

## Artículo completo

## Ciencias Ambientales, Agroindustriales y de la Tierra

## Aportes al análisis y cálculo del ZTD en base a redes geodésicas y modelos atmosféricos

### *Assessment of ZTD derived from geodetic networks and atmospheric models*

Rosell, Patricia Alejandra<sup>1,2,3</sup>; Mackern, María Virginia<sup>1,2,3</sup>; Euillades, Pablo Andrés<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ingeniería. Instituto CEDIAC; Argentina

<sup>2</sup>Universidad Juan Agustín Maza. Facultad de Ingeniería y Enología; Argentina

<sup>3</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET); Argentina

DOI: <https://doi.org/10.59872/icu.v7i9.436>

Correo de correspondencia: [patricia.rosell@ingenieria.uncuyo.edu.ar](mailto:patricia.rosell@ingenieria.uncuyo.edu.ar)

Recepción: 28/06/2023; Aceptación: 15/11/2023;

Publicación: 20/12/2023

Palabras claves: GNSS; Retardo cenital troposférico; ERA5;

SIRGAS; Series temporales

Keywords: GNSS, ZTD, ERA5, SIRGAS, Time series

#### Resumen

Cuando la señal GNSS atraviesa masas de vapor de agua (WV), la velocidad de propagación disminuye generando un retardo en el camino que recorre el pulso. El centro de atmósfera neutra de SIRGAS calcula estos productos desde el 2014, desde la combinación de parámetros troposféricos de cada Centro de Análisis. En este trabajo se presenta un análisis del ZTD, realizado en base a los productos troposféricos de la red SIRGAS-CON. Se propone un método alternativo para su cálculo en base al modelo atmosférico de reanálisis ERA5. La validación de los retardos calculados fue realizada con respecto a los ZTD de SIRGAS, en 382 estaciones, mostrando diferencias de hasta 1.5 cm, mientras que en sitios de altura las diferencias se incrementaron hasta los 5 cm. En la mayoría de los casos el desvío estándar fue menor que 2 cm. Aun así, en este trabajo, se muestran las capacidades de ERA5 para proporcionar retrasos troposféricos en áreas con baja densificación GNSS.

#### Abstract

*The presence of water vapour (WV) in the neutral atmosphere generates a delay in the path of the GNSS signal known as Zenith Total Delay (ZTD). The Analysis Centre for the Neutral Atmosphere from the SIRGAS Network estimates this product since 2014 as the combination of the tropospheric products of each analysis centre. This work presents an assessment of the spatiotemporal behaviour of the ZTD obtained from the SIRGAS geodetic network. We also propose an alternative method for its calculation using the ERA5 model. The validation of this method was made for 382 sites concerning the SIRGAS ZTD. The differences between the data reach 1.5 cm whilst, for sites in elevated areas, the difference increases up to 5 cm. In most of the cases, the standard deviation is less than 2 cm. With this work, we prove the capabilities of ERA5 for providing tropospheric delays to areas with low GNSS densification.*

## 1. Introducción

La determinación del retardo de la señal GNSS a causa de la atmósfera surge por la necesidad de lograr alta precisión en el cálculo de coordenadas geodésicas. A causa del error de refracción que genera la presencia de la atmósfera, el camino que sigue la señal electromagnética sufre una desviación que curva la señal hacia la Tierra, la cual depende del ángulo de observación al objeto. La desigual distribución de constituyentes de la atmósfera genera que la señal de cada satélite sea observada por un receptor GNSS con una desviación distinta según la ubicación relativa satélite-receptor. Esta desviación es máxima si la dirección satélite-receptor está cercana al horizonte y mínima en el cenit, por lo tanto, el retardo de la señal será mayor a medida que el satélite se acerca al horizonte (Yao *et al.*, 2016). A fin de reducir las observaciones a una única dirección, se utiliza una función de mapeo, la cual permite proyectar las observaciones a la dirección cenital.

El retardo proyectado en la dirección del cenit del sitio de observación, también llamado Retardo Cenital Troposférico (ZTD por sus siglas en inglés: *Zenith Total Delay*), se le puede considerar como la suma de dos componentes, relacionadas directamente con el aire seco y con el vapor de agua (Zebker *et al.*, 1997). Existen diversas funciones de mapeo para la obtención del ZTD, siendo algunas la Función de Mapeo de Hopfiel (Hopfiel, 1969), Chao (Chao, 1972), Baby (Berrada Baby *et al.*, 1988), Herring (Herring, 1992), Isobaric Mapping Function (Niell, 2001), Vienna Mapping Function (Boehm *et al.*, 2006a) y Global Mapping Function (Boehm *et al.*, 2006b).

En este sentido, desde el 2014, se extraen como parámetros adicionales para su posterior análisis, los valores de ZTD, en cada estación de la red geodésica SIRGAS. Estos parámetros se estiman durante el proceso de cálculo, para lograr las precisiones requeridas dentro de los estándares internacionales. Estos retardos surgen de un procesamiento riguroso con software científico y de un ajuste ponderado (Mackern *et al.*, 2022). Han sido validados con respecto a radiosondeos y retardos troposféricos estimados por el International GNSS Service (IGS) (Mackern *et al.*, 2020). La red SIRGAS-CON se extiende en un amplio territorio, cubriendo la gran mayoría del continente americano y está en constante proceso de densificación hacia el interior de los países de la región.

Dado que el retardo que sufre la señal se debe, en gran medida, a la distribución de masas de vapor de agua concentrada en las capas bajas de la tropósfera (Bevis *et al.*, 1992; Jacobson, 2005; Wallace, 2006), es de esperar que el ZTD presente un comportamiento que responda a la distribución espacial y temporal de dicha variable. Es por lo que, en este trabajo, se han analizado las series de tiempo del ZTD, para un periodo de 8 años (2014-2021), en 382 estaciones, con el objetivo de mostrar cómo es el comportamiento y distribución del ZTD a lo largo de América del Sur, Centro y Caribe. Se ha analizado su variabilidad con la latitud y con la altura del sitio.

Como segundo aporte, considerando que aún hay amplias áreas no cubiertas por estaciones GNSS en el continente, se propone en este trabajo, un método alternativo de cálculo del ZTD desde el modelo de reanálisis atmosférico ERA5 y se presenta su validación, con respecto a los productos troposféricos disponibles en las estaciones SIRGAS-CON seleccionadas. Esta validación se ha realizado sobre la comparación de un año de parámetros, el año 2018.

## 2. Datos y metodología

### 2.1 Productos troposféricos de SIRGAS

Los retardos cenitales troposféricos son calculados por el Centro de Análisis SIRGAS para la Atmósfera Neutra, para cada una de las estaciones GNSS que componen la red SIRGAS-CON, las cuales se encuentran heterogéneamente distribuidas en todo América. Tales productos troposféricos de SIRGAS ( $ZTD_{SIR}$ ) se encuentran disponibles en el sitio web oficial (<https://sirgas.ipgh.org/productos/retrasos-troposfericos/>). Para este trabajo se han utilizado los  $ZTD_{SIR}$  correspondientes a estaciones que presentaban un mínimo de tres años de productos, en el periodo comprendido entre el 2014 y 2021, resultando seleccionados 382 sitios (Figura 1).

