

Medida en tiempo cuasi-real y predicción a 24h del contenido atmosférico de agua precipitable a partir de una red de receptores GPS en la isla de Tenerife

Nota técnica 20 de AEMET

Pedro Miguel Romero Campos ⁽¹⁾
Emilio Cuevas Agulló ⁽¹⁾
Juan José de Bustos Seguela ⁽¹⁾

(1) Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI).

Centro de Investigación Atmosférica de Izaña
Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

Mayo de 2016





Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

Edita:

© Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2016

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 281-16-002-6

<https://doi.org/10.31978/281-16-002-6>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

C/ Leonardo Prieto Castro, 8

28040 Madrid

<http://www.aemet.es/>



@Aemet_Esp



<https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>

Índice

Introducción	1.
1. Agua precipitable en tiempo cuasi-real	3.
1.1. Red GPS sobre Tenerife	6.
1.2. Presiones asignadas a cada emplazamiento.....	8.
1.3. Agua precipitable por estratos	12.
1.4. Perfiles gráficos y mapas de contorno.....	13.
2. Predicción a 24h del agua precipitable GPS	17.
2.1. Modelo CEPPM	17.
2.2. Predicción de la refractividad y ZTD atmosféricos.....	18.
3. Validación de la predicción	21.
3.1. Estaciones de superficie. Santa Cruz de Tenerife.....	22.
3.2. Estaciones de superficie. Puerto de La Cruz.....	24.
3.3. Estaciones de superficie. Los Cristianos.....	26.
3.4. Estaciones de altura. Observatorio de Izaña	28.
4. Conclusiones	32.
5. Agradecimientos.....	33.
Bibliografía	34.

Introducción

El uso como herramienta meteorológica del Sistema de Posicionamiento Global, conocido por sus siglas en inglés como GPS, está cada vez más extendido. De hecho, dentro de los programas de observación de la Red de Servicios Nacionales Meteorológicos Europeos (EUMETNET, <http://eumetnet.eu/observations>), el programa E-GVAP (EUMETNET EIG GNSS Water Vapour Programme, <http://egvap.dmi.dk>), iniciado en abril de 2005 en su primera fase, y continuado actualmente en su fase 3 hasta finales de 2017, proporciona a los países miembros, datos en tiempo cuasi-real del contenido de vapor de agua integrado en la columna atmosférica (IWV) obtenido a partir de los retrasos de las señales del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS).

Al contenido de vapor de agua integrado en la columna atmosférica se le denomina también agua precipitable, ya que, en caso de que este vapor condensara, y se dieran las condiciones necesarias, podría dar lugar a fenómenos de precipitación.

Es un hecho constatado que el contenido de vapor de agua presente en la atmósfera influye en el retraso, debido a la refracción atmosférica, de la señal de radio enviada por la constelación de satélites transmisores GPS a su llegada a las antenas de los receptores situados en tierra. En Internet, existe abundante bibliografía donde se describe la metodología seguida para obtener agua precipitable a partir del retraso total de la señal GPS en la dirección cenital (denominado: Zenith Total Delay ó ZTD). Esta metodología está descrita con detalle en el capítulo 2 de la Nota Técnica de Romero Campos P.M. et al., 2009, que se puede descargar gratuitamente de:

http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Programa_vapor_de_agua_en_columna/Vapor_de_agua_en_columna.pdf

El presente trabajo está concebido como una aplicación de lo descrito en dicha Nota Técnica a una red de receptores GPS ubicados en distintos puntos y a diferentes alturas sobre la isla de Tenerife. Básicamente, consiste en poner a disposición del usuario información de utilidad de forma automática y en tiempo cuasi-real, basada en mapas y gráficos con valores **medidos** del contenido de agua precipitable (con un retraso aproximado de unas dos horas desde la realización de las medidas) así como de valores **previstos** a 24h basados en el modelo del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (CEPPM) sobre cada uno de los diferentes emplazamientos de las antenas GPS.

En el capítulo 1, describimos, brevemente, la red de receptores GPS que utilizamos para generar estos productos, así como los procedimientos para la confección de mapas de contorno con valores integrados de agua precipitable en toda la columna atmosférica y gráficos con perfiles verticales basados en diferentes estratos o capas. En el capítulo 2, confeccionaremos estos mapas y gráficos generando el valor de agua precipitable a partir de los valores previstos de humedad específica, geopotencial, presión, temperatura y datos

de latitud, longitud y tiempo asociado suministrados por el modelo CEPPM. En el capítulo 3, expondremos una validación de las predicciones de agua precipitable GPS frente a las medidas reales y, por último, en el capítulo 4, comentaremos, brevemente, las principales conclusiones de este trabajo.

1. Agua precipitable en tiempo cuasi-real

Los conceptos expuestos en este capítulo, son la base de la aplicación objeto de esta Nota Técnica.

El tiempo que tarda la señal de radio emitida por parte del satélite en alcanzar la antena del receptor GPS situado en tierra, depende de la distancia entre satélite y receptor, así como de la velocidad de la onda electromagnética al atravesar el vacío. Sin embargo, la presencia de la atmósfera introduce un retraso en dicho tiempo debido a la refracción atmosférica. La mayor densidad de la atmósfera respecto al vacío, hace que la señal transmitida desde el satélite se desvíe o se curve en su recorrido por la atmósfera hasta llegar al receptor. Este recorrido, denominado slant path es, en general, oblicuo, y por tanto, de mayor longitud que el que hubiese recorrido la onda si no hubiese encontrado atmósfera alguna. Por eso, el retraso introducido, se expresa en unidades de una distancia equivalente en mm al exceso de camino empleado en alcanzar la antena terrestre. Esta distancia equivalente se toma en referencia a la distancia cenital o vertical y recibe el nombre de Retraso Total Cenital, en inglés, ZTD (Zenith Total Delay). Este va a ser el observable clave en la determinación del vapor de agua precipitable en la columna atmosférica, ya que, el retraso ZTD va a depender, esencialmente, de la densidad de los gases contenidos en la atmósfera.

A nosotros, nos interesa conocer qué parte del retraso depende, exclusivamente, del contenido de vapor de agua en la columna atmosférica sobre la posición de cada receptor GPS, y de ahí, poder deducir el valor del agua precipitable correspondiente. Para ello, debemos conocer de forma precisa, qué parte del retraso es debido a la atmósfera “seca” en su conjunto, es decir, a los gases distintos al vapor de agua. A este último retraso, se le conoce como Retraso Hidrostático Cenital, en inglés, ZHD (Zenith Hydrostatic Delay) y, en general, representa sobre un 90% del ZTD, limitando, aproximadamente al 10% restante, la contribución del vapor de agua. Al retraso correspondiente al contenido de vapor de agua se le denomina Retraso Húmedo Cenital, en inglés, ZWD (Zenith Wet Delay). Se cumple, por tanto, que la relación entre los tres es de la forma:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (1.1)$$

Matemáticamente, el ZTD, representa la integral de la refractividad atmosférica (N) desde la altitud de la antena GPS hasta el límite superior (TOP) de la columna atmosférica (Archanco X., 2011):

$$ZTD = 10^{-6} \int_{z_{antena}}^{TOP} N dz \quad (1.2)$$

Su determinación, se realiza dentro del proyecto E-GVAP (GNSS Water Vapour Programme) de EUMETNET a través de la acción cost716 en la que participa el Instituto Geográfico Nacional (IGN). El software que se utiliza para el cálculo es el software Bernese 5.0, actualmente, v5.2.

Sin embargo, la refractividad atmosférica es función de la temperatura, de la presión parcial del aire seco y de la presión parcial del vapor de agua, parámetros que no suelen conocerse a priori. Para eludir este requerimiento, las últimas técnicas permiten estimar el ZTD modelizando los propios datos de la red de receptores GPS mediante complejos algoritmos de inversión (Ortiz de Galisteo J.P., 2013). El dato del ZTD calculado es grabado, para cada una de las estaciones de la red, en ficheros cost716.

Conocido el valor de la presión en cada instante de medida sobre el lugar de ubicación de cada estación GPS, para calcular el ZHD sobre dicha estación, seguiremos el mismo procedimiento descrito en (Romero Campos P.M. et al., 2009).

$$ZHD(mm) = 10^{-5} \times k_1 \times \frac{R}{\rho g} \times p(hPa) \quad (1.3)$$

Aquí, $R = 8.31 \times 10^7 \frac{dinas \times cm}{K \times mol}$ es la constante universal de los gases, $g = 978.67 \frac{cm}{s^2}$ es la aceleración de la gravedad, $k_1 = 77.6 \frac{K}{hPa}$ es una constante (Bevis et al., 1994), $\rho = 28.9 \frac{gr}{mol}$ es la densidad del aire seco, y $p(hPa)$ es la presión en superficie en el lugar de ubicación de la antena del receptor GPS. Con estos valores para esas constantes, el $ZHD \approx 2.28 \times p$ y viene expresado en mm .

Empleando la relación (1.1), se tendrá entonces que:

$$ZWD = ZTD - ZHD$$

El agua precipitable PWV (Precipitable Water Vapour) en la columna atmosférica total sobre una determinada ubicación se obtiene a partir del ZWD mediante la denominada función de mapeo, Π .

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (1.4)$$

Π , es adimensional y función de la temperatura media, $T_m(K)$, en la columna atmosférica. Esta dependencia de Π con T_m es muy débil siendo el valor de Π prácticamente constante con una oscilación mínima entre 0.15 y 0.16, dependiendo de la época del año.

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho \times R_v \times \left[\frac{k_3}{T_m} + k_2 - w \times k_1 \right]} \quad (1.5)$$

$\rho = 1 \frac{gr}{cm^3}$, es la densidad del agua líquida, $R_v = 4.61 \times 10^6 \frac{dinas \times cm}{K \times gr}$, es la constante de los gases referida al vapor de agua, $w = 0.622$, es la relación

entre el peso molecular del agua y el del aire seco, y las constantes $k_1 = 77.6 \frac{K}{hPa}$, $k_2 = 70.4 \frac{K}{hPa}$ y $k_3 = 3.739 \times 10^5 \frac{K^2}{hPa}$ fueron obtenidas por (Bevis et al., 1994).

Para la temperatura media en la columna atmosférica se usa una climatología basada en mediciones de sondeos a partir de los 100msnm (metros sobre el nivel del mar), y otra, en troposfera libre, a partir de los 2370msnm para las que se obtiene, desde cada uno de estos niveles, dicha temperatura usando los valores de la presión parcial del vapor de agua $e_v(hPa)$ y la temperatura $T(K)$ en cada capa dz del sondeo, a través de la siguiente fórmula:

$$T_m = \frac{\int \frac{e_v}{T} dz}{\int \frac{e_v}{T^2} dz} \quad (1.6)$$

Un estudio detallado de esta variable puede consultarse en (Romero Campos P.M. et al., 2009). La climatología en troposfera libre se usa para las estaciones de altura por encima de los 2000msnm. Para el resto de estaciones, se usa la climatología al nivel de 100msnm.

La influencia de la temperatura en la obtención del PWV no es muy importante. La variable realmente importante es la presión, necesaria para determinar con suficiente precisión el valor del ZHD. El cálculo de PWV es del orden de cinco veces menos sensible a los errores de la temperatura que a los de la presión (Ortiz de Galisteo J.P., 2013). De hecho, una incertidumbre de 5K en la temperatura media atmosférica produce prácticamente la misma incertidumbre (sobre un 2%, básicamente) en la obtención de PWV que una incertidumbre de 1hPa en la presión (Hagemann et al., 2003; Ortiz de Galisteo J.P., 2013).

Entre los diferentes modelos matemáticos que podemos encontrar en la literatura científica para obtener el ZHD como función de la presión medida al nivel de la estación GPS, nosotros hemos utilizado en (1.3) una aproximación del modelo troposférico hidrostático de Saastamoinen (Saastamoinen, 1972) en el que se han despreciado los efectos de la latitud y la altura de la estación sobre el elipsoide. Pero en la literatura, existen varios modelos más como los de Hopfield (Hopfield, 1969), Goad y Goodman (Goad C. C. and Goodman L., 1974), entre otros. En todos ellos, la medida de la presión en el lugar sobre el cual se pretende obtener el contenido de agua precipitable es clave, por lo que, lo ideal, sería disponer de un barómetro situado en el lugar de recepción de la señal GPS. Pero esto, no siempre es posible.

Cuando no disponemos del valor de la presión en el lugar de recepción de la señal, lo que hacemos es estimar dicho valor usando alguno de referencia que conocemos de algún lugar próximo, y luego, aplicar la ecuación hidrostática para corregir por la diferencia de altitudes. Esto es lo que vamos a describir en la sección 1.2.

1.1 Red GPS sobre Tenerife

Describimos brevemente a continuación, la red de antenas y receptores GPS cuyos datos explotamos actualmente en el Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (Tenerife) para la obtención de valores de agua precipitable. A estos efectos, hay que indicar que, en Canarias, existen más estaciones receptoras GPS que las que aquí tratamos, las cuales, pertenecen a diferentes subredes. En la figura 1.1.1, se presenta un mapa donde se indican las estaciones GPS que hay repartidas actualmente por el archipiélago.

