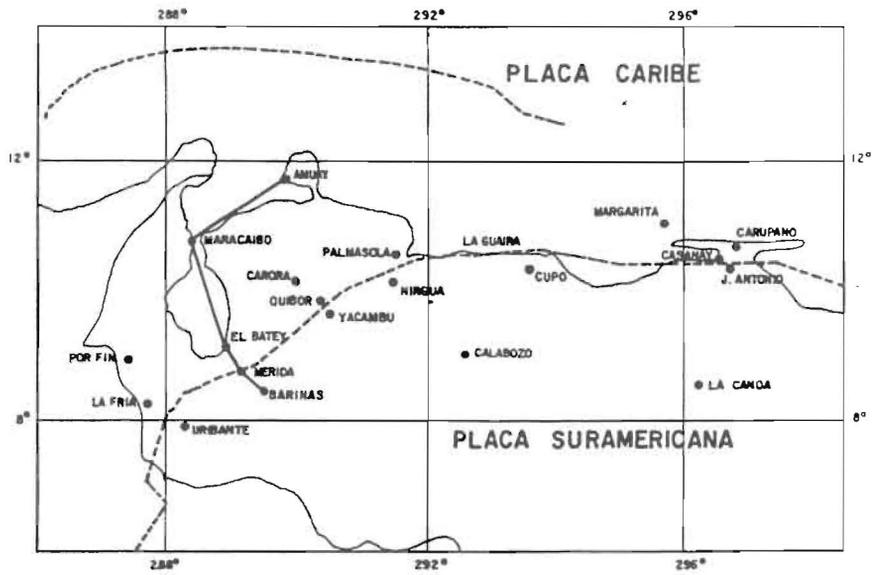


Figura 1. Líneas base GPS del proyecto CASA'93.

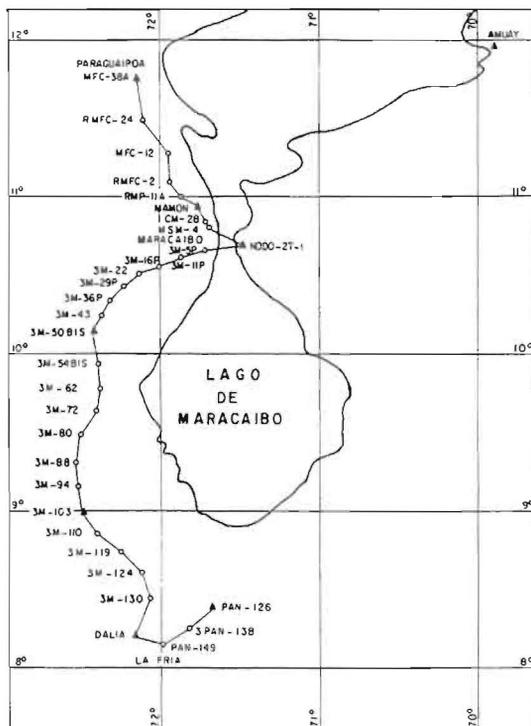


Figura 2. Líneas base GPS del proyecto Perfil GPS-Nivelación'93 alrededor del Lago de Maracaibo.

Fría al sur-oeste del Lago de Maracaibo (Figura 2). El trayecto tiene una extensión de 501.2 km y comprende un total de 27 estaciones, conectadas a través de 26 líneas base cuyas distancias varían de 9.3 a 35.8 km. La mayor diferencia en altura entre las estaciones es 146.6 m. aprox. Esta parte del perfil fue medida con equipos Trimble 4000 SST durante 4 días en tramos de 8 estaciones, empleando tres sesiones diarias de 2 ½ horas de observación cada una.

Proyecto SIRGAS'95: fueron seleccionadas 3 líneas base medidas durante 2 días a lo largo del país, en sesiones de 23 horas (Figura 3) y utilizando receptores Trimble 4000 SST. La distancia de las líneas varía entre 411.8 y 882.6 km, con diferencias de altura entre 63.4 y 1863.6 m.

Data meteorológica

En el trabajo se consideran 3 categorías de datos meteorológicos:

Estándar globales: valores correspondientes al nivel del mar para una atmósfera estándar global, a saber, P=1013.25 mbar, T=18°C y HR=50%.

