

Metodología para la estimación del sesgo de la reflectividad diferencial de los radares del SINARAME

Nota Técnica SMN 2022-122

Luciano Vidal, Diego Giménez y Martin Rugna

Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios

Marzo 2022

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

Resumen

Los radares meteorológicos de doble polarización son muy bien reconocidos alrededor del mundo como instrumentos vitales para diferentes aplicaciones donde las variables polarimétricas juegan un rol fundamental como la obtención de estimaciones cuantitativas de precipitación más precisas o estudios relacionadas con una mejor caracterización de los hidrometeoros asociados a un sistema precipitante mediante algoritmo de clasificación. No obstante, para lograr resultados aceptables, los datos de radar utilizados deben ser sometidos a numerosos controles de calidad y correcciones. En esta Nota Técnica se discute una de las metodologías propuestas en la bibliografía para la corrección de los errores sistemáticos presentes en una variable clave de los radares polarimétricos: la reflectividad diferencial.

Abstract

Dual polarization weather radars are used around the world as an essential tool to obtain precise quantitative precipitation estimations or a characterization of hydrometeors within a precipitating system using polarimetric variables. This cannot be achieved if the collected data is uncalibrated, and for this reason a rigorous quality control must be done prior to the calculations. In this Technical Note one methodology is discussed for correcting one of the key polarimetric variables: differential reflectivity.

Palabras clave: radar meteorológico, reflectividad diferencial, sesgo, calibración, perfil cuasi-vertical.

Citar como:

Vidal, L., Giménez, D. y M. Rugna, 2022: Metodología para la estimación del sesgo de la reflectividad diferencial de los radares del SINARAME. Nota Técnica SMN 2022-122.

1. RADAR POLARIMÉTRICO

Los radares meteorológicos de doble polarización basados en tierra son muy bien reconocidos alrededor del mundo como instrumentos vitales para diferentes aplicaciones donde las variables polarimétricas juegan un rol fundamental. Las mismas podrán ser utilizadas para lograr una mejor caracterización de los hidrometeoros asociados a un sistema precipitante (Seliga y Bringi 1976, Straka y otros 2000, Schuur y otros 2012, Al-Sakka y otros 2013), para obtener estimaciones cuantitativas de precipitación más precisas (Bringi y Chandrasekar 2001, Ryzhkov y otros 2005, Bringi y otros 2011, Diederich y otros 2015), así como para mejorar el control de calidad de los datos de radar (Werner y Steinert 2012, Hubbert y otros 2009 y 2010).

Los radares meteorológicos convencionales o de polarización única proporcionan tres variables básicas: el factor de reflectividad del radar (Z_H), la velocidad Doppler (V_r) y el ancho del espectro Doppler o ancho espectral (W) [ver Fabry (2015) o Rauber y Nesbitt (2018) para explicaciones más detalladas]. Debido a que los radares convencionales envían y reciben señales con polarización horizontal, estos tres momentos se miden con dicha polarización y entonces se las indicará con un subíndice H (Z_H , V_H , W_H). Por su parte, los radares de polarización doble o polarimétricos pueden medir estos tres momentos tanto en polarizaciones horizontal como vertical (V): Z_H , Z_V , V_H , V_V , W_H y W_V . Luego, comparando las amplitudes y fases de las señales devueltas en las polarizaciones H y V se obtiene información adicional y muy importante a través de un conjunto de nuevas variables. La diferencia entre la reflectividad en las polarizaciones H y V (es decir, $Z_H - Z_V$, donde Z_H y Z_V se expresan en dB) se denomina reflectividad diferencial (Z_{DR}). A la diferencia en el cambio de fase entre las dos polarizaciones se la denomina diferencial de fase (Φ_{DP}) y a la correlación entre las señales devueltas en la polarización H y V se la llama coeficiente de correlación copolar (CC).

A nivel nacional, el radar polarimétrico se ha convertido en los últimos años en la tecnología estándar de la red operativa de radares meteorológicos de Argentina impulsada por el SINARAME (de Elia y otros 2017, Rodriguez y otros 2017, Giménez y otros 2021). No obstante, aún queda un camino importante por recorrer en lo que respecta a la integración de las nuevas capacidades que ofrecen las variables polarimétricas en las áreas operativas del Servicio Meteorológico Nacional. Esta asignatura pendiente de alguna manera se relaciona con avanzar en controles eficientes de calidad de las variables polarimétricas que aún no han sido incluidas en el sistema desarrollado en la Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos (Arruti y otros 2021) en colaboración con el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET). Ahora bien, ¿qué entendemos por variables polarimétricas de calidad?. El interrogante es muy amplio y para los fines prácticos o más bien operativos donde lo que se busca es usar los datos como entrada para un algoritmo de estimación cuantitativa de precipitación o la identificación de hidrometeoros, lo primero que se tendrá que conocer o tener más o menos claro es cuales son los principales problemas que afectan dichas variables.

2. CALIBRACIÓN DE LA REFLECTIVIDAD DIFERENCIAL

Los valores que toma esta variable varían en un rango estrecho que va de aproximadamente -1 a $+6$ dB (lluvia: 0 a $+5.5$ dB; granizo y graupel: -1 a $+6$ dB; nieve y cristales de hielo: -0.5 a $+6$ dB). Luego, debido al pequeño rango de los valores intrínsecos, la precisión requerida en Z_{DR} para aplicaciones cuantitativas es del orden de 0.1 a 0.3 dB (Kumjian 2013). Por ejemplo, para lograr sesgos en las estimaciones cuantitativas de precipitación del 20% o menos, la variable Z_{DR} debería calibrarse con una precisión de $\pm 0,2$ dB o menor

(Seliga y Bringi 1976, Bringi y Chandrasekar 2001), asumiendo que no hay sesgo en la reflectividad horizontal. Por lo tanto, los sesgos introducidos en el hardware del radar pueden causar compensaciones que deben corregirse antes del uso cuantitativo de las mediciones de Z_{DR} (ver Zrnić y otros 2006).