Como puede verse en esta figura, hay un código de colores que indica a qué subred pertenece cada una de ellas. Así, las azules son estaciones receptoras del Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS gestionado por el Servicio GNSS Internacional (IGS), las de color rojo pertenecen a la red del Sistema de Vigilancia Volcánica (SVV) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), y las de color verde son estaciones GNSS que pertenecen a la Red de Estaciones Permanentes del Gobierno de Canarias (GRAFCAN).

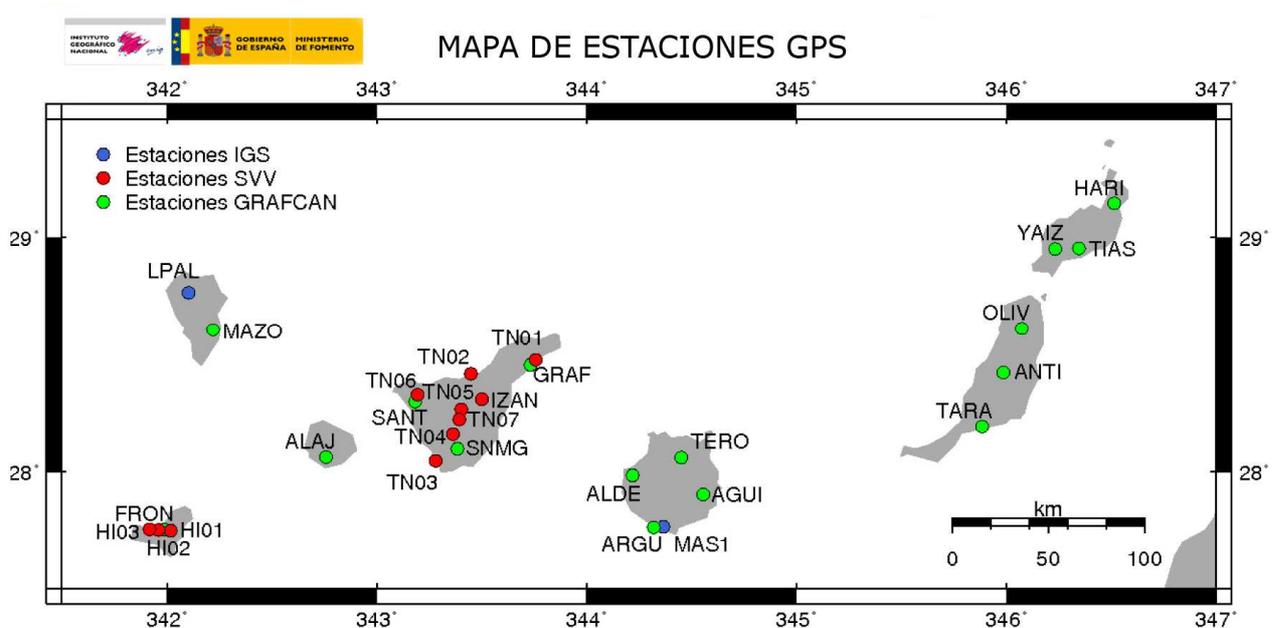


Figura 1.1.1. Estaciones receptoras GPS en el archipiélago canario.

La aplicación desarrollada en esta Nota Técnica toma un subconjunto de estos receptores GPS, situados sobre la isla de Tenerife, que son los representados en la figura 1.1.2.

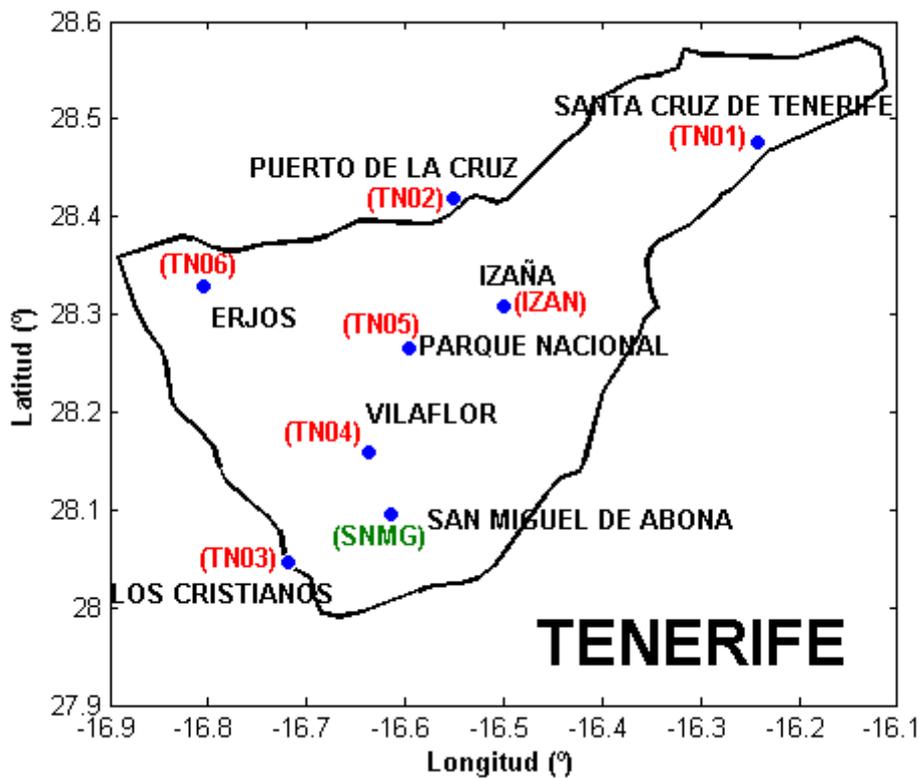


Figura 1.1.2. Estaciones GPS sobre Tenerife incorporadas al estudio.

Todas las estaciones seleccionadas se integran en el Sistema de Vigilancia Volcánica del IGN para la monitorización de deformaciones del terreno.

La localización sobre el geode de las antenas receptoras GPS y sus altitudes, expresadas por orden creciente en metros sobre el nivel del mar, son las que se muestran en la tabla 1.1.2.

Estación GPS	Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)
TN01	Santa Cruz de Tenerife	28.477185	-16.241154	7.834
TN02	Puerto de la Cruz	28.418256	-16.550786	8.278
TN03	Los Cristianos	28.047165	-16.718522	14.025
SNMG	San Miguel de Abona	28.096468	-16.615438	579.216
TN06	Erjos	28.327783	-16.804019	1006.914
TN04	Vilaflor	28.158895	-16.636928	1420.736
IZAN	Izaña	28.308068	-16.499679	2370.018
TN05	Parque Nacional	28.264799	-16.596955	2461.560

Tabla 1.1.2. Localización de receptores GPS de la red objeto de estudio.

Las tres primeras de la tabla, son estaciones de superficie, ya que están situadas a pocos metros por encima del nivel del mar. San Miguel, Erjos y Vilaflor, pueden considerarse como estaciones de medianías (entre los 500 y 1500msnm). Finalmente, las estaciones de Izaña y Parque Nacional (también

denominada Montaña Rajada), son estaciones de altura situadas en la troposfera libre.

No todas las antenas y receptores GPS de la red de trabajo son del mismo tipo y características. No obstante, el software Bernese 5.2 utilizado para el tratamiento y procesamiento de las señales GPS emitidas por la constelación de satélites, permite realizar las correcciones oportunas depurando, calculando y ajustando los diferentes retrasos de la señal a través de las diversas capas atmosféricas a su llegada a los receptores en tierra, de manera, que puedan ser comparados entre sí.

1.2 Presiones asignadas a cada emplazamiento

La red de estaciones GPS objeto de este trabajo no cuenta con barómetros situados exactamente en todos los lugares de ubicación de las antenas. Es necesario, por tanto, asignar un valor adecuado y suficientemente preciso de la presión mediante cálculos basados en la medida de presión en lugares próximos y asumiendo ciertas hipótesis.

Por otro lado, y dado que no todas las estaciones meteorológicas automáticas de las que dispone la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) situadas en el entorno más próximo posible a cada estación GPS de la red dispone de medidas de presión, el criterio que hemos seguido ha sido elegir, para la isla de Tenerife, una estación de referencia en altura, que es la estación meteorológica del Observatorio Atmosférico de Izaña (IZO, 28.308983N, 16.499383W, 2370msnm), y dos estaciones de referencia en superficie, una que es la estación meteorológica situada en la terraza de las oficinas centrales del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña en Santa Cruz de Tenerife (SCO, 28.472528N, 16.247361W, 52msnm), y otra, que es la estación meteorológica del Aeropuerto Reina Sofía (Tenerife Sur) (ATS, 28.046992N, 16.561158W, 64msnm).

Los valores de presión aportados por IZO y SCO se miden, simultáneamente cada minuto, mientras que los de la estación ATS se miden cada 10 minutos. Para poder comparar las medidas de presión entre estas estaciones y poder realizar la posterior asignación a cada ubicación GPS, lo que hacemos, primeramente, es interpolar o extrapolar linealmente la presión para aquellos instantes de tiempo en los que este valor falta. De esta forma, tendremos un valor de presión por minuto en cada una de las tres estaciones meteorológicas de referencia. Las diferencias entre cada pareja de valores de presión simultáneos pertenecientes, uno a IZO, y otro a cualquiera de las dos estaciones meteorológicas de superficie (SCO ó ATS), divididas por la diferencia de altitud entre ambas, nos permitirá obtener, para cada instante de las medidas, un valor de la densidad atmosférica pesada o multiplicada por la gravedad. Este valor, lo consideramos representativo de la atmósfera comprendida entre la estación de superficie escogida y nuestra estación de altura. Asumimos con ello la hipótesis hidrostática, según la cual, la variación de la presión con la altura, es proporcional y de signo contrario, al producto de la densidad por la gravedad:

$$dp = -\rho g dz \quad (1.2.1)$$

Evidentemente, también hemos asumido, implícitamente, otra hipótesis que es despreciar el efecto de la variación horizontal de la presión. En realidad, el valor asumido del producto densidad por gravedad sería, para cada instante, representativo de la atmósfera en la columna comprendida entre las dos estaciones si ambas estuviesen situadas en la misma vertical. Pero no es así, sino que existe una diferencia de latitud y longitud entre las mismas que introduce un error en el cálculo. Este error se da al presuponer que la presión medida en cualquiera de las estaciones sería la misma si la trasladáramos a la posición de la otra pero conservando su altitud. No obstante, esta estimación es suficientemente aproximada, si la distancia horizontal entre las estaciones no es muy grande y no existen otros factores que puedan influir localmente, y de manera significativa, en el valor de la presión. A partir de los reanálisis NCEP/NCAR del valor medio anual de la presión en superficie en el período 2008 – 2015, estimamos que la distancia máxima sobre Tenerife para la que podemos asumir una variación horizontal de presión $\leq 1hPa$ es de 60Km que sería la distancia horizontal entre Santa Cruz de Tenerife (TN01) y la estación de Los Cristianos (TN03). En cualquier caso, y a falta de barómetro en los lugares de ubicación de los receptores GPS, es la única opción, en tiempo real, de que disponemos para estimar el producto densidad por gravedad en la columna atmosférica sobre los mismos.

Así pues, supondremos que todos los receptores GPS de la red a los que asignamos el mismo valor del producto densidad por gravedad para cada instante dado, así como las estaciones meteorológicas de referencia que nos han permitido obtenerlo, se sitúan sobre la misma vertical. Entonces, aplicando la ecuación hidrostática (1.2.1), podremos deducir el valor de presión en la estación GPS de interés sin más que substituir, en dicha ecuación, el producto densidad por gravedad asignado y obtenido entre las referencias apropiadas, el valor de la altitud de la estación GPS problema y los valores de altitud y presión de la referencia adecuada:

$$p_{GPS} = p_{ref} - \rho \times g \times (z_{GPS} - z_{ref}) \quad (1.2.2)$$

Por referencia adecuada, entendemos aquella estación meteorológica de referencia **más próxima** a la estación receptora GPS considerada, independientemente de que esté situada a un nivel más alto o más bajo que esta. Por otro lado, en la asignación del producto densidad por gravedad a cada estación GPS se ha tenido en cuenta no sólo la referencia más próxima a ella, sino también, su localización relativa respecto a las dos referencias de superficie y a la de altura. La tabla 1.2.1, recoge para cada estación GPS, cuál ha sido la referencia elegida así como el valor de la presión y el perfil de procedencia del producto densidad por gravedad asignados.

ESTACIÓN GPS	PRES REF	PERFIL ATMOSFÉRICO	PRESIÓN ASIGNADA
TN01	SCO	IZO-SCO	$p_{TN01} = p_{SCO} + \rho \times g \times (52 - 7.82)$
TN02	SCO	IZO-SCO	$p_{TN02} = p_{SCO} + \rho \times g \times (52 - 8.49)$
TN03	ATS	IZO-ATS	$p_{TN03} = p_{ATS} + \rho \times g \times (64 - 14.06)$
SNMG	ATS	IZO-ATS	$p_{SNMG} = p_{ATS} - \rho \times g \times (579.22 - 64)$
TN06	ATS	IZO-ATS	$p_{TN06} = p_{ATS} - \rho \times g \times (1006.91 - 64)$
TN04	IZO	IZO-ATS	$p_{TN04} = p_{IZO} + \rho \times g \times (2390.06 - 1420.74)$
			$p_{TN04} = p_{IZO} + \rho \times g \times (2370.06 - 1420.74)$ (desde 25/07/2014)*
IZAN	IZO	IZO-SCO	$p_{IZAN} = p_{IZO} + \rho \times g \times (2390.06 - 2370.06)$
			$p_{IZAN} = p_{IZO}$ (desde 25/07/2014)*
TN05	IZO	IZO-ATS	$p_{TN05} = p_{IZO} - \rho \times g \times (2461.56 - 2370.06)$

Tabla 1.2.1. Presiones y perfiles atmosféricos asignados según la ubicación de los receptores GPS. Hasta el 24 de julio de 2014, el sensor de presión de la estación meteorológica de Izaña (IZO) utilizado en este trabajo era el situado en una torre a unos 20m sobre el nivel del terreno. A partir de entonces, se usó otro barómetro situado al nivel del receptor GPS*.