Estándar locales: comprenden el promedio mensual de los valores registrados diariamente en las estaciones meteorológicas del Mi-

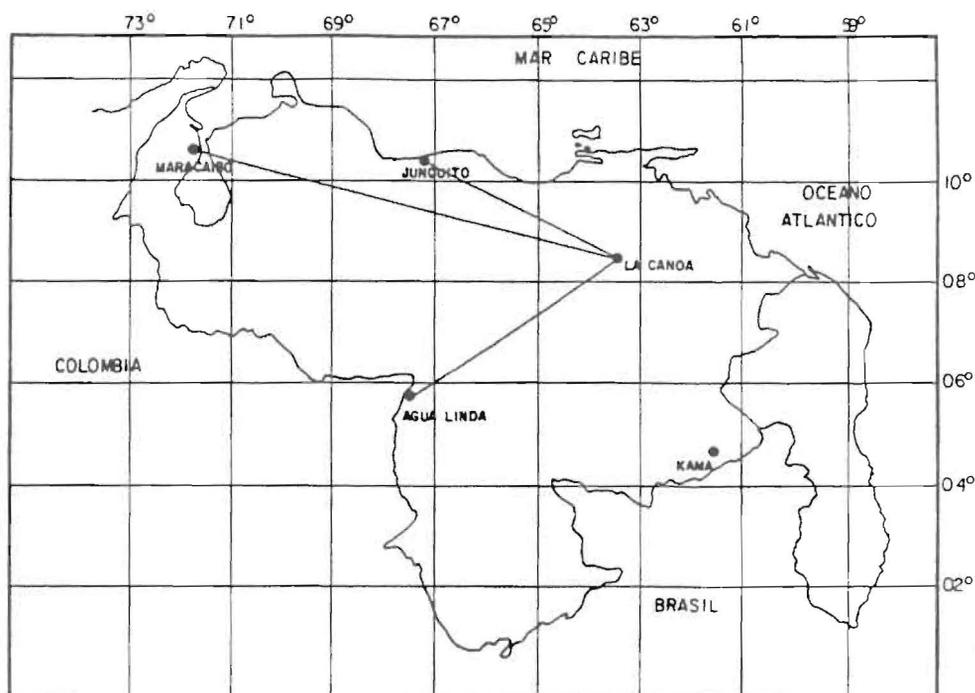


Figura 3. Líneas base GPS del proyecto SIRGAS'95.

nisterio del Ambiente (MARNR) más cercanas a los sitios GPS involucrados en cada proyecto.

Observados: se refieren a aquellos medidos con instrumental portátil en cada estación GPS durante el transcurso mismo de la observación satelital. Se consideran mediciones de presión atmosférica, temperatura seca y temperatura húmeda.

Efemérides precisas

Se utilizaron efemérides precisas y otros productos relacionados (correcciones a los estados de los relojes GPS, parámetros de orientación terrestre, coordenadas del polo, etc.) generados por dos de los principales centros de análisis de órbitas GPS en la actualidad, el CODE (Center for Orbit Determination in Europe) y el IGS (International GPS Service for Geodynamics), [1]. En los proyectos CASA'93 y Perfil GPS-Nivelación'93 se utilizaron efemérides CODE, mientras que en SIRGAS'95 se emplearon órbitas IGS. A pesar que en la actualidad las efemérides de mayor calidad son las IGS, en los dos primeros proyectos mencionados no se utilizaron por sólo estar disponibles a partir de Enero de 1994 (semana GPS 730).

Cálculos efectuados

La investigación comprende un gran número de pruebas de procesamiento desarrolladas bajo diferentes condiciones instrumentales, meteorológicas, observacionales y de cálculo. Los principales factores considerados en el cálculo de las líneas base correspondientes a cada proyecto fueron:

- 10 modelos troposféricos, a saber, Chao [9], Saastamoinen [10], Hopfield Modificado [11], Lanyi [12], Davis [13], Ifadis [14], Herring [15], Baby [16], Rahnemoon [17] y Niell [18],
- software científico, BERNESE v3.4 [19],
- data meteorológica estándar global, local y observada en las estaciones GPS medidas o en estaciones meteorológicas del MARNR,
- efemérides precisas CODE e IGS,
- diferentes ventanas de observación,
- corrección troposférica en el modo diferencial o estimando factores troposféricos cenitales residuales [2] por estación, sesión, día o campaña,

Tabla 1
Relación de cálculos efectuados

Proyecto	No. Líneas Base	Pruebas de Procesamiento GPS		Total Proyecto
		Líneas Base	Red	
CASA'93	4	162	0	648
PERFIL'93	26	0	45	45
SIRGAS'95	3	132	39	435
				1128

Tabla 2
Diferencias medias en las coordenadas calculadas del proyecto CASA'93, sin estimar y **estimando** factores troposféricos cenitales residuales

Línea	$\Delta\phi$ [cm]	$\Delta\lambda$ [cm]	Δh [cm]	ΔL [ppm]
Mamón - Amuay 194510.480 m	1.7 1.7	7.7 7.6	1.6 1.6	0.4 0.4
Mamón - Batey 187414.306 m	-1.7 -1.1	-9.3 -5.2	-15.6 4.1	-0.09 -0.03
Mérida - Barinas 52538.125 m	-0.7 -0.8	0.7 0.7	2.1 -0.2	0.2 0.2
Mérida - Batey 50369.268 m	-2.0 -1.3	-3.9 -2.1	-30.2 5.1	0.5 -0.06

- diferente número de factores troposféricos estimados,
- distintos ángulos de elevación al satélite (cut-off),
- ubicación de las estaciones seleccionadas en zonas planas y montañosas, separadas por distancias y diferencias de altura de distinta magnitud,
- procesamiento GPS múltiple o por líneas base simples.