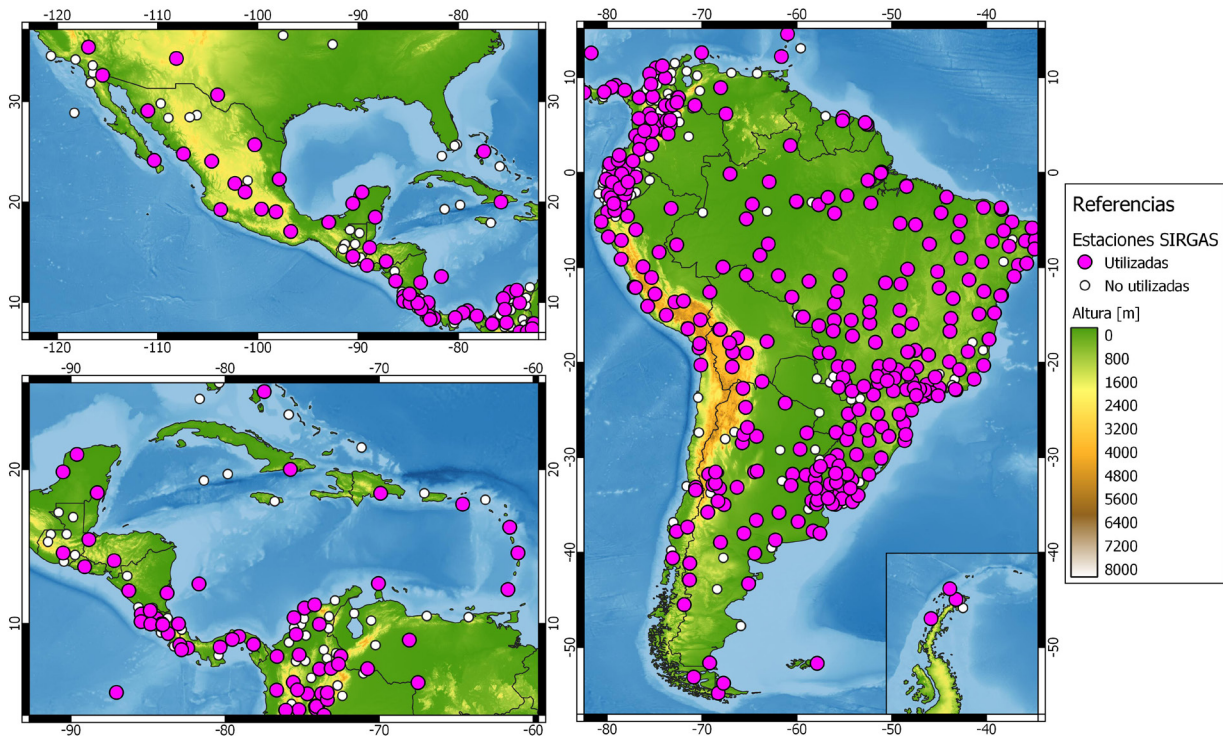


Figura 1. Distribución de estaciones SIRGAS a abril del 2021. Las estaciones utilizadas se indican con puntos rosas y las no utilizadas con puntos blancos.

## 2.2 Metodología de cálculo del ZTD desde ERA5

La distribución actual de estaciones de la red SIRGAS se presenta, en algunas áreas, con muy baja densidad de estaciones GNSS. Por otro lado, es común encontrar discontinuidades en las series temporales del  $ZTD_{SIR}$  en algunos sitios. Por estas dos razones, se propuso un método alternativo de cálculo del ZTD, desde datos de modelos atmosféricos, aplicando el camino opuesto al utilizado en Mackern, *et al.*, (2020) para la determinación de vapor de agua. Para este trabajo, el vapor de agua es un dato obtenido del modelo, al igual que la temperatura y presión atmosférica.

El modelo elegido para este trabajo fue ERA5, el cual es uno de los más difundidos y accesibles, generado y distribuido por el ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Este modelo brinda estimaciones horarias de un gran número de variables atmosféricas, de suelo y oceánicas en una grilla de  $0.25^\circ$  ( $\approx 31$  km) de resolución tanto a nivel de superficie como a 137 niveles de altura atmosférica. Las variables de ERA5 cubren un gran periodo de tiempo, ya que cuenta con datos desde 1979 y los datos finales de este modelo se publican cada 3 meses mientras que los datos preliminares de procesamiento se pueden obtener con 5 días de demora (Hersbach *et al.*, 2018). Para este estudio, se seleccionó el modelo atmosférico «ERA5 a nivel de superficie» (llamado «Single level»), cuyos datos se pueden descargar gratuitamente desde el sitio oficial de Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>). La validación de los nuevos parámetros obtenidos ( $ZTD_{ERA5}$ ) se realizó con los valores troposféricos de la red SIRGAS-CON. En este caso se consideró el  $ZTD_{ERA5}$  calculado en el nodo más cercano a la estación GNSS donde se disponía del  $ZTD_{SIR}$ . Las comparaciones se realizaron para un año de productos, correspondientes al año 2018.

La temperatura, obtenida en grados Kelvin [K], corresponde a la temperatura del aire a dos metros de altura del suelo. La presión atmosférica extraída se publica en hectopascales [ $h_{pa}$ ] y es la fuerza ejercida por la atmósfera ajustada a la altura del nivel medio del mar. Si bien el modelo brinda presión atmosférica al nivel de la superficie terrestre, se ha decidido utilizar el nivel medio del mar como referencia de altura para la presión, a fin de ajustarse a la metodología de cálculo de IWV propuesta por Mackern *et al.* (2020). Finalmente, el vapor de agua expresado en unidades de presión [ $kg/m^2$ ], representa el valor de vapor de agua integrado a lo largo de toda la columna atmosférica desde el nivel de superficie al tope de atmósfera (Hersbach *et al.*, 2018). Este modelo en particular permite prescindir de integrar la columna atmosférica, facilitando el uso y comprensión a usuarios ajenos a las prácticas meteorológicas.

En base a las variables meteorológicas obtenidas de ERA5, el cálculo de ZTD se realizó considerando la suma de las dos componentes: seca (ZHD) y húmeda (ZWD) (Ec. 1):

$$EC. 1 \quad ZTD = ZHD + ZWD$$

Donde el ZHD se determina siguiendo la Ec. 2

$$EC. 2 \quad ZHD = 0.002276738 \cdot \frac{P_{nodo}}{1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.28 \cdot 10^{-6} h_{nodo}}$$

Siendo,  $\varphi$  la latitud y  $h_{nodo}$  la altura del nodo de ERA5. La presión extraída del modelo se reduce al nivel de superficie según lo indicado en la Ec. 3.

$$EC. 3 \quad P_{nodo} = P_0(1 - 0.0000226 \cdot (h_{nodo} - h_0))^{5.225}$$

Con  $h_0$  igual a 0, por considerar como referencia al nivel medio del mar. Finalmente, el ZWD se determinará como (Ec. 4):

$$EC. 4 \quad ZWD [m] = \frac{IWV [kg/m^2]}{\Pi}$$

Donde el factor de proporcionalidad se determina mediante la Ec. 5:

$$EC. 5 \quad \Pi = \frac{10^5}{\left(K'_2 + \frac{K_3}{T_m}\right) 0.4614991785}$$

En la Ec. 6 se utilizaron los coeficientes de la refracción  $K'_2$  y  $K_3$  «Best average» de Rüeger (2002), validados en Mackern *et al* (2021). Con ellos, la Ec. 5 queda determinada como:

$$EC. 6 \quad \Pi = \frac{10^5}{\left(22.9744 + \frac{375463}{T_m}\right) 0.4614991785}$$

La Ec. 6 depende de la temperatura media de la atmósfera, la cual fue calculada a partir de la temperatura en superficie ( $T_s$ ) (Mendes & Langley, 2000) según la Ec. 7.

$$EC. 7 \quad T_m = 50.4 + 0.789T_s$$

De esta manera fue posible determinar un valor de  $ZTD_{ERA5}$  por cada nodo (punto) del modelo atmosférico.

