

Medida del vapor de agua integrado en columna sobre el Observatorio Atmosférico de Izaña mediante radiometría de microondas. Comparación con otras técnicas

Nota técnica 40 de AEMET

Pedro Miguel ROMERO CAMPOS
Rosa Delia GARCÍA CABRERA
Antonio Fernando ALMANSA RODRÍGUEZ
África BARRETO VELASCO
Omaira Elena GARCÍA RODRÍGUEZ
Ramón RAMOS LÓPEZ



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 para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2023

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 666-23-008-5
<https://doi.org/10.31978/666-23-008-5>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
C/ Leonardo Prieto Castro, 8
28040 Madrid
<http://www.aemet.es/>

 @Aemet_Esp

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

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
1. EL OBSERVATORIO ATMOSFÉRICO DE IZAÑA	2
2. IMPORTANCIA DEL VAPOR DE AGUA.....	3
3. TÉCNICAS DE MEDIDA DEL VAPOR DE AGUA. PROS Y CONTRAS.....	4
4. OBJETIVO Y ESTRUCTURA DE ESTA NOTA TÉCNICA	6
5. INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDAS	7
5.1. Radiómetro de microondas RPG-LHATPRO	7
5.2. Sondeos aerológicos con sondas Vaisala RS41	9
5.3. Receptor GNSS.....	9
5.4. Espectrómetro de infrarrojos por Transformada de Fourier (FTIR).....	10
5.5. Fotómetros solar y lunar CIMEL (AERONET)	11
5.6. Espectro radiómetro EKO MS-711.....	11
6. INTERCOMPARACIÓN DEL IWV CON LAS DIFERENTES TÉCNICAS.....	12
6.1. Comparación diurna.....	13
6.1. a. Dependencia con la cantidad de vapor de agua	15
6.1. b. Dependencia con el ángulo cenital solar	16
6.2. Comparación nocturna.....	18
6.2. a. Dependencia con la cantidad de vapor de agua	19
6.2. b. Dependencia con el ángulo cenital lunar	20
6.2. c. Dependencia con el ángulo de fase lunar.....	22
7. ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE Y LA TRAZABILIDAD EN EL IWV	24
7.1. Límite de detección instrumental e incertidumbre del IWV	24
7.2. Trazabilidad del IWV	28
8. CONCLUSIONES	30
9. AGRADECIMIENTOS	32
10. REFERENCIAS	33

MEDIDA DEL VAPOR DE AGUA INTEGRADO EN COLUMNA SOBRE EL OBSERVATORIO ATMOSFÉRICO DE IZAÑA MEDIANTE RADIOMETRÍA DE MICROONDAS. COMPARACIÓN CON OTRAS TÉCNICAS.

Pedro Miguel ROMERO CAMPOS¹, Rosa Delia GARCÍA CABRERA^{2, 1}, Antonio Fernando ALMANSA RODRÍGUEZ^{3, 1}, África BARRETO VELASCO¹, Omaira Elena GARCÍA RODRÍGUEZ¹, Ramón RAMOS LÓPEZ¹

¹*Centro de Investigación Atmosférica de Izaña. Agencia Estatal de Meteorología*

²*Tragsatec, 28037 Madrid, España*

³*Cimel Electronique, 75011 Paris, Francia*

promeroc@aemet.es, rgarci47@tragsa.es, f-almansa@cimel.fr, abarretov@aemet.es, ogarcia@aemet.es, rramosl@aemet.es

RESUMEN

Se presentan en este estudio los resultados de la comparación entre las medidas del vapor de agua integrado en la columna total atmosférica (IWV), obtenido con un radiómetro de microondas RPG-LHATPRO de la serie G5 (MWR), en el Observatorio Atmosférico de Izaña (IZO) y los obtenidos mediante las técnicas FTIR, EKO MS-711, CIMEL, GNSS y radiosondas Vaisala RS41 durante diferentes períodos de tiempo comprendidos entre mayo de 2020 y abril de 2023. Los resultados de la comparación indican una alta trazabilidad del MWR superior al 90% con la mayoría de las técnicas, siendo la técnica FTIR, con un 99%, la de mayor trazabilidad durante el día y las RS41, con un 98%, durante la noche. Como consecuencia, estas dos últimas técnicas podrían usarse en estudios que involucren medidas del IWV con el MWR en los que se necesiten complementar períodos de ausencias de datos para el día y la noche, respectivamente. El estudio nos ha permitido estimar también la exactitud y precisión de las medidas del IWV, así como el límite de detección de las diferentes técnicas, constatando que las técnicas MWR y CIMEL Lunar son las de mayor exactitud y precisión con límites de detección de 0.18 mm y 0.13 mm y máximas incertidumbres de 0.77 mm y 0.93 mm, respectivamente. Se constata también que el instrumento MWR mide más IWV que cualquiera de las otras técnicas, tanto de día como de noche (entre un 4% y un 22% más, dependiendo de la técnica). Asimismo, las diferencias entre el IWV del MWR y el del resto de técnicas muestran, en valor absoluto, un progresivo aumento lineal con el contenido de vapor de agua, tanto de día como de noche, una ligera disminución con el ángulo cenital solar y un muy débil aumento con el ángulo cenital lunar. El ángulo de fase lunar influye en la comparación disminuyendo las diferencias entre MWR y CIMEL Lunar en el rango $[-30^\circ, 30^\circ]$.

Palabras clave: Vapor de agua integrado, Microondas, Humedad, Incertidumbre, Trazabilidad.

1. EL OBSERVATORIO ATMOSFÉRICO DE IZAÑA

El Observatorio Atmosférico de Izaña (IZO) pertenece a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), y es gestionado por el Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI). Esta estación se encuentra situada en la isla de Tenerife (Islas Canarias, 28.31°N, 16.50°W) a 2400 m.s.n.m., en la troposfera libre por encima de la capa de inversión térmica cuasi-permanente debida a la subsidencia asociada al anticiclón de las Azores. Esta capa actúa a modo de “tapadera” frente a la convección procedente de niveles inferiores de la isla evitando u obstaculizando los posibles procesos de mezcla con contaminación local. En consecuencia, ofrece excelentes condiciones para realizar mediciones atmosféricas de aerosoles y gases traza representativos de la troposfera libre y el “background” o fondo atmosférico.

En 1984, el Observatorio se convirtió en una estación de la Red de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de Fondo (Background Air Pollution Monitoring Network, BAPMoN) de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO) y, desde 1989, ha estado operando como una estación de la Red de Vigilancia Atmosférica Mundial (Global Atmospheric Watch, GAW). Además, IZO también ha contribuido a diferentes redes internacionales como la Red para la Detección del Cambio en la Composición Atmosférica (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC) desde 1999, Red para la Observación de la Columna Total de Carbono (Total Carbon Column Observing Network, TCCON) desde 2007, Red Robótica de Aerosoles (Aerosol RObotic NETwork, AERONET) desde 2003, y Red de Referencia para la Medida de la Radiación en Superficie (Baseline Surface Radiation Network, BSRN) desde 2009. Por otro lado, en 2014, IZO fue designada por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación (Commission for Instruments and Methods of Observation, CIMO) de la WMO como banco de pruebas (TestBed) para instrumentos de teledetección de aerosoles y vapor de agua (WMO, 2014). Más detalles de la estación y los programas de medición se pueden encontrar en Cuevas *et al.*, (2022).

2. IMPORTANCIA DEL VAPOR DE AGUA

En las últimas décadas, los gases de efecto invernadero (GEI) han cobrado gran interés como principales impulsores del cambio climático. El GEI más importante es el vapor de agua, ya que, interactúa eficientemente con la radiación solar y terrestre y, su concentración en la atmósfera, impulsada por la temperatura, experimenta una fuerte retroalimentación positiva en el sistema climático del sistema Tierra-Atmósfera (IPCC, 2021).

Este gran potencial retro-alimentador del vapor de agua atmosférico se debe a su rápida respuesta a los cambios de temperatura que se producen en la atmósfera a través de los procesos de evaporación, condensación y precipitación. Esta característica hace que juegue un papel crucial en el ciclo hidrológico, en la formación de nubes, en el balance radiativo terrestre y, por consiguiente, en el cambio climático. De aquí que sea de enorme interés conocer con la mayor resolución temporal y espacial posible su cantidad y distribución en la atmósfera.

3. TÉCNICAS DE MEDIDA DEL VAPOR DE AGUA. PROS Y CONTRAS

En la actualidad, la manera más habitual para medir el vapor de agua atmosférico y sus variables asociadas, la temperatura y humedad, es a partir de los radiosondeos o sondeos aerológicos en los cuales se han venido utilizando, a lo largo de los años, sondas atmosféricas de presión, temperatura y humedad cada vez más sensibles y precisas. Sin embargo, los sondeos diarios que se lanzan de forma rutinaria por AEMET así como por los servicios meteorológicos nacionales de muchos países son costosos y tienen poca cobertura espacial (varios cientos de kilómetros entre estaciones en el mejor de los casos) y temporal, ya que, se lanzan habitualmente 2 veces al día. Además, los perfiles de temperatura y humedad medidos ni son verticales, ni corresponden al mismo recorrido atmosférico, dado que, dependiendo de la velocidad y dirección del viento y del resto de condiciones atmosféricas, el globo que transporta a las sondas se desplaza en la horizontal y su trayectoria varía de un lanzamiento a otro. Por otro lado, las medidas de temperatura y humedad en el perfil tampoco corresponden al mismo instante de tiempo, dado que en recorrer un determinado perfil atmosférico el globo sonda puede tardar más o menos tiempo dependiendo de la velocidad del ascenso. Las medidas que se obtienen en los niveles más altos del perfil pueden diferir de manera significativa en el tiempo respecto del instante en el que se tomaron las medidas en los niveles más bajos, y esto, para el estudio de un componente atmosférico tan variable en el espacio y el tiempo como el vapor de agua es importante, sobre todo, para la predicción a corto o muy corto plazo.

Ciertamente, existen otras técnicas de medida del vapor de agua que complementan a las medidas del sondeo y que aportan mayor resolución temporal. Entre estas técnicas, están la detección, mediante receptores GNSS (Global Navigation Satellite System), de los retrasos debidos a la refracción atmosférica de las ondas de radio emitidas por las constelaciones de satélites cuando atraviesan la atmósfera terrestre y también las técnicas radiométricas basadas en la detección de la radiación visible o infrarroja por fotómetros o espectro radiómetros, que operan en longitudes de onda sensibles a la presencia del vapor de agua atmosférico.

En la Figura 1, se muestran algunas de estas técnicas sobre las que comentaremos brevemente en el apartado de instrumentación y medidas.

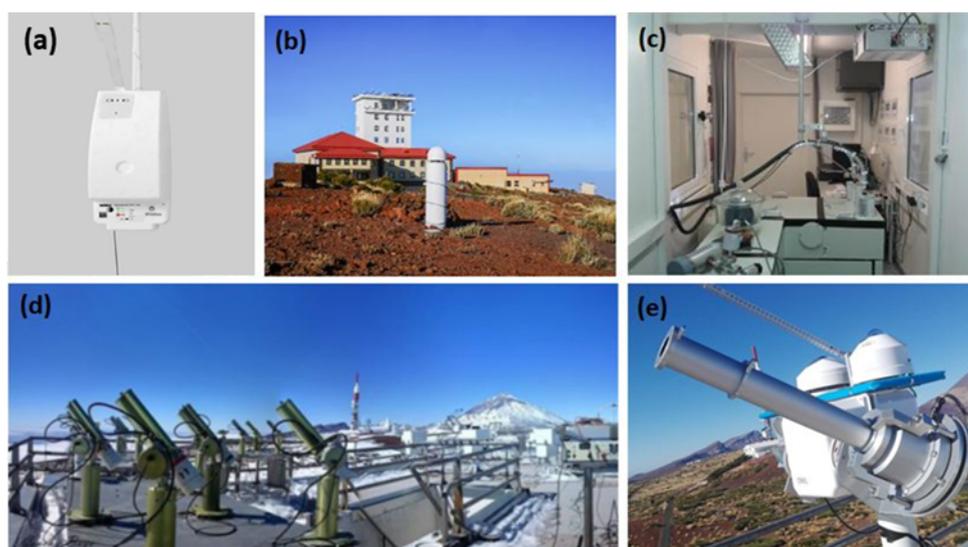


Figura 1: (a) Radiosonda Vaisala RS41, (b) Receptor GNSS, (c) Espectrómetro FTIR, (d) Fotómetros solares CIMEL y (e) Espectro radiómetro EKO MS-711 instalados en el Observatorio de Izaña.

Sin embargo, todas las técnicas radiométricas, aunque mejoren la resolución temporal respecto del sondeo, tienen también otras limitaciones. Una de ellas es la presencia de nubes. Es necesario filtrar las medidas y prescindir de los registros que estén afectados por nubes, ya que estas tienen una fuerte absorción en el infrarrojo y su presencia invalida la obtención tanto del espesor óptico de aerosoles (AOD) como la del vapor de agua. Esto limita el número de días y, dentro de cada día, el intervalo adecuado para la obtención del vapor de agua. Además, los fotómetros o radiómetros, dependiendo de si son sensibles a la radiación solar o lunar, sólo miden de día o de noche, respectivamente. En el caso de la técnica GNSS, tenemos la ventaja de que es independiente de la presencia de nubes, nos permite medir de día y de noche y mejora la resolución temporal de los sondeos. Sin embargo, es una técnica poco precisa para contenidos muy bajos de vapor de agua atmosférico integrado en columna como los que se suelen medir en IZO (< 3.5 mm).

