

Estudio del Impacto de la Troposfera sobre la Señal de GPS L1 en la ciudad de Riobamba

Study of the Effects of the Troposphere on the GPS L1 Signal in Riobamba city.

Jhonny Álvarez^{1,£}, Mónica Zabala^{2,Ω}, Jomaira Ruilova^{3,δ}, Rodrigo Vinueza^{4,ρ}

¹ Corporación Nacional de Telecomunicaciones, Riobamba, Ecuador.

² Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

³ Colegio de Ingeniería Electrónica e Informática, Universidad de Aeronáutica y Astronáutica de Nanjing, China

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

£ jhonny.alvarez@cnt.gob.ec, Ω monica.zabala@esepoch.edu.ec, δ ruilovajomaira@gmail.com, ρ jaimie.vinueza@unach.edu.ec

Resumen- El impacto producido por las capas de la atmósfera sobre la señal emitida desde los satélites han sido analizados y estudiados con gran importancia ya que es posible evaluar el efecto producido sobre las señales. Una de las capas de acuerdo a su composición y características que atenúa gravemente la señal a altas frecuencias es la troposfera. En el caso del sistema de posicionamiento global (GPS), su señal sufre un retardo al atravesar la atmósfera durante el intervalo de tiempo de transmisión. El 90% del retardo total es debido a los componentes húmedo y seco de la capa troposférica. El retardo troposférico depende directamente de la presión atmosférica, la cual se ve influenciada por el vapor de agua y la temperatura, afectando gravemente la precisión en el receptor en tierra. El objetivo propuesto es estimar el retardo que sufre la señal de GPS considerando las características troposféricas en la ciudad de Riobamba bajo diferentes circunstancias: días con mayor y menor humedad, así como la precipitación acumulada basado en el modelo de Saastamoinen. Se analiza en forma paralela los datos extraídos de la estación GNSS que forma parte de la Red de Monitoreo Continuo GNSS de Ecuador (REGME) para valorar el impacto sobre la precisión en la solución final de posicionamiento del receptor. Por medio de este proceso, es posible determinar cómo las condiciones troposféricas afectan a las señales de los sistemas de comunicación satelital, en este caso evaluando el sistema de posicionamiento GPS.

Palabras Clave- Sistema de Posicionamiento Global, Efecto Troposférico, Modelos de Corrección Troposférica, RTKLIB.

Abstract- The impact produced by the layers of the atmosphere on the signal emitted from the satellites has been analyzed and studied with great importance since it is possible to evaluate the effect produced on the signs. One of the layers according to its composition and characteristics that severely reduces the signal at high frequencies is the troposphere. In the case of the global positioning system (GPS), its signal suffers a delay when passes through the atmosphere during the transmission time interval. The 90% of the total delay is related to the wet and dry components of the tropospheric layer. The tropospheric delay depends directly on the atmospheric pressure, which is influenced by water vapor and temperature, seriously affecting the accuracy of the receiver on the ground. The proposed objective is to estimate the delay suffered by the GPS signal considering the tropospheric characteristics in Riobamba city under different

circumstances such as days with higher and lower humidity, as well as accumulated precipitation based on the Saastamoinen model. The data extracted from the GNSS station that is part of the Continuous Monitoring Network of Ecuador (REGME) is analyzed in parallel to assess the impact on accuracy in the final positioning solution of the receiver. Through this process, it is possible to determine how the tropospheric conditions affect the signals of satellite communication systems, in this case evaluating the GPS positioning system.

Keywords- Global Positioning System, Tropospheric Effect, Tropospheric Correction Models, RTKLIB.

I. INTRODUCCIÓN

La cantidad de sistemas de comunicación que actualmente interactúan entre sí es innumerable provocando interferencias no deseables que deterioran la calidad de la señal durante su transmisión a través del canal de propagación, los sistemas de comunicaciones satelital se exponen a factores de atenuación espaciales de los que incluye la atmósfera y sus diferentes capas con características diferentes las mismas que inciden de diversa forma de acuerdo a la configuración del sistema de comunicación satelital considerando parámetros de frecuencia, altura de órbita, potencia de transmisión, entre otras.