### 3 Análisis de la variabilidad del ZTD

Las series de tiempo del  $ZTD_{SIR}$  calculados en SIRGAS fueron analizadas para cada sitio, en donde se pudo observar que cada una presenta un comportamiento periódico anual y en algunas semianual. La Figura 2 muestra las series de tiempo del  $ZTD_{SIR}$  para cuatro estaciones ubicadas en regiones climáticas distintas dentro del área de estudio (Tabla 1). Puede observarse cómo en estaciones de zonas áridas (Estación MGUE, Malargüe, Mendoza), los valores promedios de ZTD no sólo son bajos en comparación con zonas húmedas (Estación BELE, Belém, Brasil) sino que la amplitud anual (diferencias entre los máximos y mínimos) también es baja. Otras estaciones en zonas áridas, como UNSJ (Ciudad de San Juan, Argentina) no sólo tienen valores de ZTD bajos, sino que las series presentan menor dispersión en comparación con una de clima semi-húmedo (VBCA, Bahía Blanca, Argentina), donde los valores indican mayor variabilidad diaria.

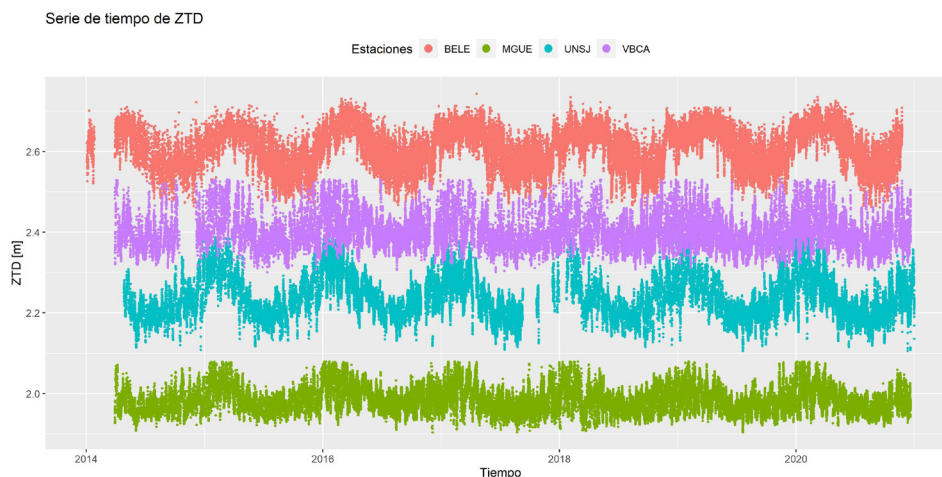


Figura 2: Serie de tiempo comparativa entre 4 estaciones GNSS pertenecientes a zonas climáticas distintas.

Fuente: Elaboración propia en base a ZTD de SIRGAS.

Tabla 1: Posiciones de estaciones SIRGAS comparadas y su valor  $ZTD_{SIR}$  medio para el periodo 2014-2021

Estación	País	Latitud (decimales)	Longitud (decimales)	Altura [m]	$ZTD_{SIR}$ medio [m]
BELE	Brasil	-01° 24' 31.65"	-48° 24' 45.18"	9	2.61
MGUE	Argentina	-35° 46' 38.46"	-69° 23' 52.53"	1554	1.98
UNSJ	Argentina	-31° 32' 28.52"	-68° 34' 37.41"	710	2.23
VBCA	Argentina	-38° 42' 02.75"	-62° 16' 09.22"	59	2.39

Los valores medios de  $ZTD_{SIR}$  fueron graficados a fin de conocer la distribución espacial de los valores esperados de esta variable. La Figura 3 permite observar que aquellas áreas con menor  $ZTD$  medio se encuentran ubicados sobre la Cordillera de los Andes, mientras que aquellas zonas a menor altura presentan un incremento en el valor medio del  $ZTD_{SIR}$ .

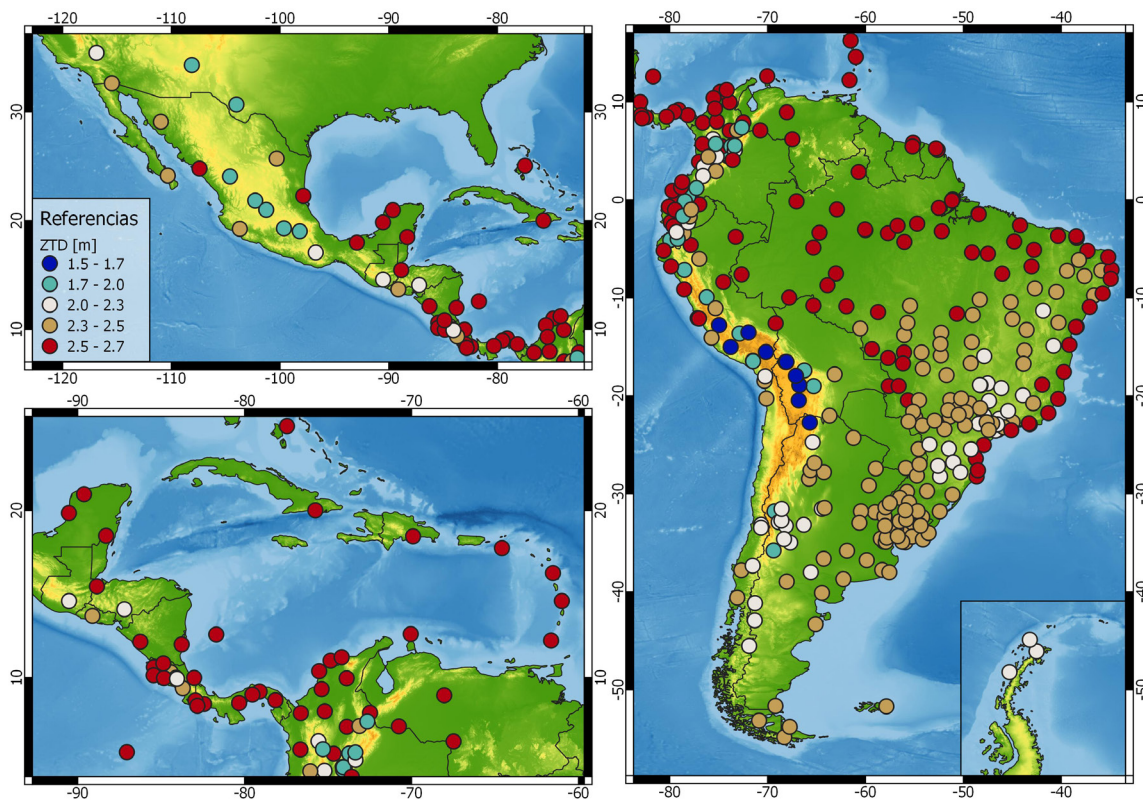


Figura 3. Distribución del valor medio de  $ZTD_{SIR}$  calculado en las estaciones SIRGAS seleccionadas

Por otro lado, para comprender la magnitud de la variación temporal del  $ZTD$  a lo largo de un día, se calculó el valor medio horario del  $ZTD$  ( $ZTD_t^i$ ), considerando la serie completa. Luego para conocer su variación horaria, se determinó la diferencia entre dos valores horarios consecutivos considerando intervalos ( $t$ ) de una y dos horas, según Eq. 8.

$$EC. 8 \quad \Delta ZTD^i = ZTD_{t+1}^i - ZTD_t^i$$

Cabe mencionar que algunas estaciones disponen de valores de  $ZTD$  estimados cada 2 horas en parte del período analizado, es por ello por lo que, en estos casos, se mantuvo ese intervalo. La Figura 4 muestra el valor absoluto de la máxima diferencia encontrada por estación.

