

Desarrollo e implementación del producto RQPE-RMA

Nota Técnica SMN 2021-104

Diego Giménez^{1,2}, Martín Rugna², Luciano Vidal², Ramón de Elía² y Leandro Giordano²

¹ Instituto Nacional del Agua.

² Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, Servicio Meteorológico Nacional.

Septiembre 2021

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

La estimación cuantitativa de precipitación derivada de radar meteorológico (RQPE, por sus siglas en inglés *Radar Quantitative Precipitation Estimation*) tiene un rol vital en diversas aplicaciones hidrológicas, como por ejemplo el manejo de inundaciones urbanas. En esta Nota Técnica se describe la metodología desarrollada e implementada en el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina para la estimación cuantitativa de precipitación a partir de los datos del radar meteorológico RMA del SINARAME (Sistema Nacional de Radares Meteorológicos). El esquema propuesto contempla las siguientes etapas: (1) corrección de atenuación por presencia de hidrometeoros; (2) estimación de índice de calidad de los datos; (3) control de calidad multivariable de los datos; (4) conversión a precipitación dentro del volumen escaneado; y (5) acumulación de precipitación dentro de una ventana temporal. La metodología propuesta se aplicó sobre el radar meteorológico RMA2 ubicado en el predio del Instituto Nacional del Agua en Ezeiza (Buenos Aires). Los períodos empleados para su desarrollo fueron los semestres de primavera/verano (octubre a marzo) entre los años 2017 y 2019 para minimizar los efectos debidos a contaminación por banda brillante. En términos generales el control de calidad de los datos ha mostrado una efectividad significativa al momento de clasificar los ecos de reflectividad en lluvia/no lluvia y mitigar el efecto de las interferencias electromagnéticas. Los resultados muestran que la metodología propuesta es un punto de partida satisfactorio dejando varios aspectos a trabajar en el futuro: clasificación de hidrometeoros, corrección de banda brillante, desarrollo de un escaneo híbrido, extrapolación de la precipitación a nivel del suelo, aplicación de una relación Z-R específica para distintos tipos de hidrometeoros; entre otros aspectos de mejora.

Abstract

Quantitative Precipitation Estimation (QPE) derived from radar data is considered vital for several hydrological applications, e.g. urban flooding. The methodology proposed in this Technical Note for constructing radar QPE uses a multi-step approach: 1) attenuation correction, 2) data quality index estimation, 3) multiparameter quality control, 4) conversion from reflectivity to rainfall, 5) accumulation within a time range. This methodology was applied to two spring/summer seasons (2017/2018 and 2018/2019) using the RMA2 data located near Buenos Aires. The quality control step produced good results, separating echoes from precipitation from those from non-precipitation targets, and eliminating electromagnetic interference. This methodology also leaves the door open for working towards hydrometeor classification, bright band correction, hybrid scan QPE, extrapolation to surface rainfall intensity, among others.

Palabras clave: radar meteorológico, precipitación, SINARAME

Citar como:

Giménez, D., M. Rugna, L. Vidal, R. de Elía y L. Giordano, 2021: Desarrollo e implementación del producto RQPE-RMA. Nota Técnica SMN 2021-104.

Prólogo

Esta Nota Técnica forma parte de una serie que recopila informes realizados en el marco del proyecto “Estimación de precipitación de mejor calidad a partir de la combinación de datos de satélite, radar y estaciones meteorológicas” en el marco del Programa 8.1.1 “Programa de explotación de los datos de sensores remotos” (año 2020) del Plan Estratégico SMN 20/23. El objetivo final del proyecto es desarrollar e implementar un algoritmo que combine de forma óptima estimaciones de precipitación basadas en sensores remotos (satélite y radar meteorológicos) y observaciones in situ (pluviómetros) para lograr una estimación cuantitativa de precipitación que permita mejorar de manera significativa el monitoreo de la precipitación y otras aplicaciones desarrolladas dentro del Servicio Meteorológico Nacional. Con esta serie de Notas Técnicas se busca documentar el proceso de desarrollo de cada componente del proyecto: 1) observaciones pluviométricas, su integración a través de redes propias y de terceros y el desarrollo de metodologías de evaluación de confiabilidad de esta información y control de calidad en tiempo real, 2) desarrollo de una estimación de precipitación en base a radar meteorológicos, metodologías de control de calidad en tiempo diferido y generación de productos, y 3) desarrollo e implementación de una primera versión de una estimación satelital de precipitación corregida con pluviómetros, cálculo y análisis de distancias de correlación, metodologías de corrección de errores sistemáticos (climatología) y diarios, y validación.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación cuantitativa de precipitación a partir de radar meteorológico (en adelante RQPE, por sus siglas en inglés, *Radar Quantitative Precipitation Estimation*) juega un rol fundamental en numerosas aplicaciones hidrometeorológicas. El radar meteorológico se presenta como una herramienta capaz de proporcionar una información espacial detallada del campo de lluvia a intervalos de tiempo breves sobre grandes extensiones. Pero las aplicaciones hidrometeorológicas del radar en vistas de su utilización, por ejemplo, como datos de entrada de modelos de previsión de inundaciones, requiere del desarrollo de algoritmos necesarios que permitan optimizar la estimación cuantitativa de la lluvia mediante dicho instrumento.

Asimismo, la complejidad de todos los factores que contribuyen, por un lado, al proceso de precipitación, y por otro, al comportamiento de la energía del haz emitido por el radar en su travesía a lo largo de la atmósfera, conllevan a que las estimaciones generalmente difieran de la precipitación observada en terreno. Villarini y Krajewski (2010) plantean que las fuentes de error más comunes en los datos de radar que afectan de manera significativa la RQPE pueden originarse en: 1) errores de calibración del radar, 2) atenuación de la señal de radar por lluvia, 3) propagación anómala y ecos de terreno, 4) bloqueo del haz, 5) variabilidad de la relación Z-R, 6) efectos relacionados con la distancia al radar, 7) estructura vertical del sistema precipitante, 8) movimiento vertical del aire y deriva de la precipitación, 9) errores de muestreo temporal, 10) presencia de ecos no meteorológicos (insectos, pájaros, interferencias electromagnéticas), entre otras.

Varios productos operativos de RQPE como NOAA/NSSL NEXRAD MRMS (Zhang y otros 2014; Berkowitz y otros 2013), CASA DFW QPE System (Chen y Chandrasekar, 2015), NCAR/Dual Polarization QPE (Dixon y otros 2015), MeteoSwiss/RAIN (German y otros 2004, 2007), entre otros, proponen, a los efectos de

mitigar las fuentes de errores antes descritas, un flujo de trabajo que incluye en primer lugar un control de calidad de los datos de reflectividad. Luego la conversión de la reflectividad en tasa instantánea de lluvia, seguido de la representación del campo de lluvia y de la acumulación temporal. Para completar el flujo típico de generación de un producto cuantitativo de precipitación con radar debemos contemplar además georeferenciación y proyecciones de los datos, reticulado, ajuste con observaciones *in situ* (pluviómetros) y verificación y control de la calidad del producto, que no serán discutidos en la presente Nota Técnica.

Al inicio del esquema, un efectivo control de calidad sobre los campos de reflectividad de radar es crítico para asegurar una representación realista de la estructura de la tormenta y la estimación precisa de precipitación, siendo la separación de ecos meteorológicos (que pueden ser lluvia, granizo o nieve, entre otros tipos de hidrometeoros, y que llamaremos en adelante a título general “*lluvia*”) de ecos no meteorológicos (en adelante “*no lluvia*”) un gran desafío. Dentro de los ecos no meteorológicos podemos encontrar interferencias electromagnéticas desde transmisores de telecomunicación e incluso desde el Sol (Vaccarone y otros 2019), ecos de tierra por propagación anómala (Grecu y Krajewski 2000) o por estructuras en superficie, tales como torres y edificios (Bachmann y Tracy 2009), ecos marinos (Gray y Larsen 2005) y ecos biológicos (pájaros, murciélagos, e insectos) (Lakshmanan y otros 2010). En la literatura se pueden encontrar técnicas basadas en reglas heurísticas (ej., Zhang y otros 2004) y redes neuronales (ej., Lakshmanan y otros 2007, 2010) que emplean como parámetros de entrada la reflectividad, velocidad radial, ancho espectral y datos del entorno. Más recientemente los radares meteorológicos de doble polarización han dado lugar a esquemas que incorporan información de la polarimetría y abordan la clasificación de hidrometeoros automático con varios niveles de complejidad y para radares de diferentes longitudes de onda (Lim y otros 2005, Gourley y otros 2007, Marzano y otros 2008, Park y otros 2009, y muchos otros).

Avanzando en línea con el esquema general, nos encontramos con que el cómputo de una RQPE basada en una relación Z-R contempla cuatro componentes fundamentales:

- **Corrección de la reflectividad de radar por atenuación en banda C y X.** Desde el inicio de la meteorología por radar, varios algoritmos para corrección de atenuación han sido sugeridos en la literatura (Bringi y otros 1990, Testud y otros 2001, Vulpiani y otros 2005, Jacobi y Heistermann 2016, entre otros). Estos algoritmos estiman la atenuación integrada a lo largo del haz empleando la reflectividad (PIA, por sus siglas en inglés *Path-Integrated Attenuation*) por métodos iterativos. Los radares de polarización dual pueden proporcionar una estimación de PIA utilizando el diferencial de fase (ϕ_{DP}) debido a que la atenuación específica y la atenuación diferencial (α_{nh} y α_{dp} respectivamente) están relacionadas prácticamente de manera lineal con el diferencial de fase específico (K_{DP}) en las bandas de frecuencia típicas de los radares terrestres (S, C y X) (Bringi y otros 2001, Vulpiani y otros 2005, Gou y otros 2019). En particular, Vulpiani y otros (2008) comparan técnicas avanzadas de corrección operacional de atenuación para banda C.
- **Separación en precipitación estratiforme y convectiva.** La correcta identificación y delimitación de tales modos de precipitación es crítico para la selección de una apropiada relación Z-R y una estimación más precisa de RQPE. Existen numerosos estudios dedicados a la clasificación de la precipitación en estratiforme y convectivo con aplicabilidad en radar meteorológico. Entre ellos se pueden distinguir aquellos basados en la medición de la distribución del tamaño de gotas (DSD, por sus siglas en inglés *Drop Size Distribution*) (Kennan y otros 1998, Thurai y otros 2010), en la reflectividad horizontal (Steiner y otros 1995, Biggerstaff y Listemaa 2000, Zhang y otros 2008), en

la columna de agua líquida integrada verticalmente (VIL, por sus siglas en inglés *Vertically Integrated Liquid water*) (Zhang y Qi 2010, Qi y otros 2013a), y aquellos basados en polarimetría (Wang y otros 2019, Matrosov 2021).