En particular, la señal de GPS L1 opera a 1500 MHz y la altura de la órbita es de 20200 Km. Esto implica que su señal debe atravesar todas las capas de la atmósfera y la distorsión que sufre se ve reflejada en la precisión en la solución de navegación en el receptor GPS. Existen modelos para la corrección de estos errores introducidos por las capas de la atmósfera las cuales dependen de parámetros característicos de cada capa, factores a considerar son los puntos máximos de radiación la misma que ioniza la ionosfera, así como condensación de la troposfera son factores primordiales que determina la atenuación de la señal transmitida. Existen recomendaciones ITU sobre los valores máximo permitidos referente a la propagación de las señales en la troposfera y los modelos de corrección troposféricos. En este trabajo, dichos



Fig. 1. Constelación de Sistemas GPS

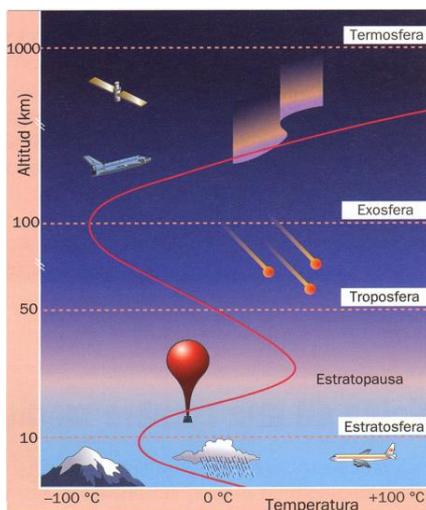


Fig. 2. Capas de la atmósfera terrestre.

valores son analizados con datos oficiales meteorológicos locales para la ciudad de Riobamba con la ayuda de herramientas informáticas.

Es importante mencionar que GPS se ha convertido, desde que fuera declarado operacional en 1993, en la herramienta de posicionamiento por excelencia por su versatilidad y bajo costo [1], así mismo las señales son objeto de estudio de otras áreas de la ingeniería.

II. ESTADO DEL ARTE

Autores como [2] en su trabajo investigativo “estudio de los efectos troposféricos en la precisión de mediciones GPS en el suroccidente colombiano” identifica la problemática existente con la composición de la troposfera y sus efectos sobre la precisión de las mediciones en GPS. De la misma forma el autor [3] en su investigación “estrategias de cálculo del retardo troposférico y su influencia en procesamiento GPS de alta precisión” realiza un estudio pormenorizado del retardo troposférico, sus modelos troposféricos y cómo afecta este a la precisión del GPS. En el documento “análisis espectral del efecto troposférico en la señal GPS” se propone recomendaciones que se deben considerar para para evaluar

cómo se producen los errores que afectan a la señal de GPS durante su trayectoria de propagación, además de sus posibles correcciones [4].

Algunas consideraciones citadas previamente se toman en consideración como base y desarrollo del estudio como el retardo que sufre la señal GPS debido a la temperatura ambiental, humedad relativa, presión atmosférica y la distancia zenital. Es indispensable trabajar con valores zenitales bajos ya que con medidas zenitales altos el efecto troposférico es mayor.

El efecto troposférico en la mañana es menor, por lo que es recomendable hacer las observaciones GPS entre las 7 y 10 de la mañana [5].

A. Sistema de Posicionamiento Global

Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema pasivo de navegación que basa su funcionamiento en satélites que emiten radiofrecuencias y proporcionan un marco de referencia espacio temporal con cobertura global, independiente de las condiciones atmosféricas de forma continua en cualquier lugar del planeta Tierra, y está disponible para cualquier usuario civil o militar. Una representación satelital del sistema GPS es el que se presenta en la Fig. 1. En la práctica, este sistema está compuesto de 24 vehículos satelitales, en órbita MEO a 20200 Km de altura [4].

B. Atmósfera Terrestre

Se puede definir como la envoltura de gases que rodea la Tierra y está constituida por varias capas tal y como se muestra en la Fig. 2. El límite superior se estima alrededor de los 10.000 Km de altura desde la superficie planetaria donde la concentración de gases es baja que se asemeja a la del espacio exterior, aunque algunos autores y científicos sitúan a este límite entre los 30.000 y 40.000 Km. Además de los gases, en la composición de la atmósfera también posee agua líquida de las nubes y sólidos como polen, esporas, polvo, microorganismos, sales, cenizas y agua sólida formando minúsculos cristales de hielo [6].