Cuando por alguna razón, no se conoce el dato de presión en un instante concreto para alguna de las estaciones meteorológicas de referencia, por ejemplo, porque no haya sido posible interpolar o extrapolar convenientemente su valor a partir del resto o porque falte el fichero de presiones ese día, se asume un valor por defecto para la presión en dicha estación. Dicho valor por defecto lo obtenemos de la ecuación altimétrica y su combinación para dos estaciones dadas, lo que nos permite poner la presión de una en función de la de la otra (1.2.3):

$$p_x = p_0 \times \exp\left(\frac{-z_x}{8420}\right); \quad p_y = p_0 \times \exp\left(\frac{-z_y}{8420}\right)$$

$$p_x = p_y \times \exp\left(\frac{z_y - z_x}{8420}\right) \quad (1.2.3)$$

En estas ecuaciones, p_x y p_y son las presiones de las estaciones x e y expresadas en hPa, y z_x y z_y son las altitudes de las mismas expresadas en msnm. Tomando de referencia, por defecto, el valor de la presión media anual en IZO como 770.0hPa a 2390msnm y substituyendo las altitudes de ATS (64msnm) y SCO (52msnm) en la relación 1.2.3 se obtiene que las presiones por defecto en las estaciones ATS y SCO son las siguientes:

$$p_{ATS} = 770.0 \times \exp\left(\frac{2390 - 64}{8420}\right) \approx 1015.0 \text{ hPa}$$

$$p_{SCO} = 770.0 \times \exp\left(\frac{2390 - 52}{8420}\right) \approx 1016.4 \text{ hPa}$$

Estos valores por defecto de las presiones nos permiten establecer también unos productos densidad por gravedad alternativos para usarlos en estos casos. Dichos valores se obtienen dividiendo las diferencias de presiones por defecto entre las estaciones por la diferencia de sus altitudes. Así, tendríamos unos perfiles alternativos del producto densidad por gravedad entre IZO-SCO e IZO-ATS que serían, respectivamente:

$$-\rho g_{(IZO-SCO)_{alter}} = \frac{770.0 - 1016.4}{2390.0 - 52} \text{ hPa} / \text{m}; \quad -\rho g_{(IZO-ATS)_{alter}} = \frac{770.0 - 1015.0}{2390.0 - 64} \text{ hPa} / \text{m}$$

Ahora bien, el uso de los valores por defecto para presiones y productos densidad por gravedad, influirán en la calidad del dato de agua precipitable que obtendremos a partir de los ZTD. Para tener en cuenta este hecho, hemos definido, para nuestro control, dos índices o flags asociados a la calidad del valor de la presión y de los productos densidad por gravedad atmosféricos utilizados. El primero, está relacionado con el valor original de la presión que se ha usado. Si este valor de presión ha sido medido, el flag tomará el valor de 0; si por el contrario, el dato de presión usado ha sido obtenido por interpolación o extrapolación, entonces el flag tomará el valor -1. El segundo índice o flag de calidad para la presión está relacionado con el tipo de perfil atmosférico seleccionado para hacer el ajuste y la asignación de presión en el lugar de ubicación de la antena del receptor GPS. Este segundo flag, tomará el valor 0 cuando el perfil escogido para realizar los ajustes sea el asignado en la tabla 1.2.1 y tomará el valor -1 cuando se utilice un perfil alternativo (o valor por defecto). De esta manera, a cada valor de agua precipitable que calculemos le asignaremos este par de índices que nos darán una idea de su calidad. La calidad máxima estará asociada a un valor 0 para ambos índices.

En el diagrama de bloques de la figura 1.2.1, aparecen esquematizados, a modo de resumen, los conceptos definidos hasta ahora relacionados con la presión asignada a las estaciones y la obtención del agua precipitable.

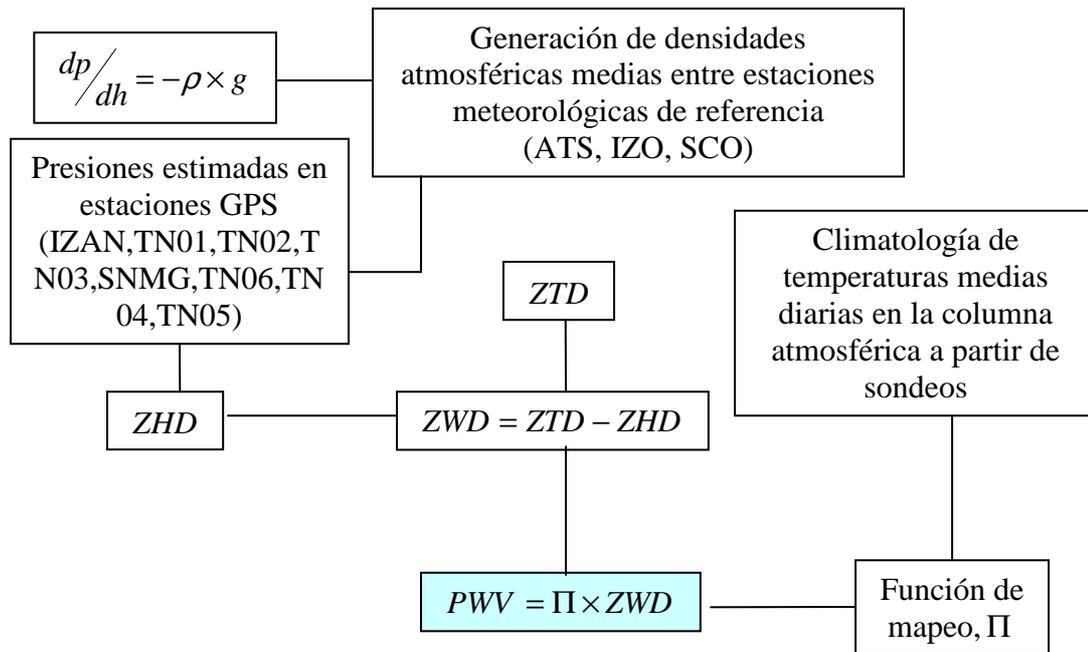


Figura 1.2.1. Esquema de evaluación del agua precipitable (PWV) GPS.

1.3 Agua precipitable por estratos

Los datos de ZTD en tiempo cuasi-real que se envían a los ficheros cost716 poseen una resolución temporal de 15 minutos. A partir de ellos, generamos valores de agua precipitable sobre cada una de las estaciones receptoras GPS de nuestra red objeto de estudio siguiendo lo explicado en la sección anterior.

La localización a diferentes altitudes de cada una de las estaciones GPS nos permite definir un conjunto de 6 estratos o niveles en la vertical donde, por diferencias del agua precipitable obtenida en la columna atmosférica trazada desde cada nivel hasta la parte superior de la atmósfera, podemos estimar la cantidad de agua precipitable confinada en cada uno de los estratos. Dado que la diferencia en altitudes entre las estaciones de superficie es muy pequeña, a efectos de estratificación en la vertical, se ha optado por considerarlas como una única estación con una altitud promedio entre las tres de 10msnm. Por ello, los 6 estratos definidos para la vertical son los siguientes:

- Estrato 1: San Miguel - Estaciones de superficie.
- Estrato 2: Erjos – San Miguel.
- Estrato 3: Vilaflor – Erjos.
- Estrato 4: Izaña – Vilaflor.
- Estrato 5: Parque Nacional – Izaña.
- Estrato 6: TOP – Parque Nacional. (TOP = Top of Atmosphere).

Los estratos 5 y 6, podrían haberse considerado también, a efectos de la vertical, como un único estrato. La razón por la que se ha optado en definirlos como estratos separados es que la diferencia de nivel entre las dos estaciones de altura es de casi 100m, que aunque no es excesivamente grande, es de un

orden de magnitud superior a las mínimas diferencias que hay entre los niveles de las estaciones de superficie.

Para evaluar el agua precipitable en los diferentes estratos necesitamos suponer, necesariamente, que la cantidad de agua precipitable disminuye con la altura, lo cual es una suposición razonable ya que, por lo general, la temperatura en el perfil atmosférico disminuye con la altura limitando así la capacidad de almacenar vapor de agua de la atmósfera.

Lo que hacemos en la práctica para estimar el agua precipitable por estratos es escoger, para cada instante de medida GPS (cada 15 minutos), el valor del PWV de aquellas estaciones que guardan entre sí un orden decreciente de dicho valor en función de su altitud. Con ellas, ajustamos por interpolación lineal normalizada las cantidades de agua precipitable en columna y las altitudes de las estaciones que cumplen con esta condición. Usaremos el ajuste entre las estaciones seleccionadas para asignar a cada estación, independientemente de que haya sido o no seleccionada para el ajuste, un valor de agua precipitable decreciente en función de su altitud que representaría el contenido total en la columna atmosférica situada encima de ella. Si la estación es una de las seleccionadas para el ajuste, el valor de PWV asignado a la misma coincidirá con el obtenido a partir del ZTD; si la estación no fue seleccionada, el valor de PWV asignado por el ajuste no será el real que se dedujo del valor de su ZTD, pero cumplirá con la condición exigida de relación decreciente entre PWV y altitud. En el caso de que todas las estaciones cumplan con esta condición, la suma del agua contenida en cada estrato coincidirá con el agua total confinada en la columna desde el nivel de superficie hasta la parte superior de la atmósfera (TOA) obtenida como diferencia entre los valores reales medidos.

A pesar de estas limitaciones, el hecho de disponer en tiempo cuasi-real de una estimación de un perfil de agua precipitable en la columna atmosférica sobre Tenerife es un avance importante con respecto al sondeo. De este también se podría obtener un perfil vertical de agua precipitable, pero sólo disponemos de un sondeo diario a las 12UTC y de otro a las 0UTC, mientras que disponemos de una medida en tiempo real del GPS cada 15 minutos. Por otro lado, el recorrido del sondeo tampoco es vertical, sino que el viento desplaza al globo horizontalmente, y en rigor, las medidas de P, T y H que nos suministra no corresponden a la columna vertical trazada desde el lugar del lanzamiento sino a un perfil oblicuo determinado por la posición del globo en cada momento respecto a dicho lugar. Sin embargo, a efectos prácticos, suponemos que el perfil del sondeo es representativo y válido para toda la isla de Tenerife, despreciando las variaciones horizontales que pueda haber en las variables medidas.

1.4 Perfiles gráficos y mapas de contorno

Para la representación gráfica de los resultados anteriores, construimos un único fichero ASCII diario donde escribimos, para cada fecha-hora de la medida GPS, el valor del PWV sobre cada una de las 8 estaciones evaluadas,

los asignados a cada uno de los 6 estratos verticales y, finalmente, el valor de PWV correspondiente al estrato comprendido entre el nivel de la estación GPS más alta (TN05) y el nivel promedio de las estaciones de superficie.

El gráfico para los perfiles de agua precipitable se construye planteando el agua confinada en cada estrato, frente al vector de altitudes medias correspondiente a cada uno de ellos.

Como ejemplo, representamos, en la figura 1.4.1, el perfil de agua precipitable GPS generado el 28 de enero de 2016 a las 10:59UTC. En él, puede leerse sobre el eje de abscisas, el contenido de agua precipitable de cada estrato. Así, por ejemplo, en el estrato comprendido entre superficie y los 600msnm, nivel aproximado de SNMG (San Miguel), se aprecian unos 8.70mm de agua precipitable, mientras que, a partir de los 2500msnm (último estrato entre Parque Nacional y Tope de la Atmósfera (TOP)), tenemos 4.60mm. También se suministra información sobre el contenido de PWV entre los niveles de costa (nivel medio de las estaciones GPS de superficie) y el nivel de la estación de mayor altitud: la del Parque Nacional (TN05). En este caso, este estrato muestra un valor de 13.2mm que, aproximadamente, coincide con la suma del contenido de agua de los 5 estratos precedentes.