- **Corrección de banda brillante.** La banda brillante (BB) ha sido encontrada como la mayor fuente significativa de sobre-estimación de la RQPE basada en la relación Z-R (Zhang y Qi 2010, Zhang y otros 2012, Qi y otros 2013b,c, Qi y Zhang 2013, Hall y otros 2015). Algoritmos automáticos basados en el perfil vertical de la reflectividad (VPR, por sus siglas en inglés *Vertical Profile of Reflectivity*; Qi y otros 2013b,c) han sido desarrollados para corregir la contaminación por BB en tiempo real (Sanchez-Diezma y otros 2000, Zhang y otros 2008, Zhang y Qi 2010, Zhang y otros 2012, Qi y otros 2013b,c, Qi y Zhang 2013, Hall y otros 2015). Si bien no todo sistema de precipitación estratiforme presenta una BB, este fenómeno está frecuentemente asociada con estos sistemas de precipitación (Zhang y otros 2008, Wang y otros 2017), razón por la cual los esquemas de corrección de la BB requieren previamente identificar la región de precipitación estratiforme (Zhang y otros 2008, Zhang y Qi 2010). Además, la altura del nivel de fusión (isoterma de 0°C) es útil en varios esquemas para delimitar el rango de búsqueda de la BB y el pico de intensidad de reflectividad característico en el VPR (Hall y otros 2015, Cao y 2019). Una revisión de las metodologías empleadas para su identificación y aplicación en la corrección de BB se puede encontrar en Hall y otros (2015), Cao y otros (2019) y Carlin y Ryzhkov (2019). Por otro lado, el coeficiente de correlación copolar (CC o RHOHV) específicamente puede proveer una mejor representación de la BB en comparación con la reflectividad. Qi y otros (2013b) desarrollan un esquema de corrección que combina VPR y el perfil vertical de CC (VPCC) para el área de la BB, con mejoras significativas en la estimación de RQPE, respecto a emplear VPR solamente. Cao y otros (2019) realizaron un estudio similar sobre radares banda S, C y X obteniendo similares resultados.
- **Conversión de reflectividad a lluvia.** En la práctica, valores de RQPE son computados a través de una relación empírica no lineal entre la reflectividad horizontal (Z) y la tasa instantánea de precipitación (R) dada por $Z = a R^b$, donde Z se expresa en unidades lineales [$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$], R en mm h^{-1} y los parámetros a y b se determinan de manera empírica (Jorgensen y Willis 1982, Marshall y Palmer 1948, Marshall y otros 1947). En los primeros estudios, la relación Z-R han sido obtenidos estadísticamente a escala de tiempo climatológicos, donde los parámetros a y b difieren significativamente en diferentes regiones (Rosenfeld y otros 1993, Vieux y Bedient 1998). Wu y otros (2018) presenta una completa revisión de las mejoras realizadas sobre la aproximación de la relación Z-R a los efectos de lograr estimaciones RQPE más precisas, donde se proponen relaciones Z-R en función del tipo de precipitación, de la intensidad de reflectividad, de la altura del tope nuboso, e incluso se considera la evolución espacio-temporal del sistema precipitante logrando una relación Z-R dinámica. Cabe aclarar que, además de la reflectividad, en otros esquemas de RQPE (Cifelli y otros 2011, Giangrande y Ryzhkov, 2008) la reflectividad diferencial (Z_{DR}) y el diferencial de fase específico (K_{DP}) son típicamente empleados, ya sea solos o combinados, para estimar la precipitación. Además, en el caso particular del K_{DP} , la ventaja principal es que no se ve afectada por la calibración del radar y el bloqueo parcial del haz (Zrníc y Ryzhkov 1996).

Estudios recientes proponen la utilización de escaneos lo más próximos posible al suelo, y que no se vea severamente afectado por bloqueos del haz, para minimizar el error asociado a la estructura vertical del sistema precipitante (Zhang y otros 2016; Zhuang y Liu, 2012; Bordoy y otros, 2010; Chang y otros, 2009)

La solución propuesta por diferentes autores es la construcción de un campo de reflectividad derivado de un escaneo híbrido (HSR, por sus siglas en inglés *Hybrid Scan Reflectivity*) (ej., Fulton y otros 1998). Este HSR se conforma de los datos de reflectividad más próximos al suelo que no se ven afectados por bloqueo total/parcial del haz, constituyendo la base para la estimación de precipitación y extrapolación a tierra. La primera aproximación a un HSR es construida basada en la topografía, asumiendo propagación estándar del haz en la atmósfera. Los RQPEs derivados desde el HSR frecuentemente presentan discontinuidades desde bloqueos no debidos a la topografía (como ser desde árboles próximos a la ubicación del radar o edificaciones). Tang y otros (2013) proponen la identificación de estas discontinuidades con mapas de acumulación de precipitación, para luego aplicar una interpolación azimutal que complete el campo de precipitación estimado. Para grandes discontinuidades (mayor a 5° en dirección acimutal) el campo de precipitación es completado desde la elevación inmediata superior. Para el caso de topografías complejas, en la literatura podemos encontrar estudios que hacen foco en RQPE sobre esas regiones (Willie y otros 2016, Vulpiani y otros 2012), mientras que otros autores han direccionado el tema a la extrapolación vertical de la reflectividad a nivel del suelo para luego estimar la tasa de lluvia, considerando las diferencias distintivas del VPR en regímenes de lluvia estratiforme y convectiva (Kirstetter y otros 2010, Zhang y otros 2016, Tabary 2007). Mejoras superiores al 25% en términos de bias normalizado se han encontrado sobre campos de lluvias acumulados cuando la extrapolación a lo largo del VPR es aplicado (Montopoli y otros 2017).

Finalmente, la acumulación de campos de precipitación basadas en RQPE puede ser un gran desafío debido a la gran variabilidad en tiempo y espacio (Bellon y otros 1991, Krajewski y otros 2003). Por ejemplo, cuando las observaciones del radar han sido generadas a intervalos de entre 10 y 15 minutos, la evolución del sistema precipitante podría no ser adecuadamente representada, conduciendo a errores de muestreo en la estimación de precipitación (Seo y Krajewski 2015). Como consecuencia de ello, generar acumulados horarios de precipitación sin una corrección de muestreo espacio-tiempo podrían conducir a un error considerable en la predicción de escorrentía de una cuenca hidrográfica (Liu y Krajewski 1996, Nielsen y otros 2014). Los métodos implementados para mitigar este error son, en general y sin considerar sus modificaciones, basados en el método de interpolación espacio-tiempo de Kriging y en el método de advección. Si bien el método de Kriging ha mostrado mejores resultados a velocidades de viento bajas en comparación con el método de advección (Liu y Krajewski 1996), este último es ampliamente sugerido por varios autores (Liu y Krajewski 1996, Tabary 2007, Nielsen y otros 2014, Seo y Krajewski 2015) debido a que ha evidenciado menor desvío estándar y error absoluto medio preservando, a su vez, el patrón de lluvia a altas velocidades de viento.

En los siguientes apartados se describe el marco de trabajo y las metodologías desarrolladas e implementadas en cada etapa del esquema propuesto para la estimación de campos de precipitación en base al radar meteorológico RMA2 ubicado en Ezeiza (Buenos Aires). Finalmente se presentan diferentes escenarios remarcando ventajas y desventajas de las metodologías y una propuesta de mejora y/o consideraciones a tener en cuenta a futuro.

2. DATOS

El desarrollo e implementación de la propuesta de estimación de campos de precipitación acumulada se llevó a cabo sobre el radar meteorológico RMA2 de la red de radares SINARAME (Sistema Nacional de RAdares MEteorológicos) ubicado en el predio del Instituto Nacional del Agua en Ezeiza (Buenos Aires). Los períodos empleados para su estudio fueron los semestres de primavera/verano (octubre a marzo) entre los años 2017 y 2019 para minimizar los efectos debidos a contaminación por presencia de banda brillante. Las características de la estrategia de escaneo utilizada por el radar durante la mayor parte del período de estudio se presentan en la Tabla 1. Para el desarrollo de la metodología se utilizaron las variables reflectividad horizontal, coeficiente de correlación co-polar (RHOHV) y diferencial de fase específico (KDP).

Tabla 1 Características técnicas del radar RMA2 para el primer volumen generado por la estrategia de escaneo volumétrico 0200

Frecuencia de operación [GHz]	5,625 (banda C)
Frecuencia de repetición de pulsos [Hz]	333
Rango máximo de los datos [km]	240
Ancho del pulso [μs]	3
Resolución en rango [km]	0,45
Elevaciones de antena [°]	0.5, 0.9, 1.3, 1.8, 2.3, 3.1, 4.0, 5.1, 6.4, 8.0, 10.0, 12.5, 15.6, 20.0, 30.0
Duración promedio del volumen [min]	6:30
Duración promedio de la estrategia [min]	8:30

3. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología implementada para la estimación de campos de precipitación acumulados en ventanas de 6 horas a partir de volúmenes escaneados por el radar meteorológico RMA2 (producto RQPE-RMA-6H). Dentro del esquema general propuesto (Fig. 1) se pueden distinguir cinco etapas:

1. Corrección de atenuación por presencia de hidrometeoros.
2. Estimación del índice de calidad de los datos.
3. Sistema de control de calidad.
4. Conversión a precipitación acumulada dentro del volumen escaneado.
5. Acumulación de precipitación dentro de la ventana temporal de 6 horas.

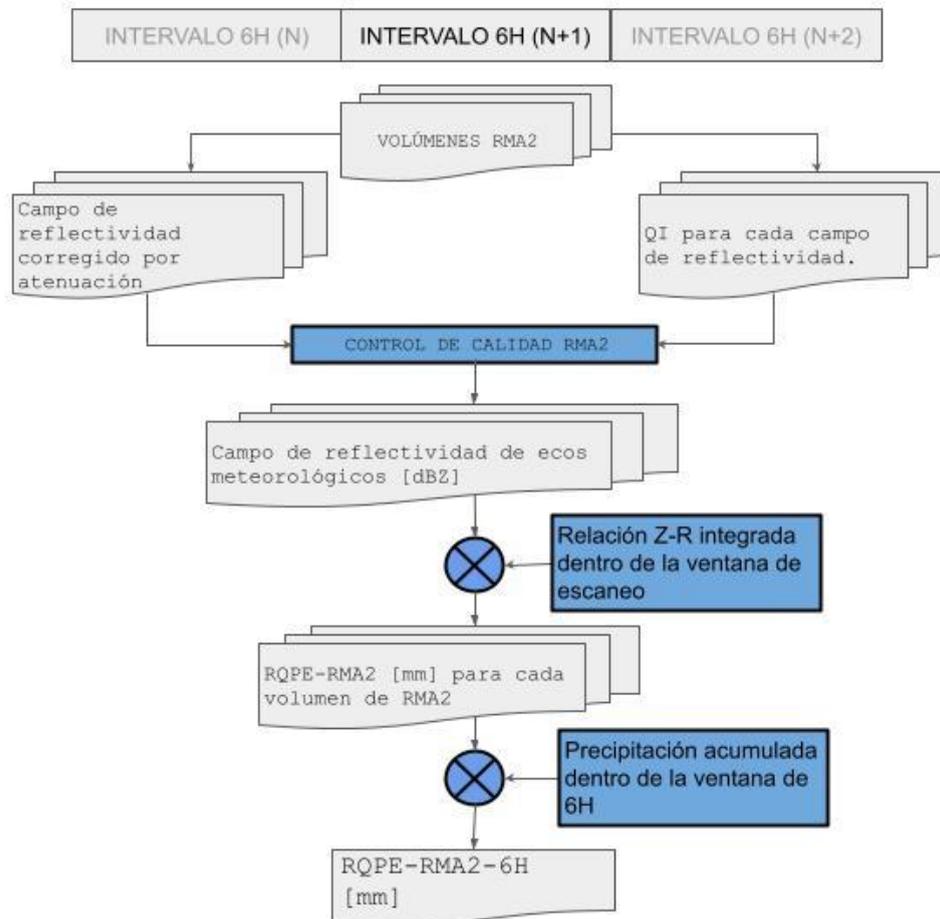


Fig. 1 Esquema general para la generación del producto RQPE-RMA y en particular para el acumulado de precipitación de 6 horas.

De acuerdo al esquema general, cada campo de reflectividad dentro de la ventana de 6 horas (aproximadamente 36 volúmenes) es corregido por atenuación de la señal de radar por lluvia. Además, se ha adaptado una metodología para la definición de un índice de confianza/calidad del dato mediante pesos asignados confeccionando un subproducto QI. A continuación, un sistema de control de calidad emplea dicho subproducto y el mapa de ecos no meteorológicos (particularmente de terreno e interferencias electromagnéticas), en adelante GC/RLAN Clutter presentado en Vidal y otros (2021) para la obtención de un conjunto de datos limpios de radar a partir de los campos de reflectividad corregidos por atenuación. Como resultado se obtienen campos de reflectividad en formato PPI. Si bien las metodologías se han implementado cuidadosamente es necesario el uso de la variable polarimétrica RHOHV para reducir el efecto erosivo que pudiese ocurrir, principalmente sobre sistemas de precipitación aislados.