Las principales capas de la atmósfera son [7]:

- **Troposfera:** Capa más cercana a la tierra, donde se producen los efectos climáticos, su altura varía entre 8 - 15 Km siendo su altura media los 12 Km.
- **Estratósfera:** En ella se encuentra la capa de Ozono, esta capa es ideal para el transporte aéreo su extensión alcanza unos 50 Km de la superficie terrestre.
- **Mesosfera:** Situada en la parte superior de la Estratósfera y llega aproximadamente a los 80 Km de Altura.
- **Termosfera:** Las partículas que la forman son ionizadas, dentro de ella se encuentran algunas capas ionosféricas y su límite superior alcanza los 400 Km.
- **Exosfera:** Capa más alejada y extensa de la atmósfera.

C. Retardos Troposféricos

La onda electromagnética emitida por el satélite atraviesa tres zonas características antes de alcanzar un receptor sobre la

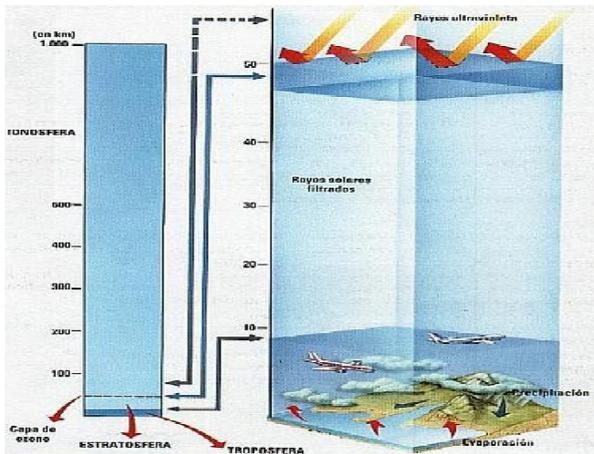


Fig. 3. Distribución altimétrica de las capas atmosféricas

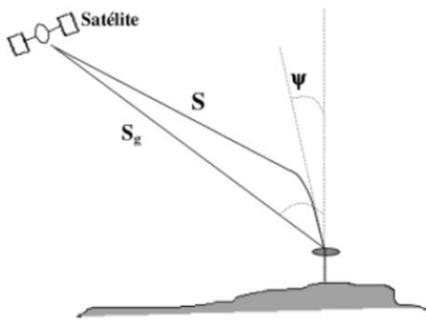


Fig. 4. Refracción Troposférica

superficie terrestre, el vacío, la ionosfera y la troposfera.

La troposfera es la capa de la atmósfera donde se originan los fenómenos meteorológicos o climáticos, estos efectos meteorológicos como lluvia, granizo, nieve, tormentas, entre otras, pueden hacer que ciertos aparatos electrónicos no funcionen correctamente, la troposfera es la capa que presenta mayores inconvenientes al momento de la transmisión de información por parte de los satélites GPS [8].

El retraso producido por la troposfera puede llegar a alcanzar unos valores medios de 2,5m en el cenit y se incrementa hasta los 25-30m con la cosecante del ángulo de elevación, es decir unos retardos entre 3 y 100 nanosegundos [9].

La troposfera induce un retraso en cualquier señal electromagnética que la atraviesa debido a dos componentes, uno es el retraso hidrostático debido a los gases inertes presentes en la atmósfera, que es el causante de un 90% del total del retardo como se muestra en la Fig. 3 ya que es aquí donde se encuentra la mayor cantidad de componentes causantes de los retardos. El retraso hidrostático es muy estable, fácil de modelar y tiene fundamentalmente que ver con la presión atmosférica y por tanto depende de la altura sobre el nivel del mar a la que se toman las medidas.

El segundo componente del retraso troposférico es el contenido de vapor de agua en la atmósfera, el cual es difícil de modelar, ya que el vapor de agua en la atmósfera puede cambiar rápidamente debido a las condiciones atmosféricas

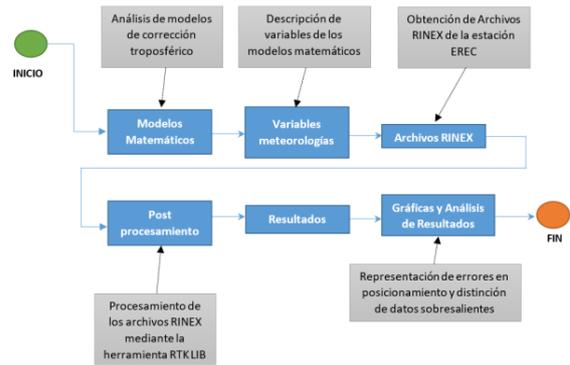


Fig. 5. Flujoograma metodología de la investigación.

locales.