En este sentido, los instrumentos de teledetección pasiva de microondas emplazados en la superficie terrestre ofrecen una serie de ventajas que nos permiten, al menos parcialmente, superar estos inconvenientes. Por un lado, las nubes son semitransparentes en la región de microondas por lo que su presencia no supone ningún tipo de limitación en las medidas. Por otro lado, los radiómetros de microondas son instrumentos robustos, preparados para la medida en un amplio abanico de condiciones atmosféricas y bastante autónomos porque requieren poco mantenimiento. Además, nos permiten obtener de manera continua perfiles atmosféricos “instantáneos” de la temperatura y humedad atmosféricas tanto en la vertical como en otras direcciones. También ofrecen una amplia variedad de productos añadidos como, por ejemplo, el vapor de agua integrado en columna (IWV o, de forma equivalente, agua precipitable, PWV) y el contenido total de agua líquida en columna (LWP). De hecho, en la actualidad, la técnica de microondas es la forma más precisa y más barata de obtener el LWP. Hoy en día, EUMETNET (Red de Servicios Meteorológicos Europeos) a través de su programa de perfilado atmosférico (E-PROFILE) desarrolla una red internacional diseñada para explotar la adquisición de estos y otros productos basados en la radiometría de microondas (Rüfenacht, R., *et al.*, 2021).

Dado el potencial de la técnica de microondas y las condiciones de baja humedad presentes en la troposfera libre de la zona subtropical, el CIAI ha completado el Programa de Medidas del Vapor de Agua con la adquisición de un radiómetro de microondas RPG-LHATPRO de la serie G5, especialmente diseñado para medir en atmósferas secas o muy secas ($IWV < 1$ kg/m², precisión = ± 0.02 kg/m² RMS, ruido medio = 0.005 kg/m² RMS) (Rose, Th. y Czekala H., 2011). Este radiómetro, al que nos referiremos como MWR (MicroWave Radiometer), se instaló y se puso en funcionamiento en IZO en mayo de 2020.

Se eligió este modelo de radiómetro porque en la troposfera libre por encima de IZO el contenido de vapor de agua precipitable en columna es habitualmente muy pequeño. En concreto, los valores medios mensuales máximos de IWV sobre el Observatorio están comprendidos entre 9 mm y 10 mm en los meses más húmedos, que son agosto y septiembre, y en torno a los 4 mm o inferiores, para los meses de enero a marzo, que son los más secos (Cuevas *et al.*, 2022).

Con la adquisición del MWR, IZO dispone de observaciones en continuo de las principales técnicas para la medida del vapor de agua a nivel de superficie, el perfil y la columna total atmosférica.

4. OBJETIVO Y ESTRUCTURA DE ESTA NOTA TÉCNICA

Hasta la fecha, en el CIAI se han realizado cinco comparaciones multi-instrumentales que involucran técnicas de medida de IWV con la instrumentación aludida anteriormente (Romero Campos *et al.*, 2009; Schneider *et al.*, 2010; García R.D. *et al.*, 2021; García O.E. *et al.*, 2021; Almansa *et al.*, 2020). El objetivo de esta nota técnica es realizar una primera comparación del IWV obtenido a partir de las medidas del radiómetro de microondas con los obtenidos a partir del resto de técnicas disponibles. Esta comparación es necesaria para incorporar al MWR como instrumento dentro del Programa de Vapor de Agua del CIAI, validando sus medidas con las efectuadas por el resto de equipos que forman parte de dicho Programa (GNSS, RS41, FTIR, EKO y CIMEL solar y lunar), los cuales, utilizan metodologías diferentes, y así poder caracterizar en qué grado son o no trazables.

Este objetivo se desarrollará en tres pasos que se abordarán en los siguientes apartados.

En primer lugar, describiremos brevemente la instrumentación y las medidas utilizadas en la comparación, explicando las diferentes metodologías empleadas con cada instrumento.

En segundo lugar, compararemos el IWV obtenido del MWR con los obtenidos con el resto de instrumentación y estudiaremos su dependencia respecto del contenido de vapor de agua durante el día y la noche, así como respecto del ángulo cenital solar durante el día y de los ángulos de fase lunar y cenital lunar durante la noche. Analizaremos los resultados y la trazabilidad entre los mismos, comentando los factores que han podido influir en ellos.

Finalmente, expondremos las principales conclusiones tras este estudio.

La nota técnica concluirá con los agradecimientos y la relación de la bibliografía empleada en la consulta para la redacción y desarrollo de la misma.

5. INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDAS

En esta sección, describiremos las características principales de la instrumentación y metodología empleada en este trabajo, así como el tipo y resolución de las medidas que se han utilizado en la comparación de las diferentes técnicas.

5.1. Radiómetro de microondas RPG-LHATPRO

El radiómetro RPG-LHATPRO (Low Humidity And Temperature PROfiler) de la serie G5 instalado en IZO en mayo de 2020, (Figura 2), es un perfilador de temperatura y humedad atmosférica, de polarización simple, basado en la teledetección pasiva de microondas. Consta de 2 receptores de banda estrecha con 7 y 6 canales, respectivamente, en el rango espectral que va desde los 51 GHz a los 58 GHz, para la medida de los perfiles de temperatura, y desde los 183 GHz a los 191 GHz, para la medida de los perfiles de humedad. La variable que se mide con este instrumento es la temperatura de brillo, y a partir de ella, mediante algoritmos de inversión basados en redes neuronales, se obtienen diferentes productos como son: los perfiles de temperatura atmosférica en la troposfera completa y, con más resolución espacial, en la capa límite atmosférica, los perfiles de humedad (HPC) absoluta y relativa, el contenido total del vapor de agua integrado en todo el recorrido atmosférico (IWV), el contenido total de agua líquida (LWP), el perfil de agua líquida (LPR), la altitud de la base de las nubes (CBH), la altitud de la capa límite (BLH), y los retrasos húmedos (WDLY) y secos (DDLY) en las señales recibidas en el receptor GPS/Galileo del instrumento debidos a la presencia o no de vapor de agua atmosférico. El instrumento lleva acoplado un fotómetro de infrarrojos que mide la temperatura infrarroja en dos canales, uno centrado en las 12 μm y el otro centrado en 11.10 μm . Por último, también incorpora una estación meteorológica completa para la medida al nivel del emplazamiento de la presión, temperatura, humedad relativa, intensidad de lluvia (mm/h) y la velocidad y dirección del viento.



Figura 2: Radiómetro de microondas RPG-LHATPRO instalado en el Observatorio de Izaña.

La obtención de los perfiles atmosféricos se basa en la medida de la emisión atmosférica en las zonas marginales o laterales (“wings”, en inglés) de las líneas rotacionales ampliadas por presión centradas en los 60 GHz para la temperatura y en los 183 GHz para el vapor de agua.

La radiación atmosférica incide en el espejo parabólico de exploración (antena) situado bajo la ventana atmosférica del instrumento (Figura 3). Desde aquí, se envía hacia una rejilla que la polariza separándola en dos haces que entran, respectivamente, en los receptores de humedad y de temperatura situados en ángulo de 90°, tal y como aparecen en la Figura 3. Allí, se miden las componentes de la frecuencia de microondas en los canales correspondientes.

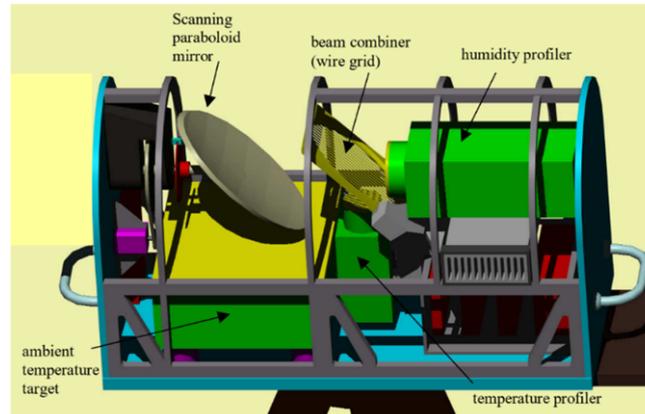


Figura 3: Esquema interno del radiómetro de microondas (Rose, Th. y Czekala H., 2011).

En cada medida, la antena o espejo parabólico se va moviendo en pasos de elevación desde los 5° hasta el cenit, recogiendo la radiación a diferentes alturas que definirán el perfil de las 93 altitudes fijas con las que trabaja el equipo y que van desde el nivel de emplazamiento hasta los 10 km por encima de dicho nivel. La resolución espacial de este perfil varía siendo más fina cuanto menor sea la altitud.

La temperatura de brillo se relaciona con la radiación espectral del cuerpo negro a través de la ley de Planck. Como las microondas son radiación electromagnética de baja frecuencia la relación entre radiación y temperatura de brillo dada por la ley de Planck se puede aproximar, para cada frecuencia de trabajo, por una relación lineal consistente con la aproximación de Rayleigh-Jeans. Esta relación lineal entre radiación y temperatura de brillo sirve de base para el proceso de calibración que transformará el voltaje correspondiente a la radiación recibida en temperatura de brillo. A partir de la temperatura de brillo, se obtendrán los diferentes productos mediante un algoritmo de inversión basado en redes neuronales.

El algoritmo utilizado para minimizar la función coste en la red neuronal es el de Davidon-Fletcher-Powell (Rose Th. y Czekala H., 2011). La arquitectura de la red consta de una capa de entrada con temperaturas de brillo simuladas para las frecuencias de trabajo del radiómetro, una capa oculta con un cierto número de neuronas o nodos y una capa de salida con la variable atmosférica de interés (IWV, LWP, etc.). Para obtener las funciones peso entre los nodos de las diferentes capas, se ha utilizado un conjunto de 15000 estados atmosféricos basados en perfiles de radiosondeos y se ha dividido en tres grupos: uno para entrenamiento de la red, otro de generalización para obtener el número de iteraciones óptimo para evitar un sobreajuste y un tercero para validar los resultados (Rose Th. y Czekala H., 2011).

La resolución temporal del producto IWV generado por el radiómetro de microondas es de 1s. Sin embargo, es una resolución demasiado fina para su comparación con las de otras técnicas por lo que utilizaremos promedios minutales de dicha variable. La exactitud y la precisión del

producto IWV del MWR la estimaremos experimentalmente en el sub-apartado 6.1 de la sección 6 a partir de los datos disponibles y de su comparación con los productos similares obtenidos con el resto de las técnicas.

5.2. Sondeos aerológicos con sondas Vaisala RS41

Las radiosondas meteorológicas RS92 que, desde junio de 2005 se venían lanzando rutinariamente dos veces al día (11:15 y 23:15 UTC) desde la estación de Güímar (28,32°N, 16,38°W, 105 m s.n.m.) situada en la línea de costa, aproximadamente a 15 km al sureste de IZO en la isla de Tenerife, son sustituidas, a partir del 13 de diciembre de 2017, por las nuevas radiosondas RS41 (Figura 1a), las cuales, suministran perfiles atmosféricos con resolución temporal de 1s. La estación de Güímar forma parte del Sistema Global de Observación del Clima (GCOS) – Upper-Air Network (GUAN) (Estación GRUAN de la OMM #60018).

El contenido de IWV en la columna de la atmósfera se determina a partir de los perfiles de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica adquiridos con las radiosondas meteorológicas (Miloshevich *et al.*, 2009; Romero-Campos *et al.*, 2009):

$$IWV = \int_0^z \rho_v \times dz \quad (5.2.1)$$

Donde ρ_v es la densidad volumétrica del vapor de agua (humedad absoluta) en $\frac{kg}{m^3}$

Los valores de IWV que se utilizan en esta nota técnica se han obtenido a partir de los perfiles atmosféricos de temperatura y humedad sobre Tenerife de las radiosondas RS41 suministrados por la red GRUAN (GCOS Reference Upper-Air Network) contenidos en el producto RS41-GDP.1. Estos perfiles han sido previamente depurados, analizados y corregidos por GRUAN siguiendo la metodología descrita en Sommer *et al.*, (2022). Los errores de la humedad de las RS41 en la troposfera superior son, aproximadamente, un 1% más pequeños que los de las RS92 (Sun *et al.*, 2021).

5.3. Receptor GNSS

Los satélites del Sistema de Posicionamiento Global estadounidense (GPS) y de su análogo ruso (GLONASS) pertenecientes ambos al Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) emiten señales de radio hacia los receptores situados en la superficie terrestre las cuales son utilizadas para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo.

Debido a la refracción atmosférica estas señales sufren un retraso. Este retraso, denominado Retraso Cenital Total (Zenith Total Delay, ZTD) se puede expresar en unidades de distancia (mm) y puede descomponerse en dos componentes: una asociada a la atmósfera seca (sin vapor de agua), denominada Retraso Hidrostático Cenital (ZHD) relacionada con los momentos dipolares inducidos por las moléculas del aire y, otra, asociada a la presencia del vapor de agua atmosférico y denominada Retraso Húmedo Cenital (Zenith Wet Delay, ZWD) que está relacionada con los momentos dipolares permanentes de las moléculas de vapor de agua. De esta forma, podemos escribir que:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (5.3.1)$$

A partir de estos retrasos se puede obtener, de manera simplificada, el agua precipitable o vapor de agua integrado en columna (IWV) mediante la expresión:

$$IWV(mm) = 0.15 \times (ZTD(mm) - 2.28 \times P(hPa)) \quad (5.3.2)$$

Donde P es la presión en superficie expresada en hPa en el lugar de emplazamiento del receptor GNSS y ZTD e IWV vienen expresados en mm.

Para recibir las señales de las constelaciones GPS/GLONASS, poder analizar el ZTD y obtener el vapor de agua en columna, en julio de 2008 se instaló en IZO un receptor GNSS (Figura 1b) modelo LEICA GRX1200GGPRO con antena LEIAT504GG que opera desde entonces dentro de la red de referencia europea EUREF (European Reference Frame Network). Posteriormente, el receptor se actualizó al modelo de referencia LEICA GR 50 que es más moderno y versátil que el anterior y mejora sus prestaciones. El receptor pertenece al Instituto Geográfico Nacional (IGN) que es la institución que gestiona y procesa la obtención de la señal ZTD utilizando el software GNSS Bernese, cuya versión actual es la 5.4.