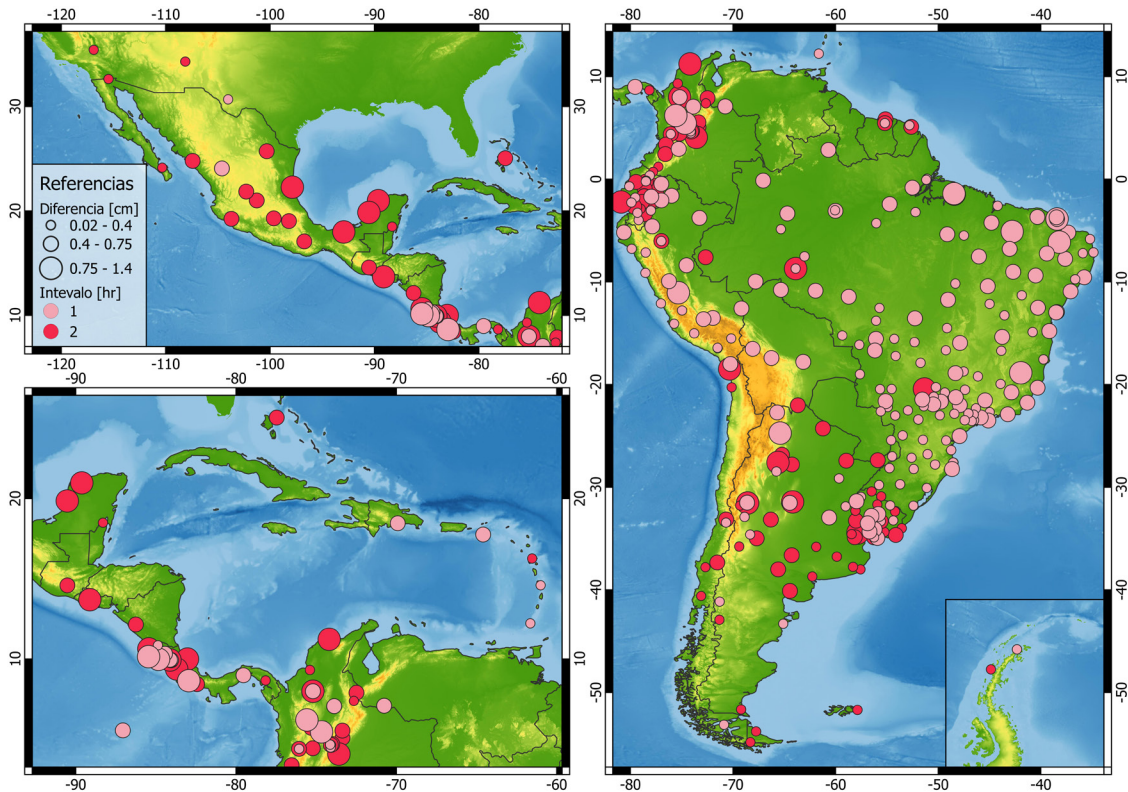


Figura 4: Máximas diferencias encontradas entre valores horarios medios consecutivos de ZTD. El tamaño del círculo representa la magnitud de la diferencia y el color indica el intervalo temporal.

Las máximas diferencias se observan en estaciones cuyos ZTD han sido estimados cada 2 horas. Los valores totales de cada intervalo horario y rango de variación pueden encontrarse en la Tabla 2. Se puede observar que las variaciones tanto horarias como cada 2 h, resultan menores que 0.75 cm en el 90 % de las estaciones, siendo tal diferencia menor que la precisión de dicho parámetro (Mackern *et al*, 2020). Comparando los registros cada 1 y 2 h se observa que las diferencias de ZTD mayores que 0.75 cm se han encontrado en el 62% de los casos en estaciones que tienen estimaciones de ZTD cada 2 h. De este análisis surge la justificación de estandarizar la estimación del ZTD a intervalos de 1 hora

Tabla 2: Cantidad de estaciones de acuerdo con el intervalo utilizado en el cálculo del  $\Delta ZTD_i$

$\Delta ZTD_i$	Cantidad de estaciones por intervalo		
	1 hora	2 horas	Total
$0.02 \text{ cm} < \Delta ZTD_i < 0.4 \text{ cm}$	123	62	185
$0.4 \text{ cm} \leq \Delta ZTD_i \leq 0.75 \text{ cm}$	93	67	160
$0.75 \text{ cm} < \Delta ZTD_i < 1.4 \text{ cm}$	14	23	37

#### 4. Validación del ZTD calculado con ERA5

Para realizar la validación de los  $ZTD_{ERA5}$  calculados, se seleccionaron aquellos puntos del modelo que se encontraban más cercanos a las estaciones SIRGAS-CON utilizadas. La validación del  $ZTD_{ERA5}$  se determinó por diferencia directa con el correspondiente  $ZTD_{SIR}$ , considerando que estos productos ya han sido validados por Mackern *et al.*, (2020). La Figura 5 muestra la distribución de las estaciones GNSS sobre las que se realizó la validación indicando en color, los valores medios de las diferencias obtenidas y, en tamaño, la desviación estándar (SD) de cada una. La Figura 6 muestra el histograma de las diferencias ( $ZTD_{SIR} - ZTD_{ERA5}$ ) medias. Se observa que, de las estaciones analizadas, el 80 % (304 estaciones) poseen diferencias de  $\pm 1.5 \text{ cm}$  y de ellas, el 96% presentan una desviación estándar menor a 2 cm.