La Tabla 1 presenta la relación del número de cálculos efectuados con motivo del trabajo. La tabla indica para cada proyecto, el número de líneas seleccionadas, la cantidad de pruebas de procesamiento realizadas bajo la modalidad de línea base y/o red, y por último, los totales respectivos.

Análisis y discusión de resultados

Seguidamente se describen, analizan y discuten los resultados más relevantes de la investigación realizada. Se toman en consideración los

cambios en las coordenadas y factores cenitales troposféricos de las estaciones, la variación en las distancias y diferencias de altura de las líneas, y la coincidencia de los resultados obtenidos con valores previamente establecidos.

Cálculo de factores troposféricos cenitales residuales

La Tabla 2 muestra un ejemplo del efecto del cálculo de factores cenitales residuales en el modelaje troposférico utilizando las líneas CASA'93. El retardo troposférico cenital residual es simplemente la diferencia entre el retardo cenital real y el calculado utilizando un determinado modelo y data meteorológica estándar u observada. Esta diferencia incluye las componentes seca y húmeda del retardo, y se determina a través de la estimación de una incógnita adicional para cada estación en el cálculo por mínimos cuadrados de las observaciones de fase GPS correspondientes a las líneas en cuestión [5].

La Tabla 2 presenta el promedio de las diferencias en las coordenadas de la estación

final y en la distancia de las líneas base calculadas cuando se aplican los 10 modelos troposféricos y se corrige el retardo en modo diferencial (sin estimar) o estimando un factor de escala cenital residual por sesión. Se utiliza el valor medio de las diferencias en las coordenadas y en la distancia de líneas base debido a que la variación en los resultados obtenidos de la aplicación de cada uno de los 10 modelos troposféricos -en los dos casos analizados- está en el orden de pocos milímetros.

Es importante señalar, las comparaciones de coordenadas y distancias de líneas base presentadas en este trabajo correspondientes al proyecto CASA'93, utilizan como patrón de referencia las coordenadas definitivas publicadas en [6], mientras que las comparaciones correspondientes a los proyectos Perfil GPS-Nivelación'93 y SIRGAS'95 se refieren a patrones específicos indicados en las secciones respectivas.

Los resultados de la Tabla 2 se refieren al procesamiento de un día de observación de aprox. 7 horas de medición continua, utilizando valores meteorológicos estándar locales en cada una de las estaciones involucradas. Cada línea incluye un promedio de 3700 observaciones de dobles diferencias en L3. Al igual que en el resto de las tablas presentadas en el artículo, las diferencias en las coordenadas y en los factores troposféricos se presentan en cm, la variación en la distancia de las líneas se muestra en ppm.

Al estimar factores troposféricos cenitales residuales utilizando data meteorológica estándar local, en las 3 últimas líneas consideradas, las discrepancias con las coordenadas definitivas CASA'93 [6] disminuyen varios centímetros en su componente vertical y pocos milímetros a centímetros en las componentes horizontales. La primera línea permanece igual, debido posiblemente a la semejanza en las características atmosféricas y topográficas de las dos estaciones involucradas. Se observó además que la calidad interna de las coordenadas calculadas aumenta significativamente cuando se estiman factores troposféricos en las líneas con grandes diferencias de altura (Mérida-Barinas y Mérida-Batey), sobre todo en la componente vertical, mientras que en caso de las líneas largas consideradas sin diferencias de altura importantes (Mamón-Amuay y Mamón-Batey), la calidad en las componentes de

la posición permanece igual y en la componente vertical sólo sucede una leve mejoría. Se obtienen resultados similares al utilizar data meteorológica estándar global y observada.

Selección del modelo troposférico

La Tabla 3 muestra el efecto producido por la selección de un determinado modelo troposférico en el cálculo de las líneas base seleccionadas del proyecto SIRGAS'95. Se estudia la influencia de la selección del modelo puesto que cada uno de ellos se diferencia en importantes características como: el tipo de observaciones meteorológicas que los originaron y la zona geográfica donde fueron recabadas, las distintas asunciones adoptadas por cada uno en cuanto a la estructura de la atmósfera y al comportamiento de los parámetros meteorológicos en ella, la utilización de diferentes funciones de mapeo empleadas para describir la variación de las componentes seca y húmeda del retardo en función del ángulo de elevación al satélite, la calidad de los resultados obtenidos de su aplicación, en especial para ángulos de elevación relativamente bajos, etc. Mayores detalles en cuanto a la descripción de cada modelo se presentan en las respectivas referencias bibliográficas ya señaladas.

