

PREVISIONES DEL ATRASO CENTAL TROPOSFÉRICO PARA AMÉRICA DEL SUR USANDO UN MODELO DE PREVISIÓN NUMÉRICA DEL TIEMPO CON ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL

Luiz Fernando Sapucci¹; João F. Galera Monico²,
Luiz Augusto T. Machado¹; Guilherme Poleszuk dos S. Rosa²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

² Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
lsapucci@cptec.inpe.br

RESÚMENES

El atraso cenital troposférico (Z_{TD} - *Zenithal Tropospheric Delay*) es uno de los factores que generan errores en las observaciones involucradas en los métodos de posicionamiento por satélites. Frecuentemente, este atraso es minimizado con el empleo de modelos desarrollados empíricamente a partir de observaciones atmosféricas, en general no colectados en nuestro continente. Sin embargo, tales modelos son incapaces de dar la precisión exigida para algunas aplicaciones en tiempo real, como en la navegación y localización. El empleo de las previsiones de los valores de Z_{TD} obtenidas a partir de la Previsión Numérica del Tiempo (PNT), denominado modelado dinámico, se muestra como una alternativa para modelar y, por lo tanto, prever los efectos de los gases atmosféricos en las señales de radio frecuencia en tiempo real. Siguiendo una tendencia mundial, el Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) ha puesto a disposición operativamente previsiones de los valores de Z_{TD} para América del Sur y océanos adyacentes (disponibles en la dirección electrónica <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital>). La versión actualmente disponible utiliza el modelo regional ETA con alta resolución horizontal (20x20km). Los objetivos principales de este trabajo son divulgar la disponibilidad y la calidad de las previsiones de Z_{TD} generadas en el CPTEC y destacar las ventajas obtenidas con la utilización de este tipo de modelado de la troposfera. Para esto son presentados los detalles más significativos de la actual versión y los resultados de una validación utilizando estimativas pos procesadas de Z_{TD} generadas a partir de los datos GPS de 25 estaciones de la RBMC. Los resultados de esta validación muestran que, independiente de las estaciones del año, el efecto sistemático es prácticamente nulo y los valores del EMQ están en torno de 4 a 5 cm. Al considerar la variabilidad temporal del Z_{TD} , las ventajas presentadas por esta técnica, los resultados obtenidos en esta validación y las mejoras que ocurrirán en el futuro, este trabajo muestra que el modelado dinámico se presenta con gran potencial en transformarse como alternativa mas apropiada para las aplicaciones de los métodos de posicionamiento por satélite en tiempo real.

ZENITHAL TROPOSPHERIC DELAY PREDICTIONS FOR SOUTH AMERICA FROM HIGH SPATIAL RESOLUTION NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL

ABSTRACT

The Zenithal Tropospheric Delay (Z_{TD}) is an important error source in the observable involved in the positioning methods using artificial satellite. Frequently, the Z_{TD} influence in the positioning is minimized by applying empirical models. However, such models are not able to supply the required precision to some real time applications, such as navigation and steak out. The predictions of Z_{TD} values from Numeric Weather Prediction (NWP), denominated dynamic modeling, is an alternative to model the atmospheric gases effects in the radio-frequency signals in real time. The Center for Weather Forecasting and Climate Studies (CPTEC) has generated operationally prediction of Z_{TD}

values for South America Continent and adjacent ocean areas following world-wide tendency (available in the site <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital>). The version available has been generated using the Eta model with horizontal resolution of 20 km. The main aims of the present paper are to divulge the availability and quality of Z_{TD} predictions generated in the CPTEC and emphasizes the advantages obtained with such tool. This paper provides the most significative details of the current version, as well as the results obtained in a quality evaluation that apply pos processed Z_{TD} estimates, which were obtained from GPS data collect by the Brazilian Continuous GPS Network (RBMC). The results show that the bias values is almost null and RMS is of about 4 to 5 cm. Considering the ZTD temporal variability, the advantages provide by this modeling, the results obtained in this evaluation and the future improvements, this work shows that the dynamic modeling has great potential to become the most appropriate alternative to model ZTD in real time.