En la práctica, la variable ZTD se obtiene de dos formas: una en tiempo cuasi-real a partir de las denominadas órbitas ultrarrápidas que suministra los valores del ZTD con una resolución temporal de 15 minutos y, la otra, mediante un análisis a posteriori basado en órbitas precisas en el que los valores ZTDs de estaciones próximas se ajustan y suavizan entre sí mediante una combinación semanal de estimaciones troposféricas llevadas a cabo por los centros de análisis EUREF. Estas últimas suministran el valor ZTD con resolución temporal de 1 hora y son las que utilizamos en este estudio.

5.4. Espectrómetro de infrarrojos por Transformada de Fourier (FTIR)

Las medidas de espectrometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) (Figura 1c) comenzaron en IZO en 1999, como resultado de una colaboración entre el CIAI-AEMET y el Institute of Meteorology and Climate Research – Atmospheric Trace Gases and Remote Sensing (IMK-ASF), perteneciente al Karlsruhe Institute of Technology (KIT) (García *et al.*, 2021). Desde entonces, dos espectrómetros FTIR han operado en el Observatorio (un IFS 120M entre 1999 y 2005, y un IFS 120 / 5HR a partir de 2005) en el marco de la red NDACC desde 1999, y desde 2007, en la red TCCON.

El experimento FTIR está formado por dos componentes principales, una óptica de entrada montada sobre un seguidor solar y un espectrómetro de alta resolución, cuyo elemento central es un interferómetro de Michelson. El campo de visión (FOV de las siglas en inglés de *Field of View*) de este instrumento es de tan sólo 0.07° (considerablemente más pequeño que el diámetro solar de 0.5°). Al tomar los espectros solares, el FOV del FTIR se centra automáticamente en el disco solar por medio del sistema Camtracker (Gisi *et al.*, 2011).

Los datos de IWV del FTIR usados en este estudio proceden de la versión R1 (GGG2020.R1) de TCCON (García, O. E. *et al.*, 2022). Para ello, se utilizaron los espectros solares adquiridos con la configuración estándar de TCCON (Wunch *et al.*, 2011; Schneider *et al.*, 2010b). Estas medidas se realizan entre 4000 y 9000 cm⁻¹ (correspondientes a longitudes de onda entre 1111 y 2500 nm) a una resolución espectral de 0.02 cm⁻¹. Los datos de TCCON se han calibrado utilizando sondeos meteorológicos lanzados en estaciones TCCON distribuidas globalmente, a partir de los cuales se determinó un factor de corrección de 1.018 ± 0.004 (R² = 0.993) para el IWV (Wunch *et al.*, 2015).

5.5. Fotómetros solar y lunar CIMEL (AERONET)

Desde 2003, el Observatorio de Izaña forma parte de la Red AErosol RObotic NETwork (AERONET) (Holben *et al.*, 1998). El instrumento de referencia de esta red es el fotómetro solar multibanda CIMEL CE318 que realiza medidas de radiación solar directa y de radiancia de cielo, con diferentes secuencias de medida. En la versión más reciente, la CE318-T (Barreto, A., 2016), el dispositivo también es capaz de realizar medidas de la radiación lunar directa (Figura 1d) a las longitudes de onda de 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020, 1640 nm con una anchura a media altura (Full Width at Half Maximum, FWHM) de 2 nm para 340 nm, 4 nm para 380 nm, y 10 nm para el resto de los canales, excepto para el canal de 1640 nm que tiene un FWHM de 25 nm. El sistema óptico de la cabeza sensora queda completado con un conjunto de lentes colimadoras y diafragmas que hacen que el FOV del instrumento sea de aproximadamente 1.3° (Torres *et al.*, 2013).

Un canal adicional centrado en 940 nm (con un ancho de banda de 10 nm) permite determinar el vapor de agua en columna, siguiendo el procedimiento descrito en Smirnov *et al.* (2004) con una incertidumbre del 10% (Alexandrov *et al.*, 2009; Giles *et al.*, 2019). Según el estudio desarrollado por Schneider *et al.* (2010) esta incertidumbre varía dependiendo de las condiciones de humedad, con valores del 7% para condiciones húmedas y del 25% para condiciones muy secas (PWV < 2 mm). En este trabajo hemos utilizado la versión 3.0 Nivel 2.0 de AERONET. Este canal adicional permite también la determinación del vapor de agua durante periodo nocturno a través de las medidas de radiación lunar directa siguiendo la metodología publicada por Barreto *et al.* (2013).

5.6. Espectro radiómetro EKO MS-711

En 2016, dentro del programa CIMO-Testbed, el Observatorio de Izaña adquirió un espectro radiómetro EKO MS-711 (en adelante, EKO). Este espectro radiómetro fue inicialmente diseñado para medir radiación espectral global en el rango espectral comprendido entre 300 y 1100 nm, con un ancho de banda de ≈ 0.4 nm, y un FOV de 5°. Posteriormente, se ha adaptado para medir radiación espectral directa con la ayuda de un colimador y situándolo en un seguidor solar (Figura 1e). La resolución temporal de este espectro radiómetro es de un minuto, con un tiempo de integración de cada medida que oscila entre los 10 ms y los 5 s, dependiendo de las condiciones del cielo (García *et al.*, 2020).

El vapor de agua en columna se ha determinado a partir de la ley de Lambert-Beer en el rango espectral entre 930 y 960 nm, utilizando la metodología desarrollada en García *et al.*, (2021). Según este estudio, el IWV determinado a partir de los espectros de radiación directa presenta una incertidumbre de 0.37 ± 0.11 mm, mostrando una clara dependencia con los valores de IWV. Para $IWV \leq 5$ mm, la incertidumbre es de 0.31 mm, mientras que para $IWV > 5$ mm la incertidumbre aumenta a 0.47 mm.

6. INTERCOMPARACIÓN DEL IWV CON LAS DIFERENTES TÉCNICAS

La intercomparación la realizaremos en diferentes períodos de tiempo comprendidos entre mayo de 2020 y abril de 2023, separando el día de la noche para estudiar la posible influencia de la radiación solar visible e infrarroja en el IWV obtenido con las técnicas que utilizan este rango de radiación frente al obtenido con el radiómetro de microondas.

Tomaremos como valores diurnos los comprendidos desde las 06:00UTC hasta las 22:00UTC y, como valores nocturnos, los comprendidos desde las 22:00UTC hasta las 06:00UTC. Se eligió este intervalo para asegurar que en los valores nocturnos no tendremos ninguna influencia de la luz crepuscular matutina o vespertina ni siquiera en los meses de verano, en los que la duración del día es la mayor del año y donde el orto y el ocaso ocurren a horas más tempranas o más tardías, respectivamente. Con ese intervalo horario, descartamos incluso el crepúsculo astronómico, que es el más leve y que ocurre cuando el sol se encuentra a 18° por debajo del horizonte.

El agua líquida y el hielo que se acumulen sobre la ventana atmosférica (radomo o antena) del MWR, degradan la exactitud de las medidas de la temperatura de brillo atmosférica (Ware, *et al.*, 2004). Por eso, antes de cruzar los datos del MWR con cualquiera de las otras técnicas, se han descartado previamente aquellos registros afectados por lluvia y que el software del equipo los ha marcado con una etiqueta.

El cruce de los datos minutales entre el IWV del MWR y el de las demás técnicas radiométricas se ha realizado promediando las medidas de resolución 1s del MWR centradas en ± 1 minuto sobre cada una de las medidas de dichas técnicas. En el caso del cruce con las RS41, el IWV de estas se ha obtenido integrando la humedad absoluta entre los niveles del sondeo más próximos a los del MWR y, el del MWR, se ha realizado promediando el IWV entre los instantes de tiempo en los que el sondeo recorre cada uno de los 93 niveles fijos de altitud del radiómetro.

Por otro lado, dado que para el GNSS hemos utilizado datos de IWV calculados a partir de órbitas precisas de resolución temporal horaria, en el cruce entre el IWV del MWR y el GNSS se han seleccionado y promediado los registros del MWR centrados en ± 1 minuto sobre el minuto 30 de cada hora de la medida GNSS.

Con respecto a los fotómetros CIMEL solar y lunar, los resultados que se muestran más adelante en esta sección y en las siguientes ponen de manifiesto que, aunque los datos oficiales de IWV de AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>) correlacionan bastante bien con los del MWR, sin embargo, se comprueba que una calibración más precisa del canal de vapor de agua de este fotómetro y, una posterior reevaluación del IWV, mejoran la comparación con el MWR. Este problema ya fue observado previamente por Almansa *et al.* (2020), autores que realizaron una reevaluación de los datos similar a la publicada en esta nota técnica. Por ello, para distinguir ambas evaluaciones, cuando hagamos referencia a los datos oficiales les denominaremos CIMEL-AERONET y a los datos reevaluados para este trabajo los denominaremos CIMEL-IZO. A estas denominaciones, les añadiremos la palabra Lunar cuando se trate de medidas nocturnas cuya fuente de luz es la Luna.

El método aplicado en CIMEL-IZO para la obtención del IWV es muy similar al de CIMEL-AERONET, diferenciándose sólo en el cálculo de los parámetros necesarios asociados a la transmisividad del vapor de agua (Almansa *et al.*, 2020).

6.1. Comparación diurna

En esta sección, presentamos la comparación de los valores diurnos del IWV obtenidos con el MWR frente a los obtenidos con las diferentes técnicas disponibles en IZO. En la Figura 4, representamos los gráficos de dispersión (scatter-plots) del IWV obtenido con el MWR y los obtenidos con el resto de técnicas en diferentes periodos entre mayo de 2020 y abril de 2023. También se representan los histogramas con las frecuencias absolutas de ocurrencia de las diferencias de IWV entre cada técnica y el MWR. En la Tabla 1, se muestra una estadística básica de esta comparación, especificando los periodos temporales analizados en cada caso.

Lo primero que observamos es que los ajustes lineales son excelentes con coeficientes de correlación muy próximos a 0.99, o incluso superiores, lo que indica una muy fuerte correlación positiva en todos los casos.

Por otro lado, las pendientes de todas las regresiones son mayores que 1 manteniéndose por encima de las bisectrices de pendiente unitaria. Esto significa que los valores de IWV medidos por el MWR son, en promedio y mayoritariamente, superiores a los medidos por cualquiera de las otras técnicas. Por ello, los histogramas que aparecen incluidos en las figuras están sesgados hacia la izquierda indicando que las diferencias del IWV entre las diferentes técnicas y el MWR (X-MWR) tienden mayoritariamente a ser negativas. Estos histogramas se han construido separando el rango de variación de las diferencias del IWV entre cada técnica y el MWR ([X-MWR]) en intervalos de 1 mm y evaluando la frecuencia de ocurrencia de las diferencias correspondientes en cada uno de ellos.

TÉCNICA (período analizado)	N	Pendiente	Intersección	RMSE	MB	STD	R
FTIR (may2020-oct2022)	37356	1.066±0.001	-0.009±0.003	0.53 (8.99%)	-0.35 (-6.03%)	0.39 (6.67%)	0.996
GNSS (may2020-oct2022)	13246	1.045±0.002	0.326±0.012	1.03 (15.76%)	-0.59 (-9.02%)	0.85 (12.93%)	0.984
EKO (jun2021-dic2022)	18660	1.063±0.001	0.162±0.009	0.86 (12.77%)	-0.55 (-8.19%)	0.66 (9.80%)	0.988
CIMEL-IZO (may2020-dic2022)	102092	1.134±0.000	-0.054±0.002	0.88 (14.58%)	-0.67 (-11.05%)	0.57 (9.51%)	0.996
CIMEL-AERONET (may2020-jun2022)	72593	1.314±0.000	-0.125±0.002	1.58 (27.49%)	-1.28 (-22.25%)	0.93 (16.15%)	0.996
RS41 (may2020-abr2023)	1018	1.033±0.006	0.431±0.046	1.07 (16.57%)	-0.63 (-9.68%)	0.87 (13.45%)	0.981

Tabla 1: Estadística de la comparación diurna entre las medidas de vapor de agua en mm medidos con el MWR y las obtenidas a partir del FTIR, GNSS, EKO, CIMEL-IZO, CIMEL-AERONET y RS41. N es el número de medidas, RMSE es el error cuadrático medio, MB es la media de la diferencia, STD es la desviación estándar de la diferencia y R es el coeficiente de correlación de Pearson. Los porcentajes entre paréntesis de cada variable se han calculado con respecto al valor medio del IWV del MWR en el período de cruce correspondiente.

Como se desprende de la Tabla 1, el MWR mide en promedio, aproximadamente, un 6% más IWV que FTIR, entre un 8% y 11% más que GNSS, EKO, RS41 y CIMEL-IZO y un 22% más que CIMEL-AERONET.

Tanto en la Figura 4, como en los datos de la Tabla 1, se constata también que la técnica AERONET es la que mayores diferencias presenta con respecto a la de microondas. Aunque las correcciones que se han realizado en CIMEL-IZO a la evaluación previa del IWV AERONET mitigan las diferencias con el IWV del MWR, no han llegado a reducirse al nivel de las otras técnicas.

Por otra parte, las diferencias más pequeñas y más estables se dan entre MWR y FTIR, ya que los valores del RMSE, MB y STD son los más pequeños.