A lo largo de estos años se han propuesto y aplicado varios métodos de calibración para corregir el sesgo presente en Z_{DR} y los mismos pueden agruparse en tres grandes tipos que mencionaremos a continuación:

a) Calibración con instrumental: para ello se requiere del uso de instrumentos internos y/o externos para medir las diferencias relativas entre los canales H y V de los puertos de calibración relacionados con la arquitectura del radar (Zrnić y otros 2006). Esta calibración puede devolver el sesgo de Z_{DR} en la cadena completa de transmisión y recepción, sin embargo, depende de la arquitectura del radar y del uso de instrumentos de alta precisión. Además, es un gran desafío determinar la diferencia relativa entre las ganancias de antena de dos canales ortogonales.

b) Calibración estándar de reflexión/dispersión natural: estas técnicas se basan en la reflexión o la dispersión de blancos naturales o artificiales con características polarimétricas conocidas (ej., esferas de metal, torres metálicas, gotas de llovizna, copos de nieve; Gabella 2018). Dentro de los métodos basados en la calibración de dispersión estándar de blancos naturales, uno de ellos busca estimar el sesgo de Z_{DR} utilizando gotas de lluvia o copos de nieve específicos con una polarización conocida (Gorgucci y otros 1992, Williams y otros 2015). En esta línea, el método propuesto por Bechini y otros (2008) de múltiples ángulos de elevación de antena (PPI) implica la observación de precipitación estratiforme en varios PPIs para calcular el sesgo de Z_{DR} de acuerdo con una fórmula que contempla la dependencia de esta variable con el ángulo de elevación de antena. Por su parte, Ryzhkov y otros (2005) propusieron un método que estima el sesgo de Z_{DR} observando lluvia débil y nieve seca agregada en un ángulo de elevación de antena alto ($>10^\circ$). Una alternativa a estas técnicas son aquellas que se basan en el apuntamiento vertical de la antena en presencia de lluvia débil o llovizna ("*birdbath scans*"; Gorgucci y otros 1999, Bringi y Chandrasekar 2001). En este caso, la premisa es que las partículas de lluvia son polariméricamente isótropas cuando se las observa de manera vertical, por lo que Z_{DR} debería ser 0. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que el sesgo de Z_{DR} depende del tiempo y puede ser significativamente diferente en dos días seguidos. Esto implica que es necesario un monitoreo frecuente de la calibración de Z_{DR} . Dentro de los métodos conocidos, los mencionados en primer lugar son de los más simples de implementar ya que no implica modificar la operatoria del radar y por ende aprovechar de la información recolectada a diario para los cálculos operativos del sesgo de la reflectividad diferencial.

c) Calibración estándar con una fuente de radiación: dentro de estos métodos se encuentran aquellos basados en observaciones del sol. La radiación solar se ha utilizado en meteorología por radar durante mucho tiempo para comprobar la alineación de la antena y la sensibilidad y estabilidad de la cadena del receptor (Huuskonen y Holleman 2007, Rugna y otros 2017). Cuando la antena del radar apunta al sol, la antena del radar recibirá la energía a la frecuencia del radar, formando ecos solares en forma de franjas (ver Fig. 3, Rugna y otros 2017). En la actualidad, este método se utiliza ampliamente en redes de radares meteorológicos operativos (Holleman y otros 2010a, Holleman y otros 2010b). El sol puede considerarse una fuente de radiación no polarizada (es decir, las potencias H y V son iguales) que también emite a frecuencias de radar. Esta técnica utiliza los spikes solares que se observan durante el escaneo operativo normal y, por lo tanto, se pueden realizar de forma continua sin interrumpir las operaciones del radar. Aunque el método solar

solo calibra la ruta de recepción de un sistema de radar, este método se considera un elemento esencial en el monitoreo de Z_{DR} y es complementario con el escaneo vertical.

El objetivo de la presente Nota Técnica es abordar la metodología de estimación del sesgo mediante la implementación de técnicas de calibración estándar de reflexión basados en el análisis de los perfiles quasi-verticales de las variables polarimétricas (Ryzhkov y otros 2016). Se describe la metodología propuesta, no siendo objeto de este trabajo proveer un valor de sesgo para la reflectividad diferencial. Eso será abordado en una próxima publicación de alcance nacional, es decir para los 11 radares que componen la red SINARAME.

En los siguientes apartados se describen todos los componentes de la metodología propuestas como elaboración de los cuasi-perfiles verticales, la detección de la banda brillante y la estimación del sesgo (offset) de Z_{DR} en la región de nieve seca siguiendo la metodología propuesta por Tabar y otros (2009). Finalmente se concluye la Nota Técnica remarcando la eficacia y limitaciones de las metodologías propuestas así como ideas de mejora y/o consideraciones a tener en cuenta a futuro.

3. TÉCNICA QVP

Como se mencionó en el apartado anterior, uno de los métodos más utilizados para estimar los errores sistemáticos de la reflectividad diferencial han sido aquellos basados en escaneos a 90° ("bird bath scan"). No obstante, algunos radares por cuestiones mecánicas no pueden realizar dichos escaneos. Luego se han propuesto en los últimos años varios procedimientos para superar esta restricción y corregir el sesgo de Z_{DR} . Ryzhkov y otros (2016) propusieron la aplicación del enfoque de perfiles cuasi-verticales (QVP, por sus siglas en inglés) para monitorear la calibración de Z_{DR} utilizando una lógica similar a la propuesta por Ryzhkov y otros (2005).

Los QVP de las variables polarimétricas brindan información sobre la evolución y estructura de los eventos de lluvia a lo largo del tiempo, lo que permite monitorear la calibración de las variables del radar. Esta técnica ha sido explorada por Kumjian y otros (2016), Griffin y otros (2020) y Sánchez-Rivas y Rico-Ramírez (2021), entre otros. Los QVP de las variables de radar se obtienen promediando de manera acimutal los datos recopilados durante exploraciones cónicas estándar (PPIs, Fig. 1a) en ángulos de elevación de antena superiores a 10° o 20° , donde la distancia en rango se transforma en altura considerando que el haz del radar se propaga en una atmósfera estándar. Tales elevaciones altas minimizan los efectos del ensanchamiento del haz del radar y la falta de homogeneidad horizontal. Por su parte, el promedio azimutal reduce los errores estadísticos de las estimaciones de radar sin comprometer la resolución temporal y asigna sus perfiles verticales promedio a un volumen cónico con un eje vertical (Fig. 1b).

De acuerdo con la versión inicial de la metodología QVP propuesta por Ryzhkov y otros (2016), solo los pixeles (gates) con $CC > 0.6$ y $Z_H > -10$ dBZ se utilizan para el promedio azimutal y el número de *gates* válidos (o azimuts) a lo largo del círculo debe exceder 30 para hacer una estimación de la variable QVP. Tal promediado se realiza para cada rango con una resolución Δr (ej., 250 m). Para una discusión más completa sobre resoluciones verticales de los QVP ver la Sección 2 de Ryzhkov y otros (2016).