Siguiendo con el esquema general, los campos de reflectividad son convertidos a tasa instantánea de precipitación mediante un relación Z-R e integrados dentro de las respectivas ventanas temporales de escaneo. Como resultado de esta etapa se obtienen los productos de precipitación acumulada (RQPE-RMA

en formato PPI) asociados a cada volumen escaneado dentro de la ventana de 6 horas establecida. Finalmente el producto RQPE-RMA-6H (PPI) es estimado acumulando los productos RQPE-RMA dentro de la ventana de 6 horas. Finalmente, y como paso opcional, esta metodología contempla la interpolación de los errores asociados al tiempo entre escaneos utilizando un esquema de advección de los sistemas precipitantes.

El desarrollo e implementación de la metodología propuesta así como el manejo de los datos de radar se realizó utilizando lenguaje de programación Python y las siguientes librerías disponibles:

- Py-ART (Helmus y Collis 2016)
- wradlib (Heistermann y otros 2013)
- pySTEPS (Pulkkinen y otros 2019)
- SciPy (Virtanen y otros 2019)

3.1 Corrección de atenuación por lluvia

La corrección de atenuación por lluvia se lleva a cabo sobre todos los barridos horizontales dentro de un volumen de datos. En esta etapa se emplea la metodología propuesta por Jacobi y Heistermann (2016) e implementada en la librería *wradlib*. Esta metodología consiste en un procedimiento de corrección de atenuación de lluvia *gate-by-gate* utilizando la reflectividad como única entrada. Se empleó la técnica *Modified Kraemer* por haber presentado resultados más consistentes y mayor estabilidad a lo largo del estudio realizado por Jacobi y Heistermann (2016) en el cual se utilizaron seis años de observaciones de radar banda C de simple polarización en el sudoeste de Alemania.

En la Figura 2b se muestra el campo PIA (Path-Integrated Attenuation) estimado a partir de la elevación de $0,5^\circ$ del campo de reflectividad (Fig. 2a) generado por el radar RMA2 el día 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC). Dicho campo representa la atenuación generada por el sistema de precipitación a lo largo de cada haz en unidades de reflectividad de radar. En la Figura 2c se muestra el campo de reflectividad resultante luego de aplicar la corrección por atenuación, la cual consiste en sumar al campo de reflectividad original (Fig. 2a) el correspondiente campo PIA estimado (Fig. 2b).

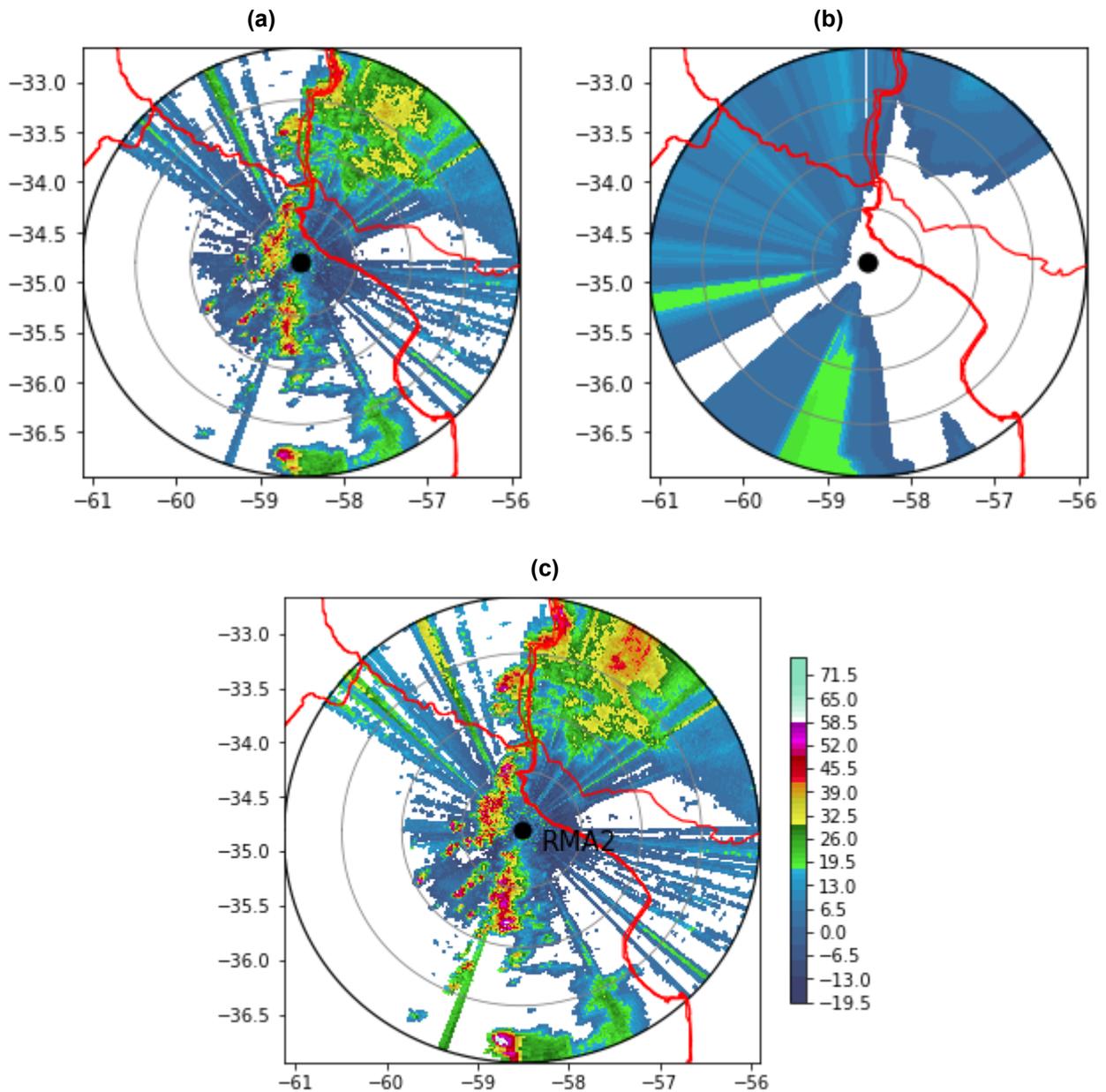


Fig. 2 (a) Campo de reflectividad sin corrección (en dBZ) correspondiente al PPI de 0.5° de elevación del radar RMA2 del día 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC). (b) Campo PIA (Path-integrated attenuation, en dBZ) asociado al campo de reflectividad mostrado en (a). (c) Campo de reflectividad corregido por atenuación (en dBZ). La separación entre anillos es de 60 kilómetros.

3.2 Índice de calidad de los datos

El índice de calidad de los datos (producto QI) es estimado sobre toda elevación dentro de un volumen de datos del radar y varía entre 0 (mínima calidad) y 1 (máxima calidad). La técnica empleada se basa en la metodología propuesta por Szturc y otros (2011). El producto QI establece el índice de calidad de los datos de reflectividad de acuerdo al grado de afectación total respecto de una serie de factores de calidad inherentes al radar meteorológico (Fig. 3):

- Frecuencia de reflectividad asociada a ecos de suelo (en adelante GC, por sus siglas en inglés *Ground Clutter*) y/o interferencias electromagnéticas (RLAN): esta variable, denominada FoR, fue estimada a partir de un conjunto de días sin precipitación. Para más detalles ver Giménez y otros (2021),
- Distancia al radar meteorológico (DR): este factor representa el error debido al tamaño creciente del volumen a medida que nos alejamos del sitio del radar y el aumento de la altura del haz inferior debido a la curvatura de la Tierra,
- Altura del haz inferior respecto a la topografía (MH): este factor tiene en cuenta el error de representatividad de la lluvia a nivel del suelo considerando la complejidad variable del terreno dentro del área de cobertura del radar. Juega un rol fundamental en situaciones de bloqueo parcial o total no contempladas en el factor DR. Este error aumenta a medida que aumenta la distancia vertical entre el haz inferior y la superficie terrestre

y además respecto a factores de calidad inherentes a las características propias de la estructura espacial de los ecos meteorológicos presentes en ese momento (Fig. 4):

- Variabilidad espacial de la reflectividad horizontal (THt),
- Variabilidad espacial del diferencial de fase específico (KDPT),
- Variabilidad espacial de la correlación copolar (RHOt).

Estos tres factores tratan de discriminar entre ecos meteorológicos y no meteorológicos teniendo en cuenta cuán suave es el campo de reflectividad. Por ejemplo, en presencia de un área de precipitación estratiforme, esta zona mostraría muy poca variabilidad espacial, mientras que una región afectada por interferencias presentaría un grado de desorden mayor. Esto puede verse en la Figura 4 (columna izq.) hacia el noreste.

En la Figura 3 se muestran los factores de calidad del radar RMA2 (paneles a, c y e para FoR, DR y MH respectivamente) y sus respectivos índices de calidad (paneles b, d y f para QI_{FoR} , QI_{DR} y QI_{MH} respectivamente), mientras que en la Figura 4 se muestran los factores de calidad asociados al evento meteorológico empleando la elevación inferior del volumen escaneado el 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC; paneles a, c y e para THt, RHOt y KDPT respectivamente) y sus respectivos índices de calidad (paneles b, d y f para QI_{TH} , QI_{RHO} y QI_{KDP} respectivamente). Todos los índices de calidad fueron estimados en cada caso empleando las fórmulas que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2 Factores de calidad y fórmulas empleadas para la estimación de los índices de calidad. Adaptado de Szturc y otros (2011).

Factor de Calidad X_i	Fórmula QI_i
FOR	$QI_{FOR} = FOR$
DR	$QI_{DR} = \begin{cases} 1 & \text{si } DR \leq 89 \\ -6 \cdot 10^{-5} DR^2 + 7 \cdot 10^{-3} DR + 0.7809 & \text{si } 89 < DR \leq 195 \\ 0 & \text{si } DR > 195 \end{cases}$
MH	$QI_{MH} = \begin{cases} 1 & \text{si } MH \leq 550 \\ -4 \cdot 10^{-7} DR^2 + 2,5 \cdot 10^{-4} DR + 0.9834 & \text{si } 550 < MH \leq 1900 \\ 0 & \text{si } MH > 1900 \end{cases}$
THt	$QI_{TH} = \begin{cases} 1 & \text{si } THt \leq 6 \\ -0.5 THt + 4 & \text{si } 6 < THt \leq 8 \\ 0 & \text{si } THt > 8 \end{cases}$
RHOt	$QI_{RHO} = \begin{cases} 1 & \text{si } RHOt \leq 0,2 \\ -13.333 RHOt + 2.666 & \text{si } 0,2 < RHOt \leq 0,125 \\ 0 & \text{si } RHOt > 0,125 \end{cases}$
KDPt	$QI_{KDP} = \begin{cases} 1 & \text{si } KDPt \leq 1,5 \\ -0.4 KDPt + 1.6 & \text{si } 1,5 < KDPt \leq 4 \\ 0 & \text{si } KDPt > 4 \end{cases}$

En la Figura 5 se observa el producto QI para la elevación inferior del volumen escaneado el 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC) estimado a partir del promedio ponderado de los índices de calidad asociados a cada factor de calidad propuesto, según pesos definidos en la Tabla 3. Tanto los umbrales empleados para establecer las fórmulas de estimación de cada índice de calidad asociado a un factor de calidad específico como los pesos adoptados para la estimación del producto QI fueron ajustados a los datos locales de acuerdo a lo realizado por Szturc y otros (2011).