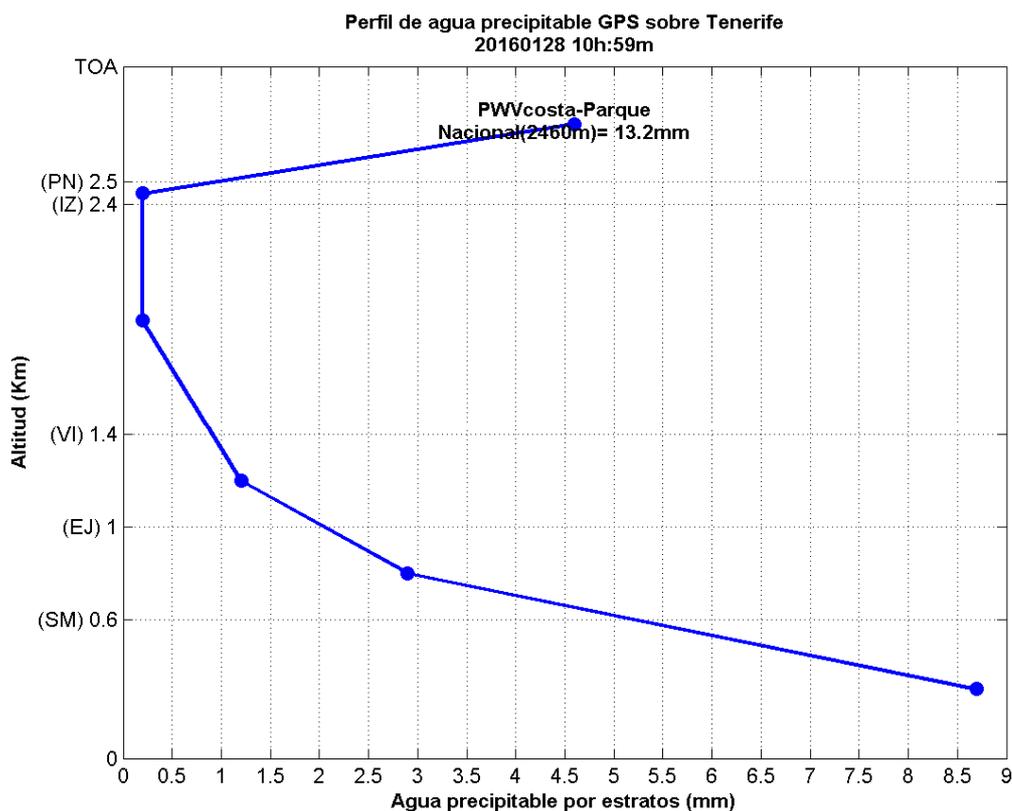


Figura 1.4.1. Perfil de agua precipitable sobre Tenerife del 28 de enero de 2016 a las 10:59UTC. Las abreviaturas en el eje de ordenadas para las estaciones GPS se han adoptado por simplicidad: TOA = Top Of Atmosphere, PN = TN05 (Parque Nacional), IZ = IZAN (Izaña), VI = TN04 (Vilafior), EJ = TN06 (Erjos), SM = SNMG (San Miguel de Abona).

En la elaboración de los mapas de contorno, se representan los contenidos totales de agua precipitable en la columna atmosférica, independientemente de que pueda o no cumplirse la condición de función decreciente entre el agua precipitable y la altitud.

En este caso, lo que hacemos es ajustar la función empírica que relaciona el agua precipitable con la latitud y longitud de los lugares de ubicación de las estaciones receptoras GPS a una superficie mediante una interpolación bi-armónica. Esta interpolación consiste en obtener la superficie de mínima curvatura total sobre la rejilla que define el agua precipitable como función de la latitud y la longitud exigiendo que dicha superficie satisfaga la condición de que su laplaciano al cuadrado (bilaplaciano) sea 0 (ecuación 1.4.1).

$$\Delta^2(PWV) = \frac{\partial^4(PWV)}{\partial(LAT)^4} + 2\frac{\partial^4(PWV)}{\partial(LAT)^2\partial(LON)^2} + \frac{\partial^4(PWV)}{\partial(LON)^4} = 0 \quad (1.4.1)$$

La solución suavizada es del tipo splines cúbicos (polinomios cúbicos a trozos). Los valores interpolados para cada una de las ubicaciones GPS, deben coincidir con el valor del agua precipitable obtenido sobre ellas a partir del ZTD medido. Obtenida la superficie, trazamos sobre ellas contornos de PWV con valores espaciados cada 2mm.

En la figura 1.4.2 se muestra el mapa de contorno correspondiente al mismo instante de medida que el perfil de la figura 1.4.1.

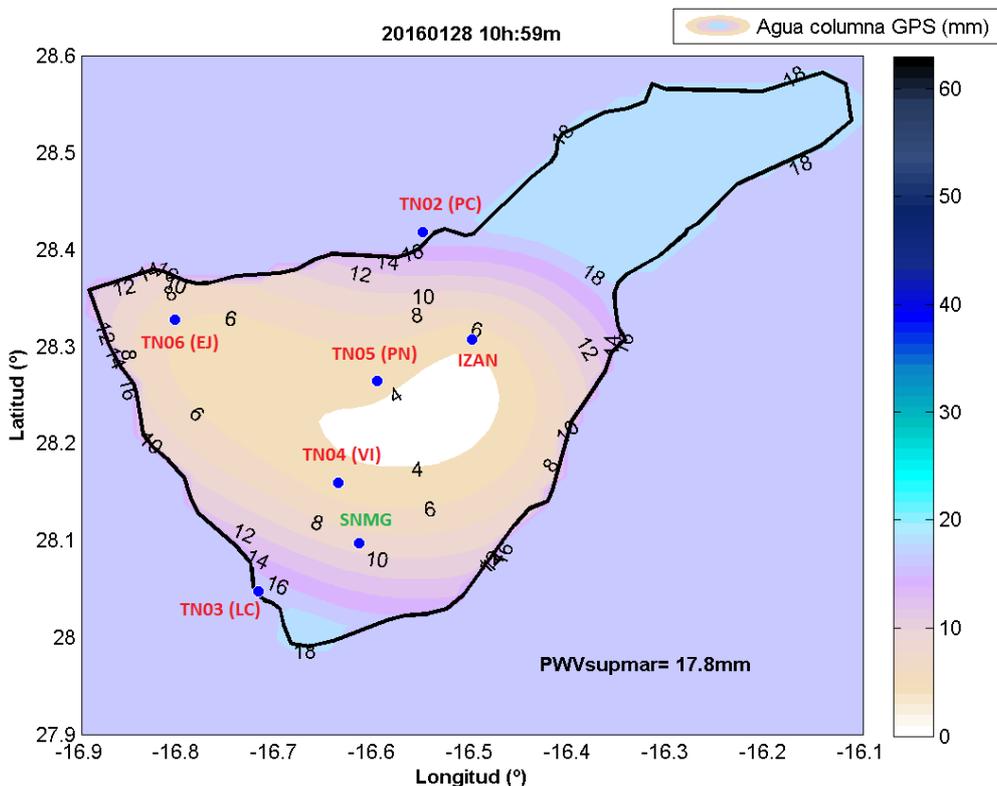


Figura 1.4.2. Contornos de agua precipitable sobre Tenerife del 28 de enero de 2016 a las 10:59UTC. Los puntos azules representan las ubicaciones de las diferentes estaciones GPS de las que se dispone de un valor del PWV en columna. Obsérvese que no tenemos, para el instante de la medida, dato del PWV sobre TN01 (SC). La interpolación, sin embargo, nos permite estimar un valor de PWV, para esta última estación, de unos 18mm.

Tanto la interpolación biarmónica en los mapas de contorno como la interpolación lineal en los perfiles verticales nos dan una idea global de la distribución del agua precipitable sobre la isla. Esta distribución será tanto más fiable y certera cuantas más estaciones GPS disponibles tengamos para la medida en tiempo real. Sería deseable poder ampliar en lo sucesivo esta red incorporando nuevos receptores GPS y mejorar la resolución de los productos obtenidos.

2. Predicción a 24h del agua precipitable GPS

No sólo es importante disponer de la información en tiempo cuasi real del agua precipitable en la columna atmosférica sobre las distintas ubicaciones de los receptores GPS, sino que también, es deseable poder disponer de una predicción lo más fiable posible. Dentro de las limitaciones actuales, una predicción a 24h sería una opción aceptable dada la gran variabilidad espacial y temporal del contenido de vapor de agua atmosférico. 24 horas es un plazo de tiempo que también permite al usuario un margen de maniobrabilidad suficiente para tomar ciertas decisiones relacionadas con el mantenimiento de equipos y con la programación de actividades. Así, por ejemplo, cuando se dan o se prevén valores altos de PWV, esta circunstancia dificultará o impedirá la operación con telescopios en un Observatorio Astronómico.

La metodología para obtener los valores previstos del PWV a partir de los retrasos cenitales totales (ZTD) será la misma que la de obtención del PWV en tiempo cuasi real. La diferencia va a estar en el procedimiento de obtención del ZTD. Esto es lo que explicamos en la siguiente sección.

2.1 Modelo CEPPM

En el caso de la predicción, y a diferencia de la obtención del agua precipitable en tiempo cuasi real, el dato del retraso cenital total (ZTD) utilizado ha de calcularse a partir de campos previstos por algún modelo.

Nosotros usamos el Modelo del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (CEPPM), en inglés, ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), el cual, nos proporciona información sobre los campos meteorológicos previstos necesarios para que, a partir de ellos, podamos realizar una estimación de la refractividad atmosférica y calcular el ZTD previsto. Lo que hacemos aquí, podría hacerse con cualquier otro modelo de predicción.

Los campos meteorológicos que necesitamos para obtener la refractividad y el ZTD son: la humedad específica, el geopotencial, la presión, la temperatura, y los datos de latitud, longitud y tiempo asociado a cada uno de los valores de las variables anteriores.

Todos estos campos, suelen venir contenidos en un fichero del tipo NetCDF (Network Common Data Form). En Internet, se puede encontrar una gran variedad de librerías, funciones y herramientas procedentes de diversas Instituciones así como de diferentes programas de cálculo (como Matlab, por ejemplo) para leer y tratar estos ficheros.

En nuestro caso, dentro del fichero NetCDF que usamos y que contiene los campos previstos del modelo del Centro Europeo, existe un mallado o rejilla rectangular formada por 8 valores de latitud separados en intervalos de 0.1° y comprendidos entre 27.9°N y 28.6°N , por 9 valores de longitud separados también en intervalos de 0.1° y comprendidos entre 16.1°W y 16.9°W ; en total: 72 puntos o nodos. La isla de Tenerife, se encuentra ubicada completamente

en esta región definida por estos límites. Por cada nodo o pareja de valores [latitud longitud] de la rejilla, tenemos 24 valores de tiempos asociados separados por intervalos de 1h (tiempos de predicción), y para cada uno de estos, 25 niveles de presión que van desde 1hPa hasta 1000hPa separados, en función del tramo de altitud, en diferentes intervalos no uniformes [1 2 3 5 7 10 20 30 50 70 100 150 200 250 300 400 500 600 700 800 850 900 925 950 1000hPa]. Finalmente, por cada tiempo y nivel de presión, tendremos un valor previsto de temperatura, otro de humedad específica y un tercero de geopotencial.

2.2 Predicción de la refractividad y ZTD atmosféricos

El primer paso, tras la lectura del fichero NetCDF, es calcular la altura geopotencial y la tensión de vapor del vapor de agua.

La altura geopotencial Z se relaciona con el geopotencial ϕ , mediante:

$$Z = \frac{\phi}{9.8} \quad (2.2.1)$$

Esta relación es válida despreciando la variación de la aceleración de la gravedad con la latitud y con la altitud.

Por otro lado, la tensión o presión de vapor del vapor de agua e_v se puede obtener a partir de la humedad específica q (gramos de vapor de agua contenidos en un kilogramo de aire húmedo), usando la presión P a través de la relación aproximada:

$$e_v = q \times \frac{P}{0.622} \quad (2.2.2)$$

Aquí, e_v y P vienen dados en hPa. Para obtener la refractividad atmosférica aplicamos la siguiente fórmula (Bevis et al., 1992):

$$N = 77.604 \times \frac{P - e_v}{T} + 64.79 \times \frac{e_v}{T} + 377600 \times \frac{e_v}{T^2} \quad (2.2.3)$$

T es la temperatura expresada en kelvines. N es adimensional.

Dada una posición (latitud, longitud) de un receptor GPS hay que averiguar qué nodo dentro de la malla suministrada por el fichero NetCDF es el más próximo a la posición del receptor.

Los valores de presión, humedad específica y geopotencial asociados a este punto de la rejilla cuya distancia es mínima respecto a la posición del receptor GPS serán los que se escojan para el cálculo de la tensión de vapor y de la refractividad previstas.

Para calcular el ZTD sobre dicho punto de la rejilla, necesitamos obtener el valor previsto de la presión a la altura geopotencial correspondiente a la altitud del receptor GPS. Lo que hacemos, entonces, es un ajuste de la presión prevista en función de la altura geopotencial obtenida a partir de (2.2.1) de manera que se respete tanto la forma como el carácter monótono entre los datos. La técnica consiste en buscar un polinomio de Hermite entre cada dos parejas de valores de [altura geopotencial, presión] que sea cúbico. La función de ajuste a trozos así obtenida, particularizada al nivel de altitud de nuestro receptor GPS, nos dará el valor de la presión prevista a dicho nivel.