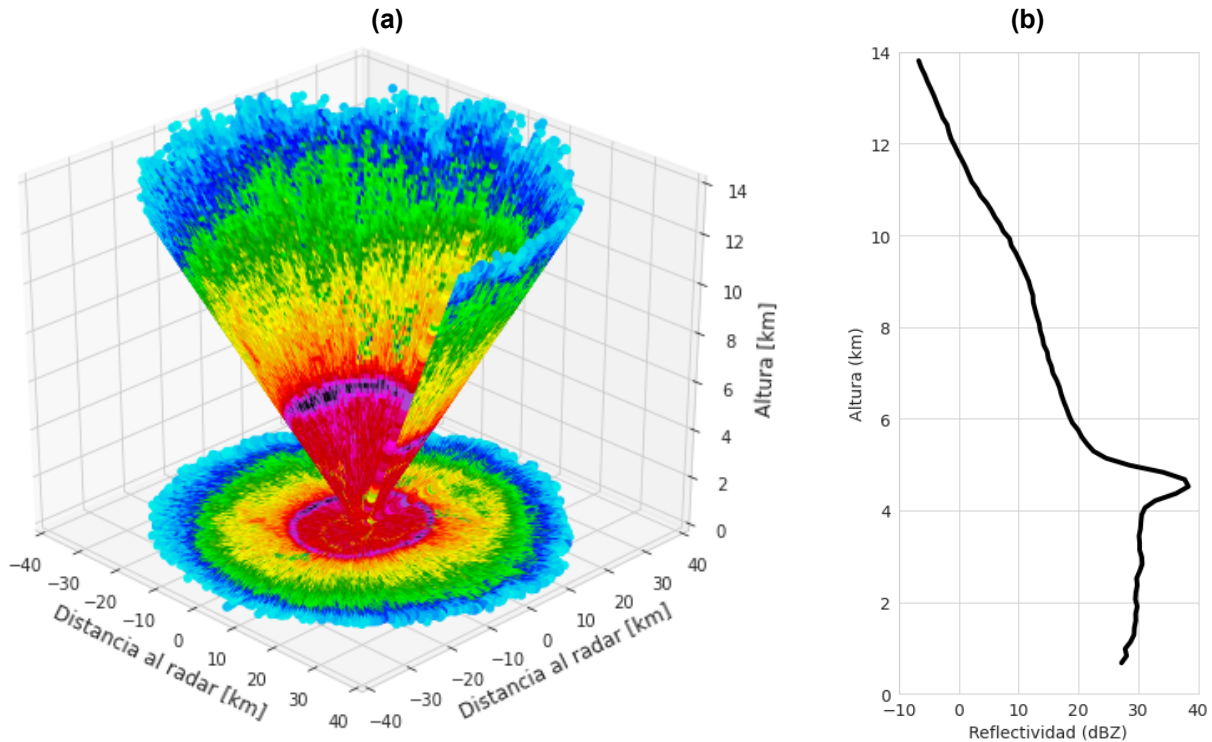


Fig. 1 (a) Escaneo PPI a 20° de reflectividad (Z_H) del radar RMA4 (Resistencia, Chaco) para el día 21 de enero de 2020 a las 14:37 UTC (11:37 HOA). (b) Perfil cuasi-vertical vertical (QVP) de reflectividad generado a partir del promedio azimutal del PPI mostrado en (a).

De acuerdo a Ryzhkov y otros (2016), es importante remarcar que cualquier heterogeneidad horizontal de los ecos asociados a una tormenta introducen incertidumbre en los QVP. Los autores mencionan que la medida de heterogeneidad "tolerable" es difícil de cuantificar y se necesita más investigación. Mejoras a la metodología son de esperar, donde las mismas pueden incluir la separación del eco estratiforme y convectivo para evitar la contaminación de elementos convectivos espacialmente no uniformes. Otra posibilidad es utilizar elevaciones múltiples (pero relativamente cercanas) para reducir aún más la incertidumbre estadística, como hicieron Giangrande y otros (2008) para la detección polarimétrica de la capa de fusión.

La Figura 2 muestra el diagrama altura-tiempo para el día 21 de enero de 2020 generado a partir de los QVP (Fig. 1b) del radar RMA4 ubicado en el Aeropuerto de Resistencia (Chaco). La porción central, entre las 08:00 y las 16:00 UTC corresponden con el pasaje de la parte estratiforme de un sistema convectivo de mesoescala como se puede ver en la secuencia temporal de las imágenes de temperatura de topos nubosos del satélite GOES-16 (Fig. 3).