1. Introducción

Actualmente después de los efectos generados por la ionosfera, la troposfera es la mayor fuente de errores en las observables GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). En muchas aplicaciones GNSS que utilizan cortos intervalos de tiempo de colecta de datos y no requieren de alta precisión (metros), los modelos empíricos disponibles para minimizar el Atraso Cenital Troposférico (Z_{TD} - *Zenithal Tropospheric Delay*) son suficientes. Sin embargo, aplicaciones en tiempo real, tales como la navegación aérea, posicionamiento de plataformas de petróleo, entre otras, requieren mejor nivel de precisión (decímetros) y los modelos empíricos se tornan inapropiados para esos casos, pues son ineficientes en el modelado de las oscilaciones temporales y espaciales del Z_{TD} .

Actualmente, hay un consenso en el medio científico de que los modelos de Previsión Numérica del Tiempo (PNT) pueden contribuir significativamente con el modelado del Atraso Cenital Troposférico (IAG, 2008). Ese modelado envuelve el Modelo de Circulación General (MCG), el cual, de forma minuciosa, lleva en consideración la interacción de los fenómenos físicos que ocurren en la atmósfera terrestre generando un sistema extremadamente complejo exigiendo alta capacidad computacional (RICHARDSON, 1922). Como esos modelos de previsión son constantemente alentados por observaciones de las variables atmosféricas, las cuales son realizadas por los más variados tipos de sensores, los mismos presentan una capacidad de generar previsiones del Z_{TD} de calidad superior a los valores generados por los modelos matemáticos disponibles, tales como Hopfield, Saastamoinen etc. Siguiendo esa tendencia mundial, desde mitad de 2004 el centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) genera operacionalmente previsiones de los valores de Z_{TD} para toda América del Sur y océanos adyacentes (disponible en la dirección electrónica <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital>). El objetivo es disponibilizar a la comunidad geodésica de América Del sur una alternativa para minimizar los efectos de la troposfera en la señales de radio frecuencia para aplicaciones que necesiten mejorar la precisión en tiempo real. En la versión disponible inicialmente fue utilizado el modelo de previsión del tiempo con resolución horizontal de 100x100 Km. (de ahora en más denominado de GLB100km) (Sapucci et al., 2006). Sin embargo, desde el inicio de 2008 está siendo disponible una nueva versión de modelado Del Z_{TD} , la cual emplea un modelo regional de previsión del tiempo Eta con resolución horizontal de 20x20 Km., denominado aquí por ETA20km. El objetivo principal de este trabajo es divulgar la disponibilidad de las previsiones del Z_{TD} sobre toda America del Sur generadas con una horizontal de 20x20 Km. y en especial destacar los beneficios obtenidos con el uso de ese producto.

2. Valores del atraso cenital troposférico a partir de modelos de PNT

Las previsiones de los valores de la componente húmeda (Z_{wp}) del atraso cenital troposférico, pueden ser obtenidas al aplicar los perfiles de temperatura y razón de mezcla previstos por el modelo de PNT (para un punto "A" cualquiera de la grilla de ese modelo), en una integración numérica en la ecuación (SPILKER, 1994):

$$Z_{WD} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} (k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}) dh, \quad (1)$$

dónde e es la presión parcial del vapor de agua y T es la temperatura, ambos variando en función de la altitud (h), Z_w^{-1} es lo inverso de la constante de compresibilidad del vapor de agua, k_2' e k_3 son constantes de la refractividad atmosférica. De forma similar, las previsiones de la componente hidrostática (Z_{HD}) del Z_{DT} son obtenidas al aplicar los valores de presión atmosférica en la superficie también previstos por el modelo y las coordenadas de ese mismo punto en la ecuación (DAVIS et al., 1985):

$$Z_{HD} = \frac{(2,27683157 \times 10^{-3}) P_0}{(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028 h_0)} \quad (2)$$

Donde P_0 es la Presión a la superficie, φ es la latitud del lugar y h_0 es altitud en kilómetros. Sumando los valores de ambas componentes se obtienen las previsiones del atraso cenital troposférico (Z_{TD}) para ese punto "A". Haciendo eso para todos los puntos de grilla del modelo se obtiene una malla de informaciones sobre la distribución espacial de esa variable. A partir de la interpolación es posible obtener previsiones del Z_{TD} para cualquier otro punto interno de la grilla del dominio del modelo de previsión utilizado. Más detalles sobre la metodología utilizada son encontrados en Sapucci et al. 2006.