Tabla 3 Pesos asociados a cada índice de calidad. El producto QI es el resultado de la suma ponderada de los índices de calidad propuestos de acuerdo al peso asignado. Adaptado de Szturc y otros (2011)

Índice de calidad QI_i	Peso W_i
QI_{FOR}	0.2
QI_{MH}	0.05
QI_{DR}	0.05
QI_{TH}	0.1
QI_{RHO}	0.3
QI_{KDP}	0.3

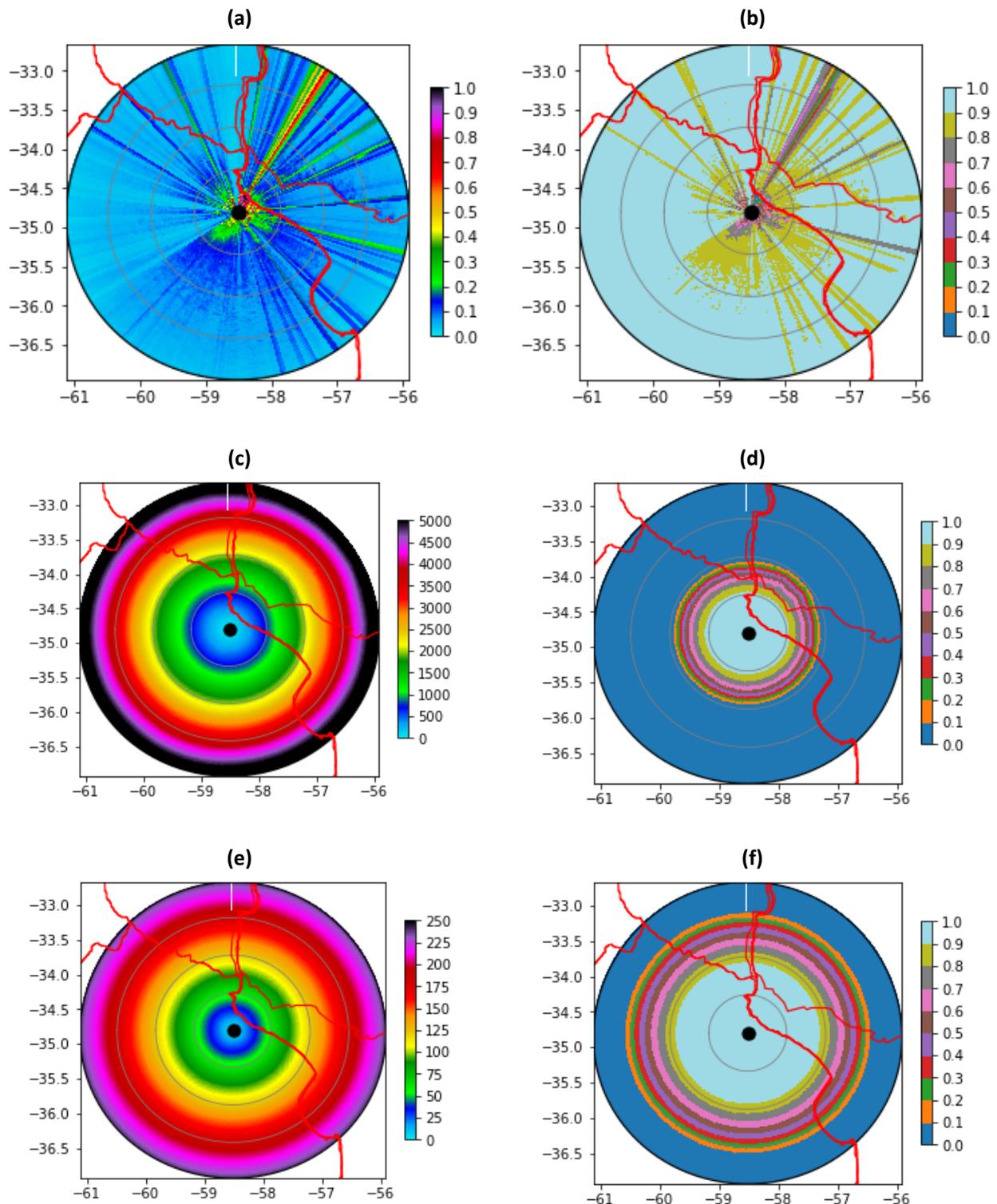


Fig. 3 Factores de calidad inherentes al radar meteorológico RMA2. **(a)** Ocurrencia espacial de clutter (GC/RLAN). **(b)** Índice de calidad QI_{FOR} asociado al panel (a). **(c)** Altitud del centro del haz de radar de elevación de antena más baja en metros. **(d)** Índice de calidad QI_{DR} asociado a la distancia al radar. **(e)** Altura de la base del haz de radar de elevación de antena más baja con respecto al suelo en metros. **(f)** Índice de calidad QI_{MH} asociado al panel (e).

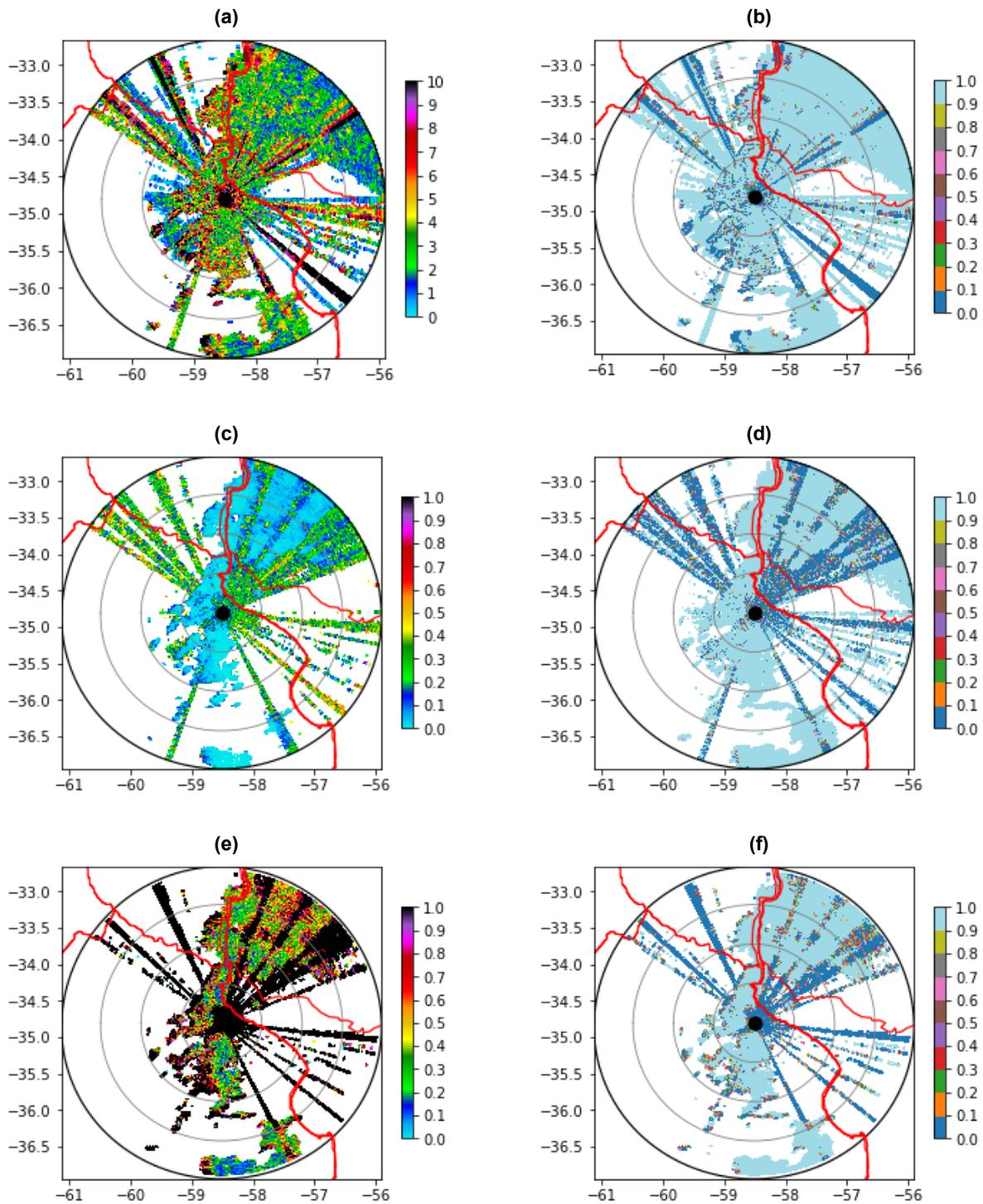


Fig. 4 Factores de calidad asociados a las variables disponibles del PPI más bajo (0.5°) del radar RMA2 para el día 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC). (a) Textura de la reflectividad horizontal. (b) Índice de calidad QI_{TH} asociado al panel (a). (c) Textura del coeficiente de correlación. (d) Índice de calidad QI_{RHO} asociado al panel (c). (e) Textura del diferencial de fase específico. (f) Índice de calidad QI_{KDP} asociado al panel (e).

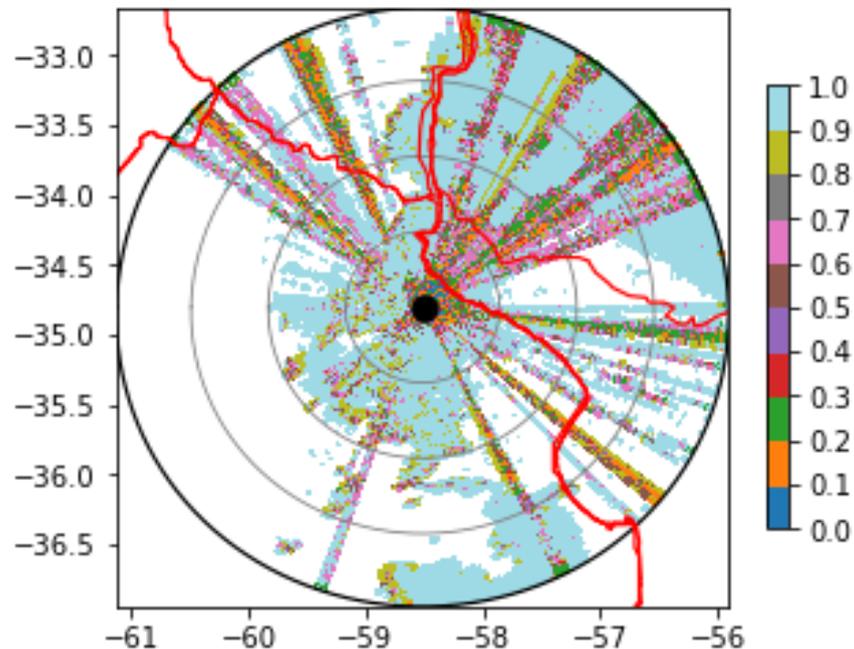


Fig. 5 Producto QI estimado a partir de la suma ponderada de los índices de calidad propuestos de acuerdo al valor de los pesos mostrados en la Tabla 3.

3.3 Sistema de control de calidad

El sistema de control de calidad tiene por objetivo la obtención de un conjunto de datos de radar para días con presencia de precipitación con la menor cantidad posible de ecos no meteorológicos. Este sistema se aplica sobre todos los barridos horizontales dentro de un volumen de datos del radar RMA2.

Si bien en la actualidad existen numerosos esquemas de control de calidad de datos basados en técnicas de lógica difusa que emplean variables polarimétricas (Lim y otros 2005; Gourley y otros 2007; Marzano y otros 2008; Park y otros 2009; y muchos otros), estos no sólo pretenden eliminar los ecos no meteorológicos, sino que además clasifican los hidrometeoros para una estimación más precisa de la precipitación empleando una relación Z-R específica por cada tipo de hidrometeoro.