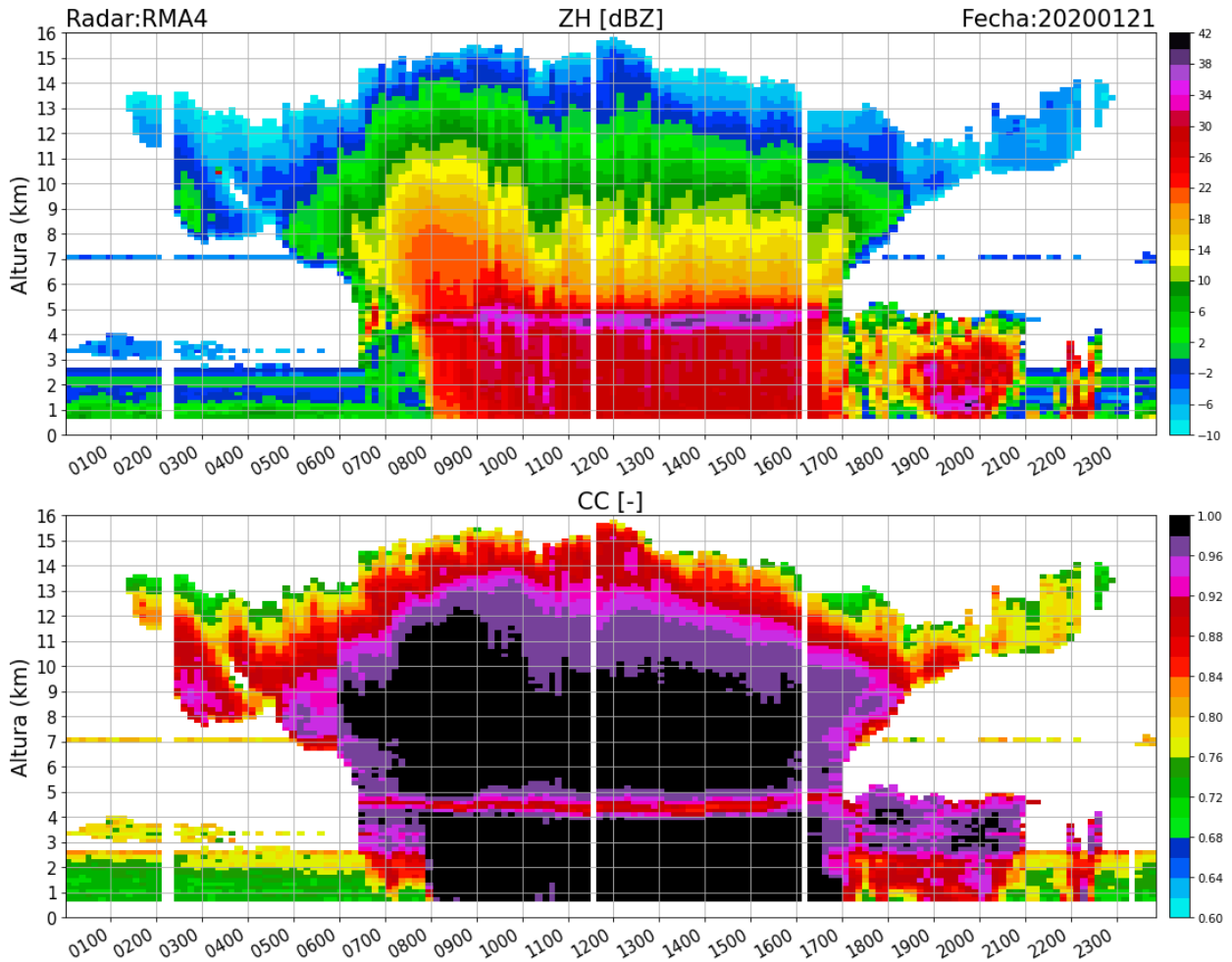


Fig. 2 Ejemplo de QVPs para una elevación de antena de 20°, donde cada uno de los perfiles calculados para cada volumen escaneado se muestran en una única representación altura vs. tiempo. En el panel superior se muestra la variable Z_H y en el inferior el coeficiente de correlación co-polar (CC). Las bandas verticales blancas indican la ausencia de datos (variable no disponible). La hora del eje X se muestra en UTC (HOA+3).

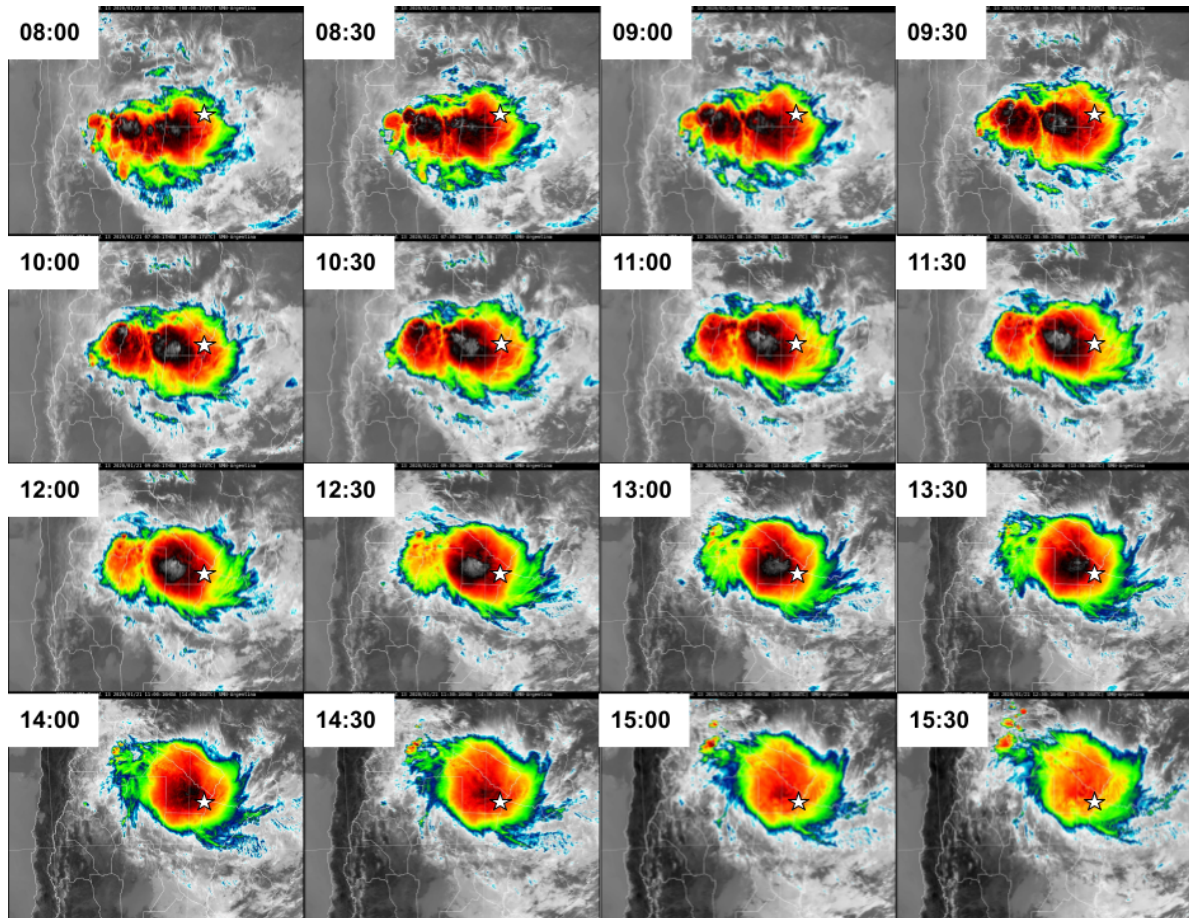


Fig. 3 Secuencia temporal de imágenes de temperatura de topos nubosos del satélite GOES-16 (canal 13) para el día 21 de enero de 2021 entre las 08:00 y 15:30 UTC. El sitio del radar RMA4 se indica con una estrella blanca.

4. DETECCIÓN DE BANDA BRILLANTE

Un elemento clave en la utilización de la metodología de QVP para la estimación del sesgo de la reflectividad diferencial es identificar regiones con características similares, por ejemplo donde los hidrometeoros sólidos comienzan a derretirse (Trabal y otros 2009). Particularmente nos concentraremos en la detección de esta región como paso necesario para la calibración. En las observaciones de radar, el nivel de fusión (altura de la isoterma de 0°C) suele aparecer como una región de reflectividad intensificada a una altura relativamente constante, conocida como banda brillante (BB) (Fabry 2015, capítulo 4.4.2). Esto se da cuando los copos de nieve que caen pasan a través de la zona de fusión hacia el aire más cálido, se derriten y colapsan para formar gotas de lluvia, lo que provoca un aumento en la reflectividad del radar. La reflectividad aumenta debido al aumento de la constante dieléctrica. Posteriormente, la reflectividad disminuye con la formación de las gotas de lluvia, debido a la disminución del tamaño y a la concentración de hidrometeoros sólidos provocada por el aumento de la velocidad de caída (Fabry y Zawadzki 1995, Szyrmer y Zawadzki 1999).