Por otro lado, el retraso cenital total puede obtenerse a partir de la refractividad atmosférica mediante la relación:

$$ZTD(Z) = 10^{-6} \times \int_Z^{TOP} NdZ \quad (2.2.4)$$

Es decir, el retraso cenital total a un cierto nivel se va a obtener como integración, extendida a todos los niveles superiores al dado y hasta el tope de la atmósfera, del producto de la refractividad por la altura geopotencial. Como la altura geopotencial viene dada en metros geopotenciales y la refractividad es adimensional, la variable ZTD obtenida por la relación anterior vendrá en metros. Habrá que multiplicarla por 1000 para expresarla en mm.

Procederemos a continuación, de manera similar a como hicimos con la presión, y ajustaremos interpolando a trozos mediante un polinomio de Hermite cúbico la relación entre el ZTD calculado y la altura geopotencial.

Mediante los dos ajustes comentados ya tenemos perfectamente definidos, para cualquier valor de altitud de una estación GPS, el valor correspondiente del ZTD y de la presión previstos a ese nivel. Esto nos permitirá calcular la predicción del retraso cenital hidrostático, del retraso cenital húmedo y de la cantidad de agua precipitable en columna.

De la relación (1.3) y de la relación (1.1) obtenemos, respectivamente, los valores del retraso cenital hidrostático (ZHD) y el retraso cenital húmedo (ZWD). Calculando la temperatura media en la columna atmosférica por la relación (1.6), y tomando para ella el valor climatológico correspondiente, según se trate de una estación GPS a nivel del mar o en medianías (climatología de superficie), o una estación de altura (climatología de altura), obtendríamos mediante (1.5) la función de mapeo que, al multiplicarla por el valor obtenido del ZWD, nos permite deducir el valor de agua precipitable en la columna atmosférica.

La metodología para la generación de perfiles verticales y mapas de contorno es similar a lo ya expuesto en el anterior capítulo para el tratamiento de la información en tiempo cuasi-real sólo que, en este caso, estamos utilizando valores calculados de ZTD, y no medidos.

La variabilidad horaria del agua precipitable se define como la dispersión de los datos de una hora con respecto al valor medio en dicha hora. Hemos

comprobado, analizando datos de agua precipitable en tiempo cuasi real cada 15 minutos en el período 2009 – 2012, que la variabilidad media horaria del agua precipitable está por debajo de 0.1mm que equivale a porcentajes medios inferiores al 1% para todas las estaciones (superficie, medianías y altura). Es razonable, entonces, suponer una variación suave lineal entre los valores horarios del agua precipitable en columna y extender la predicción horaria a intervalos intra-horarios de 15 minutos interpolando y/ó extrapolando linealmente los valores horarios de presión previstos y los calculados de ZTD a partir del modelo. De esta forma, tendremos una predicción del contenido de agua precipitable cada 15 minutos durante 24 horas.

3. Validación de la predicción

Analizamos en este capítulo, las diferencias entre los valores de agua precipitable en columna obtenidos en tiempo cuasi-real a partir de las medidas del ZTD GPS y los previstos a 24h a partir del ZTD calculado usando los campos del modelo CEPPM.

Nuestro análisis de validación, se hará para las 0 y 12 UTC dentro del período que va desde junio de 2013 hasta enero de 2016, y nos ceñiremos únicamente, a las estaciones GPS que son representativas del contenido de agua en columna atmosférica sobre la superficie de la isla en diferentes zonas: al Nordeste, TN01 (Santa Cruz), al Norte, TN02 (Puerto de la Cruz), y al Sur, TN03 (Los Cristianos), así como a la estación IZAN (Izaña), representativa del contenido de agua en columna atmosférica en altura.

Presentamos dos tipos de gráficos. En los primeros, mostramos frente al tiempo, para cada estación GPS, las series de valores PWV obtenidos de la medida, los previstos a partir del modelo, y la serie de las diferencias entre medidas y predicciones. Cada una de estas series, se referirá a las 0 y 12 UTC en punto. Estos gráficos, nos dan una visión general de cómo influye la variable tiempo en la validación sobre cada una de las estaciones GPS así como de los niveles cuantitativos de PWV en los que nos movemos, tanto en la medida como en la predicción. En los segundos, representamos, por un lado, los diagramas de dispersión (scatter-plots) de PWV previsto frente al PWV medido, y por otro, los histogramas de frecuencias, expresadas en porcentajes del total, de las diferencias entre medidas y valores previstos de PWV. Con estos gráficos, comprobaremos la coherencia general entre predicción y medida así como el nivel de error y grado de confianza que podemos tener a la hora de considerar una determinada predicción en un lugar determinado.

Comparando los coeficientes de correlación de Pearson en las correspondientes figuras, vemos que, en general, para las estaciones del Puerto de la Cruz y de Los Cristianos, la validación es ligeramente mejor por la mañana, mientras que para Santa Cruz e Izaña, la validación es ligeramente mejor por la noche.

Para finalizar este capítulo, comentar que a partir del 8 de marzo de 2016, la física que sustenta al modelo CEPPM cambia en algunos aspectos, así como la resolución del mismo. Es posible que este cambio pueda ejercer algún tipo de influencia en la validación de las predicciones. Sin embargo, dada la escasez de datos de los que disponemos hasta la fecha de redacción de esta Nota Técnica no realizaremos, por el momento, ningún análisis de comparación entre ambas versiones del modelo.

3.1 Estaciones de superficie. Santa Cruz de Tenerife

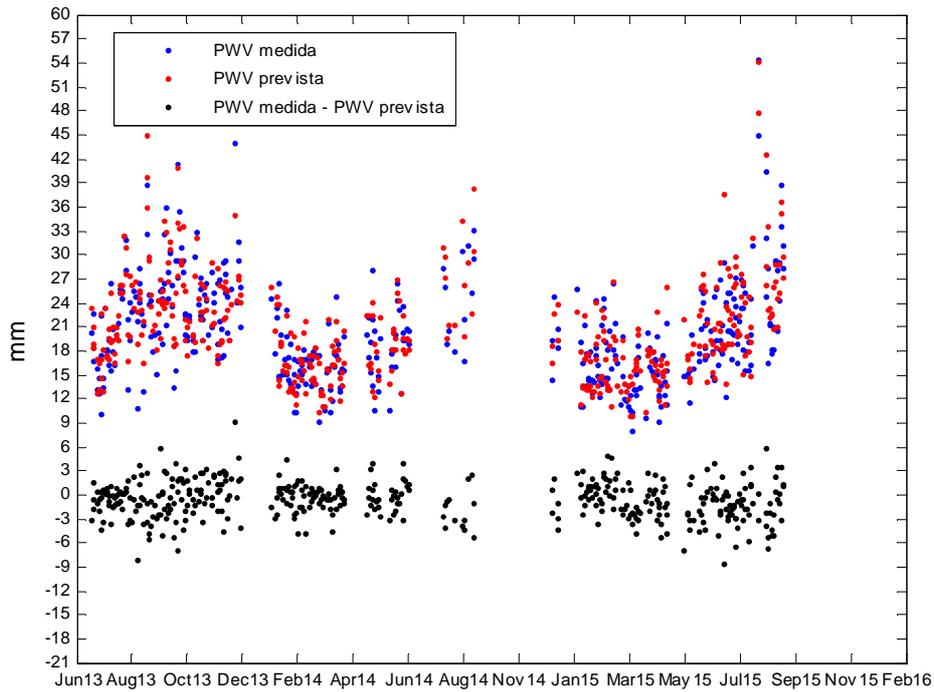


Figura 3.1.1 Valores de PWV GPS medidos, previstos y diferencias entre ellos UTC.

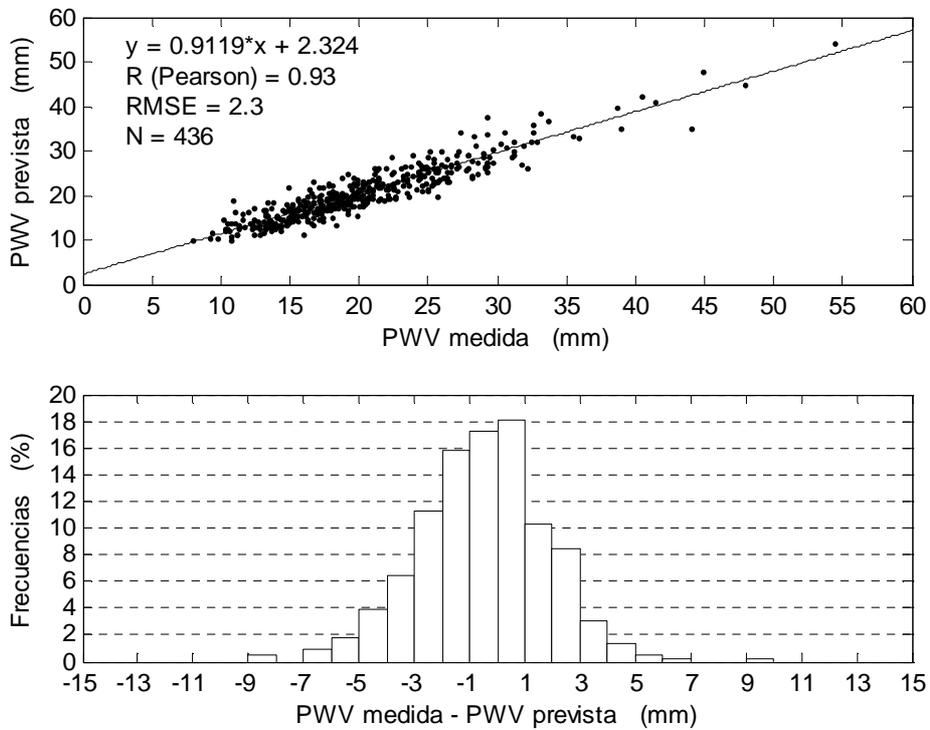


Figura 3.1.2. Arriba, correlación entre valores previstos y medidos del PWV GPS. Abajo, histograma de las diferencias. 0UTC.

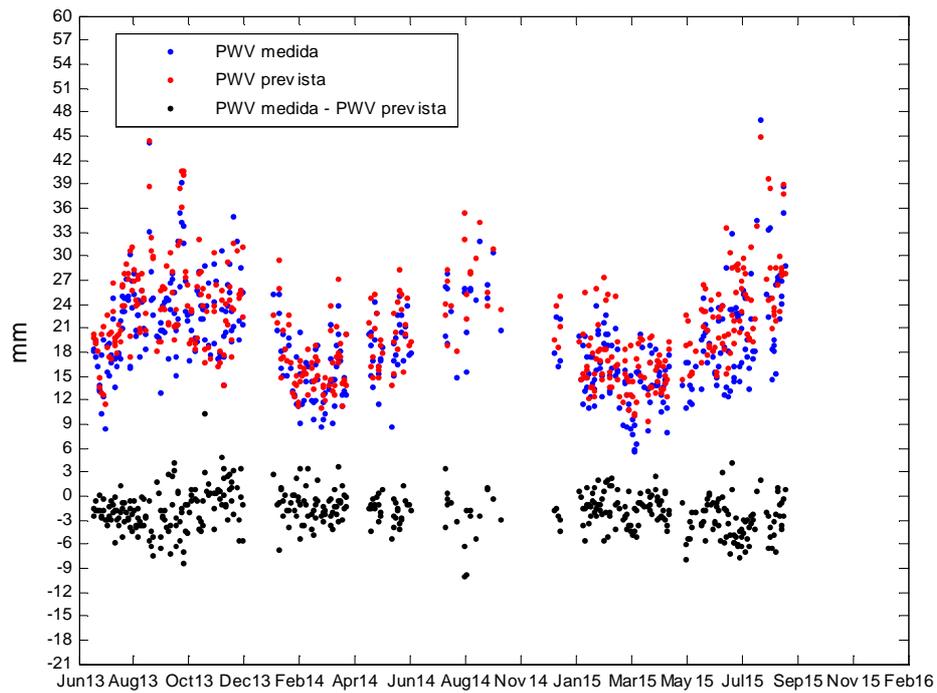


Figura 3.1.3 Valores de PWV GPS medidos, previstos y diferencias entre ellos 12UTC.

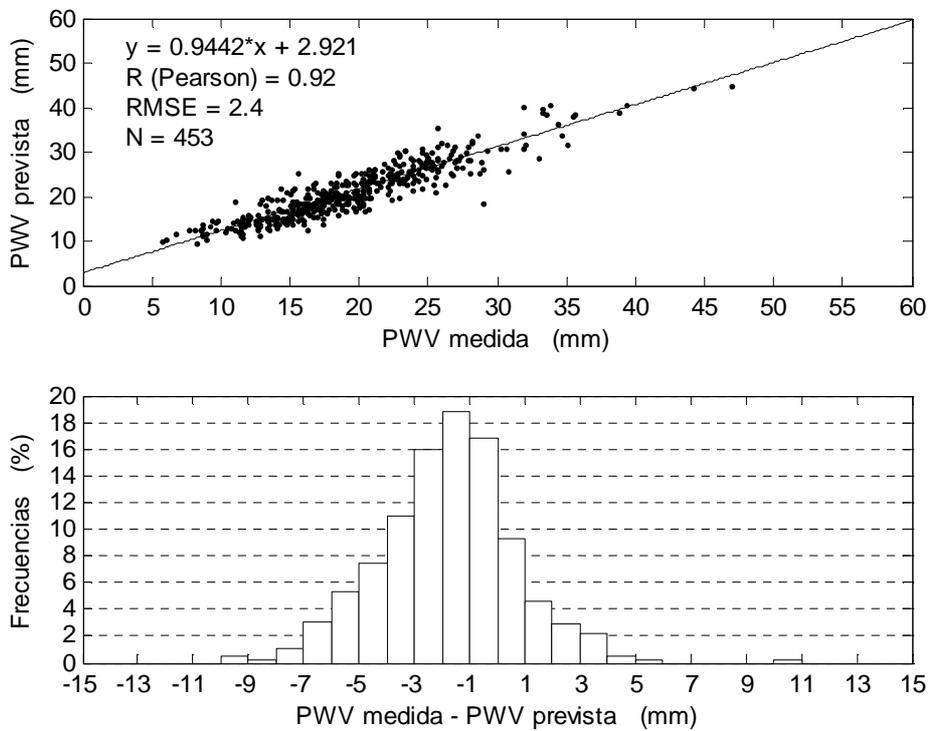


Figura 3.1.4. Arriba, correlación entre valores previstos y medidos del PWV GPS. Abajo, histograma de las diferencias. 12UTC.