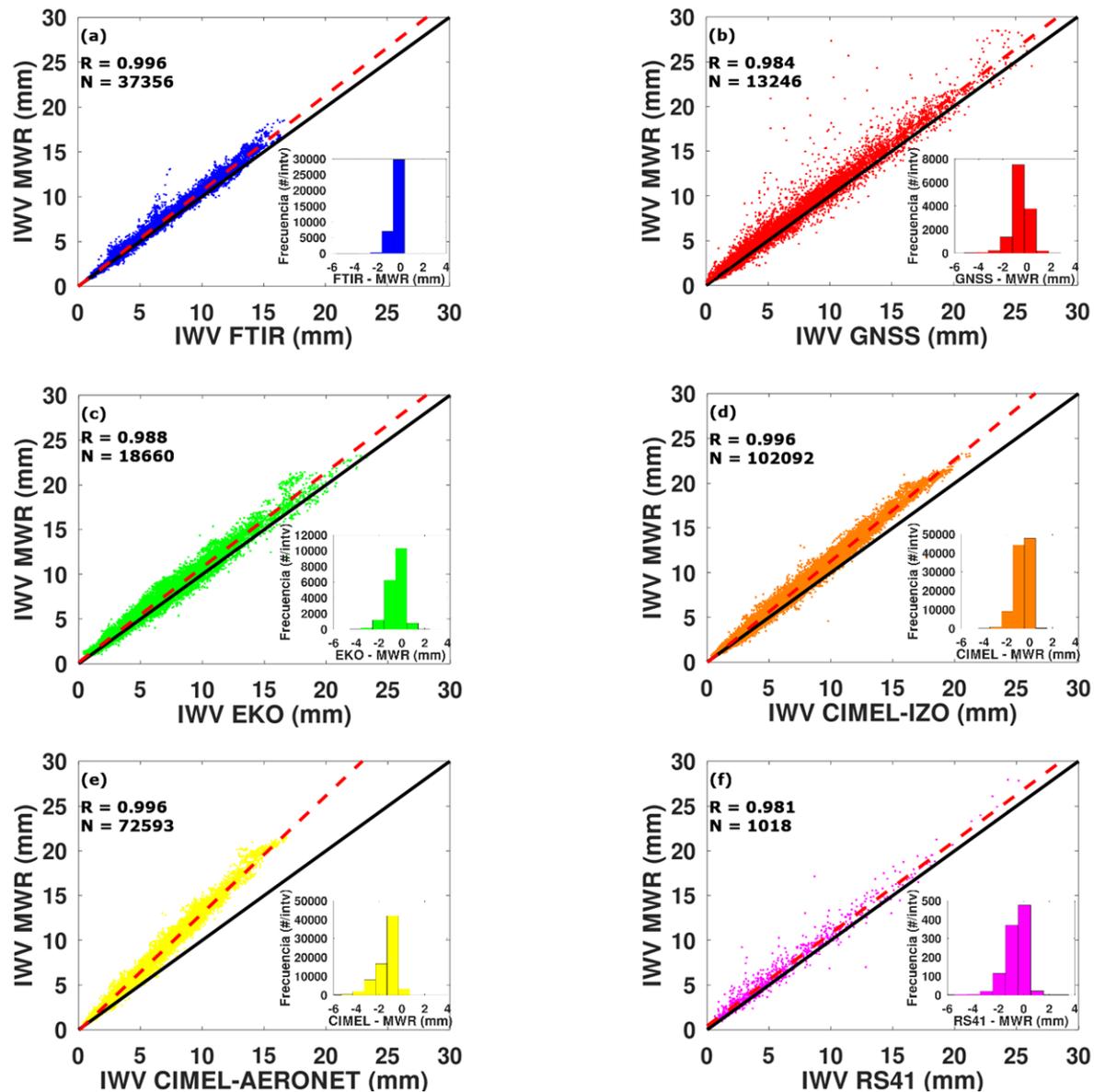


Figura 4: Diagrama de dispersión del vapor de agua diurno medido con el (a) FTIR, (b) GNSS, (c) EKO MS-711, (d) CIMEL-IZO, (e) CIMEL-AERONET y (f) RS41 frente al vapor de agua medido con el MWR en diferentes períodos entre mayo de 2020 y abril de 2023. La línea roja discontinua representa el ajuste lineal de las medidas, la línea negra continua representa la diagonal ($x=y$). R es el coeficiente de correlación de Pearson y N es el número de datos. Las figuras pequeñas con los histogramas representan la distribución de ocurrencia de las diferencias entre ambas medidas en mm ($X - MWR$). IZO 2020-2023.

6.1. a. Dependencia con la cantidad de vapor de agua

Dado que el modelo LHATPRO del MWR está especialmente diseñado para la medida de vapor de agua en atmósferas muy secas, como la que tenemos sobre IZO en la que predominan a lo largo del año valores pequeños del IWV, es interesante estudiar si las diferencias del IWV entre las diferentes técnicas y el MWR dependen o no, y en qué medida, del propio contenido de vapor de agua integrado.

En la Figura 5, representamos mediante un diagrama de cajas la variación de la estadística básica (primer cuartil, mediana y tercer cuartil) de las diferencias del IWV entre las diferentes técnicas y el MWR para cada uno de los intervalos de IWV que se especifican en el eje de abscisas. No se representan los datos anómalos ($\text{outliers} \geq 1.5$ veces la distancia intercuartílica) a fin de hacer mejor visibles los resultados de la gráfica.

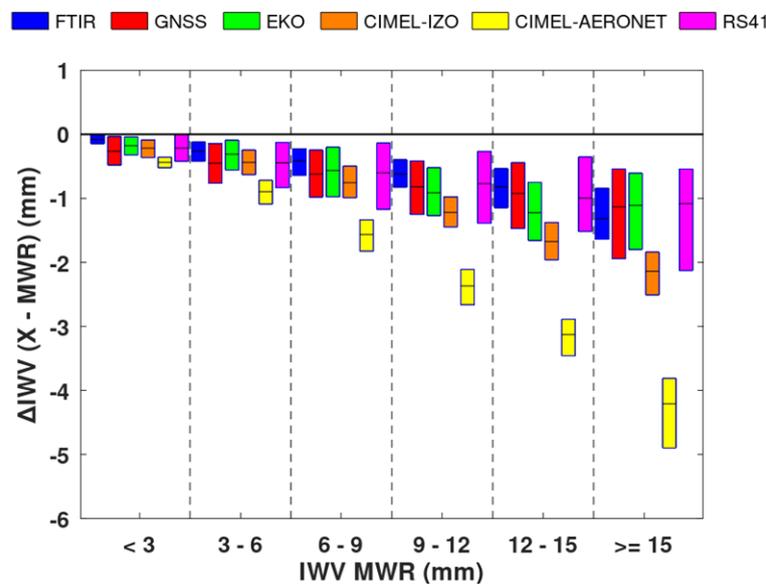


Figura 5: Diagrama de cajas de las diferencias entre el vapor de agua diurno medido por el FTIR, GNSS, EKO, CIMEL-IZO, CIMEL-AERONET y RS41 y el medido por el MWR, en diferentes períodos entre mayo de 2020 y abril de 2023 en el Observatorio de Izaña, en función de los valores de vapor de agua medidos con el MWR. La línea negra de cada una de las cajas indica la mediana y los extremos de la caja muestran el primer y el tercer cuartil. IZO 2020-2023.

Como se aprecia en esta figura, existe una dependencia ligeramente cuadrática (que razonablemente podemos considerar como lineal) entre el contenido de vapor de agua y las diferencias de dicho contenido entre las diferentes técnicas de medida y el MWR. Las mayores diferencias se corresponden con los contenidos más altos de vapor de agua para todas las técnicas. Destacan, especialmente, las mayores diferencias entre MWR y CIMEL-AERONET con respecto a las del resto de técnicas. De nuevo observamos que la corrección CIMEL-IZO disminuye esas diferencias pero siguen siendo mayores en valor absoluto que las del resto de técnicas.

En la Tabla 2, se recogen los parámetros del ajuste a una regresión lineal por mínimos cuadrados entre los valores medios y las diferencias medias de IWV en cada intervalo para cada una de las técnicas comparadas con el MWR. Las menores dependencias corresponden a la comparación del MWR con RS41 y GNSS.

AJUSTES $IWV(X-MWR)=A*IWV(MWR)+B$	FTIR	GNSS	EKO	CIMEL-IZO	CIMEL-AERONET	RS41
PENDIENTE (A)	-0.081	-0.072	-0.075	-0.134	-0.259	-0.068
INTERSECCIÓN (B)	0.122	-0.112	-0.051	0.139	0.212	-0.176
R2	0.960	0.992	0.951	0.994	0.997	0.982

Tabla 2: Parámetros de ajuste de las regresiones lineales entre las medias de las diferencias IWV (X-MWR) y las medias del contenido IWV (MWR) de cada intervalo durante el período diurno. R2 es el coeficiente de determinación. IZO 2020-2023.

6.1. b. Dependencia con el ángulo cenital solar

Las medidas de la radiación solar con técnicas fotométricas implican un seguimiento del disco solar mediante el apuntamiento de la óptica instrumental. La óptica lleva asociado un campo de visión con un determinado ángulo sólido por el que la radiación directa entra en la misma. Por ello, un apuntamiento no lo suficientemente preciso al disco solar puede conllevar errores asociados en los productos obtenidos a partir de las medidas de dicha radiación.

Por otro lado, el mayor camino óptico atmosférico que la radiación directa recorre cuando el SZA es mayor, es decir, cuando el Sol está más alejado del cenit, influye en el contenido de vapor de agua atmosférico y hace posible una dependencia de las diferencias del IWV medido entre técnicas que se basan en el seguimiento solar frente al medido por técnicas que no lo hacen o utilizan únicamente la dirección vertical (MWR).

Por ello, es interesante analizar si existe o no dependencia entre tales diferencias en el IWV y el ángulo cenital solar, y en su caso, cuantificarlas.

Para el cálculo del ángulo cenital solar, se ha utilizado el algoritmo Matlab/Octave denominado “sunpos.m” (Blanco, M.J., *et al* 2020; Bonanos A., 2023). Dicho algoritmo se aplica al campo de fecha-hora de cada uno de los registros de cruce entre MWR y el resto de técnicas que miden durante el día. En el caso de las RS41, el campo fecha-hora del cruce con MWR es el del lanzamiento de las sondas y en el caso del GNSS son los minutos 30 de cada hora del cruce.

La Figura 6, muestra esa relación de dependencia con el SZA para la comparación del IWV del MWR con el resto de las técnicas y, en la Tabla 3, se muestran los resultados numéricos de los ajustes entre los valores medios de los SZA y las diferencias medias del IWV (X-MWR) en cada intervalo considerado.

Hay que notar que, los lanzamientos de las sondas RS41 durante el período diurno establecido se han producido entre las 6UTC y las 17UTC. Esto hace que no haya datos de cruce con MWR para SZA por debajo de 20° ni por encima de 60°.

Se detecta una ligera dependencia lineal con el SZA de las diferencias del IWV entre las diferentes técnicas y el MWR dada por las pendientes de las rectas de regresión de la Tabla 3. Estas pendientes son un orden o dos de magnitud inferiores a las que se dan con el contenido de vapor de agua. Las diferencias del MWR con RS41 y con CIMEL-AERONET son las peor correlacionadas con el SZA (ajustes pobres, especialmente con CIMEL-AERONET) y las mejor correlacionadas son con FTIR y GNSS. En todas ellas, se verifica que las diferencias entre las técnicas disminuyen ligeramente en valor absoluto a medida que crece el ángulo cenital solar. Este hecho podría ser debido a que la pérdida de calidad en las medidas fotométricas con el aumento del SZA se ve “compensada”, al menos en parte, con el aumento de la sensibilidad instrumental en un mayor recorrido óptico (Vaquero-Martínez, J. *et al.*, 2023). Para el caso de las sondas RS41, el efecto podría estar relacionado con alguna influencia pequeña no deseada de la radiación solar de onda corta sobre los sensores de las mismas (Xu, G. *et al.*, 2015) la cual sería mayor para ángulos cenitales menores.

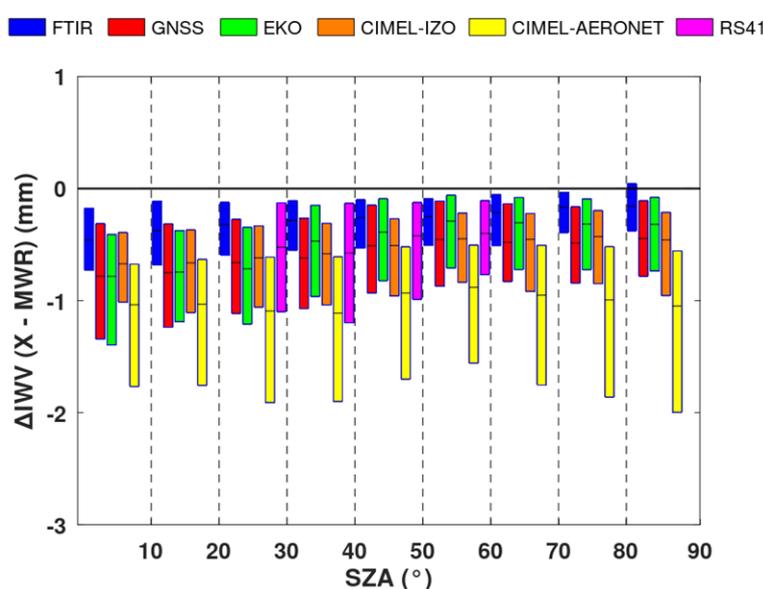


Figura 6: Diagrama de cajas de las diferencias entre el vapor de agua medido por el FTIR, GNSS, EKO, CIMEL-IZO, CIMEL-AERONET y RS41 y el medido por el MWR, en diferentes períodos entre mayo de 2020 y abril de 2023 en el Observatorio de Izaña, en función del ángulo cenital solar (SZA). La línea negra de cada una de las cajas indica la mediana y los extremos de las cajas muestran el primer y el tercer cuartil. IZO 2020-2023.

AJUSTES $IWV(X-IWV)=A*SZA+B$	FTIR	GNSS	EKO	CIMEL-IZO	CIMEL-AERONET	RS41
PENDIENTE (A)	0.004	0.005	0.008	0.003	-0.0004	0.006
INTERSECCIÓN (B)	-0.506	-0.909	-0.952	-0.801	-1.273	-0.894
R2	0.942	0.927	0.832	0.823	0.015	0.673

Tabla 3: Parámetros de ajuste de las regresiones lineales entre las medias de las diferencias IWV (X-MWR) y las medias del ángulo cenital solar (SZA) de cada intervalo. R2 es el coeficiente de determinación. IZO 2020-2023.