La mayoría de las técnicas de identificación de la BB en base a radares de polarización simple se basa en analizar las características geométricas del perfil vertical de reflectividad. No obstante, no siempre la BB se encuentra bien definida en estos perfiles lo cual introduce algunas limitaciones al momento de querer hacer una detección automática de la misma. Afortunadamente, las variables polarimétricas de radar, especialmente el coeficiente de correlación co-polar (CC), proporcionan una descripción mucho mejor de la estructura vertical de la BB (Shusse y otros 2011, Kalogiros y otros 2013, Qi y otros 2013a). En la Figura 4 se puede ver un ejemplo de lo antes mencionado, identificando en dos regiones (recuadros blancos) del QVP de reflectividad donde la BB no se observa tan bien definida como en el QVP de CC.

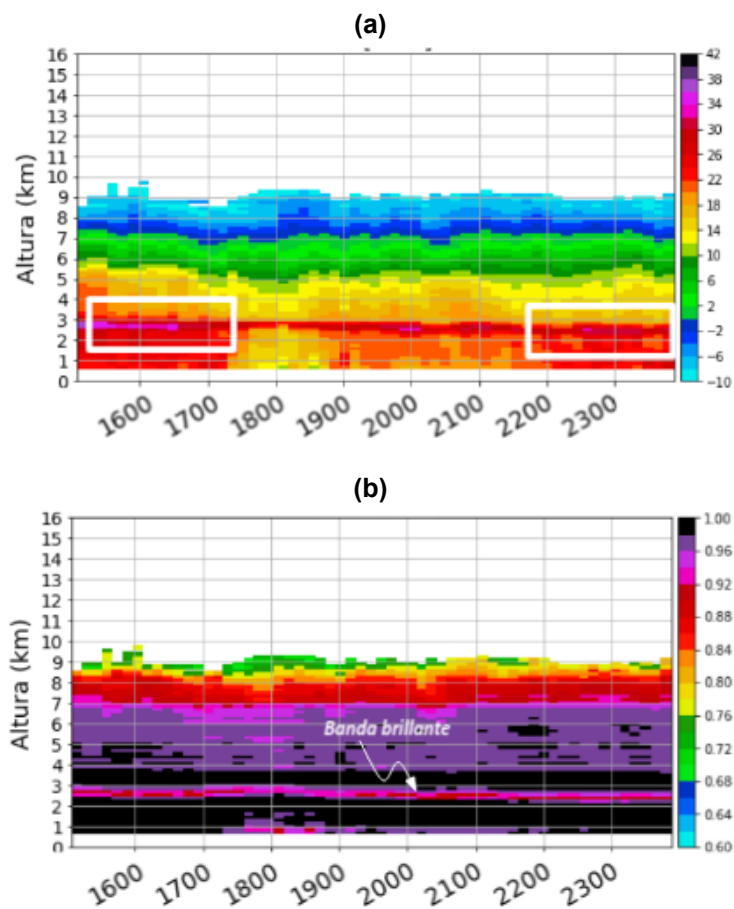


Fig. 4 (a) Perfiles cuasi-verticales (QVP) de Z_H y (b) CC en función del tiempo, para el día 21 de mayo de 2021 entre las 15:00 y las 00:00 UTC, correspondiente al radar RMA2 (Ezeiza). Las regiones indicadas con recuadros blancos en (a) corresponden a zonas donde la BB no es tan evidente como en (b). Para el cálculo de los QVP se empleó el PPI correspondiente a una elevación de antena de 20° .

En línea con lo antes expuesto, Tabary y otros (2006) estudiaron perfiles verticales de variables polarimétricas para radares banda C concluyendo que CC disminuye a 0.93 en promedio en el centro de la BB. Además, los valores de CC por encima y por debajo de la BB son usualmente mayores que 0.98.

Para ilustrar el algoritmo de detección de BB implementado, se muestra la Figura 5 donde se presenta un perfil vertical de CC. El método consiste en la identificación de un mínimo local ($CC < 0.94$; altura del pico) dentro de un rango de búsqueda sugerido en ± 1.0 km respecto de la altura de la isoterma de 0°C (Shusse y otros 2011, Qi y otros 2013b). Este último parámetro son los valores medios mensuales para todos los radares de la red SINARAME calculados a partir de reanálisis ERA-5 (Ver Anexo). Identificada la altura de pico de la BB aparente (hp), se procede a identificar los primeros puntos de inflexión superior e inferior del perfil vertical respecto a la altura del pico de la BB aparente (Qi y otros 2013b). Las alturas de los puntos de inflexión superior e inferior son consideradas alturas superior (hs) e inferior (hi) aparentes de la BB. La BB se considera válida siempre y cuando se cumplan los siguientes requisitos, de acuerdo a Shusse y otros (2011):

- $\Delta CC_s = CC(hs) - CC(hp) > 0.02$ y $\Delta CC_i = CC(hi) - CC(hp) > 0.02$
- $\Delta hi = hp - hi > 0.5$ km y $\Delta hs = hs - hp > 0.5$ km

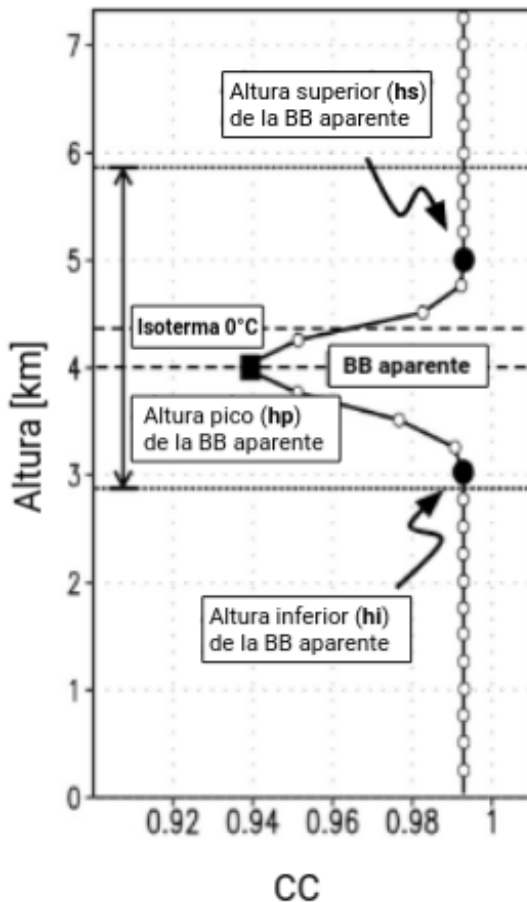


Fig. 5 Perfil vertical de CC ilustrativo donde los círculos vacíos indican la grilla de datos con intervalos verticales de 0.25 km. En este, la isoterma de 0°C se halla a los 4.37 km. La flecha indica el rango de búsqueda para el mínimo local de CC, el cual se identifica con un cuadrado sólido. Los círculos sólidos representan los puntos extremos de la BB. Adaptado de Shusse y otros (2011).