Según [10] afirma que los retrasos de la señal GPS se debe al paso de ésta por la tropósfera, en esta zona de 50 km de la atmósfera, la señal en banda L sufre una refracción y curvatura en la trayectoria. En la Fig. 4, se puede apreciar cómo se ve afectada la distancia del satélite receptor por la refracción atmosférica. Donde la S es la distancia medida que se ve afectada de dicho efecto y S_g es la distancia geométrica del satélite receptor.

D. Recomendación ITU-R referente a la propagación de señales en la atmósfera

Las regulaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) constituyen una serie de normas técnicas internacionales desarrolladas por el Sector de Radiocomunicaciones para normar la utilización y gestión del espectro de radiofrecuencia y las órbitas de satélite, uso eficaz del espectro de radiofrecuencia por todos los servicios de radiocomunicaciones, la radiodifusión terrenal y las radiocomunicaciones por satélite, entre otras [11].

Para el interés y desarrollo del trabajo se revisa las recomendaciones ITU referentes a la propagación de señales en la atmósfera son:

- **Recomendación 676-5** referente a la atenuación debida a los gases atmosféricos en frecuencias de hasta 1 000 GHz debida al aire seco y al vapor de agua.
- **Recomendación 618-12** referente a datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio, considerando efectos de la atmósfera no ionizada en todas las frecuencias, pero sobre todo por encima de aproximadamente 1 GHz y para ángulos de elevación bajos.
- **Recomendación 640-6** referente a la atenuación debida a las nubes y a la niebla, para las nubes y la niebla compuestas totalmente de gotas minúsculas, generalmente inferiores a 0,01 cm

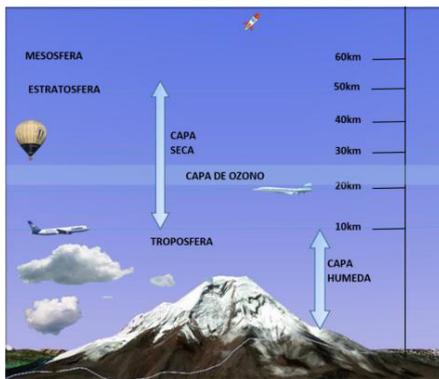


Fig. 6. División de la atmosfera según Hopfield

Tabla I
TÉRMINOS B Y Δ_R EN BASE A LA ALTURA DE LA ESTACIÓN DE OBSERVACIÓN

Apparent zenith	Station height above sea level							
	0 km	0,5 km	1 km	1,5 km	2 km	3 km	4 km	5 km
Angle								
60 deg 00 min,	+0,003	+0,003	+0,002	+0,002	+0,002	+0,002	+0,001	+0,001
66 deg 00 min,	+0,006	+0,006	+0,005	+0,005	+0,004	+0,003	+0,003	+0,002
70 deg 00 min,	+0,012	+0,011	+0,010	+0,009	+0,008	+0,006	+0,005	+0,004
73 deg 00 min,	+0,020	+0,018	+0,017	+0,015	+0,013	+0,011	+0,009	+0,007
75 deg 00 min,	+0,031	+0,028	+0,025	+0,023	+0,021	+0,017	+0,014	+0,011
δ _R , m								
76 deg 00 min,	+0,039	+0,035	+0,032	+0,029	+0,026	+0,021	+0,017	+0,014
77 deg 00 min,	+0,050	+0,045	+0,041	+0,037	+0,033	+0,027	+0,022	+0,018
78 deg 00 min,	+0,065	+0,059	+0,054	+0,049	+0,044	+0,036	+0,030	+0,024
78 deg 30 min,	+0,075	+0,068	+0,062	+0,056	+0,051	+0,042	+0,034	+0,028
79 deg 00 min,	+0,087	+0,079	+0,072	+0,065	+0,059	+0,049	+0,040	+0,033
79 deg 30 min,	+0,102	+0,093	+0,085	+0,077	+0,070	+0,058	+0,047	+0,039
79 deg 45 min,	+0,111	+0,101	+0,095	+0,083	+0,076	+0,063	+0,052	+0,043
80 deg 00 min,	+0,121	+0,110	+0,100	+0,091	+0,083	+0,066	+0,056	+0,047
B mb	1,156	1,079	1,006	0,938	0,874	0,757	0,654	0,563

III. DESARROLLO

A. Metodología

El proceso de análisis del efecto de la troposfera sobre la señal GPS se seguirá el proceso investigativo indicado en la Fig. 5. El análisis se concentra en verificar el impacto del retardo troposférico sobre la señal de GPS y cuál es el efecto de la implementación de los modelos sobre la precisión del posicionamiento final en el receptor, basados en el modelo de corrección Saastamoinen mediante la utilización de datos meteorológicos extraídos de la estación meteorológica Aeropuerto CHIMBORAZO (SERB), a través del portal Meteored.