6.2. Comparación nocturna

En esta sección, presentamos la comparación de los valores nocturnos del IWV obtenidos con el MWR frente a los obtenidos con las radiosondas RS41, el receptor GNSS y los fotómetros CIMEL-IZO Lunar y CIMEL-AERONET Lunar. El intervalo horario considerado para los cruces entre datos nocturnos va desde las 22:00UTC hasta las 06:00UTC. En la Figura 7, representamos los gráficos de dispersión (scatter-plots) del IWV obtenido con el MWR y las técnicas anteriormente comentadas. También se representan los histogramas con las frecuencias absolutas de ocurrencia de las diferencias de IWV entre cada técnica y el MWR. En la Tabla 4, se muestra una estadística básica de esta comparación en los diferentes períodos analizados, comprendidos entre mayo de 2020 y abril de 2023.

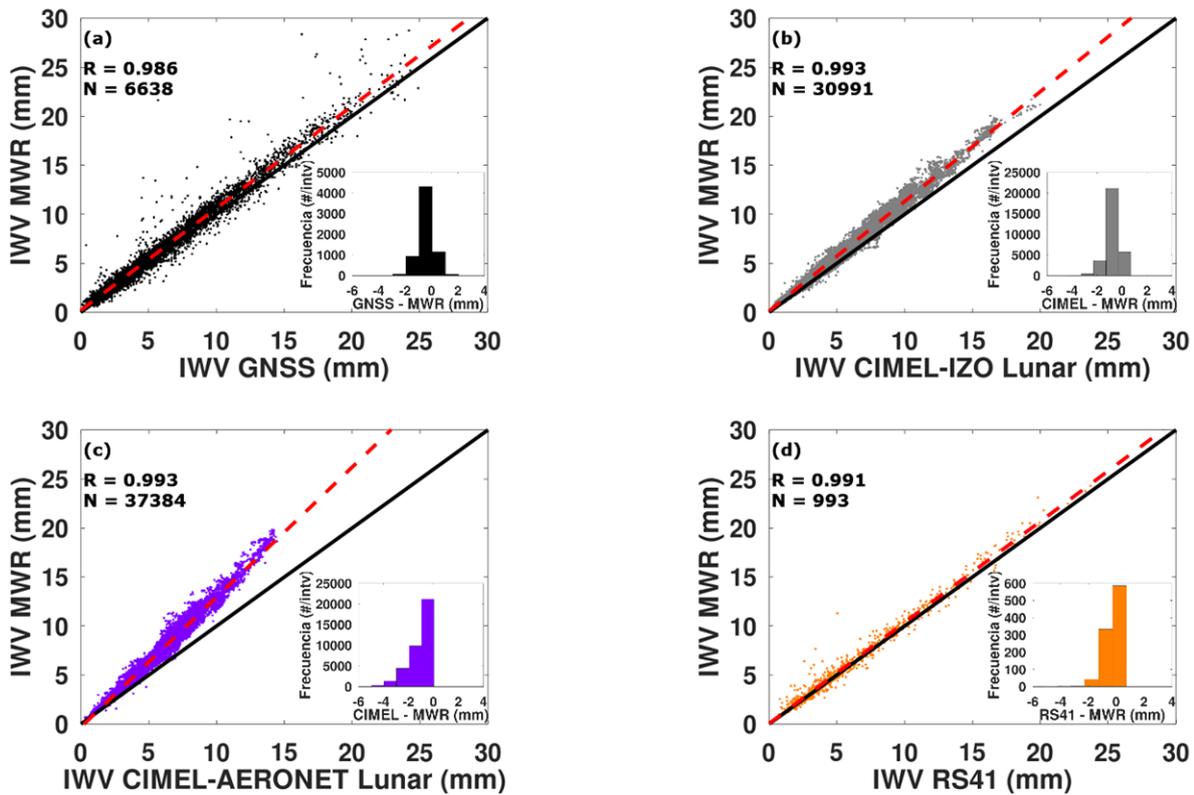


Figura 7: Diagrama de dispersión del vapor de agua nocturno medido con el (a) GNSS, (b) CIMEL-IZO Lunar, (c) CIMEL-AERONET Lunar, (d) RS41, frente al vapor de agua medido con el MWR en diferentes períodos nocturnos entre mayo de 2020 y abril de 2023, según se especifica en la Tabla 2. La línea roja discontinua representa el ajuste lineal de las medidas, la línea negra continua representa la diagonal ($x=y$). R es el coeficiente de correlación de Pearson y N es el número de datos. Las figuras pequeñas con los histogramas representan la distribución de ocurrencia de las diferencias entre ambas medidas en mm ($X - MWR$). IZO 2020-2023.

TÉCNICA (período analizado)	N	Pendiente	Intersección	RMSE	MB	STD	R
GNSS (may2020-oct2022)	6638	1.042±0.002	0.200±0.015	0.89 (14.45%)	-0.44 (-7.11%)	0.78 (12.58%)	0.986
CIMEL-IZO Lunar (may2020-dic2022)	30991	1.119±0.001	0.134±0.004	0.89 (16.26%)	-0.70 (-12.83%)	0.55 (9.99%)	0.993

CIMEL-AERONET Lunar (may2020-dic2022)	37384	1.326±0.001	-0.314±0.004	1.42 (26.38%)	-1.09 (-20.22%)	0.91 (16.95%)	0.993
RS41 (may2020-abr2023)	993	1.031±0.004	0.049±0.031	0.63 (10.65%)	-0.22 (-3.78%)	0.59 (9.96%)	0.991

Tabla 4: Estadística de la comparación nocturna entre las medidas de vapor de agua en mm medidos con el MWR y las obtenidas a partir del GNSS, CIMEL-IZO Lunar, CIMEL-AERONET Lunar y RS41. (N es el número de medidas, RMSE es el error cuadrático medio, MB es la media de la diferencia, STD es la desviación estándar de la diferencia y R es el coeficiente de correlación de Pearson). Los porcentajes entre paréntesis de cada variable se han calculado con respecto al valor medio del IWV del MWR en el período de cruce correspondiente. IZO 2020-2023.

Como se aprecia en la Tabla 4, el MWR mide de noche en torno a un 4% más IWV que las RS41, un 7% más que el GNSS, un 13% más que CIMEL-IZO Lunar y un 20% más que CIMEL-AERONET Lunar.

Al igual que ocurría en la comparación diurna los ajustes son excelentes presentando coeficientes de correlación de Pearson del orden de 0.99 o incluso superiores. En todos ellos, la pendiente supera el valor de 1 lo que indica que, en promedio, también para el período nocturno, el MWR mide más IWV que cualquiera de las otras técnicas. Esto se pone de manifiesto igualmente en los histogramas dentro de las figuras en los cuales se percibe un sesgo hacia los valores negativos de las diferencias (X-MWR) entre cada técnica y el MWR.

Por otro lado, comprobamos que la corrección efectuada al CIMEL Lunar en IZO mejora el ajuste y disminuye las diferencias con el MWR frente a la evaluación oficial de AERONET vigente actualmente. No obstante, las mayores diferencias con el MWR se dan, al igual que en la comparación diurna, entre los fotómetros CIMEL (lunares, en este caso).

A diferencia de la comparación diurna, aquí la técnica de las radiosondas RS41 es la que, en promedio, menos diferencias con el MWR presenta, siendo también la que tiene menor error (RMSE) y la más estable (menor STD).

Finalmente, indicar que las dos técnicas que miden tanto de día como de noche (GNSS y RS41) presentan menores diferencias medias en valor absoluto y mejor correlación con el MWR durante la noche que durante el día, siendo también más estables.

6.2. a. Dependencia con la cantidad de vapor de agua

La dependencia de las diferencias IWV con el contenido de vapor de agua durante el período nocturno es la que se muestra en la Figura 8. La Tabla 5, recoge los parámetros de los ajustes lineales para cada técnica entre las medias del IWV MWR y las medias de las diferencias del IWV con el resto de técnicas en cada intervalo considerado.

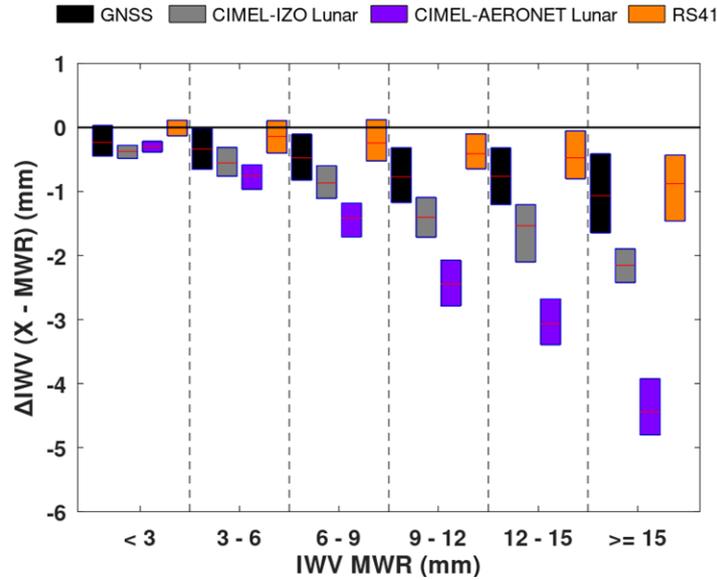


Figura 8: Diagrama de cajas de las diferencias entre el vapor de agua medido por el GNSS, CIMEL-IZO Lunar, CIMEL-AERONET Lunar y RS41 y el medido por el MWR, en diferentes períodos nocturnos entre mayo de 2020 y abril de 2023 en el Observatorio de Izaña, en función de los valores de vapor de agua medidos con el MWR. La línea roja de cada una de las cajas indica la mediana y los extremos de las cajas muestran el primer y el tercer cuartil. IZO 2020-2023.

AJUSTES $IWV(X-IWV)=A*IWV(MWR)+B$	GNSS	CIMEL-IZO Lunar	CIMEL-AERONET Lunar	RS41
PENDIENTE (A)	-0.065	-0.124	-0.271	-0.047
INTERSECCIÓN (B)	-0.033	-0.031	0.374	0.064
R2	0.972	0.988	0.995	0.933

Tabla 5: Parámetros de ajuste de las regresiones lineales entre las medias de las diferencias IWV (X-MWR) y las medias del contenido IWV (MWR) de cada intervalo durante el período nocturno. R2 es el coeficiente de determinación. IZO 2020-2023.

De noche, vuelve a ser la técnica RS41 la que menores diferencias y menor dependencia con el IWV presenta respecto del MWR.

6.2. b. Dependencia con el ángulo cenital lunar

Cuando las técnicas fotométricas utilizan como fuente de luz la Luna, es posible también algún tipo de dependencia entre el IWV obtenido con estas técnicas y el obtenido con el MWR respecto del ángulo cenital lunar (LZA). Es lo que se muestra en la Figura 9.

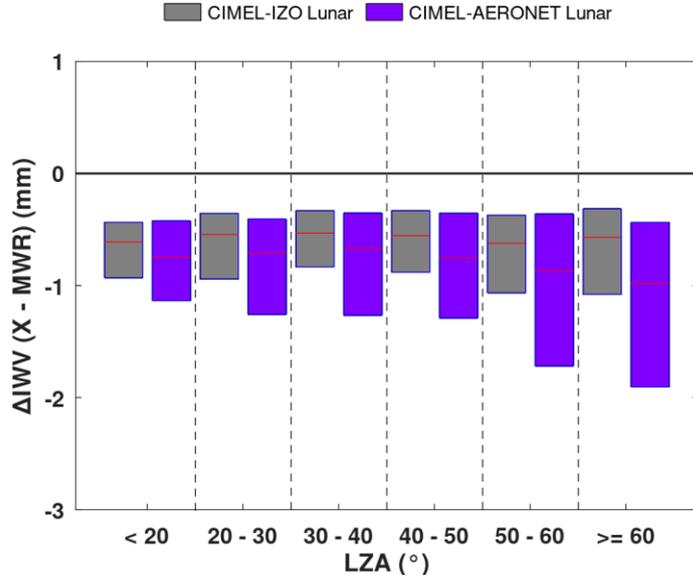


Figura 9: Diagrama de cajas de las diferencias entre el vapor de agua medido por el CIMEL-IZO Lunar y CIMEL-AERONET Lunar y el medido por el MWR, en diferentes períodos nocturnos entre mayo de 2020 y abril de 2023 en el Observatorio de Izaña, en función del ángulo cenital lunar. La línea roja de cada una de las cajas indica la mediana y los extremos de las cajas muestran el primer y el tercer cuartil. IZO 2020-2023.

Análogamente, la Tabla 6 recoge los parámetros de los ajustes lineales por mínimos cuadrados entre el LZA y las diferencias IWV.

AJUSTES $IWV(X-IWV)=A*LZA+B$	CIMEL-IZO Lunar	CIMEL-AERONET Lunar
PENDIENTE (A)	-0.002	-0.008
INTERSECCIÓN (B)	-0.609	-0.690
R2	0.398	0.841

Tabla 6: Parámetros de ajuste de las regresiones lineales entre las medias de las diferencias IWV (X-MWR) y las medias del ángulo cenital lunar (LZA) de cada intervalo considerado. Los valores del LZA son calculados por AERONET. R2 es el coeficiente de determinación. IZO 2020-2023.

La dependencia de las diferencias IWV con el ángulo cenital lunar es muy débil: 2 órdenes de magnitud inferior que la dependencia con el contenido de vapor de agua del período nocturno. Señalar también que, mientras existe una disminución generalizada de las diferencias en valor absoluto entre MWR y las diferentes técnicas conforme aumenta el valor del SZA (excepto con CIMEL-AERONET, en el que no se percibe), en el caso del LZA, CIMEL-AERONET presenta una aumento progresivo en valor absoluto de sus diferencias con MWR a partir de un LZA de 40°. Este efecto, se ha mitigado con la evaluación realizada en CIMEL-IZO donde el aumento de las diferencias con el LZA se reduce a partir de los 40° en casi un 62% con respecto a CIMEL-AERONET.