Los resultados de esta tabla se refieren al procesamiento de 2 días de medición (148 y 149-95) de aprox. 23 horas cada uno, considerando un total aproximado de 27880 observaciones de doble diferencia en L3, data meteorológica estándar local, estimación de un factor troposférico cenital residual por sesión para cada estación y un ángulo de elevación igual a 15°. Las variaciones en coordenadas ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ y Δh), distancia de líneas base (ΔL) y factores troposféricos (Δ^{Trop}) fueron obtenidas al comparar los resultados de cada uno de los modelos troposféricos con respecto a los resultados generados utilizando el modelo de Saastamoinen. Por esta razón, los valores correspondientes al referido modelo no aparecen indicados en la tabla.

Puede observarse el elevado nivel de coincidencia en los resultados derivados de cada modelo. La repetibilidad de las discrepancias en las coordenadas sólo varían en promedio unos pocos milímetros (salvo algunas excepciones con los modelos de Chao, Rahnemoon y Baby); en el caso de la distancia de las líneas, no se aprecian

Tabla 3
Variaciones en las coordenadas y distancia de las líneas calculadas SIRGAS'95, utilizando 10 modelos troposféricos ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, Δh y ΔL^{Trop} en cm, ΔL en ppm)

Línea	La Canoa - Junquito 411800.266 m				La Canoa - Agua Linda 495344.391 m				La Canoa - Maracaibo 882588.767 m			
	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL
Modelo	$\Delta_{Pto.Inicial}^{Trop}$		$\Delta_{Pto.Final}^{Trop}$		$\Delta_{Pto.Inicial}^{Trop}$		$\Delta_{Pto.Final}^{Trop}$		$\Delta_{Pto.Inicial}^{Trop}$		$\Delta_{Pto.Final}^{Trop}$	
Chao	-0.1	0.1	-4.5	0.0	0.1	0.2	0.6	0.01	0.0	0.2	0.2	0.0
1972		-8.1		-44.3		-8.1		-7.3		-8.1		-6.7
Saastam.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1973		-		-		-		-		-		-
Hop.Modf.	0.1	-0.2	-0.9	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.01	0.1	-0.3	0.0	0.0
1974		-0.4		-0.9		-0.4		-0.3		-0.4		-0.2
Lanyi	0.0	-0.1	-0.7	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.01	0.1	-0.2	-0.1	0.0
1984		-0.4		0.1		-0.4		-0.3		-0.4		-0.4
Davis	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.01	0.0	0.0	-0.2	0.0
1985		0.4		0.3		0.4		0.4		0.4		0.4
Ifadis	-0.1	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	-0.1	0.01	0.0	0.1	-0.3	0.0
1992		0.6		0.5		0.6		0.7		0.6		0.7
Herring	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	-0.1	0.0
1992		0.1		0.3		0.1		0.1		0.1		0.1
Baby	0.2	-0.4	-3.4	0.0	-0.3	-0.3	0.1	0.01	0.2	-0.8	0.3	0.01
1988		-0.2		-0.3		-0.2		-0.1		-0.2		-0.1
Rahnem.	0.2	-0.4	-1.6	0.0	-0.3	-0.3	0.1	0.01	0.3	-0.8	0.1	0.01
1988		-2.5		-3.0		-2.5		-2.4		-2.5		2.4
Niell	0.0	0.0	-0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	-0.1	0.0
1996		0.0		0.4		0.0		0.1		0.0		0.0

cambios importantes. Las discrepancias producto de la selección del modelo se ubicaron por lo general entre -0.3 a 0.3 cm en latitud, -0.4 a 0.4 cm en longitud, -0.9 a 0.3 cm en altura y 0.0 a 0.01 ppm en distancia. En cuanto a los factores troposféricos estimados, éstos sólo varían en el orden de los milímetros, únicamente los calculados con los modelos de Chao y Rahnemoon presentan cambios de varios centímetros.

En los otros dos proyectos analizados se obtuvieron resultados similares independientemente de la variación de factores como longitud de la línea, data meteorológica, diferencia de altura, cantidad de mediciones u horas de obser-

vación, procesamiento múltiple o por líneas base, ángulo mínimo de elevación de 15° ó 10° y localización de las estaciones.

Variación de los parámetros meteorológicos

Se describe a continuación el efecto producido en las líneas base calculadas cuando se utilizan distintos grupos de parámetros meteorológicos, a saber, data estándar global, local y observada en las estaciones. Los cálculos consideran la estimación de un factor troposférico por estación y un ángulo mínimo de elevación al satélite igual a 15°.