3. Validación de la calidad de las previsiones del Z_{TD}

Para la evaluación de las previsiones del Z_{TD} las mismas son comparadas con estimativas generadas a partir del pos procesamiento de las observaciones GPS de la forma como descripta en SAPUCCI et al., 2006. Los valores previstos son calculados a partir de la grilla regular generada por el modelo Eta, aplicando una interpolación bilinear horizontalmente y reduciendo el valor en la vertical aplicando la llamada ecuación hipsométrica adaptada para los valores del Z_{TD} (Sapucci et al 2008). Más detalles sobre las estaciones utilizadas y las informaciones más relevantes sobre cada una son encontradas en Sapucci et al 2008. El período de datos utilizados en esa evaluación fueron los meses de enero, abril, julio y otoño de 2006, representado respectivamente, el verano, otoño, invierno y primavera. El objetivo de la elección de esos meses es acceder al comportamiento de calidad en función de la estacionalidad. Las medidas estadísticas utilizadas en esta validación fueron el error medio (del inglés *bias*) y el EMQ (error cuadrático medio, traducción del inglés *root mean square*), ambas calculadas al considerar las estimativas como valores de referencias. La figura 1 muestra los valores del error medio y EMQ calculados al considerar todas las 24 estaciones GPS validadas. El objetivo de ese análisis es presentar un indicador global de calidad para las diferentes estaciones del año. Se observa que los valores del error medio permanecen próximos de cero, inclusive para las previsiones de 66 horas. Se observa también que los valores del EMQ son más elevados en la primavera (figura 1d) donde la curva del EMQ se aproxima de 5 cm.

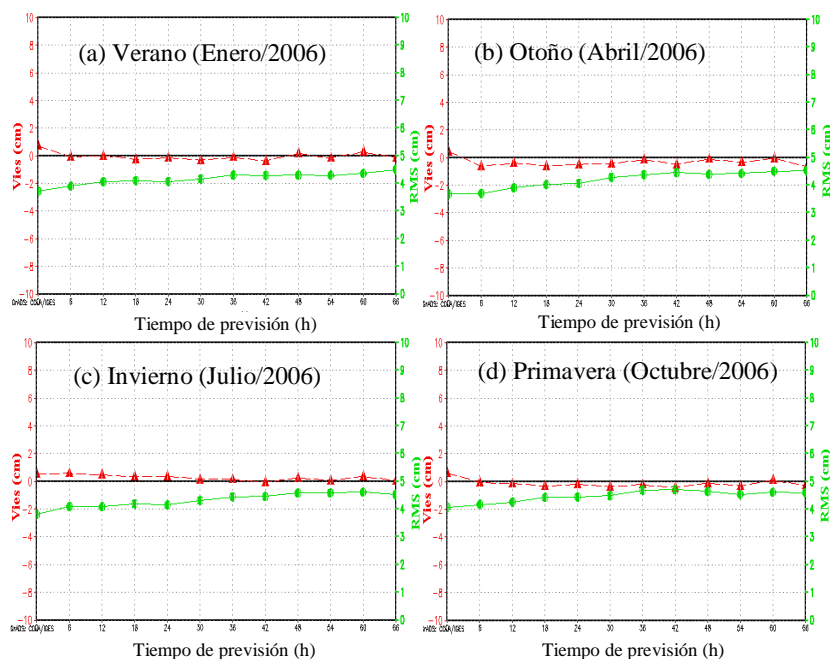


Figura 1. Valores del error medio (trazado uniendo triángulos) y del EMQ (trazo continuo uniendo círculos), al considerar todas las estaciones GPS disponibles, en función del tiempo de previsión del ETA 20km, para las diferentes estaciones del año: (a) verano, (b) otoño, (c) invierno y (d) primavera (SAPUCCI et al, 2008).

4 Ventajas obtenidas con el uso de las previsiones del ZTD

Si comparamos con las demás opciones disponibles para obtener el Z_{TD} , el modelado del Z_{TD} utilizando previsiones generadas en la PNT, presenta las siguientes ventajas:

- Con el uso del modelo de PNT, el modelado resultante considera todas las variaciones temporales y espaciales del Z_{TD} empleando operacionalmente un complejo proceso dinámico de colecta, procesamiento y distribución de informaciones;
- Disponibilidad en todas las regiones de América del Sur y océanos adyacentes;
- Valores del Z_{TD} de buena calidad en tiempo real sin precisar medir valores de cantidades meteorológicas durante la colecta de los datos;
- Modelado sensible a las variaciones diarias y estacionales de los factores que influyen los valores del Z_{TD}
- Los valores obtenidos no son contaminados con los errores provenientes de la parametrización del perfil atmosférico en función de los valores medidos en la superficie, como es frecuente en los modelos de Z_{TD} convencionales;
- Archivos de datos históricos, en el cual el usuario tiene acceso directo al BDI (Banco de Datos de Imágenes) de la División de Satélites y Sistemas Espaciales (DSA/CPTEC/INPE);
- Disponibilidad de los resultados de las validaciones mensuales de las previsiones disponibles, hechas periódicamente a partir de estimativas del Z_{TD} proveniente del procesamiento de los datos de algunas estaciones de la RBMC en estrecha colaboración con el LGE (Laboratório de Geodésia Espacial) de la UNESP de Presidente Prudente.

5. Consideraciones finales

El presente trabajo divulga la disponibilidad de las previsiones Del Z_{TD} obtenidas con el empleo del modelo regional de PNT del CPTEC/INPE, denominado ETA El cual tiene resolución

horizontal de 20 km. Las principales ventajas con la utilización de ese modelado son presentadas en este trabajo. En la comparación con las estimativas obtenidas a partir de los datos GPS de 25 estaciones de la RBMC mostró que independientemente de las estaciones del año el vies es prácticamente nulo y los valores del EMQ están en torno de 3 a 5 cm.. Visando la mejora de calidad de previsión del tiempo generada en el CPTEC, se encuentra en plena expansión las actividades ligadas a la asimilación de datos en este centro, como la inclusión de nuevas fuentes de datos y la modificación del sistema de asimilación de datos. Entre las nuevas fuentes de datos se encuentra en fase de implementación una metodología para asimilación de estimativas del Z_{TD} provenientes de la RBMC en El sistema de asimilación de datos del CPTEC. El objetivo es minimizar la deficiencia de datos se umidade sobre América del Sur. Diversas investigaciones muestran que con la inclusión de valores del Z_{TD} , provenientes de redes GNSS activas, en la PNT hay una mejoría Del desempeño Del modelo para las aplicaciones en correcciones de los efectos de la troposfera en la programación de señales de radiofrecuencia (JENSEN, 2003; AHN et al., 2006). Un nuevo sistema de asimilación denominado *Local Ensemble Transform Kalman Filter*, El cual fue desarrollado por la Universidad de Maryland (University of Maryland) de EUA, se encuentra en fase de instalación y teste en el CPTEC. Ese sistema además de más eficiente computacionalmente con relación AL anterior, entre otras ventajas, permite asimilar los más variados tipos de datos con la efectivación de esos procesos en desarrollo en el CPTEC/INPE, las perspectivas para la obtención de previsiones del Z_{TD} de mejor calidad en un futuro próximo son muy buenas.

Referencias

- AHN, YW, G. LACHAPELLE; S. SKONE; S. GUTMAN; S. SAHM. Analysis of GPS RTK performance using external NOAA tropospheric corrections integrated with a multiple reference station approach. *GPS Solutions* 10(3): 171-186, 2006.
- DAVIS, JL.; T. A. HERRING; I. SHAPIRO; A. E. ROGERS, G. ELGENED. Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length. *Radio Sci.*, vol. 20, 1593-1607, 1985.
- IAG International Association of Geomorphologists. Working Group 4.3.3. Numerical weather models for positioning. 2009. A Joint Working Group with IAG Sub-Commissions 4.3 and 4.5.: <http://www.hobiger.org/wg433/tiki-index.php> (visit in 24/04/2009).
- JENSEN, A. B. O.; C. C. TSCHERNING; F. MADSEN. Integrating Numerical Weather Predictions in GPS Positioning. In: ION GPS 2003 -16th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING. Portland, Oregon. 2003.
- RICHARDSON, L. F. 1922: *Weather Prediction by Numerical Process*, Cambridge University Press, London.
- SAPUCCI, L. F., L. A. T MACHADO, J. F. G MONICO. Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul: Variabilidade Sazonal e Avaliação da Qualidade Revista Brasileira de Cartografia No 58. V. 3, p. 279-292, 2006.
- SAPUCCI, L. F., J. F. G. MONICO, L. A. T. MACHADO, G. P. S. ROSA. Avaliação das Previsões do Atraso Zenital Troposférico para a América do Sul, obtidas usando modelo de previsão numérica de tempo com alta resolução espacial. *Boletim das Ciências Geodésicas. Comunicações*, Curitiba, v. 14, no 4, p.591-605, 2008.