6.2. c. Dependencia con el ángulo de fase lunar

El ángulo de fase lunar es el que forma la luz incidente del Sol sobre la Luna con la luz reflejada desde la Luna sobre el observador en la Tierra.

Cuando la fase lunar se da en porcentaje de superficie de Luna iluminada (P), el ángulo de fase lunar (LPA) en grados se puede calcular, aproximadamente, en base a la siguiente fórmula:

$$\text{LPA} = \cos^{-1} \left(2 * \frac{P}{100} - 1 \right) \quad (6.2.1)$$

Según esta expresión, cabría esperar cierta dependencia significativa entre las diferentes fases (ángulos) lunares y las diferencias de IWV entre CIMEL-IZO Lunar y MWR ya que la radiación procedente de la Luna recibida en el fotómetro CIMEL y, por tanto, la calidad de la medida en la determinación, tanto del AOD como del IWV nocturnos, va a depender de la superficie iluminada de esta.

Los resultados se muestran en la Figura 10, en la que se representa la variación, por intervalos de ángulos LPA, de la estadística básica de las diferencias de IWV entre CIMEL-IZO Lunar y MWR. En ella, se aprecia cómo es la dependencia de las diferencias de IWV con el LPA. Esta dependencia, se manifiesta en menores diferencias en el rango de LPA comprendido entre -30° y 30° y, aproximadamente, un 25% mayores fuera de este rango. Esto probablemente sea debido a que los ángulos de fase lunar implicados en el rango $[-30^\circ, 30^\circ]$ suponen una superficie lunar iluminada superior al 93%, mientras que para los ángulos de fase lunar fuera de este rango la superficie iluminada se reduce por debajo del 80% para ángulos mayores de 50° (o menores de -50°) y por tanto la calidad del dato de IWV del fotómetro lunar es peor.

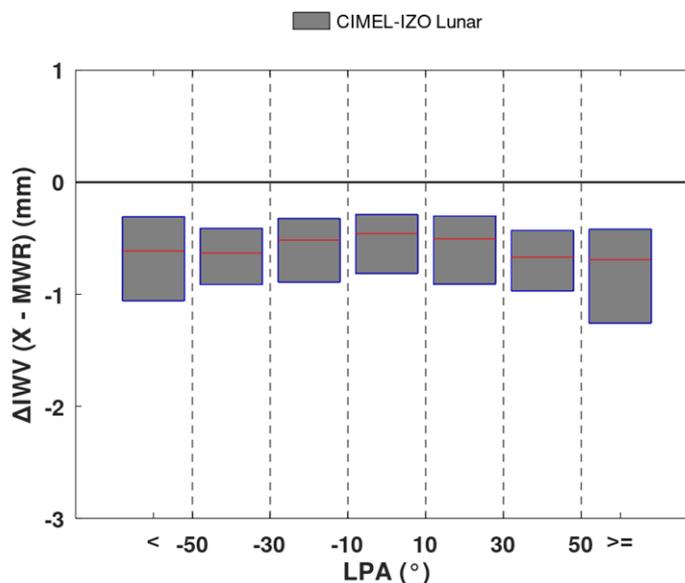


Figura 10: Diagrama de cajas de las diferencias entre el vapor de agua medido por el CIMEL-IZO Lunar y el medido por el MWR, en diferentes períodos nocturnos entre mayo de 2020 y abril de 2023 en el Observatorio de Izaña, en función del ángulo de fase lunar (LPA). La línea roja de cada una de las cajas indica la mediana y los extremos de las cajas muestran el primer y el tercer cuartil.

La Tabla 7, recoge los parámetros de un tentativo ajuste lineal entre los promedios de los ángulos de fase lunar y los de las diferencias de IWV para cada intervalo de LPA especificado en el eje de abscisas. Como vemos en dicha Tabla, el coeficiente de determinación (R2) es muy bajo lo que implica que la regresión lineal no es un buen modelo para representar esta dependencia. Otro tipo de dependencias ajustan mejor a los resultados (p. ej.: una dependencia cuadrática correlaciona con un R2=0.88) pero, para argumentar y escoger la más adecuada, habría que hacer un análisis más específico que no vamos a acometer en este trabajo.

AJUSTES IWV(X-IWV)=A*LPA+B	CIMEL-IZO Lunar
PENDIENTE (A)	-0.001
ORDENADA (B)	-0.699
R2	0.199

Tabla 7: Parámetros de un ajuste lineal entre las medias de las diferencias IWV (X-MWR) y las medias del ángulo de fase lunar (LPA) de cada intervalo considerado. Los valores del LPA son calculados por AERONET. R2 es el coeficiente de determinación. IZO 2020-2023.

7. ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE Y LA TRAZABILIDAD EN EL IWV

En esta sección, estudiaremos en qué grado el vapor de agua integrado en columna del MWR suministrado por su propio software es trazable con respecto a cada una de las técnicas FTIR, EKO, CIMEL-IZO, CIMEL-IZO Lunar, CIMEL-AERONET, CIMEL-AERONET Lunar, GNSS y RS41 con las que se ha comparado.

La CIMO-OMM, define la trazabilidad entre medidas como “aquella propiedad que nos permite relacionar con una referencia dada, ya sea un estándar nacional o internacional, el resultado obtenido de una medida a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones con incertidumbres establecidas” (WMO, 2014).

Por lo tanto, el conocimiento de las incertidumbres y sus magnitudes y variables asociadas (límite de detección instrumental, sesgo y ruido) de las diferentes técnicas, nos permitirá analizar y evaluar la trazabilidad entre el MWR y el resto.

En nuestro caso, la variable que nos ocupa es el IWV. Si tomamos como referencia el IWV del radiómetro MWR, la trazabilidad se estudiará comparando las diferencias entre el IWV de las diferentes técnicas y el del MWR junto con las incertidumbres asociadas a cada uno de ellos. A falta de encontrar en la literatura un valor de referencia máximo de incertidumbre que garantice la calidad de cualquier medida de IWV, nosotros tomaremos como incertidumbre el valor de 3 veces la precisión o desviación estándar asociada a dichas medidas más un posible sesgo instrumental debido a los errores sistemáticos que pudieran ser detectados en cada técnica (Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Detection_limit#Instrument_detection_limit).

Como el error o incertidumbre asociado a la diferencia entre dos variables es igual a la suma de las incertidumbres o errores de cada una de ellas (Zúñiga, 2023), consideraremos que dos medidas de IWV obtenidas por técnicas diferentes son trazables cuando el valor absoluto de su diferencia sea igual o inferior a la suma de las incertidumbres de las variables que se restan. Es decir:

$$abs(IWV(X) - IWV(MWR)) \leq \Delta(IWV(X)) + \Delta(IWV(MWR)) \quad (7.1)$$

Donde X representa a cualquiera de las técnicas que se comparan con la del MWR y Δ es la incertidumbre o error asociado al valor IWV correspondiente.

De esta manera, si hay trazabilidad, una variable \pm su error estará contenida en la otra \pm su error correspondiente.

Para conocer la incertidumbre del IWV asociada a cada una de las técnicas radiométricas seguiremos la misma metodología que se describe en el siguiente sub-apartado y que se aplica al MWR.

7.1. Límite de detección instrumental e incertidumbre del IWV

En general, el límite de detección instrumental es el umbral que marca la mínima cantidad de una cierta variable o señal que puede ser medida o detectada con fiabilidad por el instrumento. Esto implica que dicha medida ha de poder distinguirse del ruido de la propia señal en torno a un valor nulo de esta, o en torno a un posible error sistemático o “sesgo” de la misma.

Para estimar el límite de detección del IWV obtenido a partir del MWR, procederemos de la siguiente manera:

1. Construimos la serie de promedios minutales del IWV a partir de los ficheros con resolución de 1s generados por la red neuronal del MWR desde mayo de 2020 hasta abril de 2023. Obtenemos también la desviación estándar, la mediana y el número de datos asociados al cálculo de dichos promedios minutales.
2. Filtramos la serie eliminando los registros afectados por la presencia de lluvia y también aquellos cuyo número de valores usados en el cálculo de los promedios minutales es inferior a 59.
3. A partir de la serie de IWV resultante, obtenemos las medias de los valores minutales de IWV contenidos en intervalos de 1 mm de tamaño, así como las medias de sus respectivas desviaciones estándares.
4. Representamos las medias de las desviaciones estándares frente a las medias de los promedios minutales contenidos en cada intervalo y añadimos un histograma con el número de valores contenidos en cada uno de ellos.
5. Ajustamos la gráfica de medias resultante a una recta por el procedimiento de mínimos cuadrados, descartando previamente aquellos valores de mayor contenido de vapor de agua, que son los que se alejan de la recta de regresión y que corresponden a intervalos que contienen pocos valores (<950).

La intersección de la recta de ajuste con el eje de ordenadas nos dará el valor estimado de la desviación estándar asociada a la medida del MWR para un IWV=0. Por tanto, representa el “ruido” instrumental del MWR en ausencia de vapor de agua. En la Figura 11, podemos ver gráficamente estos resultados.

Este ruido instrumental aumenta en 0.0066 mm por cada mm de aumento del contenido de IWV y queda caracterizado por la recta de ajuste de regresión lineal de la Figura:

$$y = 0.0066 * IWV + 0.0165 \quad (7.1.1)$$

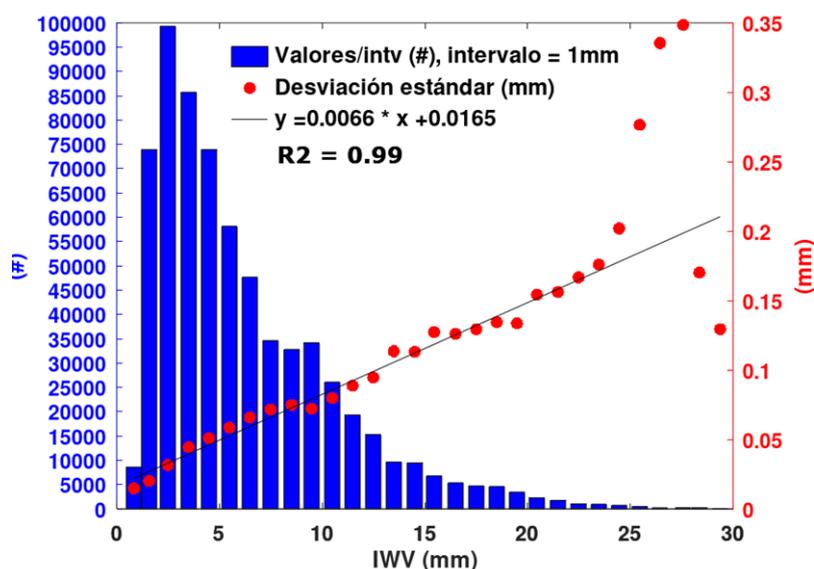


Figura 11: Ruido instrumental del IWV obtenido con el MWR. El coeficiente R2 es el coeficiente de determinación. IZO 2020-2023.

Sin embargo, el instrumento puede tener también un determinado umbral o sesgo en la obtención de esta variable y no ser capaz de medir con fiabilidad el IWV por debajo de dicho umbral, el cual, no tiene por qué ser 0. Este sesgo habría que tenerlo en cuenta a la hora de estimar el error instrumental y el límite de detección del equipo.

Para ello, lo que haremos será un *ensemble* (agrupamiento) cruzando el IWV minutal del MWR con el obtenido a partir del resto de las técnicas. Ajustamos por mínimos cuadrados a una recta de regresión y el corte de la recta con el eje de ordenadas nos dará el sesgo estimado que buscamos, ya que correspondería a la medida del IWV del MWR cuando el del resto de las técnicas es nulo.

Ante la imposibilidad de obtener un período de cruce común que asegure el mismo número de valores de comparación de todas las técnicas con el MWR, se ha procedido a cruzar el IWV del MWR con cada una de las técnicas por separado y, luego, se han unido todos los valores de cruce de las diferentes técnicas en una sola variable. De este conjunto de datos, han quedado descartados 46 registros correspondientes a cruces de valores no disponibles (NaN) del IWV en algunas de las técnicas.

Hay que señalar que, en el ajuste del *ensemble* por este procedimiento, se ha dado más peso a las técnicas con las que el MWR tiene más valores de comparación frente a aquellas otras que tienen menos (p.ej. las RS41). Sin embargo, también es posible realizar el ajuste de manera que todas las comparaciones con el MWR tengan el mismo peso. Esto podría hacerse ajustando los valores medios del IWV de cada técnica en el *ensemble* con los valores medios correspondientes al IWV del MWR. Este procedimiento se justificaría basándonos en que, en los ajustes por mínimos cuadrados, las rectas de regresión siempre pasan por el punto medio de cada ajuste. En total, se ajustarían 8 valores (uno por cada técnica que se compara con el MWR, contando por separado las del día y las de la noche). A este *ensemble* alternativo le llamaremos “*ensemble* simplificado”.

La Figura 12, muestra los diagramas de dispersión (scatterplots) correspondientes a los dos tipos de *ensembles* propuestos donde se incluyen tanto los cruces diurnos como nocturnos y los ajustes obtenidos.

Como puede verse, los ajustes de ambos tipos de *ensembles* difieren bastante. Sin embargo, el ajuste del *ensemble* de la Figura 12.a tiene una más alta correlación que el de la Figura 12.b con un coeficiente de determinación de 0.97 frente al 0.84 de esta última. Por otro lado, los errores en la pendiente y la ordenada del *ensemble* simplificado son tres (dos) órdenes de magnitud mayores que los del *ensemble* normal, respectivamente.