La utilización de diferentes tipos de datos meteorológicos produjo discrepancias pequeñas en magnitud considerando la gran distancia de las líneas y las fuertes diferencias de altura. Pudo observarse además, una elevada coincidencia entre los resultados obtenidos con cada grupo de datos meteorológicos. La Tabla 4 muestra un ejemplo del efecto para 4 estaciones seleccionadas del Perfil GPS-Nivelación'93 alrededor del Lago de Maracaibo. Las variaciones en coordenadas ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ y Δh) y factores troposféricos (Δ^{Trop}) fueron derivadas al comparar los resultados obtenidos con data meteorológica estándar local y observada con respecto aquellos donde se utilizó data estándar global. Debido a esto, los valores correspondientes al cálculo con data estándar global no se presentan en la tabla.

Considerando los tres proyectos, las variaciones en las líneas base analizadas se ubicaron en los órdenes siguientes: 0.2 a 2.8 cm en latitud, -0.5 a 1.6 cm en longitud y -4.8 a 3.4 cm en altura, independientemente del modelo utilizado y la distancia de la línea. Por lo general, las mayores variaciones se obtuvieron en la componente vertical de las líneas con grandes diferencias de altura.

Para las líneas largas con estaciones sin cambios significantes en altura, los resultados obtenidos al usar distintos datos meteorológicos variaron máximamente en un orden de 1.2 cm en latitud, 1.2 cm en longitud y 2.7 cm en altura, mientras que para las líneas de mediana longitud y fuertes cambios en altura, la variación máxima en los resultados fue 0.9 cm en latitud, 0.9 cm en longitud y 3.3 cm en altura. En este caso, se notó un leve aumento en la variación de la altura y una disminución en la variación de la posición,

con respecto a las líneas largas. En ambos casos, la variación de la altura se incrementó con respecto a la posición en aprox. un factor de 3.

Por otro lado, comparando las coordenadas calculadas con las definitivas CASA'93, se observó que las menores discrepancias en latitud y altura fueron obtenidas con los datos estándar locales. En las líneas largas las menores discrepancias en longitud se obtuvieron con los datos globales mientras que en las líneas medianas, la longitud mejoró con los valores observados. La magnitud de la mejoría en las discrepancias se ubicó en el orden de pocos milímetros a centímetros.

Variación del número de factores troposféricos estimados

Se presenta a continuación el efecto que produce la estimación de un mayor o menor número de factores troposféricos cenitales en el cálculo de las líneas base analizadas. Los resultados fueron derivados a partir de data meteorológica observada, estimando 1 y 3 factores troposféricos cenitales por sesión para cada estación. La Tabla 5 muestra el efecto en las líneas del proyecto CASA'93, los valores corresponden a las diferencias promedio (utilizando los 10 modelos troposféricos) entre las coordenadas y distancias de líneas base obtenidas con respecto a las publicadas en [6].

Puede observarse que los cambios en las diferencias de coordenadas y distancia de las líneas consideradas se ubican entre -0.3 a 0.5 cm en latitud, -1.0 a 1.2 cm en longitud, -4.4 a 0.9 cm en altura y -0.3 a 0.3 ppm en distancia. Los cambios en los factores troposféricos estu-

Tabla 4
Variaciones en las coordenadas calculadas del Perfil GPS-Nivelación'93 alrededor del Lago de Maracaibo utilizando data meteorológica estándar global, local y observada ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, Δh y Δ^{Trop} en cm)

Distancia Poligonal	MFC-38A → NODO-2T1 103146.120 m				MFC-38A → 3M-50BIS 234177.716 m				MFC-38A → 3M-103 365226.601 m				MFC-38A → PAN-126 501210.532 m			
Data Meteorol.	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	Δ^{Trop}	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	Δ^{Trop}	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	Δ^{Trop}	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	Δ^{Trop}
Est. Global	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Est. Local	0.7	-0.5	0.6	-7.2	1.3	0.6	1.7	-6.1	2.4	0.7	2.4	-7.6	2.8	0.0	1.9	-6.9
Observada	0.5	0.7	-4.8	-11.4	1.5	1.6	3.4	-10.2	2.4	1.6	1.6	-13.6	2.6	1.4	1.1	-14.9

Tabla 5
Diferencias medias en las coordenadas y distancia de las líneas calculadas de CASA'93 utilizando 1 y 3 factores troposféricos cenitales residuales por sesión para cada estación ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ y Δh en cm, ΔL en ppm)