Dado que en esta instancia nuestro objetivo es discernir entre ecos de lluvia y ecos no meteorológicos (una única relación Z-R está disponible para el rango del radar RMA2) un esquema sencillo es propuesto para tal fin que permite, además, dar un tratamiento a las áreas de precipitación afectadas por interferencia electromagnética (ver Fig. 4).

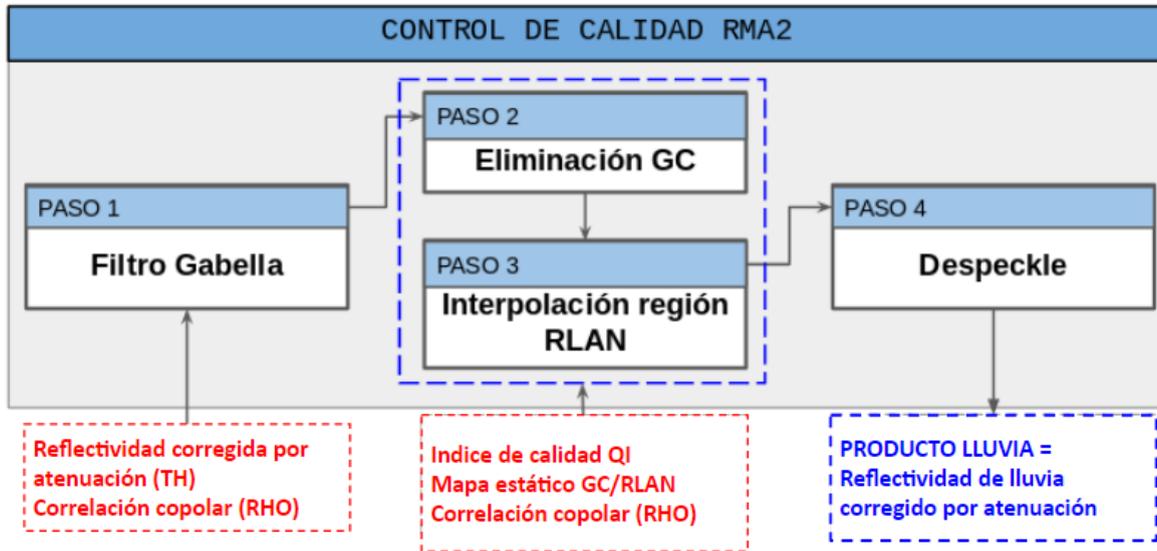


Fig. 6 Esquema general propuesto para el control de calidad de los datos de reflectividad a partir del cual se obtiene el mapa de lluvia/no lluvia y el campo de reflectividad asociada a ecos meteorológicos.

El sistema de control de calidad de datos aquí propuesto (Fig. 6) combina un algoritmo de identificación de *clutter*, índices de calidad de los datos y un mapa estático de GC. En el esquema propuesto se pueden distinguir las siguientes cuatro etapas:

1. **Filtro Gabella:** Remoción de *clutter* mediante un algoritmo de identificación que distingue entre ecos meteorológicos y *clutter* basado en la continuidad espacial del eco de radar y la relación entre un área mínima establecida y la circunferencia de las regiones de ecos contiguos. Se empleó la metodología de Gabella y Notarpietro (2002) disponible en la librería *wradlib*. Este paso devuelve un campo parcial de reflectividad con menor grado de presencia de ecos no meteorológicos sobre el cual las metodologías implementadas en las siguientes etapas son más eficientes (Fig. 7 a y b).
2. **Remoción de ecos GC:** en esta etapa se emplea el mapa estático GC/RLAN y el producto QI para conformar la máscara GC (Fig. 7d - amarillo) a partir de la cual se identifican los ecos de reflectividad a ser removidos (Fig. 8).
3. **Tratamiento de áreas afectadas por RLAN:** en esta etapa se emplea el mapa estático GC/RLAN y el producto QI para conformar la máscara RLAN (Fig. 7b - negro) a partir de la cual se identifican los ecos de reflectividad a ser sustituidos mediante interpolación polar (función disponible en la librería *wradlib*; Fig. 9).
4. **Remoción de ecos de radar aislados (despeckle):** Los residuos del procesamiento previo son identificados y eliminados empleando una función disponible en la librería *wradlib* (Fig. 9)

Previo a aplicar el control de calidad se requiere la identificación de los ecos afectados por posible presencia de ecos de tierra (GC) y/o por interferencias electromagnéticas (RLAN). Para ello se utiliza de manera combinada el índice de calidad de la reflectividad y el mapa de clutter estático GC/RLAN (Fig. 7 c y d).

Siguiendo con el esquema de control de calidad, en el paso 2, se eliminan todos aquellos píxeles del campo de reflectividad obtenido de aplicar el filtro Gabella (paso 1) clasificados como GC (Fig. 8a). El campo resultante se muestra en la Figura 8b. A continuación, en el paso 3, las áreas afectadas por interferencias (RLAN; Fig. 9a) son interpoladas en dirección azimutal (Fig. 9b). Luego, en el paso 4, se eliminan las pequeñas estructuras con un filtro de ruido o *speckle* (Fig. 9b). Por último, a partir del campo de reflectividad original, todo eco sin valor de reflectividad asociado son etiquetados como NO DATO, aquellos ecos eliminados por el control de calidad son etiquetados como NO LLUVIA, mientras que aquellos que persistieron fueron etiquetados como ecos de LLUVIA (Fig. 10).

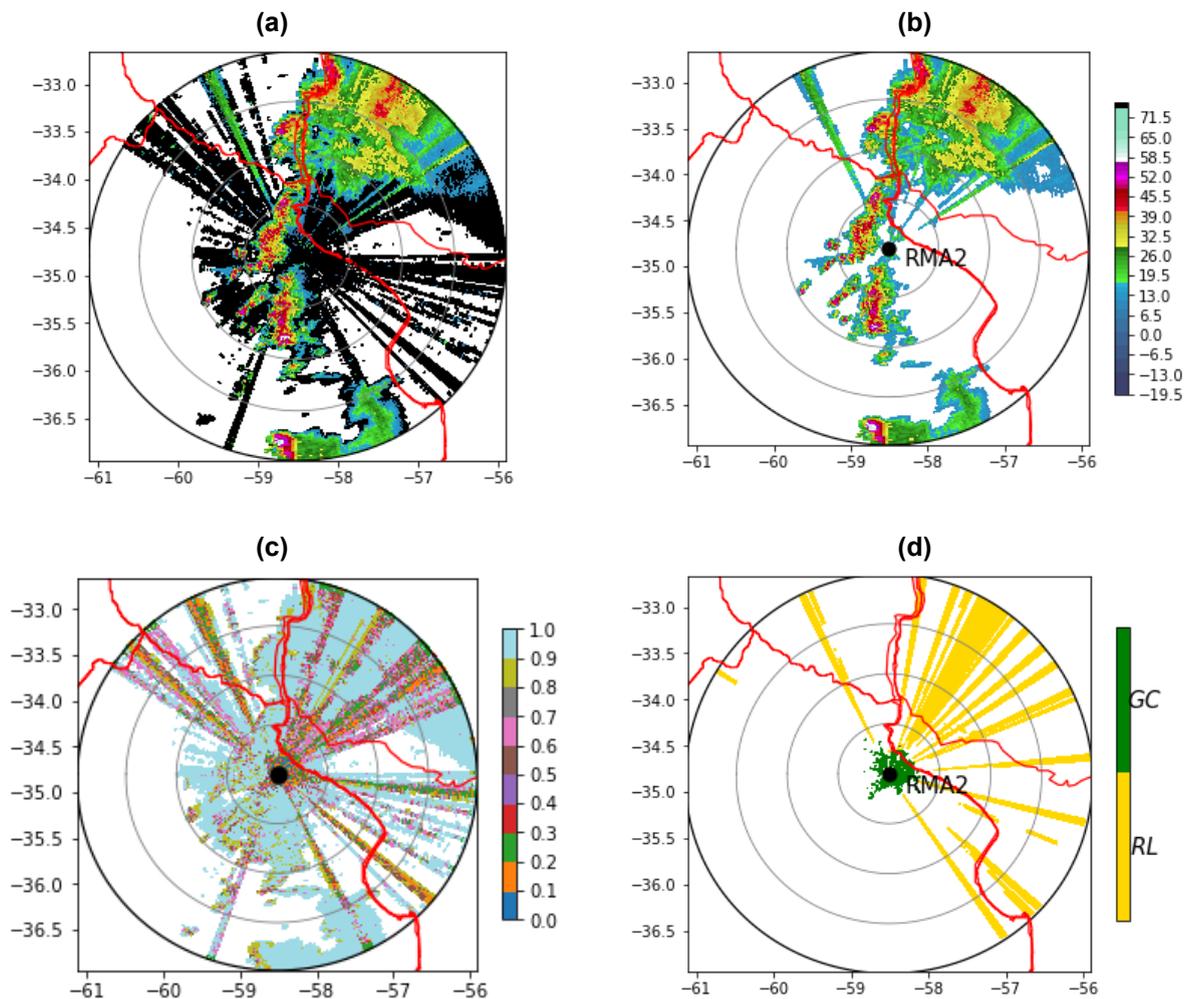


Fig. 7 (a) Campo de reflectividad corregido por atenuación (en dBZ) del día 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC) del PPI más bajo (0.5°) del radar RMA2 (Ezeiza) donde las zonas negras corresponden a ecos identificados como clutter por el filtro Gabella. (b) Campo de reflectividad (en dBZ) resultante luego de aplicar el filtro. (c) Producto QI donde los píxeles con $QI < 0.7$ se considera que están fuertemente afectados por GC/RLAN. (d) Mapa de ecos afectados por GC y RLAN.

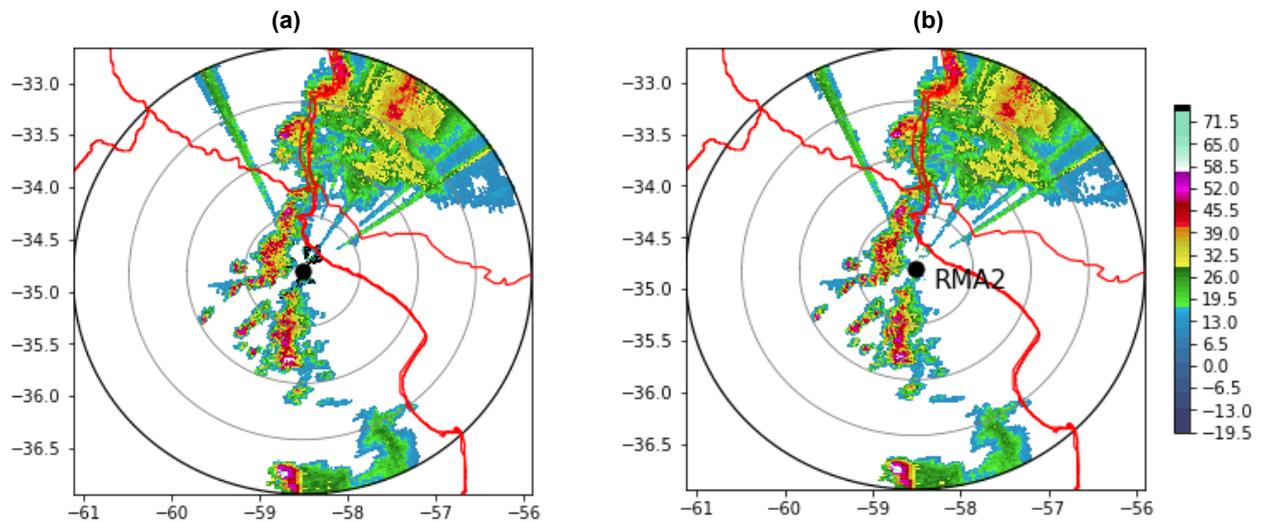


Fig. 8 Remoción de ecos GC aplicado sobre el campo de reflectividad (en dBZ) del PPI más bajo (0.5°) del radar RMA2 para el día 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC). **(a)** Campo de reflectividad (en dBZ) obtenido por el filtro Gabella donde las zonas de color negro corresponden a ecos identificados como GC. **(b)** Campo de reflectividad (en dBZ) obtenido al eliminar los ecos identificados como GC.