Por tanto, el uso de pocos valores y la magnitud de los errores asociados en el ajuste del *ensemble* simplificado, se traducen en una considerable imprecisión en la determinación del sesgo instrumental si usamos este tipo de *ensemble*. Por otra parte, teniendo en cuenta que todas las técnicas utilizadas obtienen valores en el mismo rango de magnitud del IWV, es razonable considerar que las que más datos aporten a la comparación sean más influyentes que el resto, aunque ello signifique sacrificar la independencia de la técnica en el procedimiento. Nos quedamos pues con el *ensemble* normal, que es más preciso, y descartamos el simplificado.

El sesgo o error sistemático en la medida del IWV del MWR obtenido a partir del *ensemble* es de 0.1296 mm.

Este sesgo, representa la exactitud del producto IWV obtenido con el MWR y es el valor nominal que mediría el MWR en ausencia de vapor de agua. La precisión, para un valor nulo de IWV, vendría dada por 3 veces el ruido en el sesgo ($\cong 0.0521\text{mm}$). Definimos el límite de detección (L_{det}) como la suma de ambas contribuciones, es decir:

$$L_{det} = \text{sesgo} + 3 * \text{ruido}(\text{sesgo}) \quad (7.1.2)$$

$$L_{det} = 0.1296 + 3 * (0.0066 * 0.1296 + 0.0165) \cong 0.1817\text{mm} \quad (7.1.3)$$

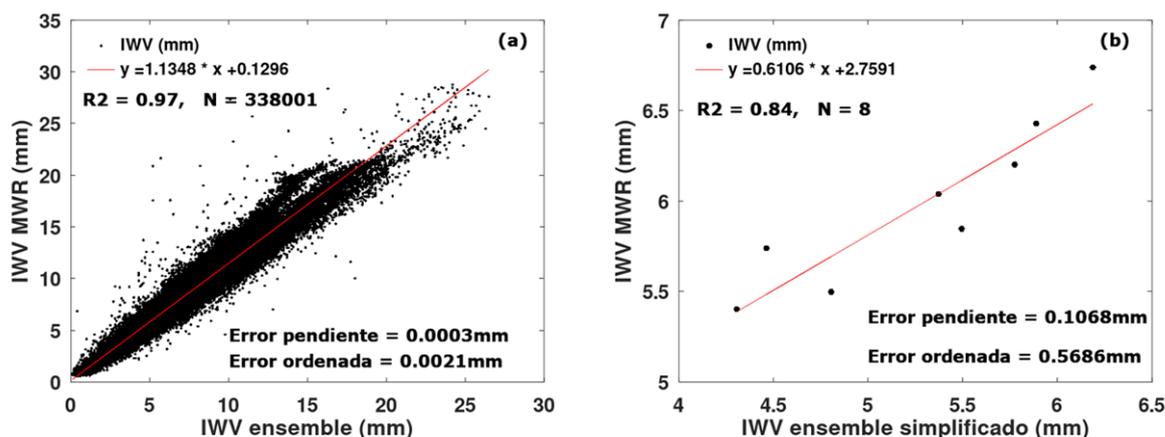


Figura 12: (a) Sesgo instrumental del IWV obtenido con el *ensemble* entre MWR y el resto de técnicas diurnas y nocturnas. El coeficiente R2 es el coeficiente de determinación y N es el número de datos. (b) Sesgo instrumental considerando un *ensemble* simplificado que ajusta sólo los valores medios de los IWV de las comparaciones entre MWR y el resto de técnicas. IZO 2020-2023.

Para determinar el límite de detección instrumental del IWV en el resto de las técnicas radiométricas (FTIR, EKO, CIMEL-IZO, CIMEL-IZO Lunar, CIMEL-AERONET y CIMEL-AERONET Lunar), se ha trabajado cruzando medias diez-minutales de los valores IWV de las diferentes series centradas sobre la fecha-hora de cada registro de la serie objeto que se compara con las demás y seguiremos el mismo procedimiento descrito aquí para el MWR, comparando cada una de ellas con todas aquellas con las que proceda según el tipo de medidas (diurnas y/o nocturnas). En la Tabla 8, se presentan todos estos resultados.

Técnica	Sesgo (IWV=0) (mm)	Incertidumbre $I = \text{sesgo} + 3 * f(\text{IWV})$ (mm)	L_{det} I (IWV=sesgo) (mm)	I mínima	I máxima
MWR	0.1296	$f(\text{IWV}) = 0.0066 * \text{IWV} + 0.0165$	0.1817	0.1989	0.7731
FTIR	0.2187	$f(\text{IWV}) = 0.0110 * \text{IWV} + 0.0204$	0.2871	0.3129	1.2699
EKO	0.1147	$f(\text{IWV}) = 0.0207 * \text{IWV} + 0.0196$	0.1806	0.2356	2.0365
CIMEL-IZO	0.3029	$f(\text{IWV}) = 0.0164 * \text{IWV} + 0.0283$	0.4027	0.4370	1.8638

CIMEL-AERONET	0.1732	$f(IWV) = 0.0165 * IWV + 0.0214$	0.2524	0.2869	1.7224
CIMEL-IZO Lunar	0.0743	$f(IWV) = 0.0089 * IWV + 0.0175$	0.1288	0.1535	0.9278
CIMEL-AERONET Lunar	0.3764	$f(IWV) = 0.0088 * IWV + 0.0139$	0.4280	0.4445	1.2101

Tabla 8: Sesgos, incertidumbres y límites de detección asociados a las medidas de IWV para las diferentes técnicas radiométricas. I mínima e I máxima son los valores mínimos y máximos de la incertidumbre para cada técnica calculados sobre un rango de variación del IWV desde 1 mm a 30 mm. IZO 2020-2023.

Los datos recogidos en la Tabla 8, nos muestran que MWR, EKO y CIMEL-IZO Lunar son las técnicas que presentan un menor error sistemático o sesgo y un menor límite de detección instrumental. Esto implica que son las que miden con mayor exactitud el IWV. Sin embargo, las técnicas de mayor precisión son MWR y CIMEL-IZO Lunar ya que según se muestra en las dos últimas columnas de la Tabla 8, son las que tienen menores incertidumbres mínimas y máximas.

En el caso del GNSS y de las sondas RS41, no hemos empleado la metodología aquí propuesta, ya que, la resolución temporal de ambas técnicas es pequeña (1 hora para la serie del GNSS y 40 ó 45 minutos para el caso de las RS41 que sería el tiempo estimado de duración del sondeo entre la altitud de IZO y los 12 km). Este asunto se aborda en el apartado siguiente.

7.2 Trazabilidad del IWV

Para obtener la trazabilidad entre el IWV del MWR y el del resto de técnicas, incluidas el GNSS y las RS41, lo que hacemos es establecer un límite de calidad en la medida del IWV que nos servirá de referencia y que vendrá dado, como es lógico, por aquellas técnicas más exactas y precisas que lo miden y que son, como vimos en el apartado anterior, el MWR y el CIMEL-IZO Lunar.

Basándonos en la ecuación 7.1 y, siendo conservativos, escogeremos la suma de las máximas incertidumbres de ambas técnicas para determinar este límite o índice de calidad. Por tanto, nuestro índice de calidad (I_c) de la medida IWV aplicable a todas las técnicas, será:

$$I_c = 0.7731mm + 0.9278mm \cong 1.7mm \quad (7.2.1)$$

En la Figura 13, se muestra un gráfico con las trazabilidades calculadas como porcentajes del número de diferencias de IWV entre cada técnica y el MWR que satisfacen la ecuación 7.1 y, por lo tanto, son trazables, respecto del número total de valores comprendidos en cada intervalo de IWV considerado.

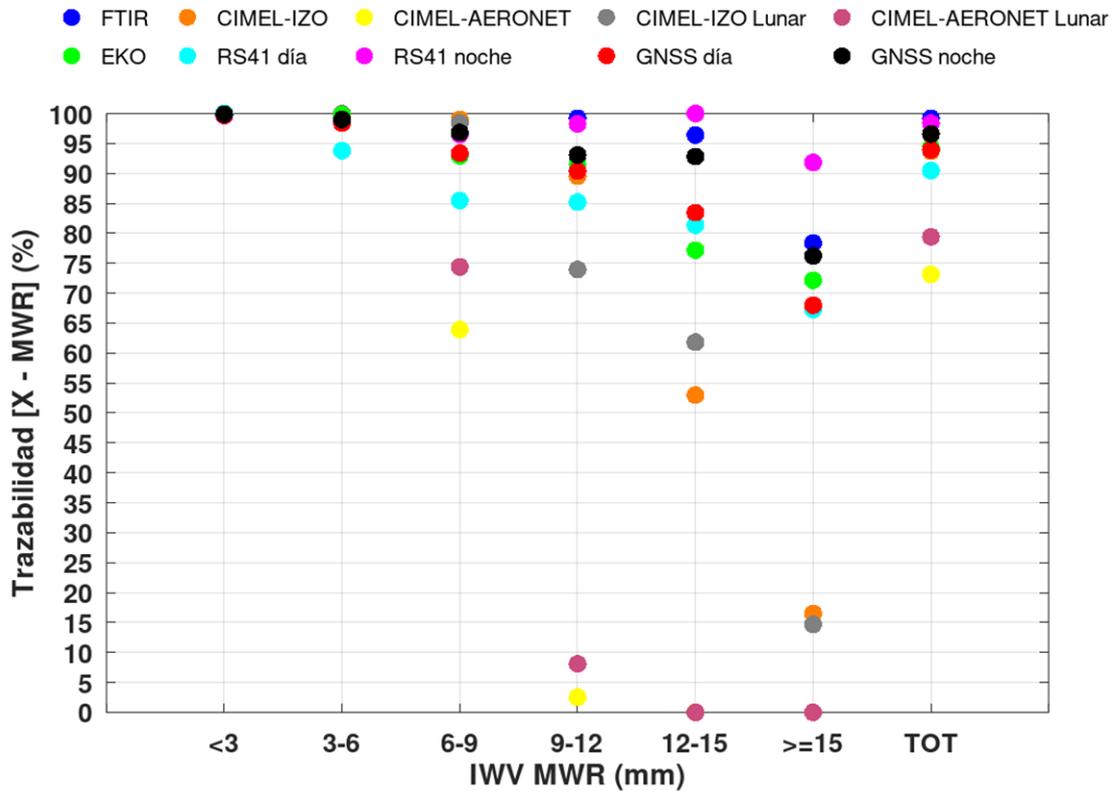


Figura 13: Porcentajes de trazabilidad de las diferencias del IWV entre las distintas técnicas y el del MWR. TOT es la trazabilidad total del MWR con cada técnica. IZO 2020-2023.

En la Figura 13, TOT indica la trazabilidad total del MWR con cada técnica en todo el rango de variación del IWV de los períodos diurnos o nocturnos correspondientes. Todas las técnicas, excepto CIMEL-AERONET y CIMEL-AERONET Lunar, presentan una alta trazabilidad total por encima del 90%. Durante el día, la más alta corresponde a FTIR con un 99% seguida de EKO, GNSS y CIMEL-IZO con un 94%. Durante la noche, la más alta corresponde a RS41 con un 98% seguida de GNSS con un 97% y CIMEL-IZO Lunar con un 94%.

Por otro lado, se constata que, las mayores trazabilidades para todas las técnicas, ocurren cuando la atmósfera es seca ($IWV < 6$ mm) o muy seca ($IWV < 3$ mm) superándose el 93% en todas las técnicas.

8. CONCLUSIONES

El vapor de agua presenta una gran variabilidad espacio-temporal que hace complicado su estudio y tratamiento. Son necesarias diferentes técnicas de medida con una mayor resolución temporal y espacial que la propia de un sondeo, que se suele tomar como referencia, para tener un conocimiento más preciso de su contenido, distribución y evolución temporal.

Esto implica conocer en qué grado las diferentes técnicas de medida del vapor de agua son o no trazables en relación a algún tipo de referencia. De esta manera, sabremos hasta qué punto estas medidas son o no similares y poder así tratarlas como partes de una única serie temporal.

En este trabajo, hemos evaluado experimentalmente la incertidumbre en la medida del vapor de agua integrado en columna obtenido con diferentes técnicas. Al mismo tiempo, hemos definido la trazabilidad entre medidas en función de sus incertidumbres respectivas.

Los resultados apuntan a que las mejores trazabilidades entre medidas del vapor de agua integrado obtenido por radiometría de microondas y el obtenido mediante metodologías basadas en radiometría se obtienen para atmósferas con bajo contenido de vapor de agua (< 6 mm) y, en general, son inferiores a las obtenidas combinando la metodología de microondas con las metodologías GNSS y radiosondas RS41.

Tras este estudio, concluimos que:

1. El radiómetro de microondas RPG-LHATPRO, especialmente diseñado para la medida de vapor de agua en atmósferas muy secas, es la técnica de las aquí comparadas que mayor contenido en vapor de agua integrado en columna mide en todos los rangos analizados presentando una muy alta correlación positiva con coeficientes de Pearson del orden de 0.99 o superiores con el resto de técnicas, tanto para el día como para la noche. El MWR mide un 6% más IWV que FTIR, entre un 8% y 11% más que GNSS, EKO, RS41 y CIMEL-IZO y un 22% más que CIMEL-AERONET. Durante la noche, mide un 4% más IWV que las RS41, un 7% más que GNSS, un 13% más que CIMEL-IZO Lunar y un 20% más que CIMEL-AERONET Lunar.
2. Se han medido experimentalmente la exactitud y la precisión del vapor de agua integrado en columna obtenido a partir de dicho radiómetro. La primera, viene caracterizada por un sesgo de, aproximadamente, 0.13 mm, que correspondería al valor suministrado por el equipo para un contenido teórico nulo de IWV. La segunda, se estima, aproximadamente, en 0.05 mm, para un valor teórico nulo de IWV con un aumento lineal creciente en función del contenido de IWV equivalente a 0.0066 mm por cada mm de aumento. MWR y CIMEL-IZO Lunar son las técnicas que miden el IWV con mayor exactitud y precisión.
3. Se establece un índice de calidad (I_c) de valor 1.7 mm que representa la diferencia máxima estimada para que dos medidas simultáneas de IWV efectuadas en el mismo lugar por instrumentos o técnicas diferentes sean trazables.
4. Las diferencias de IWV entre las diferentes técnicas y el MWR aumentan en valor absoluto conforme aumenta el contenido de IWV, tanto de día como de noche. Sin embargo, este aumento está algo más mitigado en el período nocturno.