Línea	Mamón - Amuay 194510.480 m				Mamón - Batey 187414.306 m				Mérida-Barinas 52538.125 m				Mérida - Batey 50369.268 m			
	No. Fact. Trop.	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh
1	2.1	-1.1	-0.2	0.01	-0.2	0.5	-13.2	0.01	-1.6	0.0	3.3	0.2	-1.4	-0.8	9.7	-0.3
3	1.8	-0.9	-0.8	0.01	0.3	-0.5	-12.3	-0.3	-1.2	1.2	-0.2	0.3	-1.1	-1.5	5.3	-0.1

vieron en el orden de varios cm. Al calcular factores troposféricos adicionales se nota el importante cambio de la coordenada altura en las líneas con grandes diferencias en esa coordenada. Se observa además, una mejor coincidencia entre las alturas calculadas y las definitivas CASA'93. En cuanto a las coordenadas de posición, la variación entre los dos cálculos es menor a 1.2 cm, aunque se nota una leve desmejoría con respecto a CASA'93 en la coordenada longitud. En relación con las líneas largas, los cambios producidos en las coordenadas son muy pequeños, no mayores a 1 cm, considerando la distancia de las líneas (aprox. 200 km).

Considerando los tres proyectos, el aumento del número de factores troposféricos estimados por sesión, produjo cambios máximos en las coordenadas de posición en el orden del cm y en altura de varios cm. En las líneas de gran longitud con elevadas cantidades de data GPS aportada por sesiones de observación muy largas (7 ó más horas) como en CASA'93 y SIRGAS'95, el efecto fue despreciable. En el caso del perfil GPS-Nivelación alrededor del Lago de Maracaibo, el aumento del número de factores troposféricos estimados produjo fuertes cambios en altura de hasta de 9 cm. Este comportamiento parece indicar que el cálculo de un número excesivo de factores troposféricos en sesiones de observación relativamente de corta duración (2 a 3 horas) produce serias discrepancias en altura.

Variación en el ángulo mínimo de elevación al satélite

La Tabla 6 ilustra el efecto generado en las líneas base calculadas del proyecto SIRGAS'95 al

variar el ángulo de elevación, utilizando data meteorológica observada y estimando un factor troposférico por sesión para cada estación. Para fines del cálculo se consideraron los ángulos 10°, 15° y 20° por ser los de mayor empleo en la medición y procesamiento de data GPS. No se toman en cuenta ángulos de elevación mayores ni menores a los antes indicados por la significativa reducción de datos y por el aumento considerable del retardo troposférico que producen, respectivamente. Las variaciones de coordenadas y distancia de líneas base mostradas en la Tabla 6 provienen de la comparación de los resultados obtenidos con los ángulos de 10° y 20° con respecto a los alcanzados con 15°, razón por la cual los valores correspondientes al cálculo con 15° no aparecen señalados en la tabla.

En el ejemplo de la Tabla 6, la variación de las coordenadas y líneas base se ubicó en los órdenes siguientes: -0.1 a 0.5 cm en latitud, -0.8 a 0.2 cm en longitud, -0.6 a 3.3 cm en altura y -0.01 a 0.01 ppm en distancia. Al igual que en el proyecto CASA'93, las mayores variaciones ocurrieron en la coordenada altura, generalmente entre los resultados con los ángulos 10° y 20°. Se observó además, que la longitud sufrió variaciones mayores a las ocurridas en latitud, aprox. por un factor 2. A su vez la altura varió con respecto a la longitud aprox. por un factor 3. Las diferencias obtenidas con 10° y 15° muestran la mayor coincidencia, en el orden de 1 a 2 mm en posición y 5 mm en altura. La magnitud de las variaciones se muestra independiente de la longitud de la línea y diferencia en altura. En los tres casos analizados, los cambios en la distancia de las líneas fueron muy pequeños, 0.01 ppm en promedio.

Tabla 6
Variaciones en las coordenadas y distancia de las líneas calculadas de SIRGAS'95
utilizando distintos ángulos de elevación ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ y Δh en cm, ΔL en ppm)

Línea	La Canoa -Junquito 411800.266 m				La Canoa - Agua Linda 495344.391 m				La Canoa -Maracaibo 882588.767 m			
	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL
10°	0.1	0.1	0.7	-0.01	0.1	0.2	0.5	-0.01	-0.1	0.2	0.4	0
15°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20°	0.2	0.1	-0.6	0	0.5	-0.8	3.2	0.01	0.3	-0.4	3.3	0.01

Tabla 7
Variaciones en las coordenadas y distancia de las líneas calculadas SIRGAS'95 en sesiones
de observación diferentes ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ y Δh en cm, ΔL en ppm)

Línea	La Canoa -Junquito 411800.266 m				La Canoa - Agua Linda 495344.391 m				La Canoa - Maracaibo 882588.767 m			
	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL	$\Delta\phi$	$\Delta\lambda$	Δh	ΔL
Sesión [HLV]												
20:30-04:10	-0.5	-0.2	2.0	0	-1.1	-1.4	4.3	0.04	-3.0	3.5	0.1	-0.05
04:10-11:50	0.2	0.4	-0.1	-0.01	1.4	3.3	6.0	-0.07	0	3.7	7.2	-0.03
11:50-19:30	0.6	-1.2	-3.2	0.03	-1.1	-2.1	-16.7	0.03	1.5	-0.8	-3.7	0.01