3.2 Estaciones de superficie. Puerto de La Cruz.

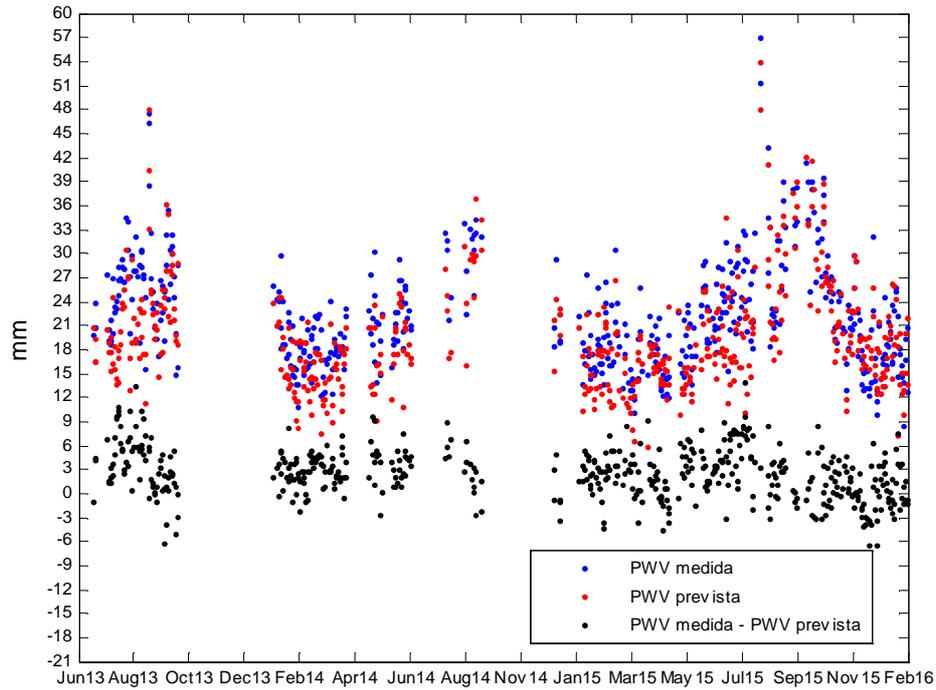


Figura 3.2.1 Valores de PWV GPS medidos, previstos y diferencias entre ellos OUTC.

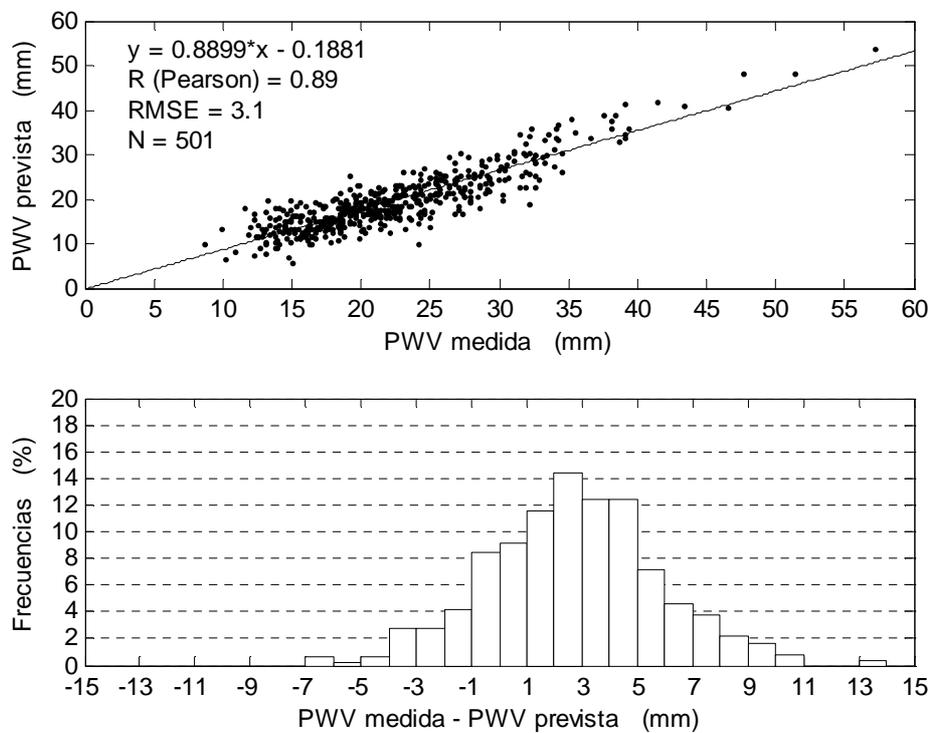


Figura 3.2.2. Arriba, correlación entre valores previstos y medidos del PWV GPS. Abajo, histograma de las diferencias. 0UTC.

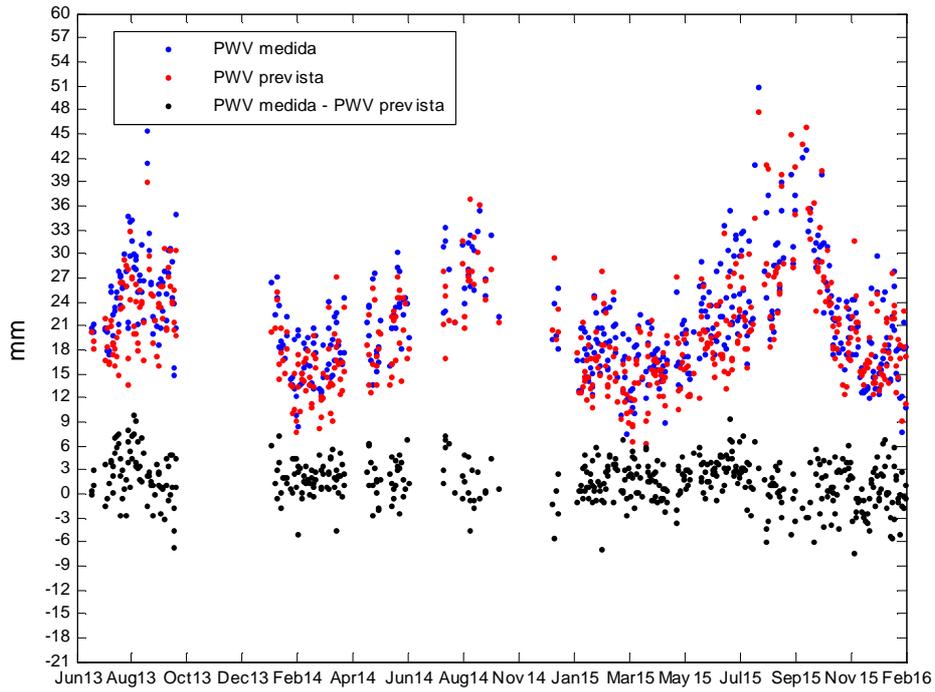


Figura 3.2.3 Valores de PWV GPS medidos, previstos y diferencias entre ellos 12UTC.

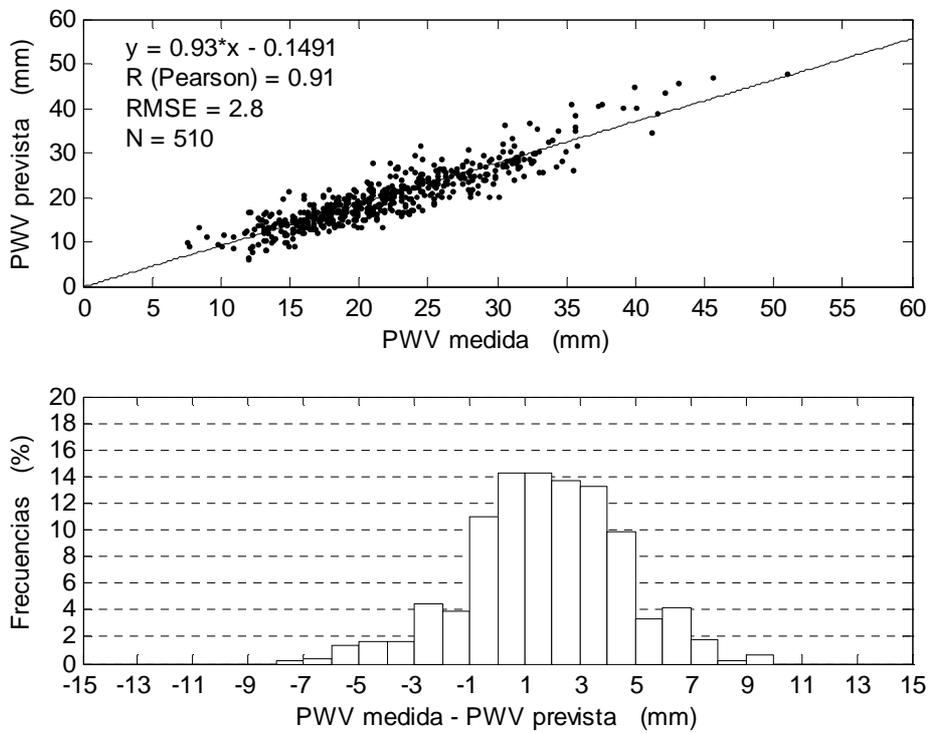


Figura 3.2.4. Arriba, correlación entre valores previstos y medidos del PWV GPS. Abajo, histograma de las diferencias. 12UTC.

3.3 Estaciones de superficie. Los Cristianos.

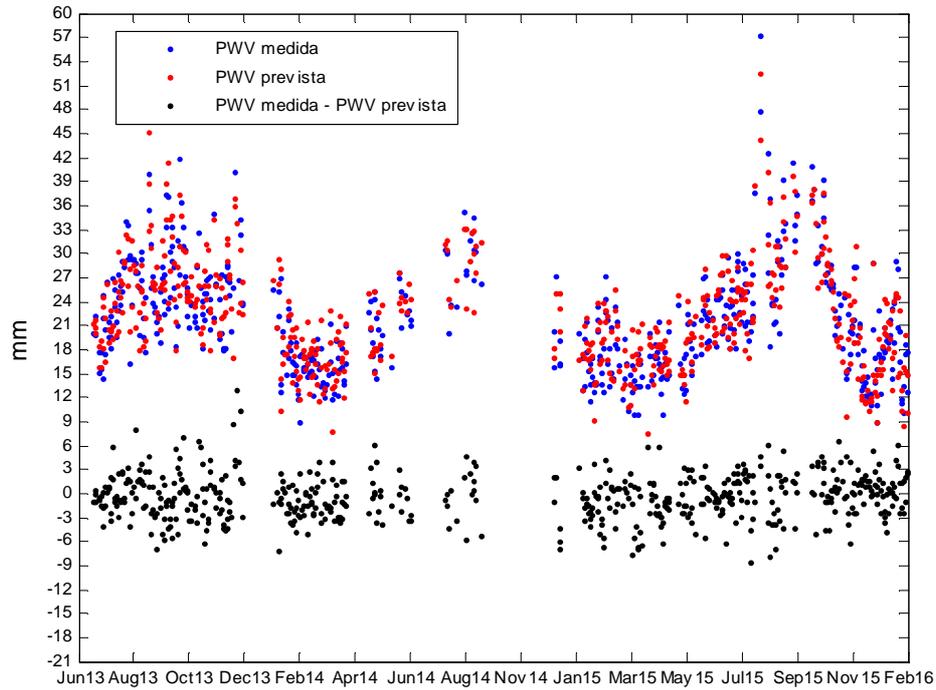


Figura 3.3.1 Valores de PWV GPS medidos, previstos y diferencias entre ellos UTC.