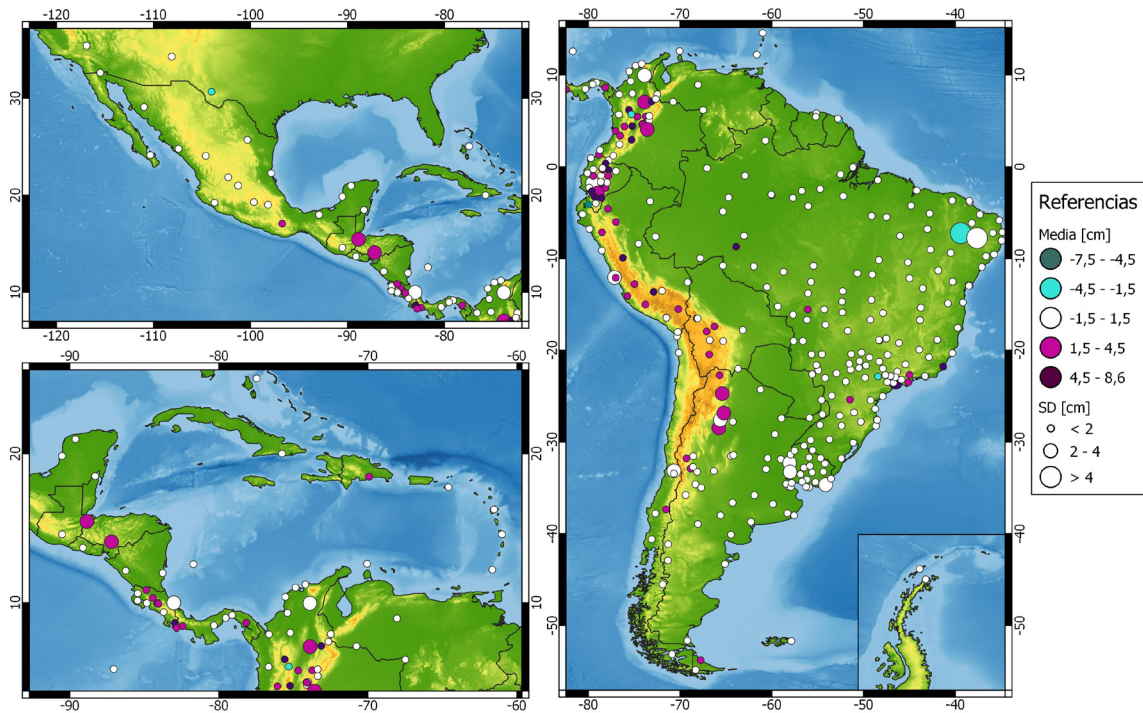


Figura 5: Distribución geográfica de las diferencias entre  $ZTD_{SIR}$  y  $ZTD_{ERA5}$  en cada estación SIRGAS. Los colores representan la media de las diferencias ( $ZTD_{SIR} - ZTD_{ERA5}$ ) y el tamaño, la desviación estándar (SD) en centímetros.

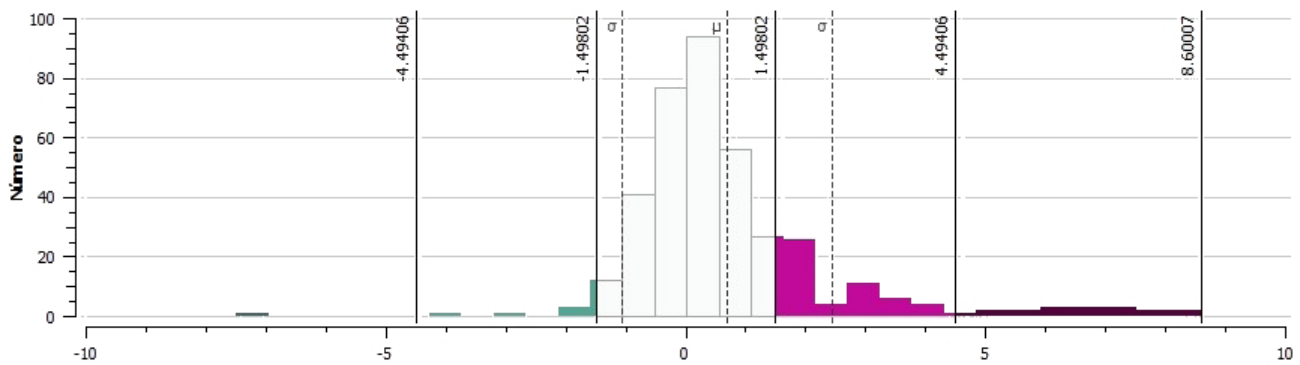


Figura 6: Histograma de las diferencias medias ( $ZTD_{SIR} - ZTD_{ERA5}$ ). Fuente: Análisis estadístico de Qgis (v. 3.10.6).

Por otro lado, del total de estaciones analizadas, sólo el 4% (17 estaciones), presentan diferencias entre 5 y 8.6 cm, y se localizan en la zona norte de la Cordillera de los Andes. Estas diferencias superan ampliamente la incertidumbre de los  $ZTD_{SIR}$  y  $ZTD_{ERA5}$  (de  $\approx 7.5$  mm) encontrados en Mackern *et al*, 2020. En la Figura 7, se muestran las series de tiempo de ZTD de las dos estaciones con máximas diferencias: AP01 (Perú) y BNGA (Colombia). Puede apreciarse que si bien ambas series presentan el mismo comportamiento, se encuentran sesgadas en valores entre 7 y 8 cm respectivamente. Además, puede observarse que las diferencias presentan variabilidad estacional, lo cual requiere de un análisis detallado que no es parte de este trabajo. Como complemento, se presentan dos ejemplos en la Figura 8, en las cuales las diferencias entre los ZTD son mínimos y centrados en el 0 cuyos valores no superan los  $\pm 4$  cm.

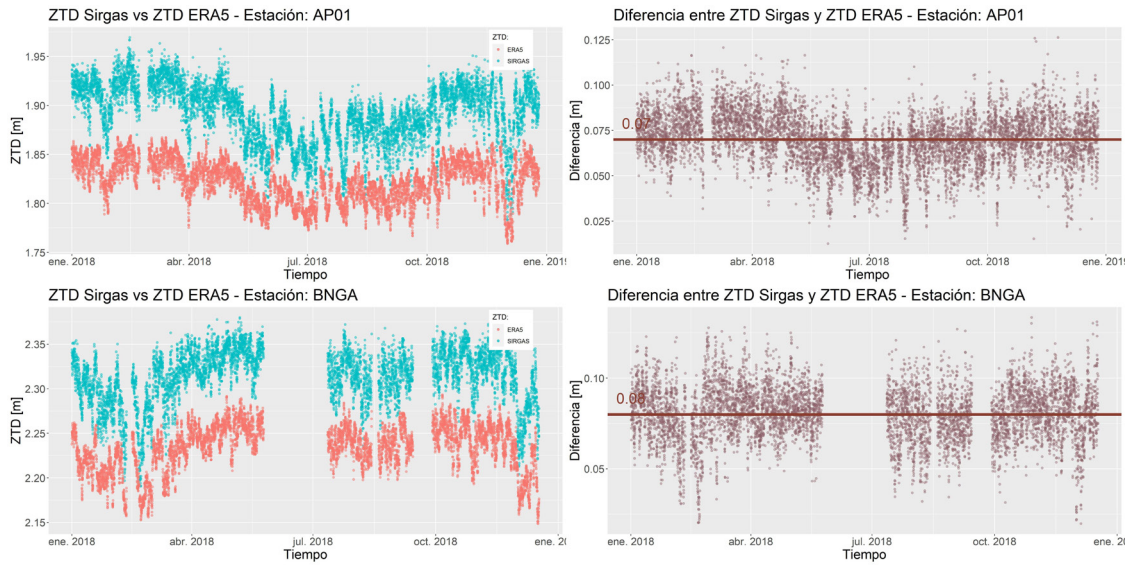


Figura 7: Ejemplos de dos estaciones con máximas diferencias ( $ZTD_{SIR} - ZTD_{ERA5}$ ). AP01: 2419 m. BNGA: 959 m.