Es importante destacar el elevado nivel de coincidencia entre los resultados obtenidos en los tres proyectos con los ángulos de 10° y 15°. A pesar que la disminución del ángulo de elevación al satélite incrementa la magnitud del retardo troposférico, los modernos modelos utilizados (Lanyi, Davis, Rahneem, Baby, Ifadis, Herring, Niell) permitieron modelar rigurosamente el efecto a un ángulo de elevación bastante bajo (10°), produciendo resultados prácticamente iguales a los obtenidos con 15°. Esta situación plantea la posibilidad de medir regularmente con GPS en ángulos inferiores a los 15°, siempre que se utilice en el procesamiento de la data la estimación de factores troposféricos cenitales residuales en conjunto con alguno de los modelos antes señalados.

Variación de la sesión de observación

El efecto en el modelaje troposférico producto del cambio de la sesión de observación en cuanto a horas de duración así como su ubica-

ción en el día se ilustra en el ejemplo de la Tabla 7. En ella se presentan las discrepancias medias en las coordenadas y líneas base calculadas del proyecto SIRGAS'95 cuando la sesión original de observación del día 148-95 (23 horas de medición continua) es dividida en 3 sesiones de 7:40 horas, a saber, la primera de 8:30 pm a 4:10 am, la segunda de 4:10 a 11:50 am y la tercera de 11:50 am a 7:30 pm. Se utiliza data meteorológica observada y la estimación de un factor troposférico cenital por sesión para cada estación. Las variaciones en coordenadas ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ y Δh) y distancia de líneas base (ΔL) fueron obtenidas al comparar los resultados de cada una de las 3 sesiones indicadas con respecto a los resultados derivados de la sesión original.

La tabla muestra cambios producidos en las líneas base en el orden de -3.0 a 1.5 cm en latitud, -2.1 a 3.7 cm en longitud, -16.7 a 7.2 cm en altura y -0.07 a 0.04 ppm en distancia. Las líneas de mayor longitud (La Canoa-Agua Linda y La Canoa-Maracaibo) presentan las mayores variaciones en posición, altura y distancia. Estos

resultados se corresponden con los obtenidos en los otros dos proyectos, donde se obtuvieron discrepancias de varios centímetros en la posición, centímetros a decímetros en altura y fracciones de ppm a varios ppm en distancia cuando se procesan datos GPS correspondientes a sesiones de observación de diferentes horas del día. En la mayoría de los casos analizados, la variación en altura es 2 a 4 veces mayor a la presentada en la posición.

Los efectos producidos en las líneas por el cambio de las ventanas de observación, los cuales fueron relativamente superiores a los obtenidos por la variación de los otros factores analizados en el trabajo, no pudieron relacionarse rigurosamente con la longitud de la línea, diferencia de altura, cambios entre parámetros meteorológicos, magnitud de los factores troposféricos calculados u horas específicas del día. Por otro lado, considerando el estable comportamiento de los parámetros meteorológicos observados en las estaciones, no fue posible señalar al efecto troposférico como la única razón de estos cambios tan significativos en las líneas. Por el contrario, los cambios responden en mayor medida a la disminución sustancial -cerca del 60%- de datos GPS (dobles diferencias L3) que supone cada una de las sesiones individuales generadas a partir de las sesiones originales objeto de análisis.

Conclusiones

El modelaje del efecto troposférico en líneas base GPS medidas en Venezuela, de acuerdo a las pruebas efectuadas, puede introducir cambios de hasta 2.6 cm en posición, 8.2 cm en altura y 0.6 ppm en distancia, generalmente independientes de la longitud de la línea.

La corrección troposférica basada en la estimación de factores cenitales residuales empleando data meteorológica estándar global, local u observada produjo mejores resultados que los obtenidos en el modo diferencial de procesamiento.

Con la excepción del modelo de Chao, se obtuvo un elevado nivel de coincidencia entre los resultados generados por los diferentes modelos troposféricos objeto de análisis.

El uso de datos meteorológicos estándar locales generó resultados de mayor calidad en

comparación a los obtenidos con la utilización de data estándar global y observada.

El aumento de factores troposféricos estimados por sesión produjo cambios despreciables en las líneas de gran longitud con sesiones de observación largas (7 horas o más), mientras que el cálculo de un número excesivo de factores troposféricos en sesiones de observación relativamente cortas (2 ó 3 horas) produjo serias discrepancias en altura.

Los modernos modelos troposféricos permitieron modelar rigurosamente el efecto refractivo a un ángulo de elevación de 10°, produciendo resultados prácticamente iguales a los obtenidos con 15°.