B. Modelo de corrección troposférica

Los modelos de corrección troposféricos son métodos desarrollados con el fin de reducir el retardo y la refracción de la señal causada por la troposfera. Entre los más importantes está el modelo de Hopfield en 1969 desarrolló dos modelos diferentes para la refracción, uno para la componente seca y otro para la componente húmeda, como se puede observar en la Fig. 6, se considera que la refracción en la componente seca resultante de la atmosfera hidrostática y en la componente húmeda del vapor de agua, son dos refracciones distintas que también dependerán de la altura de cada una de las capas. La capa húmeda desde la superficie de la Tierra hasta unos 11 km

Tabla II
DATOS DE TEMPERATURA EN °C

Hora	Día					
	32	38	39	94	95	115
13	11	12	11	11	10	12
14	15	15	12	12	12	13
15	17	17	15	14	16	15
16	18	19	19	16	18	16
17	18	21	20	18	18	17
18	20	21	22	18	20	17
19	21	22	24	16	20	17
20	22	22	24	15	13	18
21	23	21	23	12	12	18

Tabla III
DATOS DE HUMEDAD RELATIVA EN %

Hora	Día					
	32	38	39	94	95	115
13	87,5	87,6	93,5	93,5	100	87,6
14	72	72	87,6	93,6	93,6	82
15	63,4	55,4	72	87,7	67,5	77
16	59,5	52,2	52,2	77,1	59,5	72,2
17	59,5	46,2	45,9	68	59,5	67,7
18	52,5	49,4	43,4	63,6	56,1	75,1
19	49,4	43,4	38,5	77,1	52,5	82,5
20	46,4	43,4	38,5	77	82	72,6
21	38,2	46,2	43,7	100	93,6	68

Tabla IV
DATOS DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN hPa

Día	32	38	39	94	95	115
13	1029	1030	1030	1030	1030	1032
14	1029	1030	1030	1030	1030	1032
15	1028	1030	1029	1030	1030	1031
16	1029	1029	1028	1030	1029	1031
17	1028	1027	1027	1027	1029	1030
18	1027	1026	1026	1027	1027	1029
19	1026	1025	1024	1027	1026	1028
20	1024	1023	1023	1027	1026	1026
21	1023	1023	1022	1026	1027	1026

de altitud y la capa seca desde 11 km hasta unos 40 km aproximadamente.

En estudios publicados en 1972 y 1973, Saastamoinen presentó uno de los primeros modelos de refracción de la troposfera, que estimaba el retardo según el ángulo de elevación y que es de nuestro interés ya que es el modelo utilizado por GPS [12]. La Ec. 1, propuesta por Saastamoinen, modela la presión atmosférica seca, en el cual se utiliza un modelo de temperaturas sobre tropopausa:

$$P = P_T \exp\left[\frac{-gM}{TR_t}(h-h_T)\right] \tag{1}$$

donde, todos los valores expresados con el subíndice T, son parámetros en la tropopausa, P_T es la presión atmosférica, g es la constante gravitatoria de la tierra, (M = cte = 28.9644 $\frac{kg}{kg}$ - mol) masa molecular de la atmosfera que se considera un valor constante en las 3 capas inferiores de la atmosfera hasta una altitud de 80 km, T la temperatura ambiente en grados Kelvin, R el radio de la tierra en metros, h es la altitud de la estación de observación, h_T es la altitud de referencia, la diferencia entre (h - h_T) es cercana a 0.