5. ESTIMACIÓN DEL SESGO DE Z_{DR}

Para la estimación del sesgo de Z_{DR} se adaptó el método propuesto por Trabal y otros (2009) basado en el análisis de la región de hielo seco (“dry snow layer”), comúnmente presente en los primeros 2 km por encima de la BB [hs, hs+2km]. Esta región se caracteriza por valores de $Z_{DR} \approx 0$.

Este esquema consiste en construir, para un evento determinado, los pares QVP-tiempo para las variables Z_H , CC y Z_{DR} . La BB es identificada únicamente a partir del QVP de la variable CC de acuerdo a lo descrito en el apartado anterior. A los efectos de discriminar hielo seco de hielo húmedo o hielo cristalizado en los primeros 2 km por encima de la BB válida se emplean los siguientes umbrales: $Z_H < 25$ dBZ y $CC > 0.95$ (Trabal y otros, 2009). En la Figura 6 se puede observar, sobre los tres perfiles verticales los límites inferior y superior de la BB (círculos blancos para BB válida) y la región de análisis de hielo seco delimitada entre el límite superior de la BB y los 2 km establecidos (signos “+” blancos para BB válida).

Luego, el valor medio de Z_{DR} es estimado desde cada perfil vertical de Z_{DR} para cada tiempo del evento donde se identifica una BB válida empleando cada punto del perfil discriminado como hielo seco. En la Figura 7(b)(b) se muestra a modo de ejemplo el Z_{DR} medio en función del tiempo para el evento de referencia desde los píxeles de Z_{DR} que contienen hielo seco. El sesgo de Z_{DR} es estimado a partir de la media de Z_{DR} para el evento completo.

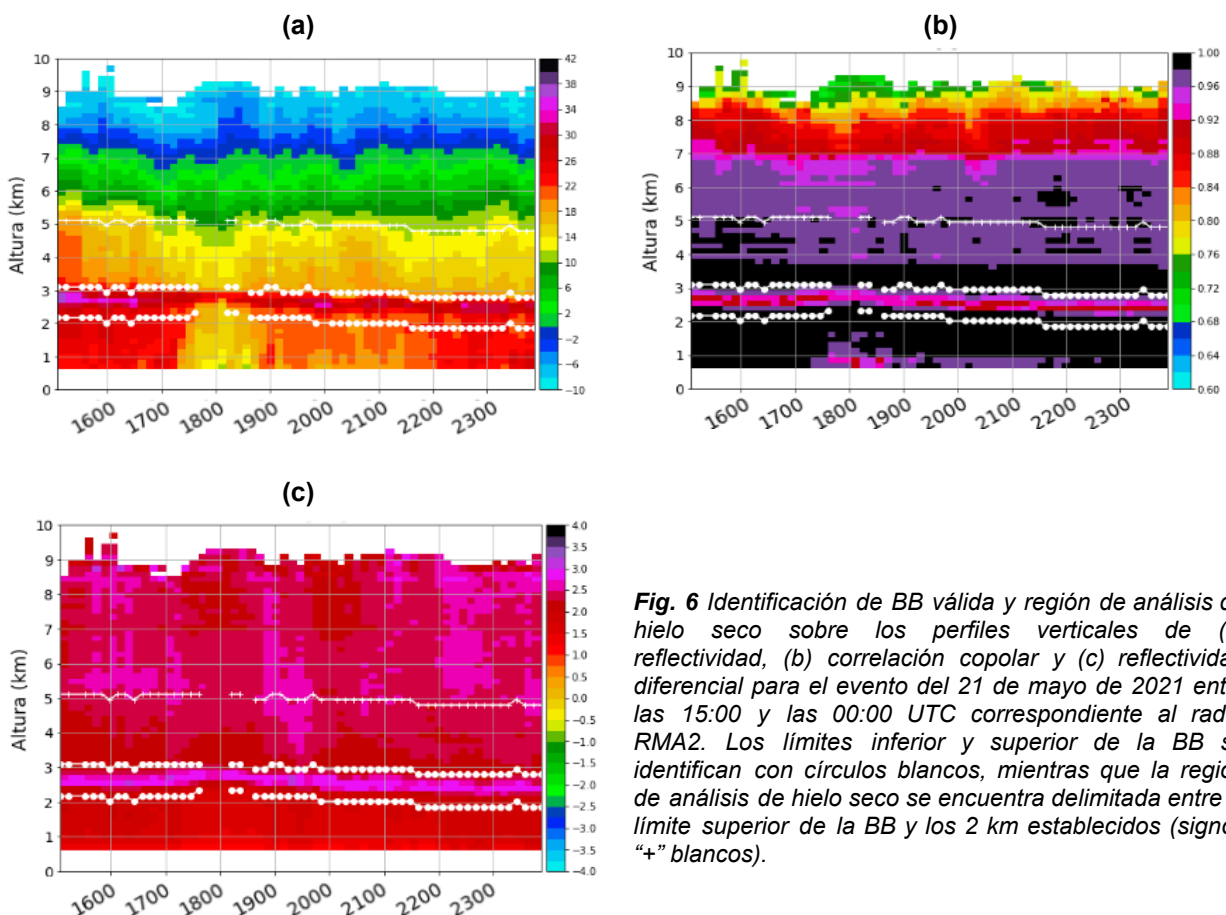


Fig. 6 Identificación de BB válida y región de análisis de hielo seco sobre los perfiles verticales de (a) reflectividad, (b) correlación copolar y (c) reflectividad diferencial para el evento del 21 de mayo de 2021 entre las 15:00 y las 00:00 UTC correspondiente al radar RMA2. Los límites inferior y superior de la BB se identifican con círculos blancos, mientras que la región de análisis de hielo seco se encuentra delimitada entre el límite superior de la BB y los 2 km establecidos (signos “+” blancos).