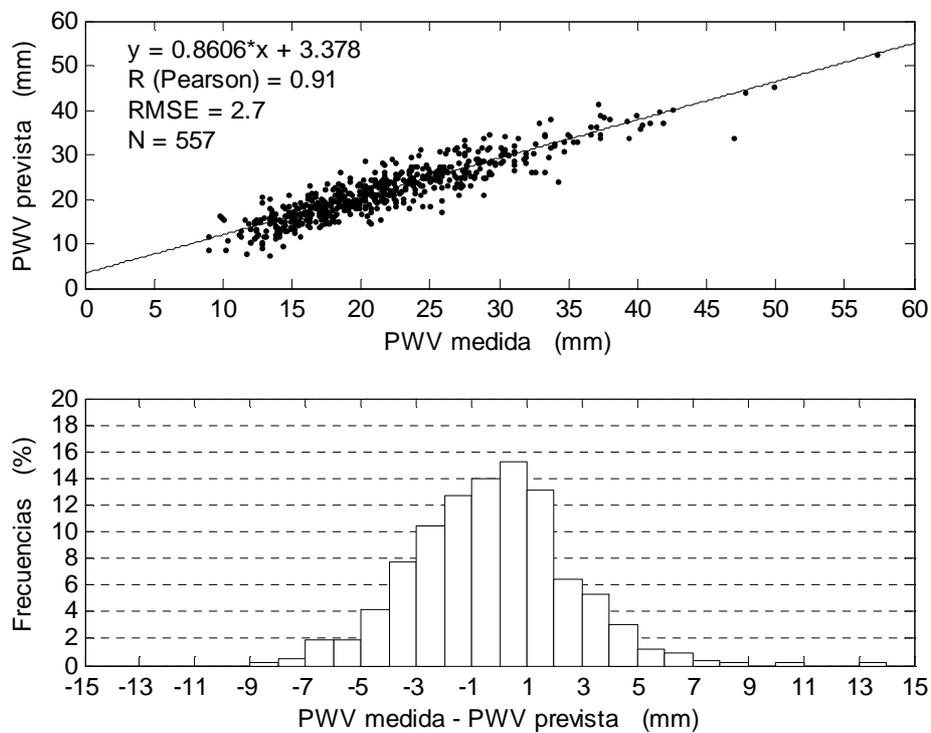


Figura 3.3.2. Arriba, correlación entre valores previstos y medidos del PWV GPS. Abajo, histograma de las diferencias. 0UTC.

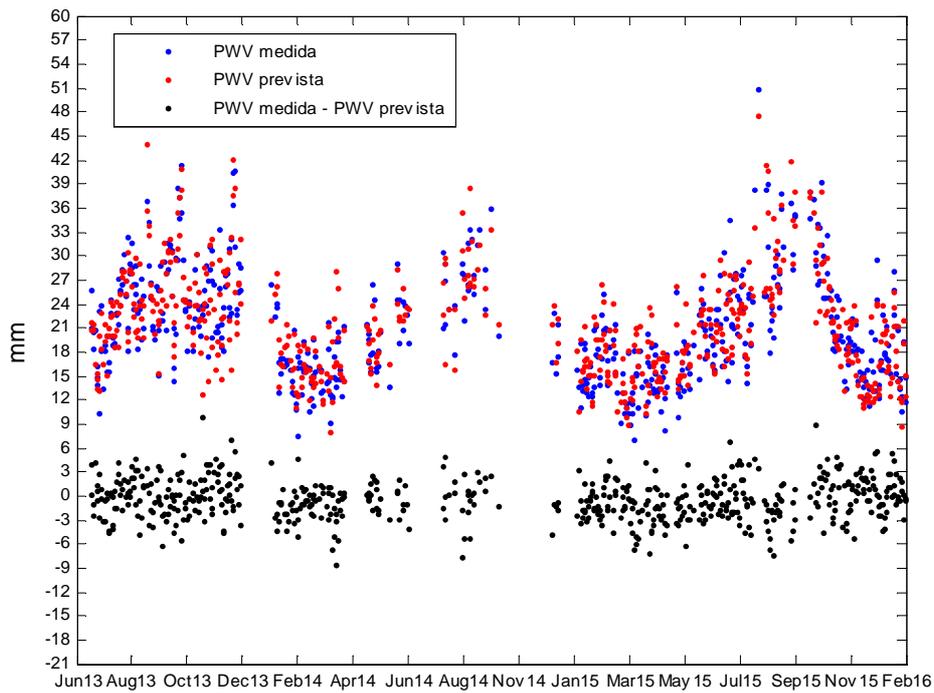


Figura 3.3.3 Valores de PWV GPS medidos, previstos y diferencias entre ellos 12UTC.

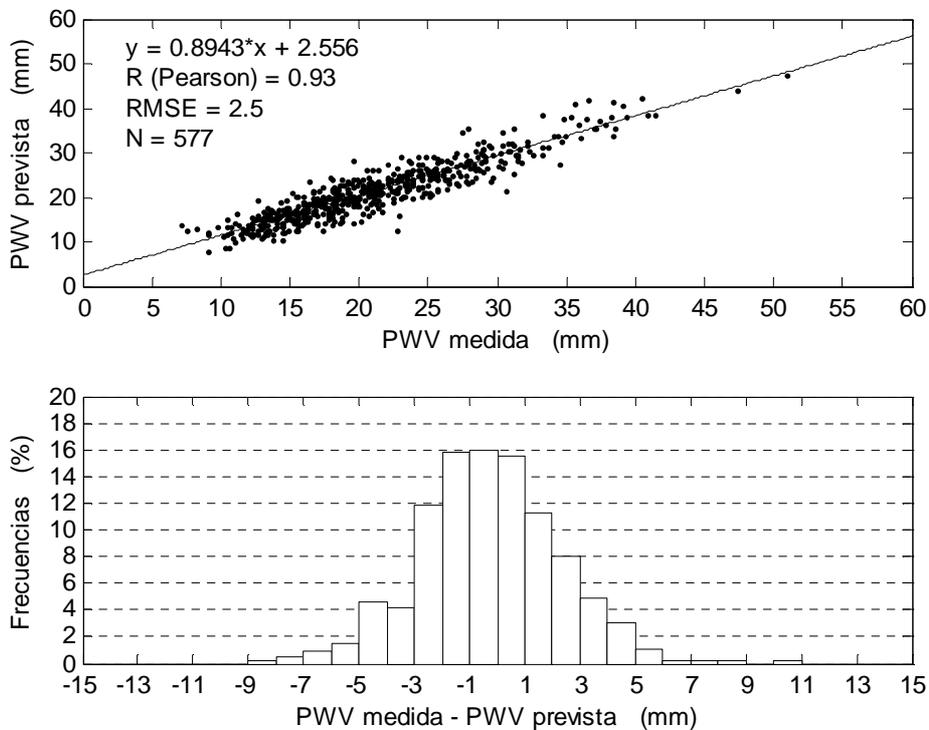


Figura 3.3.4. Arriba, correlación entre valores previstos y medidos del PWV GPS. Abajo, histograma de las diferencias. 12UTC.

3.4 Estaciones de altura. Observatorio de Izaña.

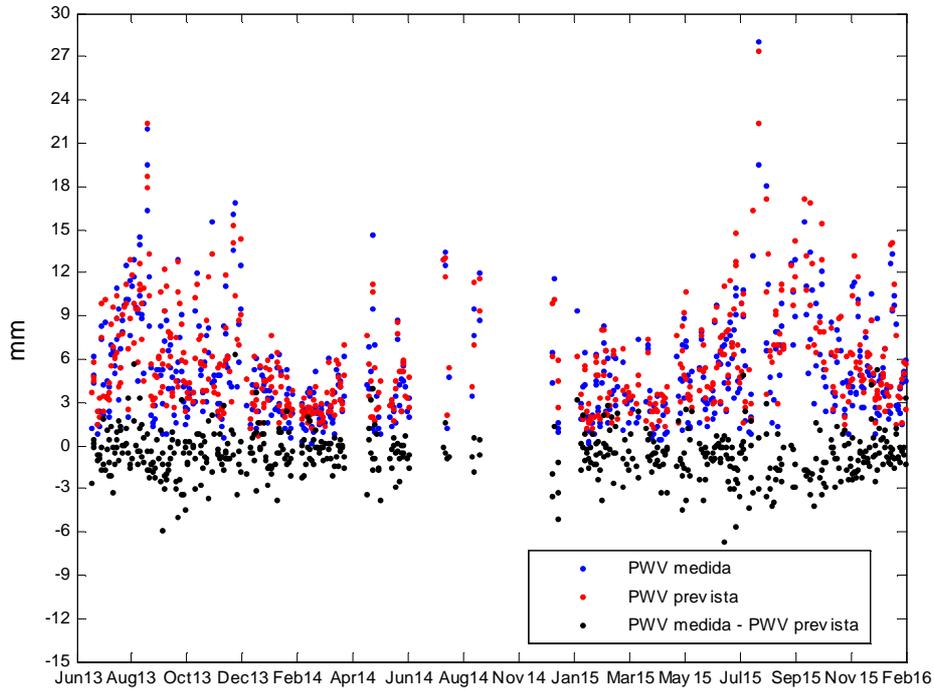


Figura 3.4.1 Valores de PWV GPS medidos, previstos y diferencias entre ellos UTC.

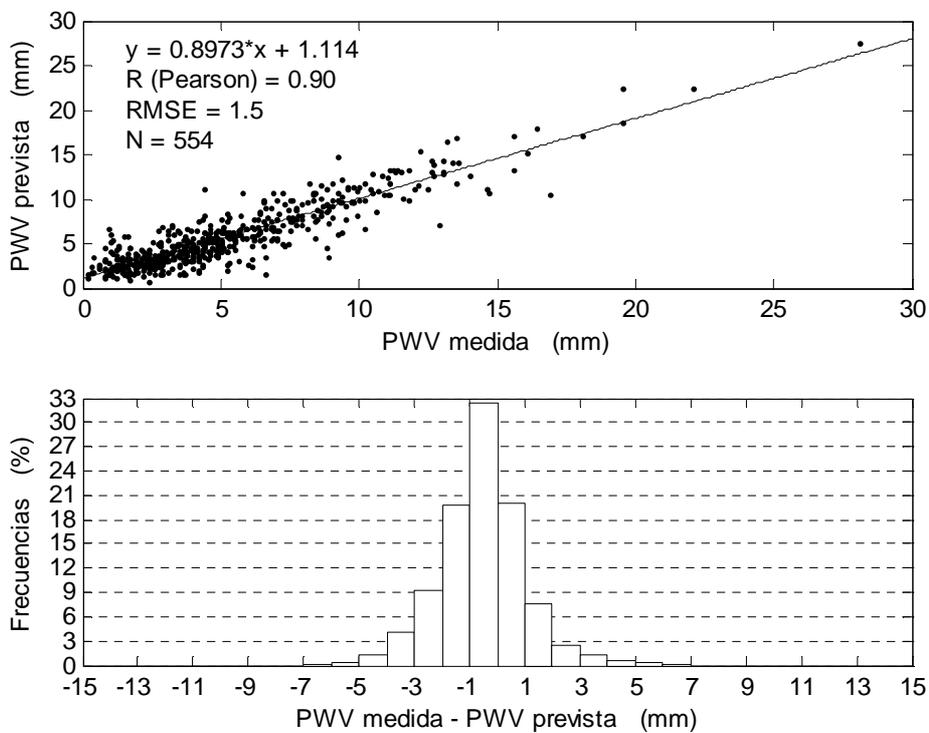


Figura 3.4.2. Arriba, correlación entre valores previstos y medidos del PWV GPS. Abajo, histograma de las diferencias. 0UTC.

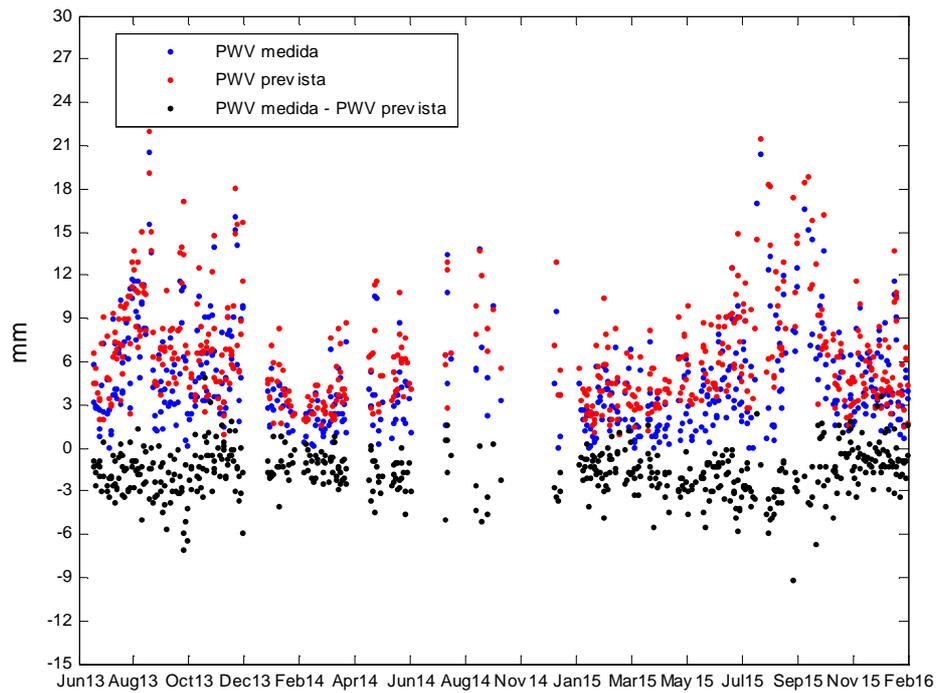


Figura 3.4.3 Valores de PWV GPS medidos, previstos y diferencias entre ellos 12UTC.