TABLA V
COORDENADAS DE LA ESTACIÓN GNSS

	Geodésicas	Planas UTM 17S
Latitud [GMS]	1°40'16,2142" S	9815128,634 N
Longitud [GSM]	78°39'4,3953" W	761323,453 E
Altura elipsoidal [m]	2801,348	

TABLA VI
RETARDO TROPOSFÉRICO CALCULADO

Hora Día	32	38	39	94	95	115
13	13,9783	14,0331	14,0302	14,1988	14,1358	14,2804
14	13,9783	14,0331	14,0302	14,1988	14,1358	14,2804
15	13,9651	14,0331	14,0170	14,1988	14,1358	14,2673
16	13,9783	14,0200	14,0039	14,1988	14,1226	14,2673
17	13,9651	13,9936	13,9907	14,1593	14,1226	14,2541
18	13,9520	13,9805	13,9776	14,1593	14,0963	14,2410
19	13,9388	13,9673	13,9512	14,1593	14,0832	14,2278
20	13,9125	13,9410	13,9381	14,1593	14,0832	14,2015
21	13,8993	13,9410	13,9249	14,1462	14,0963	14,2015

Además, para la refracción del componente húmedo Sastamoinis propone:

$$\Delta = 0.002277(1+D)\sec\varphi_0 \left[P_0 + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.005 \right) e_0 - B \tan^2 \varphi_0 \right] + \delta_R m \quad (2)$$

donde, Δ es el retardo sufrido en metros, P_0 la presión del lugar, e_0 están en milibares, T_0 es en $^{\circ}K$.

La Tabla I muestra los valores correspondientes a B y δ_R para las correcciones, basados en la altura de la estación de observación y el ángulo zenith.

C. Obtención de datos brutos

Para estimar el retraso que provoca la troposfera sobre la señal de GPS es necesario identificar los parámetros locales bajo el cual se desarrolla el análisis. Mediante la utilización de datos meteorológicos extraídos de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto de la ciudad de Riobamba denominada (SERB) se accede a estos a través del portal Meteored [13]. Con los datos para verificar el impacto que tiene la troposfera sobre la señal GPS se tomará los 3 días con mayor registro de humedad relativa y precipitación acumulada del mes de correspondientes a los días 4, 5 y 25 de abril equivalente a los días 94, 95 y 115 del calendario juliano. así como los 3 días con menor humedad relativa y precipitación acumulada del mes correspondiente a los días 1,7 y 8 de febrero equivalente a los días 32, 38 y 39 del calendario juliano según información provista por [14]. Los datos recolectados están organizados en las Tablas II - IV.

Por otra parte, la estación GNSS de propiedad de la EERSA (Empresa Eléctrica Riobamba S.A.) denominada EREC forma parte de REGME [15] y provee en formato RINEX la información de los archivos de navegación y observación con las coordenadas referenciales indicadas en la Tabla V.

El procesamiento de los datos se ejecuta por medio herramientas matemáticas como MATLAB, así como el software de procesamiento de información de GNSS denominado RTKlib debido a que permite aplicar la corrección del modelo troposférico y evaluar el impacto que inserta sobre la precisión en los ejes de posicionamiento.

D. Estimación del retardo troposférico

Con los datos meteorológicos se procede al cálculo realizado para el retardo troposférico de la componente seca y húmeda utilizando Ec.1 y Ec. 2 respectivamente del día de análisis 32 a las 13h00 UTC con condiciones de temperatura a $11^{\circ}C$, humedad a 87.5% y presión atmosférica de 1029 hPa. Considerando la transformación de la temperatura de grados centígrados a grados Kelvin de la siguiente manera:

$$T_{^{\circ}K} = 273.15 + T_{^{\circ}C} \quad (2)$$

$$T_{^{\circ}K} = 273.15 + T_{^{\circ}C}$$

$$T_{^{\circ}K} = 284.15^{\circ}K$$

Se aplica la Ec. 1 para la estimación del índice de refracción para el componente seco de la presión atmosférica con $M=cte= 28.9644$ de la siguiente forma:

$$P = 1029 \exp \left[- \frac{9.81 * 28.9644}{284.15 * 6371 * 10^3} (h - h_T) \right]$$

Para el componente húmedo de la presión atmosférica, según la Ec. 2, es necesario calcular previamente los componentes extras como la presión de vapor de agua e_0 la misma que se calcula a partir de la temperatura en grados kelvin (ver Ec. 3) y la humedad relativa del ambiente según la Ec. 4, donde H es el porcentaje de humedad relativa.