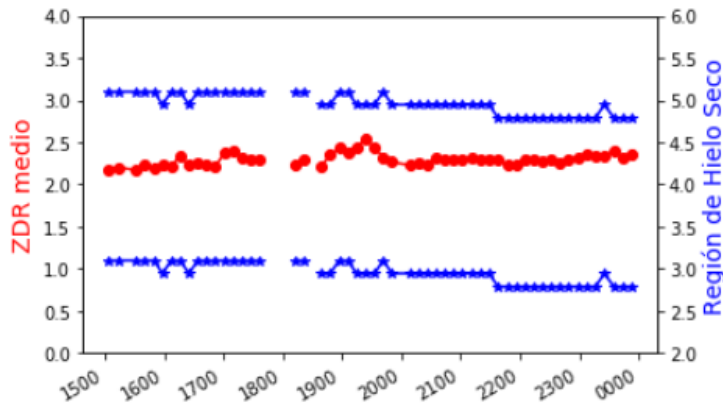


Fig. 7 Z_{DR} medio (dB; eje izquierdo) en función del tiempo para el evento del 21 de mayo de 2021 entre las 15:00 y las 00:00 UTC correspondiente al radar RMA2 (Ezeiza). Los puntos rojos corresponden a los valores medio de Z_{DR} . El sesgo estimado para este evento es de +2.26 dB. La región de análisis de hielo seco (eje derecho; altura en km) sDR_e halla delimitada por los puntos azules para cada instante del evento donde la BB es válida.

6. CONCLUSIONES

La técnica propuesta para el cómputo de los QVP fue capaz de representar adecuadamente la secuencia de los perfiles verticales a lo largo del tiempo. Entre las mejoras a incorporar se pueden numerar las siguientes: (a) incluir la separación del eco estratiforme y convectivo para evitar la contaminación de elementos convectivos espacialmente no uniformes; (b) utilizar elevaciones múltiples (pero relativamente cercanas) para la incertidumbre estadística; y (c) incorporar una técnica de control de calidad de los datos sobre todas las elevaciones previo a aplicar la técnica de QVP propuesta.

En cuanto a la metodología propuesta para identificar la BB y estimar el sesgo de Z_{DR} , con un desarrollo de bajo costo computacional y consistente fue posible abordar la identificación de la BB aparente y la potencial capa de hielo seco. Además fue capaz de seguir la dinámica del sistema precipitante a lo largo de la secuencia temporal de los eventos. Entre las mejoras a incorporar se pueden enumerar las siguientes: (a) análisis temporal de la dinámica de la BB a los efectos de eliminar segmentos no válidos y asegurar una continuidad temporal sobre las alturas inferior, de pico y superior de la misma; y (b) valoración estadística de los valores medios de Z_{DR} estimados a lo largo del tiempo a los efectos de discriminar aquellas estimaciones significativamente no estadísticas.

REFERENCIAS

Al-Sakka, H., Boumahmoud, A.-A., Fradon, B., Frasier, S. J. y Tabary, P., 2013: A new fuzzy logic hydrometeor classification scheme applied to the French X-, C-, and S-band polarimetric radars, J. Appl. Meteor. Climatol., 52, 2328–2344.

- Arruti, A., P. Maldonado, M. Rugna, M. Sacco, J. Ruiz y L. Vidal, 2021: Sistema de control de calidad de datos de radar en el Servicio Meteorológico Nacional - Parte I: Descripción del algoritmo. Nota Técnica SMN 2021-86.
- Bechini, R., L. Baldini, R. Cremonini y E. Gorgucci, 2008: Differential Reflectivity Calibration for Operational Radars. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 25, 1542–1555.
- Bringi, V. N. y V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications*. Cambridge University Press, 636 pp.
- Bringi, V. N., Rico-Ramirez, M. A. y Thurai, M., 2011: Rainfall Estimation with an Operational Polarimetric C-Band Radar in the United Kingdom: Comparison with a Gauge Network and Error Analysis, *J. Hydrometeor.*, 12, 935–954.
- de Elía R., Vidal, L., Lohigorry, P., Mezher, R., y Rugna, M., 2017: La red Argentina de radares meteorológicos de Argentina. Nota Técnica SMN 2017-39.
- Diederich, M., Ryzhkov, A., Simmer, C., Zhang, P. y Trömel, S., 2015: Use of Specific Attenuation for Rainfall Measurement at X-Band Radar Wavelengths. Part I: Radar Calibration and Partial Beam Blockage Estimation, *J. Hydrometeor.*, 16, 487–502.
- Fabry, F. (2015). *Radar Meteorology: Principles and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107707405
- Fabry, F. y Zawadzki, I., 1995: Long-term radar operations of the melting layer of precipitation and their interpretation. *J. Atmos. Sci.*, 52, 838–851.
- Gabella, M., 2018: On the Use of Bright Scatterers for Monitoring Doppler, Dual-Polarization Weather Radars. *Remote Sens.*, 10, 1007.
- Giangrande, S. E. y Ryzhkov, A. V., 2008: Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification. *Journal of applied meteorology and climatology*, 47(9), 2445-2462.
- Giménez, D., L. Vidal, M. Rugna, R. de Elía y L. Giordano, 2021: Climatología de ecos no meteorológicos para la red de radares SINARAME. Nota Técnica SMN 2021-103.
- Gorgucci, E., Scarchilli, G., Chandrasekar, V., 1992: Calibration of Radars using Polarimetric Techniques. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30, 853–858.
- Gorgucci, E., Scarchilli, G. y Chandrasekar, V., 1999: A Procedure to Calibrate Multiparameter Weather Radar using Properties of the Rain Medium. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 37, 269–276.
- Griffin, E. M., Schuur, T. J., and Ryzhkov, A. V., 2020: A polarimetric radar analysis of ice microphysical processes in melting layers of winter storms using s-band quasi-vertical profiles, *J. Appl. Meteorol.*, 59, 751–767.
- Holleman, I., Huuskonen, A., Gill, R. y Tabary, P., 2010a: Operational Monitoring of Radar Differential Reflectivity Using the Sun. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 27, 881–887.