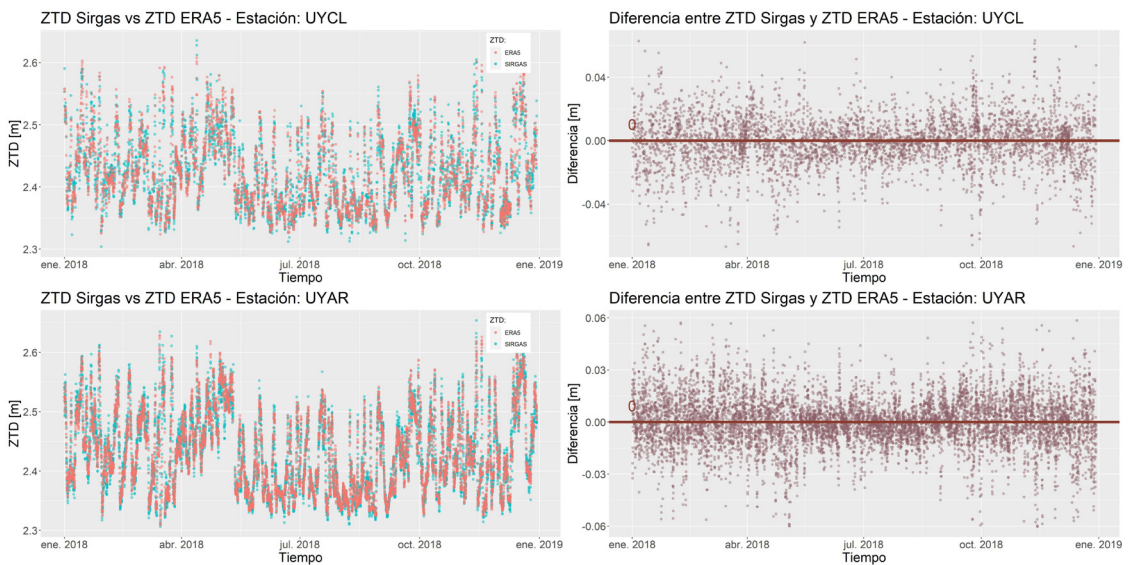


Figura 8: Ejemplos de dos estaciones con mínimas diferencias ( $ZTD_{SIR} - ZTD_{ERA5}$ ). UYCL: 134 m. UYAR: 146 m.

La fuente de estas discrepancias puede tener diversos orígenes. Desde el punto de vista geodésico, se analizó la influencia de la superficie de referencia, la ubicación de los nodos ERA5 con respecto a la posición de las estaciones SIRGAS y la disponibilidad de valores de vapor de agua asimilados en el modelo atmosférico.

#### 4.1 Superficie de referencia en el cálculo del $ZTD_{ERA5}$

En ERA5, la altura a la que refieren las variables meteorológicas se expresa como medida de potencial [ $m^2/s^2$ ] en una variable llamada «geopotencial». Esta superficie de referencia es producto de interpolaciones de cinco modelos de superficie, los cuales se combinan para generar una grilla regular de  $\approx 31$  km de resolución (ECMWF, 2016a). El geopotencial de ERA5 puede transformarse a alturas geopotenciales (metros sobre el Geoide) si se los divide por un valor promedio de gravedad (ECMWF, 2016b):

Para analizar las alturas calculadas por la Ec. 9 se realizó una comparación con el modelo digital de elevaciones (DEM) SRTM30 (NASA-JPL, 2013) el cual brinda alturas al Geoide y es uno de los modelo más utilizado para representar la superficie terrestre.

$$EC. 9 \quad h_{ref}[m] = \frac{geopotencial [m^2/s^2]}{9.80665 [m/s^2]}$$



Si bien ambas superficies de referencia se encontraban con diferente resolución (ERA5: ≈31 km, SRTM: 30 m), la diferencia se realizó punto a punto, tomando las coordenadas coincidentes entre ambos (Figura 9). Los resultados muestran que las mayores diferencias se encuentran sobre la Cordillera de los Andes, llegando a superar en algunos sitios, los 1000 m en valor absoluto. Estos valores coinciden con lo expresado por Wang *et al.* (2016), quienes mencionan la complejidad de los modelos atmosféricos en determinar la superficie terrestre, especialmente en áreas montañosas, a causa de la suavización del terreno requerida para obtener las resoluciones finales.

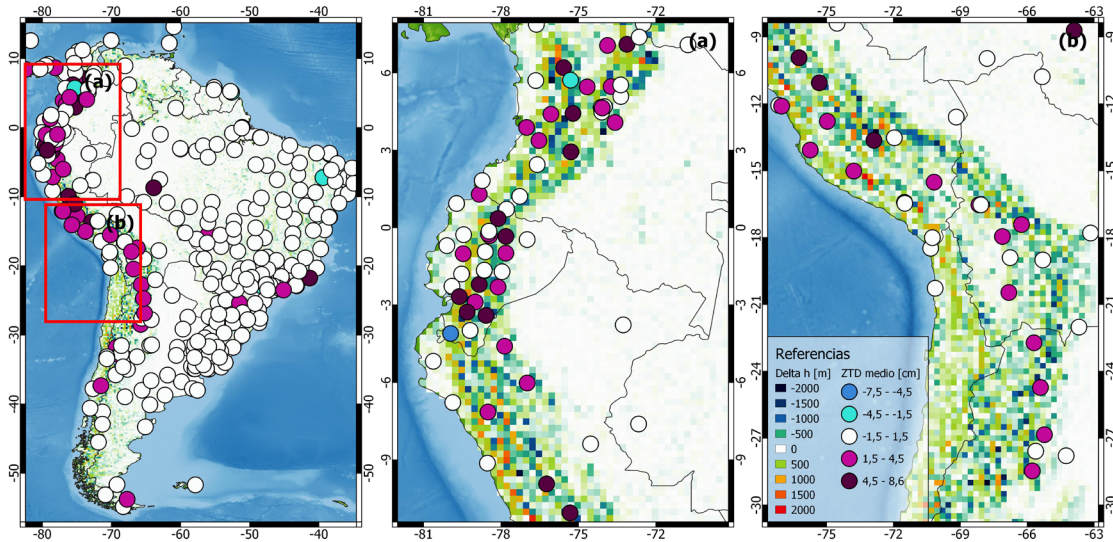


Figura 9: Comparación entre las medias de las diferencias  $ZTD_{SIR} - ZTD_{ERA5}$  y las diferencias en alturas (ERA5 - DEM SRTM30).

En la misma Figura 9 se observan superpuestos los valores medios de las diferencias obtenidas entre el  $ZTD_{SIR}$  (valor de control) y el  $ZTD_{ERA5}$  determinado en cada estación GNSS. De su observación conjunta se concluye que hay una correspondencia entre los sitios con máximas diferencias y las regiones donde se cuantificaron las máximas inconsistencias de alturas. Corresponde aclarar que los valores de  $ZTD_{SIR}$  están referidos a la altura elipsoidal,  $h_{GNSS}$  (altura sobre el elipsoide WGS84) mientras que el  $ZTD_{ERA5}$  refiere a la altura geopotencial ( $H_{ref}$ ) del punto de grilla más cercano a la estación GNSS correspondiente. Entre dichas alturas existe una diferencia de alturas a considerar (ondulación geoidal) en cada punto, sin embargo, en la zona de estudio la ondulación geoidal se encuentra entre 5 y 50 m, valor muy inferior a las diferencias de altura encontradas.