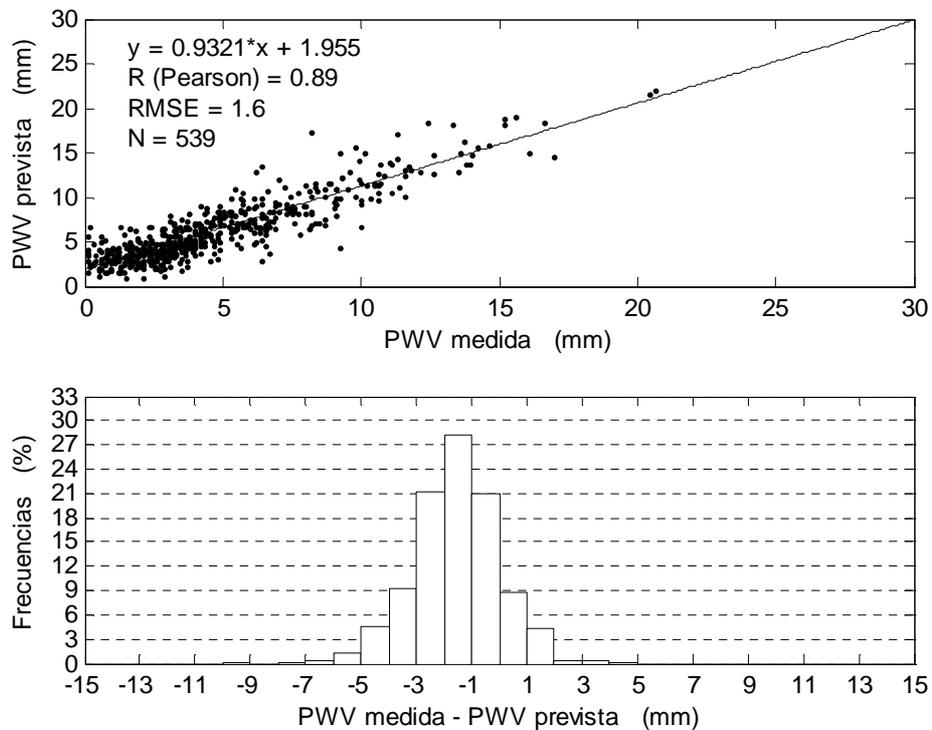


Figura 3.4.4. Arriba, correlación entre valores previstos y medidos del PWV GPS. Abajo, histograma de las diferencias. 12UTC.

En Izaña, los percentiles relacionados con la medida de agua precipitable, independientemente de la hora, son los que se resumen en la siguiente tabla:

PERCENTIL	PWV EN IZAN (mm)	ATMÓSFERA
25	2.5	SECA
50	4.2	NORMAL
75	6.7	HÚMEDA

Tabla 3.4.1. Percentiles obtenidos de la medida de PWV en la estación IZAN entre junio de 2013 y enero de 2016.

Hemos considerado el percentil 50 como umbral entre atmósfera seca y húmeda. Mostramos en las figuras 3.4.5 y 3.4.6 para la estación de Izaña (IZAN), un ejemplo de intervalo de tiempo en el que se dan transiciones de situaciones de atmósfera seca a situaciones de atmósfera húmeda y viceversa, en el que se muestra un excelente comportamiento de la predicción a 24h.

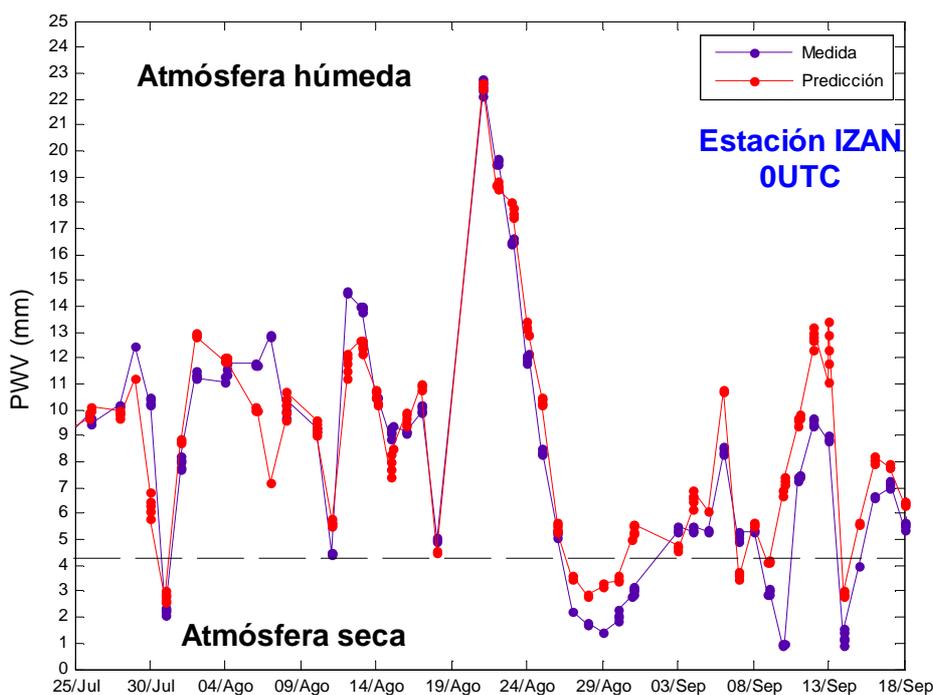


Figura 3.4.5. Medida y predicción en IZAN a las 0UTC entre el 25 de julio y el 18 de septiembre de 2013.

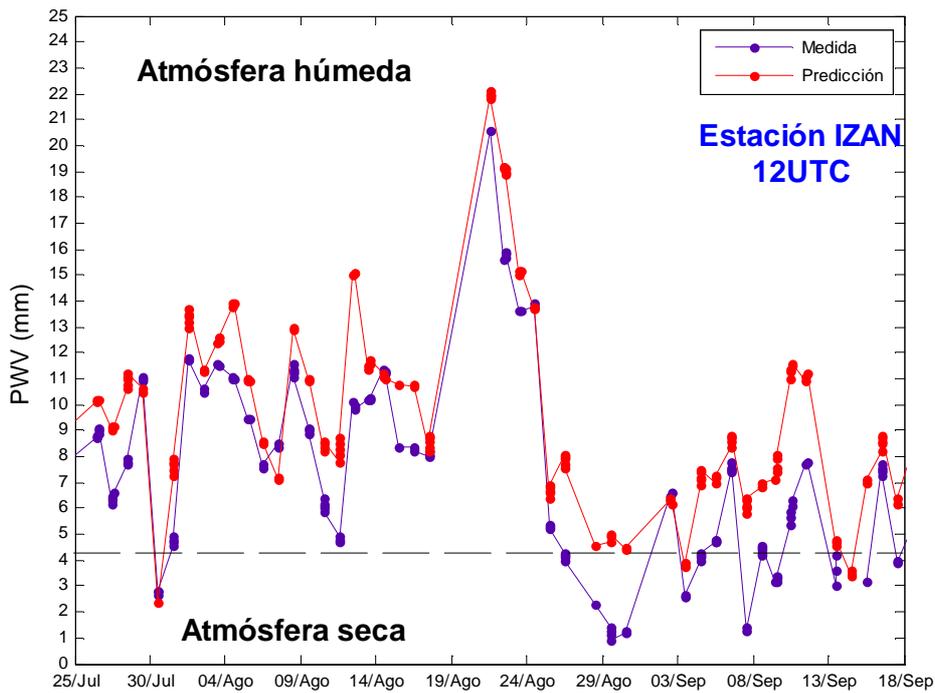


Figura 3.4.6. Medida y predicción en IZAN a las 12UTC entre el 25 de julio y el 18 de septiembre de 2013.

Este ejemplo, nos sirve para ilustrar que, a nivel cualitativo, tanto a las 0UTC como a las 12UTC, la predicción y la medida varían de una forma muy similar, y a nivel cuantitativo, sus valores están muy próximos. En este ejemplo, también podemos apreciar cómo la predicción en IZAN tiende a sobrevalorar el valor medido, sobretodo cuando la atmósfera es más seca.

4. Conclusiones

1. Observando todos los histogramas, y sabiendo que el intervalo de error asociado con la técnica GPS para la medida del agua precipitable es del orden del 10% del valor de la medida (Schneider M. et al., 2010), o lo que es equivalente, a unos $\pm 3\text{mm}$ (Ortiz de Galisteo J.P., 2013), comprobamos que, en todos los casos, las diferencias entre predicción y medidas se mueven, aproximadamente, dentro del mencionado margen de error, si bien, hay estaciones en las que dicho valor está más centrado en 0 que en otras. Entre estas últimas, las estaciones de Santa Cruz de Tenerife y de Izaña, presentan a las 12UTC, un ligero offset negativo entre medidas y predicción, mientras que el Puerto de La Cruz, presenta un offset positivo, tanto a las 0UTC como a las 12UTC.
2. En general, la correlación entre valores previstos y medidos de PWV es muy buena para todas las estaciones superándose holgadamente el valor de 0.8 en el coeficiente de correlación lineal de Pearson (R), e incluso la mayoría de las veces, el valor de 0.9.
3. Analizando, las series ploteadas de valores medidos y previstos de agua precipitable y los histogramas en las diferentes estaciones, podemos afirmar que, exceptuando el Puerto de la Cruz, los valores previstos de agua precipitable por el modelo CEPPM sobrevaloran el valor medido GPS, especialmente, en atmósferas secas como la de Izaña. Este último resultado puede verse también más fácilmente si realizamos las correlaciones entre valores previstos y medidos con rectas que pasen por el origen. En todas ellas, menos en el Puerto de la Cruz, obtendremos pendientes mayores que la unidad, tanto a las 0h como a las 12h. No sabemos por qué en el Puerto de la Cruz la predicción infravalora la medida y en el resto de estaciones es al revés. Es posible que se deba a algún efecto muy local que no se da con la suficiente intensidad en las otras dos estaciones costeras (Santa Cruz de Tenerife y Los Cristianos).

El conocimiento del contenido y distribución vertical del agua precipitable en tiempo cuasi-real, y su predicción a 24h, son una información valiosa tanto para la observación astronómica como para la operatividad en Aeropuertos, en Observatorios Astronómicos y Meteorológicos y en la predicción a corto plazo de fenómenos de precipitación. Por ello, pensamos que esta herramienta puede facilitar, complementar o servir de ayuda a los investigadores, observadores, operarios, y predictores, en los trabajos relacionados con sus respectivas funciones.

Agradecimientos

Desde aquí, queremos expresar nuestro agradecimiento a las personas e Instituciones que han hecho posible mediante su colaboración el desarrollo de este trabajo. En particular, queremos dar las gracias al Instituto Geográfico Nacional por el tratamiento y evaluación de los datos de las órbitas GPS mediante el software Bernese para la obtención del Retraso Cenital Total en los diversos emplazamientos de las antenas GPS, lo cual, constituye la base de este trabajo. Agradecemos también, al Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio, el suministro del fichero netCDF diario con los campos previstos a 24h de humedad específica, geopotencial, temperatura y presión que nos ha permitido desarrollar la segunda parte de la Nota Técnica. Por último, damos las gracias a todas aquellas personas que desde AEMET o el Ministerio contribuyen de un modo u otro a la revisión y publicación de este trabajo.

Bibliografía

1. Archanco X., Estudio de variables meteorológicas para la predicción de la precipitación mediante tecnología G.P.S. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Pública de Navarra. Julio, 2011.
2. Bevis M., Businger S., Chiswell S., Herring T.A., Anthes R.A., Rocken C., Ware R.H., GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. American Meteorological Society. March 1994.
3. Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H., GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. J. Geophys. Res. Vol. 97, NO. D14, p. 15,787-15,801. October 20, 1992.
4. Goad C.C. and Goodman L., A modified Hopfield tropospheric refraction correction model. Paper presented at the Fall Annual Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, 1974.
5. Hagemann S., Bengtsson L., Gendt G., On the determination of atmospheric water vapor from GPS measurements. J. Geophys. Res. Vol. 108, NO. D21, 4678. doi: 10.1029/2002JD003235, 2003.
6. Hopfield, H.S., Two-quadratic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. Journal of Geophysical Research, 74, pp. 4487-4499. 1969.
7. Ortiz de Galisteo J.P., Caracterización del contenido de vapor de agua atmosférico con receptores GPS. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Valladolid. Publicado por la Asociación Meteorológica Española (AME). Boletín, nº 39. p.: 28-33. Enero 2013.
8. Romero Campos P.M., Cuevas Agulló E., Ramos López R., Valdés Pérez de Vargas M., y Schneider M., Programa de vapor de agua en columna del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña: análisis e intercomparación de diferentes técnicas de medida. Nota Técnica Digital Nº 1 del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña. Agencia Estatal de Meteorología. NIPO: 784-09-009-9. Abril 2009.
9. Saastamoinen, J., Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser., Am. Geophys. Un., Washington.D.C., 15, 245-251. 1972.
10. Schneider M., Romero P.M., Hase F., Blumenstock T., Cuevas E., Ramos R., Continuous quality assessment of atmospheric water vapour measurement techniques: FTIR, Cimel, MFRSR, GPS and Vaisala RS92. Atmos. Meas. Tech., 3, 323-338. 2010.