- Holleman, I., Huuskonen, A., Kurri, M. y Beekhuis, H., 2010b: Operational Monitoring of Weather Radar Receiving Chain Using the Sun. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 27, 159–166.
- Hubbert, J. C., Dixon, M., Ellis, S. M. y Meymaris, G., 2009: Weather Radar Ground Clutter. Part I: Identification, Modeling, and Simulation, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 26, 1165–1180.
- Hubbert, J. C., Ellis, S. M., Dixon, M. y Meymaris, G., 2010: Modeling, Error Analysis, and Evaluation of DualPolarization Variables Obtained from Simultaneous Horizontal and Vertical Polarization Transmit Radar. Part II: Experimental Data, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 27, 1599–1607.
- Huuskonen, A. y Holleman, I., 2007: Determining Weather Radar Antenna Pointing Using Signals Detected from the Sun at Low Antenna Elevations. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 24, 476–483.
- Kalogiros, J., M. N. Anagnostou, E. N. Anagnostou, M. Montopoli, E. Picciotti y F. S. Marzano, 2013: Correction of polarimetric radar reflectivity measurements and rainfall estimates for apparent vertical profile in stratiform rain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 1170–1186.
- Kumjian, M., 2013: Principles and Applications of Dual-polarization Weather Radar. Part I: Description of the Polarimetric Radar Variables. *J. Oper. Meteorol.*, 1, 226–242.
- Kumjian, M. R., Mishra, S., Giangrande, S. E., Toto, T., Ryzhkov, A. V. y Bansemer, A., 2016: Polarimetric radar and aircraft observations of saggy bright bands during MC3E, *J. Geophys. Res.*, 121, 3584–3607.
- Qi, Y., J. Zhang, P. Zhang y Q. Cao, 2013a: VPR correction of bright band effects in radar QPEs using polarimetric radar observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(9), 3627-3633.
- Qi, Y., J. Zhang, Q. Cao, Y. Hong y X.-M. Hu, 2013b: Correction of radar QPE errors for nonuniform VPRs in mesoscale convective systems using TRMM observations. *J. Hydrometeor.*, 14, 1672–1682.
- Rauber, R. M. y Nesbitt, S. W., 2018. *Radar meteorology: A first course*. John Wiley & Sons.
- Rodríguez, A.; Lacunza, C., Serra, J., Saulo, C., Ciappesoni, H., Caranti, G., Bertoni, J., Martina, A., 2017: SiNaRaMe: El Primer Sistema Integrado de Radares Hidro-Meteorológicos de Latinoamérica; Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* ; 4; 1; 3-2017; 41-48.
- Rugna, M., L. Vidal y R. de Elía, 2017: Verificación de la orientación de la antena de los radares meteorológicos de INTA utilizando la radiación solar. *Nota Técnica SMN 2017-4*.
- Ryzhkov, A. V., Giangrande, S. E., Melnikov, V. M. y Schuur, T. J., 2005: Calibration Issues of Dual-Polarization Radar Measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(8), 1138-1155.
- Ryzhkov, A., Zhang, P., Reeves, H., Kumjian, M., Tschallener, T., Trömel, S. y Simmer, C., 2016: Quasi-vertical profiles—A new way to look at polarimetric radar data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(3), 551-562.
- Sanchez-Rivas, D. and Rico-Ramirez, M. A., 2022: Calibration of radar differential reflectivity using quasi-vertical profiles, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 503–520.

Seliga, T. A. y V. N. Bringi, 1976: Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *J. Appl. Meteor.*, 15, 69–76.

Shusse, Y., N. Takahashi, K. Nakagawa, S. Satoh y T. Iguchi, 2011: Polarimetric radar observation of the melting layer in a convective rainfall system during the rainy season over the East China Sea. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 354–367.

Schuur, T. J., Park, H.-S., Ryzhkov, A. V. y Reeves, H. D., 2012: Classification of precipitation types during transitional winter weather using the RUC model and polarimetric radar retrievals, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 763–779.

Straka, J. M., Zrníc, D. S. y Ryzhkov, A. V., 2000: Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations, *J. Appl. Meteorol.*, 39, 1341–1372.

Szyrmer, W. y Zawadzki, I., 1999: Modeling of the melting layer. Part I: Dynamics and microphysics. *J. Atmos. Sci.*, 56, 3573–3592.

Tabary, P., A. Le Henaff, G. Vulpiani, J. Parent-du-Châtelet y J. J. Gourley, 2006: Melting layer characterization and identification with a C-band dual-polarization radar: A long-term analysis. Preprints, Fourth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2006), Barcelona, Spain, Servei Meteorologic de Catalunya, 17–20.

Trabal, J. M., V. Chandrasekar, E. Gorgucci y D. J. McLaughlin, 2009: Differential Reflectivity (ZDR) calibration for CASA radar network using properties of the observed medium. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. II-960-II-963.

Werner, M. y Steinert, J., 2012: New quality assurance algorithms for the DWD polarimetric C-band weather radar network, in: 7th Europ. Conf. On Radar in Meteor. and Hydrol., NET403, available at: http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/NET_403_ext_abs.pdf.

Williams, E. R., Smalley, D. J., Donovan, M. F., Hallowell, R. G., Hood, K. T., Bennett, B. J., Evaristo, R., Stepanek, A., Bals-Elsholz, T., Cobb, J., Ritzman, J., Korolev, A. y Wolde, M., 2015: Measurements of Differential Reflectivity in Snowstorms and Warm Season Stratiform Systems, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(3), 573-595.

Zrnić, D. S., V. M. Melnikov y J. K. Carter, 2006: Calibrating differential reflectivity on the WSR-88D. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23, 944–951.

Anexo

Valores medios mensuales de la altura de la isoterma de 0°C calculada a partir de los campos medios mensuales 3D de temperatura y altura geopotencial para las 12:00 UTC provistos por los reanálisis ERA-5 (<https://doi.org/10.24381/cds.6860a573>) para el periodo 1990-2020. Los valores mostrados corresponden a un promedio dentro de un cilindro de radio 20 km centrado en cada sitio radar.

Mes	RMA1	RMA2	RMA3	RMA4	RMA5	RMA6	RMA7	RMA8	RMA9	RMA10	RMA11
E	4493	4092	4914	4731	4693	3741	3719	4597	1396	3675	4861
F	4466	4100	4881	4684	4648	3789	3724	4553	1571	3708	4822
M	4419	4006	4862	4632	4591	3656	3584	4496	1424	3567	4812
A	4209	3693	4825	4536	4489	3255	3141	4341	1155	3167	4678
M	3890	3308	4613	4248	4202	2859	2772	4000	900	2784	4381
J	3711	2983	4569	4181	4103	2432	2346	3884	499	2328	4285
J	3547	2781	4492	4065	4008	2245	2156	3759	449	2125	4181
A	3695	3025	4555	4176	4114	2489	2258	3901	480	2336	4286
S	3680	2994	4575	4191	4189	2411	2311	3932	633	2285	4306
O	3880	3326	4717	4387	4371	2793	2598	4154	803	2635	4486
N	4046	3523	4755	4444	4433	3077	2980	4240	966	2989	4580
D	4334	3864	4901	4656	4622	3462	3414	4475	1135	3392	4776

Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía (rdelia@smn.gov.ar), Luciano Vidal (lvial@smn.gov.ar) o Martín Rugna (mrugna@smn.gov.ar) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo (macevedo@smn.gov.ar).