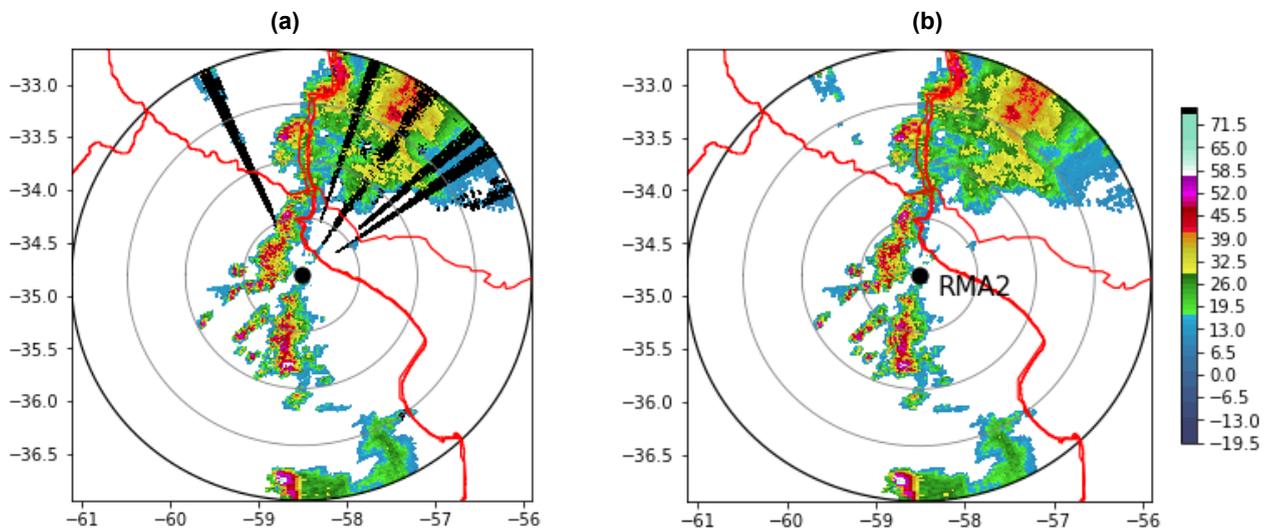


Fig. 9 Tratamiento de áreas afectadas por RLAN aplicado sobre campo de reflectividad del PPI más bajo (0.5°) del radar RMA2 para el día 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC). **(a)** Campo de reflectividad (en dBZ) obtenido a partir del filtro Gabella y la eliminación de ecos GC residuales, donde las zonas de color negro corresponden e áreas afectadas por RLAN. **(b)** Campo de reflectividad (en dBZ) obtenido al reemplazar los ecos afectados por RLAN mediante la interpolación polar de los ecos de lluvia y eliminación de pequeñas estructuras (despeckle).

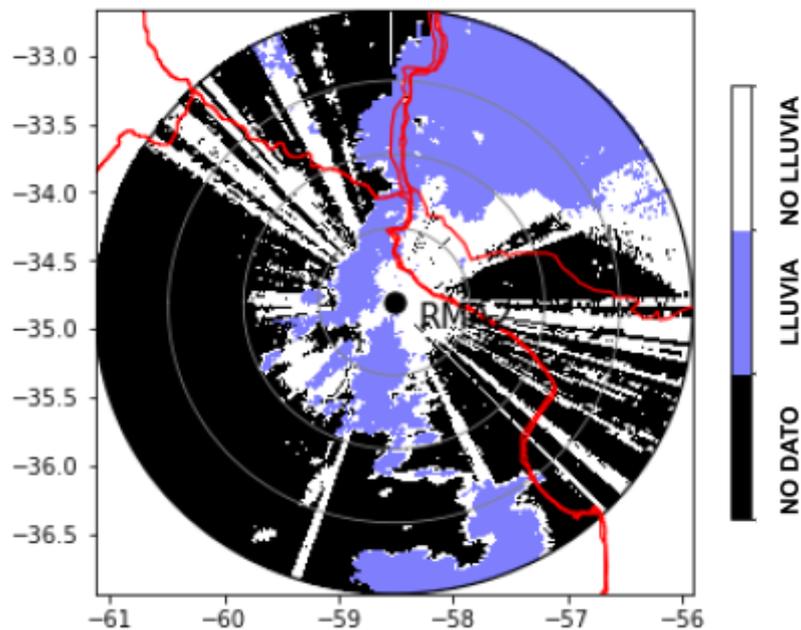


Fig. 10 Mapa lluvia / no lluvia estimado a partir del campo de reflectividad del PPI más bajo (0.5°) del radar RMA2 (Ezeiza) para el día 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC) y el campo de reflectividad obtenido como resultado del control de calidad.

3.4 Conversión a precipitación acumulada dentro del volumen escaneado

En esta etapa se obtienen los productos de precipitación acumulada RQPE-RMA (en formato PPI) asociados a cada volumen de datos del RMA. Para ello se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

- **Acondicionamiento:** los campos de reflectividades en unidades de decibelios (dBZ) son convertidos a unidades lineales [$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$] (Z).
- **Relación Z-R:** se empleó en esta etapa la relación Z-R obtenida con el disdrómetro OTT Parsivel² del Servicio Meteorológico Nacional ubicado en la Estación Meteorológica La Plata Aero. Los parámetros a y b para el trimestre de verano (Diciembre-Enero-Febrero, 2014-2018) son 379,2 y 1,47 respectivamente ($Z = a R^b$, donde Z está en unidades lineales [$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$] y R en mm/h).
- **Estimación de la precipitación integrada:** la tasa de lluvia instantánea R [mm/h] es integrada dentro de la ventana temporal de escaneo del radar obteniendo la precipitación integrada RQPE-RMA. Las ventanas temporales de escaneo pueden diferir a lo largo del tiempo debido al cambio en las estrategia (ventanas temporales del orden de 520-545 s). En la Figura 11 se observa el campo de precipitación estimado a partir del campo de reflectividad de lluvia obtenido aplicando el adecuado control de calidad de los datos. Cabe aclarar que este campo corresponde a la precipitación integrada dentro de la ventana de escaneo.

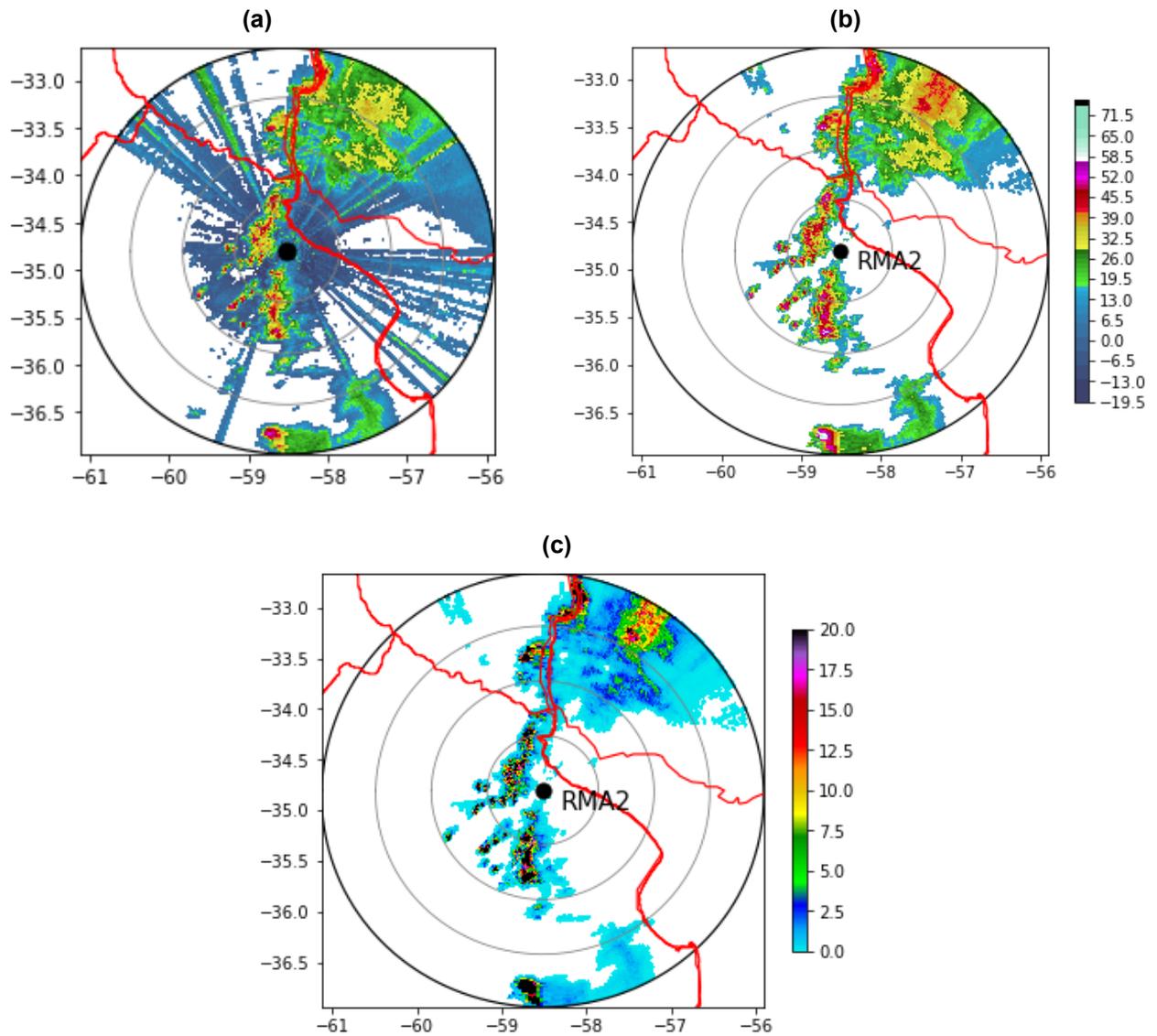


Fig. 11 (a) Campo de reflectividad (en dBZ, datos crudos) del PPI más bajo (0.5°) del radar RMA2 para el día 16 de diciembre de 2017 a las 14:20 HOA (17:20 UTC). (b) Campo de reflectividad (en dBZ) resultante luego de aplicar el control de calidad. (c) Campo de precipitación acumulada (en mm) dentro de la ventana de escaneo del radar.

3.5 Acumulación de precipitación dentro de una ventana temporal de 6 horas

El producto RQPE-RMA-6H es estimado acumulando los productos instantáneos dentro de una ventana de 6 horas. Debido a que se está utilizando un método de acumulación temporal basado en un único barrido horizontal por volumen (PPI) y que los sistemas precipitantes se desplazan entre dichos barridos, la simple acumulación de estos campos genera discontinuidades en el campo de precipitación resultante. Luego, aplicar un método de interpolación temporal es una práctica común tendiente a corregir los campos de precipitación acumulada ya que dichos huecos se vuelven particularmente significativos para ciclos largos de exploración del radar (estrategia de escaneo) en combinación con la presencia de ecos de precipitación de rápido desplazamiento. Es por esto que la metodología propuesta contempla la corrección de la precipitación acumulada por advección, basado en el método Lucas-Kanade (Anagnostou y Krajewski 1999) implementado en la librería pySTEPS. Thorndahl y otros (2014) han demostrado que la precipitación estimada a partir de radar meteorológico puede ser mejorada significativamente, en relación al bias, al aplicar una técnica de interpolación por advección.