5. Las diferencias de IWV entre las diferentes técnicas y el MWR disminuyen muy débilmente en valor absoluto con el ángulo cenital solar, en cambio, aumentan, más débilmente aún, con el ángulo cenital lunar. Con respecto al ángulo de fase lunar se perciben menores diferencias en el IWV dentro del rango $[-30^\circ, 30^\circ]$.
6. Para estudios que involucren medidas del IWV con el MWR y que necesiten complementar períodos de ausencias de datos, las mejores opciones serían completar dichos períodos con medidas del FTIR, durante el día, y de las RS41 durante la noche, que son las técnicas que presentan mayor trazabilidad con el radiómetro.

9. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo, se ha desarrollado en el marco de las actividades de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (CIMO-Testbed) -Banco de pruebas de Izaña- para instrumentos de teledetección de aerosoles y vapor de agua. Los fotómetros solares AERONET en Izaña fueron calibrados a través de la Instalación Central AEROSPAIN en el marco del proyecto ACTRIS número 871115. Agradecemos al Instituto Geográfico Nacional (IGN) su contribución en la evaluación de los retrasos cenitales totales (ZTD) que hemos utilizado en este trabajo para obtener los valores de IWV con la técnica GNSS.

10. REFERENCIAS

- Alexandrov, M. D., Schmid, B., Turner, D. D., Cairns, B., Oinas, V., Lacis, A. A., Gutman, S. I., Westwater, E. R., Smirnov, A., and Eilers, J.: Columnar water vapor retrievals from multifilter rotating shadowband radiometer data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2008JD010543>, 2009.
- Almansa, A.F.; Cuevas, E.; Barreto, Á.; Torres, B.; García, O.E.; Delia García, R.; Velasco-Merino, C.; Cachorro, V.E.; Berjón, A.; Mallorquín, M.; López, C.; Ramos, R.; Guirado-Fuentes, C.; Negrillo, R.; de Frutos, Á.M: Column Integrated Water Vapor and Aerosol Load Characterization with the New ZEN-R52 Radiometer, *Remote Sens.*, 12, 1424, 2020.
- Barreto, A., Cuevas, E., Damiri, B., Romero, P. M., and Almansa, F.: Column water vapor determination in night period with a lunar photometer prototype, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2159-2167, doi:10.5194/amt-6-2159-2013, 2013.
- Barreto, A., Cuevas, E., Granados-Muñoz, M. J., Alados-Arboledas, L., Romero, P. M., Gröbner, J., Kouremeti, N., Almansa, A. F., Stone, T., Sorokin, M., Holben, B., Canini, M., and Yela, M.: The new sun-sky-lunar Cimel CE318-T multiband photometer – a comprehensive performance evaluation , *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 631-654, 2016 doi:10.5194/amt-9-631-2016.
- Blanco, M.J., Milidonis, K. and Bonanos, A.M.; "Updating the PSA Sun Position Algorithm", *Solar Energy*, Vol. 212, pp. 339-341, 2020, DOI:10.1016/j.solener.2020.10.084.
- Bonanos, A., (2023). Sun Position Algorithm (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/83453-sun-position-algorithm>), MATLAB Central File Exchange. Recuperado September 5, 2023.
- Bruegge, C.J.; Conel, J.E.; Green, R.O.; Margolis, J.S.; Holm, R.G.; Toon, G. Water vapor column abundance retrievals during FIFE. *J. Geophys. Res. Atmos.* 1992, 97, 18759–18768.
- Cuevas, E., Milford, C., Barreto, A., Bustos, J. J., García, O. E., García, R. D., Marrero, C., Prats, N., Ramos, R., Redondas, A., Reyes, E., Rivas-Soriano, P. P., Romero-Campos, P. M., Torres, C. J., Schneider, M., Yela, M., Belmonte, J., Almansa, F., López-Solano, C., Basart, S., Werner, E., Rodríguez, S., Afonso, S., Alcántara, A., Álvarez, O., Bayo, C., Berjón, A., Carreño, V., Castro, N. J., China, N., Cruz, A. M., Damas, M., Gómez-Trueba, V., González, Y., Guirado-Fuentes, C., Hernández, C., León-Luís, S. F., López-Fernández, R., López-Solano, J., Parra, F., Pérez de la Puerta, J., Rodríguez-Valido, M., Sálamo, C., Santana, D., Santo-Tomás, F., Sepúlveda, E. and Serrano, A.: Izaña Atmospheric Research Center Activity Report 2019-2020. (Eds. Cuevas, E., Milford, C. and Tarasova, O.), State Meteorological Agency (AEMET), Madrid, Spain and World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, NIPO: 666-22-014-0, WMO/GAW Report No. 276, <https://doi.org/10.31978/666-22-014-0>, 2022.
- García, R. D., Cuevas-Agulló, E., Barreto, Á., Cachorro, V. E., Pó, M., Ramos, R., and Hoogendijk, K.: Aerosol retrievals from the EKO MS-711 spectral direct irradiance measurements and corrections of the circumsolar radiation, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 2601–2621, <https://doi.org/10.5194/amt-13-2601-2020>, 2020.

García, O. E., Schneider, M., Sepúlveda, E., Hase, F., Blumenstock, T., Cuevas, E., Ramos, R., Gross, J., Barthlott, S., Röhling, A. N., Sanromá, E., González, Y., Gómez-Peláez, Á. J., Navarro-Comas, M., Puenteadura, O., Yela, M., Redondas, A., Carreño, V., León-Luis, S. F., Reyes, E., García, R. D., Rivas, P. P., Romero-Campos, P. M., Torres, C., Prats, N., Hernández, M., and López, C.: Twenty years of ground-based NDACC FTIR spectrometry at Izaña Observatory – overview and long-term comparison to other techniques, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15519–15554, <https://doi.org/10.5194/acp-21-15519-2021>, 2021.

García, R.D.; Cuevas, E.; Cachorro, V.E.; García, O.E.; Barreto, Á.; Almansa, A.F.; Romero-Campos, P.M.; Ramos, R.; Pó, M.; Hoogendijk, K.; Gross, J. Water Vapor Retrievals from Spectral Direct Irradiance Measured with an EKO MS-711 Spectroradiometer—Intercomparison with Other Techniques. *Remote Sens.*, 13, 350. <https://doi.org/10.3390/rs13030350>, 2021.

García, O. E., Schneider, M., Herkommer, B., Gross, J., Hase, F., Blumenstock, T., & Sepúlveda, E. (2022). TCCON data from Izana (ES), Release GGG2020.R1 (Versión R1) [Data set]. CaltechDATA. <https://doi.org/10.14291/tccon.ggg2020.izana01.R1>

Gasteiger, J.; Emde, C.; Mayer, B.; Buras, R.; Buehler, S.A.; Lemke, O. Representative wavelengths absorption parameterization applied to satellite channels and spectral bands. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2014, 148, 99–115.

Giles, D. M., Sinyuk, A., Sorokin, M. G., Schafer, J. S., Smirnov, A., Slutsker, I., Eck, T. F., Holben, B. N., Lewis, J. R., Campbell, J. R., Welton, E. J., Korkin, S. V., and Lyapustin, A. I.: Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database— automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 169–209, <https://doi.org/10.5194/amt-12-169-2019>, 2019.

Gisi, M., Hase, F., Dohe, S., and Blumenstock, T.: Camtracker: a new camera controlled high precision solar tracker system for FTIR-spectrometers, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 47–54, <https://doi.org/10.5194/amt-4-47-2011>, 2011.

Halothore, R.N.; Markham, B.L.; Deering, D.W. Atmospheric correction and calibration during kurex-91. In Proceedings of the IGARSS '92 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Houston, TX, USA, 26–29 May 1992; Volume 2, pp. 1278–1280.

Holben, B., Eck, T., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., 660 and Smirnov, A.: AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, *Remote Sens. Environ.*, 66, 1 – 16, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5), 1998.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Kasten, F. A new table and approximation formula for the relative optical air mass. *Arch. Für Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser. B* 1965, 14, 206–223.

Mayer, B.; Kylling, A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations—description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.* 2005, 5, 1855–1877.

Michalsky, J. J., Liljegren, J. C., and Harrison, L. C. (1995), A comparison of Sun photometer derivations of total column water vapor and ozone to standard measures of same at the Southern Great Plains Atmospheric Radiation Measurement site, *J. Geophys. Res.*, 100(D12), 25995–26003.

Miloshevich, L.M.; Vömel, H.; Whiteman, D.N.; Leblanc, T. Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 114, 2009.

Romero Campos, P. M., Cuevas Agulló, E., Ramos López, R., Valdés Pérez de Vargas, M., Schneider M., Programa de vapor de agua en columna del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña: Análisis e intercomparación de diferentes técnicas de medidas. Nota Técnica Digital N° 1, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Agencia Estatal de Meteorología, Madrid. NIPO: 784-09-009-9, 2009.

Rose, Th., Czekala, H., RPG-HATPRO, RPG-TEMPRO, RPG-HUMPRO, RPG-LHUMPRO, RPG-LHATPRO, Operating Manual Version 8.17 (24.3.2011). Radiometer Physics GmbH, 53340, Meckenheim, Germany.

Rüfenacht, R. & Haeefe, Alexander & Pospichal, Bernhard & Cimini, D. & Bircher-Adrot, Simone & Turp, Myles & Sugier, Jacqueline. (2021). EUMETNET opens to microwave radiometers for operational thermodynamical profiling in Europe. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*. 2. 10.1007/s42865-021-00033-w.

Schmid, B.; Thorne, K.J.; Demoulin, P.; Peter, R.; Mätzler, C.; Sekler, J. Comparison of modeled and empirical approaches for retrieving columnar water vapor from solar transmittance measurements in the 0.94- μm region. *J. Geophys. Res. Atmos.* 1996, 101, 9345–9358.

Schneider, M., Romero, P. M., Hase, F., Blumenstock, T., Cuevas, E., and Ramos, R.: Continuous quality assessment of atmospheric water vapour measurement techniques: FTIR, Cimel, MFRSR, GPS, and Vaisala RS92, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 323–338, <https://doi.org/10.5194/amt-3-323-2010>, 2010.

Schneider, Matthias & Sepúlveda, E. & García, Omaira & F, Hase & T, Blumenstock. (2010). Remote sensing of water vapour profiles in the framework of the Total Carbon Column Observing Network (TCCON). *Atmospheric Measurement Techniques*. 3. 10.5194/amt-3-1785-2010.

Smirnov, A., Holben, B., Lyapustin, A., Slutsker, I., and Eck, T.: AERONET processing algorithms refinement, in: AERONET Workshop, El Arenosillo, Spain, pp. 10–14, 2004.

Sommer, M.; von Rohden, C.; Simeonov, T.; Dirksen, R.; Fiedler-Krüger, M.; Friedrich, H.; Körner, S.; Naebert, T.; Oelsner, P.; Tietz, R. (2022): RS41 GRUAN Data Product Version 1 (RS41-GDP.1). GRUAN Lead Centre (DWD).

Sun, B.; Calbet, X.; Reale, A.; Schroeder, S.; Bali, M.; Smith, R.; Pettey, M. Accuracy of Vaisala RS41 and RS92 Upper Tropospheric Humidity Compared to Satellite Hyperspectral Infrared Measurements. *Remote Sens.* 2021, 13, 173. <https://doi.org/10.3390/rs13020173>.

Torres, B., Toledano, C., Berjón, A., Fuertes, D., Molina, V., Gonzalez, R., Canini, M., Cachorro, V. E., Goloub, P., Podvin, T., Blarel, L., Dubovik, O., Bennouna, Y., and de Frutos, A. M.: Measurements on pointing error and field of view of Cimel-318 Sun photometers in the scope of AERONET, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2207–2220, <https://doi.org/10.5194/amt-6-2207-2013>, 2013.

Vaquero-Martínez, J., Antón, M., Costa, M.J., Bortoli, D., Navas-Guzmán, F., Alados-Arboledas, L., Microwave radiometer, sun-photometer and GNSS multi-comparison of integrated water vapor in Southwestern Europe, *Atmospheric Research*, Volume 287, 2023, 106698, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106698>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809523000959>).

Wikipedia. (https://en.wikipedia.org/wiki/Detection_limit#Instrument_detection_limit). Último acceso 22 de noviembre de 2023.

Xu, G., B. Xi, W. Zhang, C. Cui, X. Dong, Y. Liu, and G. Yan (2015), Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 10,313–10,323, doi:10.1002/2015JD023438.

WMO: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO No 8, 2014 edition, ISBN 978-92-63-10008-5, 2014.

Ware, Randolph & Cimini, D. & Herzegh, P & Marzano, Frank & Vivekanandan, Jothiram & Westwater, Ed. (2004). Ground-based microwave radiometer measurements during precipitation. 24-27.

Wunch, Debra & Toon, Geoffrey & Blavier, Jean-Francois & Washenfelder, Rebecca & Notholt, Justus & Connor, Brian & Griffith, David & Sherlock, Vanessa & Wennberg, Paul. (2011). The Total Carbon Column Observing Network. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences.* 369. 2087-112. 10.1098/rsta.2010.0240.

Wunch, D.; Toon, G.C.; Sherlock, V.; Deutscher, N.M.; Liu, C.; Feist, D.G.; Wennberg, P.O. Documentation for the 2014 TCCON Data Release (Version GGG2014.R0). CaltechDATA 2015.

Zúñiga Román, J.: Técnicas experimentales de Física General. Propagación de errores. Departament de Física Atòmica, Molecular i Nuclear. Universitat de València. España. (https://www.uv.es/zuniga/3.2_Propagacion_de_errores.pdf). Último acceso 6 de septiembre de 2023.