La rigurosa consideración de los factores anteriores, directamente relacionados con el modelaje troposférico, es indispensable en las tareas de posicionamiento geodésico preciso que pretendan ejecutarse en el país.

Agradecimiento

Los cálculos de este trabajo fueron realizados con el software Bernese v3.4 desarrollado por el Instituto de Astronomía de la Universidad de Berna (AIUB), Suiza.

Las subrutinas de los modelos troposféricos de Lanyi, Davis, Baby, Rahnemoun y Niell fueron cedidas por el Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (Instituto Alemán de Investigaciones Geodésicas), Munich.

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias aportadas por los árbitros durante el proceso de revisión de este artículo.

Referencias Bibliográficas

1. SEEBER G. "Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications". Walter de Gruyter. Berlin - New York. 1993.
2. BRUNNER F.K., WELSCH W.M. "Effect of the Troposphere on GPS Measurements". GPS World. January (1993), pp. 42-51.
3. PEDROZA M. "Preliminary analyses of the effects of troposphere and geometry of satellite distribution in GPS applied to ground subsidence studies". MSc. Thesis. University of New Brunswick. Canada, 1988.

4. LEAL J. "Integración del GPS y Nivelación para estudios de monitoreo de subsidencia en los campos petroleros de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Venezuela". Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Geodésica. Universidad del Zulia, 1992.
5. ACUÑA G. "Efectos de propagación troposférica sobre mediciones GPS realizadas en Venezuela". Tesis de Maestría en Ingeniería Geodésica. División de Postgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Junio, 1996.
6. DREWES H., KANIUTH K., STUBER K., TREMEL H., KAHLE H.-G. STRAUB CH., HERNANDEZ N., HOYER M., WILDERMANN E. "The CASA'93 GPS campaign for crustal deformation research along the south caribbean plate boundary". *Journal of Geodynamics*. Vol. 20, No. 2 (1995), pp. 129-144.
7. ACUÑA G., CARRASQUERO F., HOYER M., MEDINA N., MEDINA M., ROYERO G., WILDERMANN E. "Mediciones GPS y de nivelación alrededor del Lago de Maracaibo". *Memorias de las 9nas. Jornadas Científico-Técnicas*. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Vol. III (1995), pp. 350-357.
8. DREWES H., FORTES L.P., HOYER M. "The SIRGAS'95 GPS Campaign". Paper presented at XXI General Assembly of International Union of Geodesy and Geophysics. Boulder-Colorado, USA. July, 1995.
9. CHAO C.C. "A model for tropospheric calibration from daily surface and radiosonde balloon measurements". *JPL Technical Memorandum* 391-350. Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, California, USA. 1972.
10. SAASTAMOINEN J.J.: "Contributions to the theory of atmospheric refraction". *Bulletin Geodesique*, Vol. 105-107, 13-34 (1973), pp. 279-298.
11. REMONDI B.W. "Using the Global Positioning System (GPS) phase observable for relative geodesy: modeling, processing and results". University of Texas at Austin, USA. Center for Space Research, CSR 84-2 (1984), pp. 37.
12. LANYI G. "Tropospheric Calibration in Radio Interferometry". *Proceedings of the International Symposium on space Techniques for Geodynamics*. Sopron, Hungary. July 9-13. Vol. 2 (1984), pp. 184-195.
13. DAVIS J.L., HERRING T.A., SHAPIRO I.I., ROGERS A.E., ELGERED G. "Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modelling errors on estimates of baseline length". *Radio Science*, Volume 20, Number 6. November-December (1985), pp. 1593-1607.
14. IFADIS I.M. "The excess propagation path of radio waves: Study of the influence of the atmospheric parameters on its elevation dependence". *Survey Review*, 31, 243. January (1992), pp. 289-298.
15. HERRING T.A. "Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data". *Proceedings of the symposium: Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*. Edited by J.C. Munck, T.A.TH. Spoelstra. The Hague, The Netherlands, May 19-22, 1992. pp. 157-164.
16. BABY H.B., GOLE P., LAVERGNAT J. "A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements". *Radio Science*, Vol. 23. No. 6 (1988), pp. 1023-1038.
17. RAHNEMOON M. "Ein korrekturmodell fuer mikrowellenmessungen zu satelliten". *Publ. Germann Geodetic Commission, Munich. Series C*, Vol. 335. 1988.
18. NIELL A.E. "Global mapping funtions for the atmospheric delay at radio wavelengths". *Journal of Geophysical Research*, 101, B2. February 1996, pp. 3227-3246,.
19. ROTHACHER M., BEUTLER G., GURTNER W., BROCKMANN E., MERVART L. "Documentation for BERNESE GPS Software, Version 3.4". *Astronomical Institute. University of Berne*. May, 1993.

Recibido el 18 de Septiembre de 1996

En forma revisada el 29 de Abril de 1997