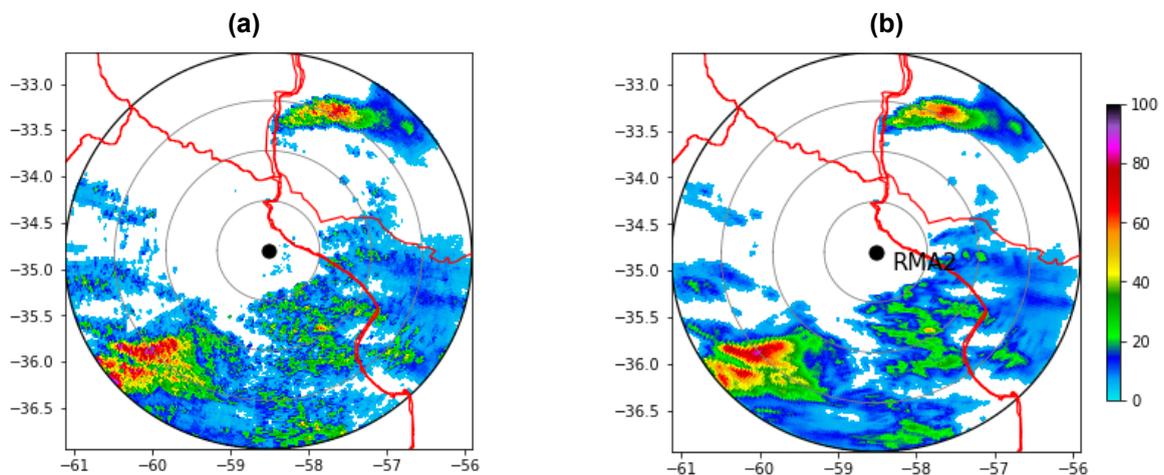


Fig. 12 Campos de precipitación acumulada (mm) en 6 horas, entre las 09:00 HOA (12:00 UTC) y las 15:00 HOA (18:00 UTC) del 16 de diciembre de 2017. (a) Campo resultante obtenido mediante suma temporal. (b) Campo resultante aplicando corrección por advección.

En la Figura 12a se muestra el producto RQPE-RMA-6H correspondiente al periodo comprendido entre las 09:00 (12:00) y las 15:00 HOA (18:00 UTC) del día 16 de diciembre de 2017 obtenido mediante suma temporal, mientras que el campo resultante aplicando la corrección por advección se presenta en la Figura 12b. El primero de ellos es el resultado de sumar píxel a píxel la precipitación total de cada volumen dentro de la ventana temporal (método clásico) mientras que la metodología propuesta acumula la precipitación mientras advecta el sistema precipitante a lo largo del campo de movimiento. Las mayores diferencias se deben a que con el método clásico se observan valores altos en un área menor (acumulación puntual) mientras que al incluir la corrección por advección la intensidad se distribuye en un área mayor. Estos detalles pueden verse en la Figura 13. Es importante mencionar que como toda metodología que utiliza

técnicas de advección, presenta inconvenientes en los bordes del dominio. Esto se puede ver en la Figura 13b hacia el sudoeste. Los vectores de movimiento que “entran” al dominio no traen precipitación y por ende el resultado es una disminución local de la precipitación.

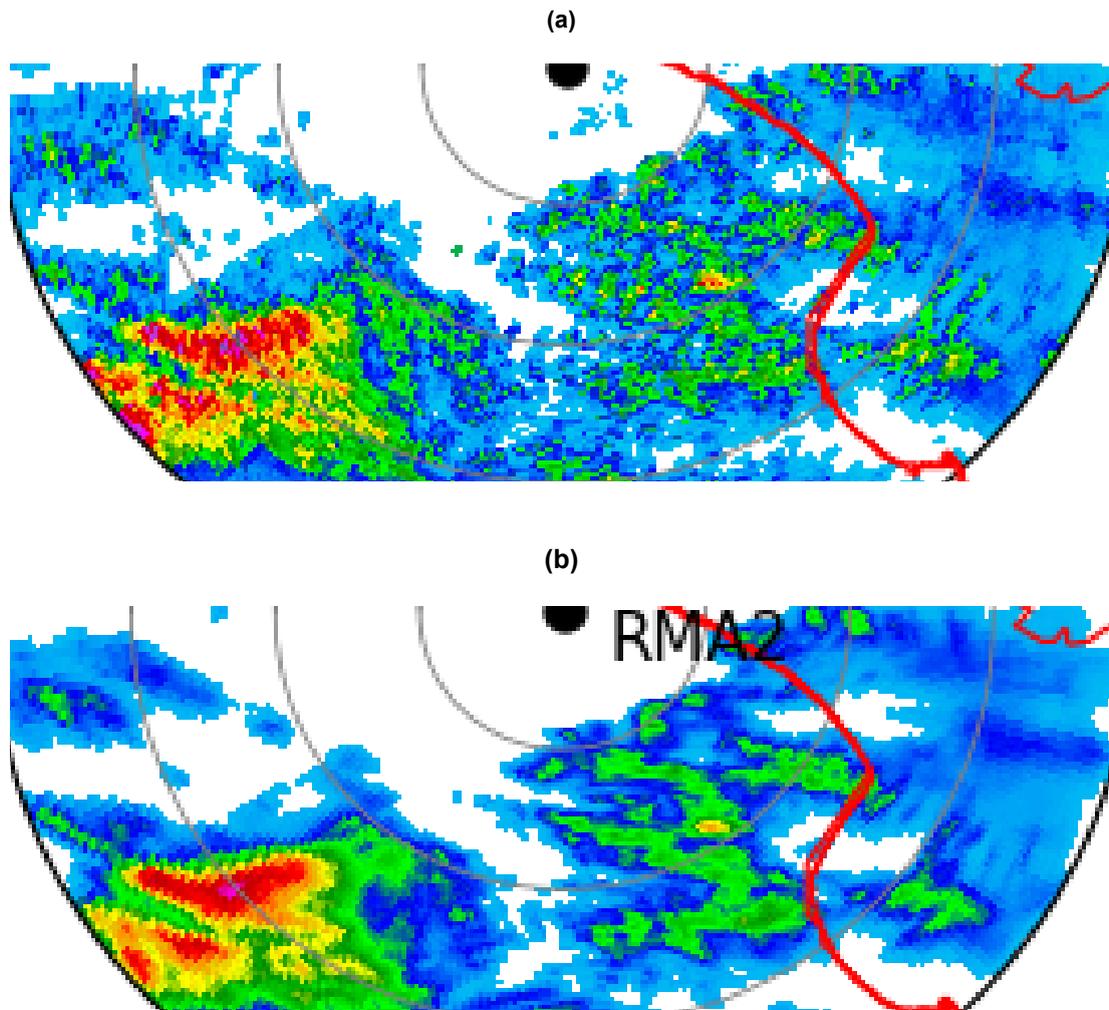


Fig. 13 Efecto de la metodología de corrección por advección sobre el RQPE-RMA2-6H estimado para el período de 6 horas a partir del 16/12/2017 a las 12:00 UTC. **(a)** Campo resultante mediante suma temporal presenta acumulación de precipitación puntual (mayores intensidades en un área menor). **(b)** El RQPE-RMA2-6H contemplando la corrección por advección presenta acumulación de precipitación a lo largo del desplazamiento de sistema precipitante (la intensidad se distribuye en un área mayor).

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este apartado se busca remarcar los inconvenientes detectados al momento de llevar a cabo la implementación operativa del flujo de trabajo propuesto a los efectos de conocer los puntos de mejora y/o dificultades encontradas al implementar el esquema en el radar meteorológico RMA2 debido a sus particularidades.

En términos generales el control de calidad de los datos es efectivo al momento de clasificar los ecos de reflectividad en lluvia/no lluvia y mitigar el efecto de la interferencia electromagnética sobre el sistema de precipitación. Esta etapa es clave para una precisa estimación de la precipitación acumulada. No obstante en la Figura 14 se muestran situaciones donde la efectividad del esquema de control de calidad se ve afectada.

Se puede observar que no siempre el esquema propuesto es capaz de mitigar/eliminar las interferencias electromagnéticas presentes en el radar RMA2 como se indica en la Figura 14a de la derecha hacia el noreste y sudeste. Por otro lado, existen inconvenientes asociados a la pérdida de información debido a la atenuación causada por lluvia intensa (Fig. 14b der., hacia el sudeste) y al bloqueo parcial de los haces (Fig. 14c der., hacia el sudoeste).

En cuanto al proceso de estimación de precipitación acumulada sobre una ventana de 6 horas, en términos generales, los campos obtenidos resultaron tener una textura adecuada y consistente con lo esperado. Lo antes expuesto se puede observar en el campo RQPE-RMA2-6H estimado para el día 16 de diciembre de 2017 a partir de las 12:00 UTC (Fig. 12 y 13). Por otro lado, si observamos los campos RQPE-RMA2-6H estimados para el día 11/12/2018 (Fig. 15) se puede apreciar claramente la presencia de efectos no deseados debido a bloqueos de haz total/parcial (Fig. 15 a-c) no topográficos (como ser desde árboles próximos a la ubicación del radar o edificaciones; ver Gimenez y otros 2021), y debido a la dificultad de mitigar/eliminar la totalidad de las interferencias electromagnéticas presentes en el radar RMA2 (Fig. 15 d).

Los resultados obtenidos son satisfactorios en este primer abordaje, siendo clave seguir trabajando en esta línea en la implementación/adaptación de diferentes metodologías que permitan mejorar los resultados obtenidos. A continuación se detallan las mejoras futuras a tener en cuenta en cada etapa del esquema general propuesto para estimar el RQPE-RMA:

- **Corrección por atenuación de lluvia:** En este esquema se ha implementado la técnica Modified Kraemer (Jacobi y Heistermann, 2016) para obtener el campo de reflectividad corregido por atenuación. A futuro se espera poder implementar la metodología propuesta por Gu y otros (2011) donde se calcula la atenuación a partir de variables polarimétricas.
- **Esquema de control de calidad:** El esquema de control de calidad propuesto resultó ser muy efectivo a la hora de discriminar ecos de lluvia de los de no lluvia. De igual manera se lograría una mejora notable al incorporar este esquema dentro del sistema de control de calidad de datos de radar operativo desarrollado en el SMN que combina velocidades de desplazamiento nulas,

estructura tridimensional de los ecos, análisis textural y variables polarimétricas (Arruti y otros 2021). Por otro lado, es recomendable abordar un estudio de sensibilidad de los parámetros del sistema empleando una serie de campos de reflectividad de lluvia previamente clasificados por un experto.

- **Estimación del campo de precipitación:** Es conveniente abordar a futuro la correcta identificación y delimitación de los procesos de lluvia separándolos en estratiforme y convectivo. Por un lado, mediante una apropiada relación Z-R, la identificación de los procesos de lluvia nos permitirá una estimación más precisa de RQPE (Wang y otros, 2019; Matrosov 2021). Por otro lado, la identificación de sistemas de precipitación estratiforme son fundamentales para abordar la corrección de la BB (Zhang y otros, 2008; Zhang y Qi, 2010). Esto último es crítico y sumamente necesario debido a que la BB ha sido encontrada como la mayor fuente de significativa sobre-estimación de lluvia (Zhang y Qi, 2010; Zhang y otros, 2012). Otro aspecto a tener en cuenta, y a los efectos de mitigar los bloqueos totales y mejorar la precisión de la estimación, sería la conformación de un HSR característico del radar meteorológico y la consecuente extrapolación vertical de la reflectividad a nivel del suelo previo a estimar la tasa de lluvia.
- **Estimación RQPE-6H:** Si bien, en esta etapa se ha implementado la corrección por advección en la acumulación de campo de precipitación, nos hemos encontrado con inconvenientes inherentes al RMA2. Es necesario a futuro complementar este esquema con un sistema que detecte los inconvenientes particulares (discontinuidad de volúmenes de datos, inconvenientes de escaneo, bloqueos totales y/o parciales, etc.) y que ajuste la salida del modelo de acuerdo a criterios que respondan de manera óptima a las necesidades del sistema hidrológico.