**Ubicación diferencial del nodo de ERA5 con respecto al sitio GNSS**

4.2 Otro factor importante a tener en cuenta es la diferencia geográfica que existe entre el punto de grilla del modelo ERA5 utilizado, con respecto a la estación GNSS correspondiente. Dado que la grilla de ERA5 es regular, una estación GNSS puede encontrarse a una distancia máxima de ≈22 km del nodo de ERA5 más cercano. En una región de topografía compleja, cada nodo puede presentar diferencias de altura superiores a 1000 m con respecto a la estación GNSS. En este aspecto, el punto de grilla de ERA5 utilizado en este trabajo (nodo más cercano) podría estar en desventaja con respecto a alguno de los otros 3 nodos, que se encuentre a una distancia ligeramente mayor, pero con diferencia de altura inferior (Van Dam *et al.*, 2010). Un ejemplo de lo mencionado puede observarse en la Tabla 3, donde se presenta cómo la variación de altura entre estaciones SIRGAS cercanas, ubicadas en zona montañosa, presentan una variación media del ZTD del orden de 10 cm, similares a las máximas diferencias de ZTD encontradas en esta investigación.

Tabla 3: Ejemplos de variaciones de ZTD en estaciones cercanas

Estación	País	Altura [m]	ΔAltura [m]	Distancia horizontal [km]	ZTD medio [m]	ΔZTD [m]
EPEC	Ecuador	2523	532	14	1.76	0.10
QUEM		3055			1.86	
BOGA	Colombia	2610	350	18	1.83	0.08
ABPD		2960			1.75	

#### 4.3 Incertidumbre en la modelización del vapor de agua

Si bien la determinación del contenido del vapor de agua no escapa a la problemática de alturas mencionada, el modelado del vapor de agua requiere de un análisis independiente. Para la determinación de esta variable, los datos de entrada se retroalimentan de los valores estimados por radiosondeos y mediciones satelitales. En el caso de los radiosondeos, el área de estudio mencionada en este trabajo cuenta con sólo 44 radiosondeos, una muy baja densidad en comparación con otras regiones como Europa y EEUU. Por otro lado, las determinaciones satelitales son posibles en regiones con cielos despejados, lo cual condiciona la observación en áreas como el Caribe y América Central, cuyos cielos se encuentran cubiertos de nubes por grandes períodos de tiempo (Leontiev & Reuveni, 2017; van de Berg *et al.*, 1995). También es necesario mencionar que la resolución temporal de las técnicas mencionadas resulta insuficiente para la caracterización del vapor de agua en la zona, considerando que se cuenta con radiosondeos cada 12 horas en el mejor de los casos (Bevis *et al.*, 1992; Durre *et al.*, 2006), y cada 6 días para las observaciones satelitales. Por lo mencionado anteriormente, los valores de vapor de agua son insuficientes para su modelización en la región ya que los datos no son lo suficientemente densos para representar la variabilidad espacio-temporal en esta área de características tan diversas y de gran extensión (Wang *et al.*, 2016).

#### 5. Discusiones y conclusiones

El ZTD es una corrección que debe ser determinada cuando se utiliza GNSS, puesto que influye directamente en la distancia satélite-receptor. Por este motivo, las redes geodésicas de alta precisión lo deben determinar para evitar su propagación en el cálculo de las coordenadas. Por otro lado, este parámetro resulta de interés para la meteorología, puesto que tiene una relación directa con el contenido del vapor de agua troposférico, permitiendo su estimación.

La determinación de las series de tiempo de ZTD mostraron que esta variable presenta un comportamiento periódico anual y que los valores medios de cada serie presentan diferencias según la región climática a la que pertenecen. Es necesario mencionar que, como el ZTD es consecuencia directa del contenido de vapor de agua en una región (así como de los cambios de presión atmosférica y temperatura), es de esperar que el comportamiento de ambas variables sea proporcional. Se espera entonces que, en áreas y épocas donde el ZTD es mayor, también lo sea el correspondiente contenido de vapor de agua. La misma relación se espera para los sitios y épocas de mínimos.

Del análisis realizado sobre la variación temporal del ZTD, para lo cual se calcularon las máximas variaciones horarias consecutivas, resultan ser inferiores a la precisión determinada para el ZTD según lo reportado por Mackern *et al.* (2020) en el 90% de las estaciones. Las variaciones máximas del ZTD para épocas consecutivas se determinaron con valores superiores a 0.75 cm en el 10% restante y para este grupo de estaciones el 62% de esas diferencias máximas se detectó para estaciones que cuentan con registros de ZTD estimados cada 2 h, lo cual justifica la necesidad de estimar el ZTD cada 1 hora. Esto último es un requerimiento actual de SIRGAS para con los centros de análisis que realizan su estimación dentro del cálculo operacional de la red. Se está trabajando en la posibilidad de estimar el parámetro a intervalos menores o bien proponer un método de interpolación temporal en ciertas estaciones y para aplicaciones que requieran épocas específicas (sub horarias).

Dado que el vapor de agua y el ZTD son variables de utilidad para distintas aplicaciones, se propuso un método de cálculo de ZTD basado en el modelo atmosférico ERA5, el cual permite aumentar la cantidad de datos disponibles y garantiza la continuidad de la serie temporal en sitios de interés específico. Los valores calculados fueron validados con respecto a valores de ZTD de la red SIRGAS-CON utilizando una serie anual de ambos parámetros (año 2018). Las diferencias medias resultaron ser cercanas al centímetro (para el 80% de las estaciones), y para un limitado número de estaciones ubicadas en altura, las diferencias resultaron superiores a 5 centímetros. De la validación del ZTD calculado desde datos de ERA5, con respecto a los de SIRGAS se concluyó que:

- En 304 sitios GNSS se encontraron diferencias entre  $\pm 1.5$  cm y, de ellas, 293 presentan una desviación estándar menor a 2 cm. Estos sitios estarían delimitando las áreas en las cuales el método de cálculo del ZTD desde ERA5 podría utilizarse.
- En 53 estaciones se observaron diferencias cuyos valores se encuentran entre 1.5 y 4.5 cm con desviaciones estándar también menores a 2 cm., 36 de las cuales se encuentran ubicadas en sitios de altura (sobre la Cordillera de los Andes), sobre las cuales se ha planificado realizar un análisis específico comparativo de alturas.
- En sólo 7 sitios se determinaron diferencias negativas entre -7.5 y -1.5 cm, de los cuales dos (GODE y KOUG) se encuentran cercanos a la costa y 5 están ubicados en zonas donde la ondulación geoidal es negativa (GODE, KOUG, CRAT, SPBO y MDO1).
- Por último, se encontró que en 5 de los puntos que presentaron diferencias de ZTD negativas entre -7.5 y -1.5 (CLEC, SNSN, MDO1, CRAT y SPBO) las diferencias entre la altura del nodo de ERA5 utilizado (más cercano) y altura de la estación GNSS superan, en valor absoluto, los 186 m (no mostrado en este trabajo).

Por todo lo expuesto se concluye que gran parte de las diferencias encontradas en el  $ZTD_{ERA5}$  validado se relaciona con la diferencia existente entre la superficie de referencia utilizada en ERA5 y las alturas de los sitios SIRGAS comparados. Este efecto resulta más notorio en las zonas de montaña, en donde se encontraron diferencias que, en algunos casos, superan los 1000 metros, adicionando un sesgo superior a los 5 cm en el  $ZTD_{ERA5}$ . Esta diferencia en alturas está complementada con el hecho de que el nodo ERA5 más cercano a la estación SIRGAS, puede presentar también diferencias de altura con respecto a sitio GNSS, introduciendo otro factor de incertidumbre. Estos análisis se están llevando a cabo por este grupo de investigación, en donde se tiene previsto analizar la influencia de la distancia y altura de los nodos de los modelos atmosféricos con respecto a las estaciones GNSS, así como la influencia de la ondulación geoidal, como corrección a los sistemas de alturas involucrados.