$$e_0 = 6.108 \exp \left[\frac{(17.15 * T_{^{\circ}K}) - 4684}{T_{^{\circ}K} - 38.45} \right] \times \frac{H}{100} \quad (4)$$

$$e_0 = 6.108 \exp \left[\frac{(17.15 * 284.15) - 4684}{284.15 - 38.45} \right] \times \frac{87.5}{100}$$

$$e_0 = 11.542 \text{ [mbar]}$$

Además, se ha elegido un ángulo de elevación de 10° considerándolo como el peor caso en el que la señal sufre distorsión y la altura de la estación GNSS. Para la determinación de los valores correspondientes a B y δ_R para las correcciones, se utilizará el siguiente ángulo zenit:

$$\vartheta_0 = 90^{\circ} - E$$

$$\vartheta_0 = 90^{\circ} - 10^{\circ} \quad (5)$$

$$\vartheta_0 = 80^{\circ}$$

Entonces, para el ángulo zenit calculado y la altura de la estación de observación $h \cong 3Km$, los valores de corrección correspondientes, según la Tabla I, son $\delta_R m = 0.086$ y $B = 0.757$.

Por otro lado, el coeficiente D puede ser calculado a partir de la Ec.6, donde α es la latitud y h la altura en Km del punto de observación (estación GNSS, ver Tabla V).

$$D = 0.0026 \cos^2 \alpha + 0.00028h \quad (6)$$

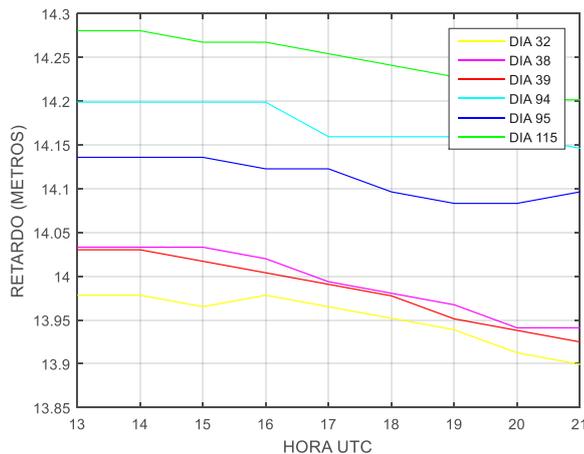


Fig. 7. Retardo troposférico calculado en el presente estudio.



Fig. 8. Variación del Error de Retardo Troposférico en el Eje Norte correspondiente al día 32.

$$D = 0.0026 \cos^2(-1^\circ 40' 16.2142'') + 0.00028(2801)$$

$$D = 3.382 \times 10^{-3}$$

Finalmente, el resultado para la refracción del componente húmedo según la aplicación de la Ec. 2 es $\Delta = 13.9783$.

Se sistematiza el cálculo con la ayuda de MATLAB con todos los datos meteorológicos adquiridos para los demás días en análisis.

IV. RESULTADOS

Los resultados de los cálculos realizados del retardo troposférico, mediante el software MATLAB son analizados de forma gráfica en el Fig. 7. En esta figura se muestra el impacto de la troposfera en el error de posicionamiento de los días analizados durante el intervalo de tiempo 13:00 – 21:00.

Como se observa, el día que presenta mayor retardo troposférico es el día de análisis 115 a las 13 horas UTC, bajo una temperatura de 12° , una humedad relativa del 87.6% y una presión atmosférica de 1032 hPa. Mientras que el menor retardo troposférico registrado se evidencia el día 32 a las 21 horas UTC, bajo una temperatura de 23° , una humedad relativa del 38.2% y una presión atmosférica de 1023 hPa.

En base a estos resultados, se evidencia que el mayor valor de retardo troposférico registrado es a las horas de mayor



Fig. 9. Variación del Error de Retardo Troposférico en el Eje Este correspondiente al día 32.



Fig. 10. Variación del error del Retardo Troposférico en el parámetro Altitud correspondiente al día 32.

exposición solar. Es importante mencionar que los archivos de observación y navegación de la estación GNSS registra estos datos, los mismos que son analizados con RTKlib aplicando el modelo de corrección troposférico para verificar el error estimado.

En las Fig. 8 - 10 se evalúa la variación que existe entre los valores de referencia (línea color azul) y los datos observados por la estación activando y desactivando el modelo de corrección troposférico. En otras palabras, la línea verde son los valores medidos sin la aplicación del modelo de corrección troposférica mientras que la línea roja representa los valores obtenidos con la aplicación troposférica.

Además, el error troposférico afecta a los 3 ejes de coordenadas, pero especialmente afecta al eje de altura ya que en su punto máximo alcanza 20 m cuando el índice de radiación es máximo, es decir a las 12:00 PM. Al aplicar el modelo de corrección sobre las medidas, el error se reduce a 4 m aproximadamente. Lo mismo ocurre en los ejes de coordenadas Norte y Este.

V. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos y basado con los datos meteorológicos obtenidos de presión, humedad relativa y temperatura necesarios para calcular el retardo troposférico en un intervalo de tiempo que implica puntos máximos y mínimos de radiación que implica dentro de 13:00 – 21:00 (UTC). Uno de los casos analizados y que presenta mayor retardo troposférico es el día de análisis 115 a las 13:00, con temperatura de 12° (C), humedad relativa de 87.6% y presión atmosférica de 1032 hPa. Mientras que el menor retardo troposférico registrado se evidencia el día 32 a las 21:00, con



temperatura de 23°, humedad relativa del 38.2% y presión atmosférica de 1023 hPa. Los datos de observación y navegación extraídos de la estación GNSS del día de mayor radiación son analizados ya que registra los retardos producidos sobre la señal debido a las condiciones meteorológicas verificando así el impacto de sobre la precisión sobre el receptor. Se verifica que el valor estimado del error troposférico es de 13.9 m lo que se verifica al obtener valores aproximados al aplicar el análisis en con los archivos de la estación GNSS de referencia que alcanza a 20 m.

Los modelos de corrección troposférico reducen notablemente el error, llegando a reducir las variaciones en casi un 70% lo que reduce los errores en la precisión de la estación de observación.

REFERENCIAS

- [1] Mejora de los Sistemas de Cartografía del Territorio Colombiano, Marzo 2007. [Online]. Disponible en: ftp://gisweb.ciat.cgiar.org/DAPA/planificacion/GEOMATICA/GPS/GP_S_Modulo.pdf
- [2] Espinal L., "Estudio de los efectos troposfericos en la precision de mediciones GPS en el suroccidente colombiano", Tesis de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia, Tech. Report., 2015.
- [3] Perdiguer R., "Estrategias de cálculo del retardo troposférico y su influencia en procesamiento GPS de alta precisión", Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, pp. 15 - 20, 2008.
- [4] Manzano R., "Análisis espectral del efecto troposferico en la señal GPS", Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Autonoma de México, Mexico, 2014
- [5] Manzano R., "Análisis espectral del efecto troposferico en la señal GPS", Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Autonoma de México, Mexico, 2014. p. 81.
- [6] Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, Abril 2017 [Online]. Disponible en: http://lagc.uca.es/web_lagc/docs/curso_rap/Presentacion_II.pdf
- [7] P. Molina, "Simulacion Numerica de un problema de contaminacion atmosferica", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013.
- [8] Alvarez J., "Analizar los efectos de la troposfera sobre la señal de GPS y el impacto en la precisión en el posicionamiento de un receptor dentro de la ciudad de Riobamba", Tesis de Maestría, Instituto de Postgrado y Educación Continua, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, Tech. Report., 2017. p. 12
- [9] Researching GNSS and Real Estate delimitation. En Investigando sobre GNSS y delimitación de la propiedad. Abril 2017. [Online]. Disponible en: <https://nagarvil.webs.upv.es/errores-atmosfericos-gnss-gps/>
- [10] Manzano, G. "Desarrollo de una metodología de actualización discreta de la cartografía catastral mediante la integración de técnicas GPS y SIG: Aplicación al catastro de Rústica en el T. M. de Nijar (Almería)". Tesis Doctoral, Universidad de Almería, España., 2003. p. 87.
- [11] Recomendaciones UIT-R. Mayo 2017. [Online]. Disponible en: <https://www.itu.int/pub/R-REC/es>
- [12] Munich X., "Estudio sobre la influencia de los modelos troposféricos en observaciones GNSS", Proyecto Final de Carrera, Universidad Politecnica de Cataluña, Barcelona, España, 2011. p. 26.
- [13] Meteored, Junio 2018. [Online]. Disponible en: https://www.meteored.com.ec/tiempo-en_Riobamba-America+Sur-Ecuador-Chimborazo--1-20215.html?d=historico
- [14] Boletin de Precipitación y Temperatura Zona 3. [Online]. Disponible en: http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/territoriales/precipitacion/2016/p_recipitacion_noviembre2016_zona3.pdf
- [15] Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador - REGME, Junio 2018. [Online]. Disponible en: <http://www.geoportaligm.gob.ec/wordpress/>