Las inconsistencias encontradas en el  $ZTD_{ERA5}$  también pueden deberse a los complejos procesos de cálculo que se utilizan en la determinación del vapor de agua a causa de la falta de datos (pasados y actuales) de radiosondeos en América Latina. Esto genera una incertidumbre en el modelado del vapor de agua, el cual, en este trabajo, es el principal insumo para el cálculo del  $ZTD_{ERA5}$ . Sin embargo, las comparaciones realizadas entre el  $ZTD_{ERA5}$  y  $ZTD_{SIR}$  permitieron concluir que, excluyendo la zona de la Cordillera de los Andes, los valores de  $ZTD_{ERA5}$  pueden ser utilizados con una incertidumbre de  $\pm 1.5$  cm. Dada la resolución espacial ( $0.25^\circ$ ), temporal (1 hora) y su libre disponibilidad, se han mostrado las capacidades de ERA5 para proporcionar retrasos troposféricos en aquellas zonas que no cuentan con estaciones SIRGAS o que requieren de una mayor densificación de puntos que la que ofrecen las redes GNSS de la región.

El aporte de valores de ZTD contribuye directamente a la generación de correcciones atmosféricas en imágenes satelitales (Rosell, 2022) y a la estimación en el cálculo de coordenadas, principalmente la altura, en procesamientos de observaciones GNSS. Si bien estos cálculos son generados internamente en los programas de procesamiento, un mejor conocimiento del ZTD contribuye a mejorar los modelos de corrección necesarios para trabajar con señales satelitales de origen electromagnético.

Por último, cabe aclarar que en América Latina hay una gran cantidad de estaciones GNSS, no incluidas en SIRGAS-CON, correspondientes a redes de densificación nacionales y que a la fecha de este trabajo no disponen de parámetros troposféricos publicados. Contar con productos ZTD a intervalos horarios en cada una de ellas podría significar un gran aporte tanto en la mejora de los modelos, en caso de ser asimilados a los mismos o bien como referencia para validar los modelos en zonas que actualmente no disponen de ningún control.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen la tarea silenciosa de los responsables de las estaciones GNSS, de los centros de datos y de análisis SIRGAS, sin los cuales esta investigación no hubiera sido posible. En especial se agradece al centro de análisis de atmósfera neutra, CIMA (Centro de Ingeniería Mendoza Argentina, UNCuyo-UMaza) quienes calculan semanalmente y brindan públicamente los productos troposféricos de las estaciones de SIRGAS, que se utilizaron en esta investigación.

## 7. Referencias bibliográficas

- Berrada Baby, H., Golé, P., & Lavergnat, J. (1988). A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements. *Radio Science*, 23(6), 1023-1038. <https://doi.org/10.1029/RS023i006p01023>
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research*, 97(D14), 15787. <https://doi.org/10.1029/92JD01517>
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7). <https://doi.org/10.1029/2005GL025546>
- Boehm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(2). <https://doi.org/10.1029/2005JB003629>
- Chao, C. (1972). A model for tropospheric calibration from daily surface and radiosonde balloon measurement. In *JPL Technical Memorandum*, 350-391, pp 16.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. *Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS)*, Accessed 2018-05-04.
- Durre, I., Vose, R. S., & Wuertz, D. B. (2006). Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. *Journal of Climate*, 19(1), 53-68. <https://doi.org/10.1175/JCLI3594.1>
- ECMWF. (2016a). *IFS Documentation CY41R2*. ECMWF.
- ECMWF. (2016b). IFS Documentation CY41R2 - Part IV: Physical Processes. *IFS Documentation CY41R2*, March, 213. <https://doi.org/10.21957/tr5rv27xu>
- Herring, T. A. (1992). Modeling of Atmospheric Delay in the Analysis Space Geodetic Data. *Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, 36. <http://ncgeo.nl/downloads/36DeMunck.pdf#page=167>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., & Rozum, I. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). *ECMWF*, 147. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Hersbach, H., De Rosnay, P., Bell, B., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Balmaseda, A., Balsamo, G., Bechtold, P., Berrisford, P., Bidlot, J., De Boissésón, E., Bonavita, M., Browne, P., Buizza, R., Dahlgren, P., Dee, D., Dragani, R., ... Zuo, H. (2018). Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP including updates on the ERA5 production status. *ERA Report Series*. <https://doi.org/10.21957/tkic6g3wm>
- Hopfield, H. S. (1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 74(18), 4487-4499. <https://doi.org/10.1029/JC074i018p04487>
- Jacobson, M. Z. (2005). *Fundamentals of Atmospheric Modeling* (Second). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139165389>
- Leontiev, A., & Reuveni, Y. (2017). Combining Meteosat-10 satellite image data with GPS tropospheric path delays to estimate regional integrated water vapor (IWV) distribution. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(2), 537-548. <https://doi.org/10.5194/amt-10-537-2017>
- Mackern, M. V., Mateo, M. L., Camisay, M. F., & Morichetti, P. V. (2020). Tropospheric Products from High-Level GNSS Processing in Latin America. In *International Association of Geodesy Symposia book series*. [https://doi.org/10.1007/1345\\_2020\\_121](https://doi.org/10.1007/1345_2020_121)
- Mackern, M. V., Mateo, M. L., Camisay, M. F., & Rosell, P. A. (2022). Quality control of SIRGAS ZTD products. *Journal of Geodetic Science*, 12(1), 42-54. <https://doi.org/10.1515/jogs-2022-0136>
- NASA-JPL. (2013). *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second number*. The Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1N.003>
- Niell, A. E. (2001). Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8). [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00087-4)
- Rosell, P. (2022). *Desarrollo de un modelo de corrección de la influencia del vapor de agua troposférico en el procesamiento DInSAR con el aporte de GNSS y ERA5*. Tesis doctoral (FCEN, UNCUYO).
- Van Dam, T., Altamimi, Z., Collilieux, X., & Ray, J. (2010). Topographically induced height errors in predicted atmospheric loading effects. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(7), 1-10. <https://doi.org/10.1029/2009JB006810>
- Van de Berg, L. C. J., Schmetz, J., & Whitlock, J. (1995). On the calibration of the Meteosat water vapor channel. *Journal of Geophysical Research*, 100(D10), 21069. <https://doi.org/10.1029/95JD01880>
- Wallace, J. H. P. (2006). *Atmospheric Science*. In *Dairy Science & Technology*, CRC Taylor & Francis Group (Issue June). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-00034-8>
- Wang, Y., Zhang, Y., Fu, Y. F., Li, R., & Yang, Y. J. (2016). A climatological comparison of column-integrated water vapor for the third-generation reanalysis datasets. *Science China Earth Sciences*, 59(2), 296-306. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5183-6>
- Yao, Y. Bin, Zhang, B., Xu, C. Q., He, C. Y., Yu, C., & Yan, F. (2016). A global empirical model for estimating zenith tropospheric delay. *Science China Earth Sciences*, 59(1), 118-128. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5173-8>
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., & Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4), 7547-7563. <https://doi.org/10.1029/96JB03804>