El esquema propuesto se ejecuta actualmente de forma experimental en tiempo real donde el proceso transcurre con relativa rapidez. Sin embargo se tuvieron que realizar adaptaciones menores para que el filtro de atenuación no retrase el producto. Durante la implementación se encontró que la mejor elevación de antena (esto es, con la menor cantidad de bloqueos parciales asociados al terreno) es la elevación de 1,3°. Actualmente se generan productos, solamente para la elevación mencionada, de precipitación instantánea y acumulados de 1, 3 y 6 horas.

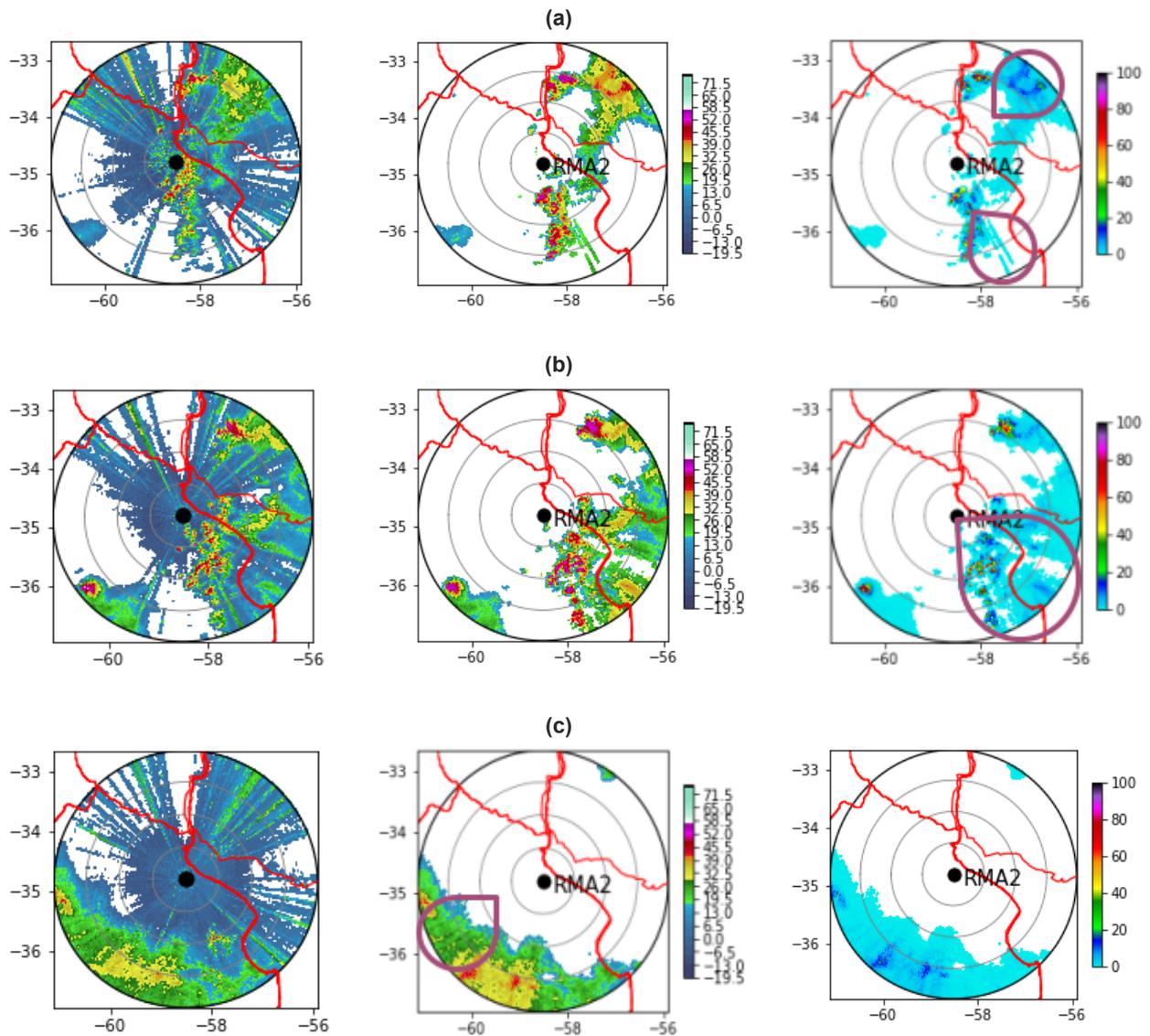


Fig. 14 Ejemplos de inconvenientes no resueltos por el esquema de control de calidad. Se muestra la elevación de antena más baja (0,5°) en diferentes situaciones donde los campos de reflectividad del radar RMA2 se ven afectados por: (a) interferencias RLAN que han sido intensificadas al corregir por atenuación y persisten, (b) atenuación por lluvia intensa, y (c) bloqueo parcial de haces por presencia de objetos cerca del radar (árboles, edificios, etc.).

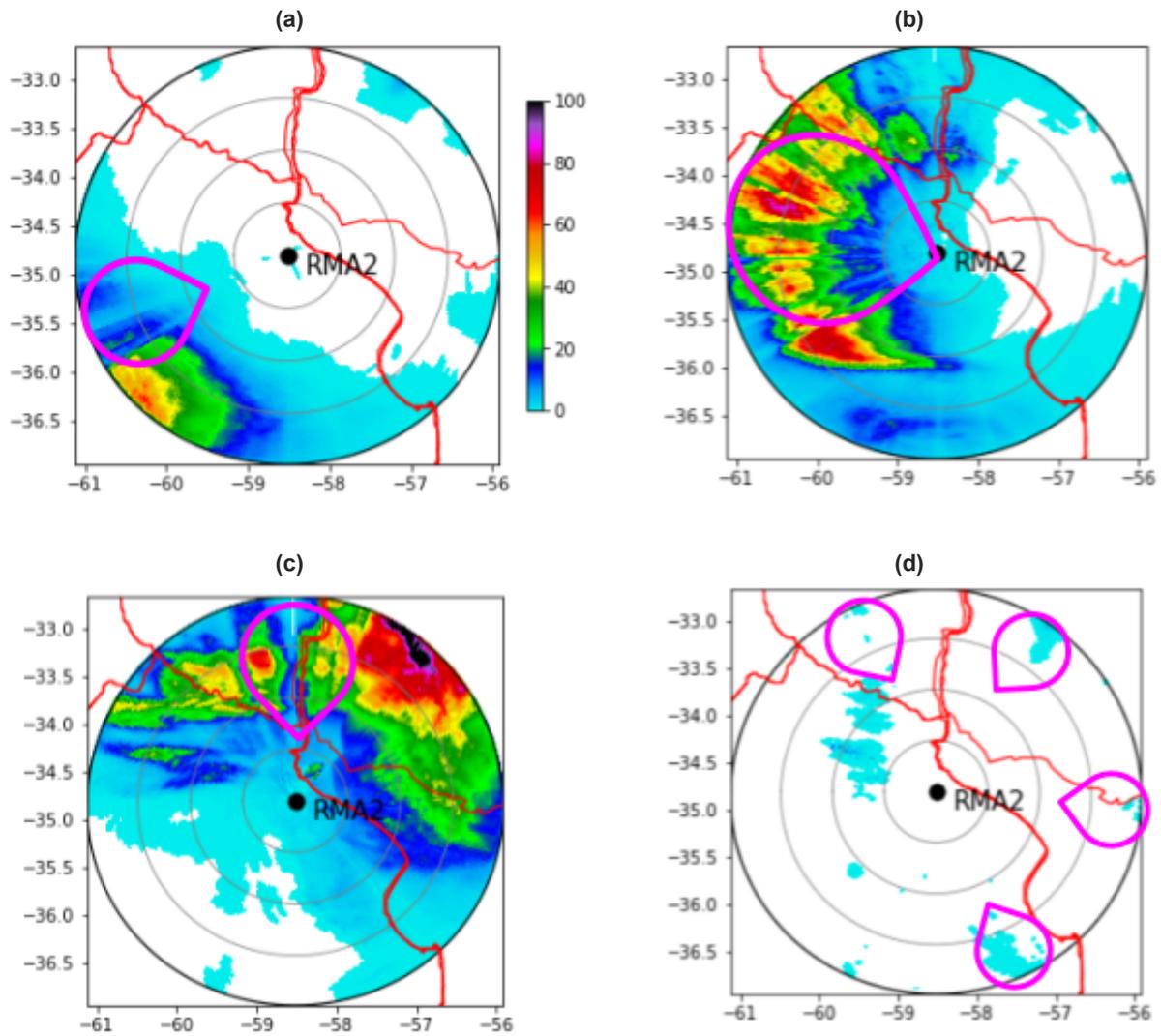


Fig. 15 Producto RQPE-RMA2-6H correspondiente al día 11 de diciembre de 2018 para diferentes periodos. (a) 0 a 6 UTC, (b) 6 a 12 UTC, (c) 12 a 18 UTC, (d) 18 a 00 UTC.

REFERENCIAS

- Anagnostou, E. N. y Krajewski, W. F., 1999: Real-time radar rainfall estimation. part i: Algorithm formulation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, 2, 189–197.
- 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.
- Bachmann, S. M., y Tracy M. D., 2009: Data driven adaptive identification and suppression of ground clutter for weather radar. 25th Conf. on Int. Interactive Information y Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., 11B.3.
- Bellon, A., F. Fabry y G. L. Austin, 1991: Errors due to space–time sampling strategies in high-resolution radar data in hydrology. Preprints, 25th Conf. on Radar Meteorology, Paris, France, Amer. Meteor. Soc., 2040–2048.
- Berkowitz, D. S., J. A. Schultz, S. Vasiloff, K. L. Elmore, C. D. Payne y J. B. Boettcher, 2013: Status of dual pol QPE in the WSR-88D network. Preprints, 27th Conf. on Hydrology, Austin, TX, Amer. Meteor. Soc., 2.2.
- Biggerstaff, M. I., y Listemaa, S. A., 2000. An improved scheme for convective/stratiform echo classification using radar reflectivity. *Journal of applied meteorology*, 39(12), 2129-2150.
- Bordoy, R., Bech, J., Rigo, T., & Pineda, N., 2010. Analysis of a method for radar rainfall estimation considering the freezing level height. *Journal of Mediterranean Meteorology & Climatology*, 7, 25-39.
- Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Balakrishnan, N., & Zrnić, D. S., 1990. An examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(6), 829-840.
- Bringi, V. N., Keenan T. D. y Chandrasekar V., 2001: Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, 1906–1915.
- Carlin, J. T., & Ryzhkov, A. V., 2019. Estimation of melting-layer cooling rate from dual-polarization radar: Spectral bin model simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(7), 1485-1508.
- Cao, Y., Su, D., Fan, X., & Chen, H., 2019. Evaluating the Algorithm for Correction of the Bright Band Effects in QPEs with S-, C-and X-Band Dual-Polarized Radars. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(1), 41-54.
- Chang, P. L., Lin, P. F., Jong-Dao Jou, B. y Zhang, J., 2009: An application of reflectivity climatology in constructing radar hybrid scans over complex terrain. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(7), 1315-1327.
- Chen, H. y V. Chandrasekar, 2015, The quantitative precipitation estimation system for Dallas–Fort Worth (DFW) urban remote sensing network. *Journal of Hydrology*, 531, 259-271.
- Cifelli, R., Chandrasekar, V., Lim, S., Kennedy, P. C., Wang, Y., & Rutledge, S. A., 2011. A new dual-polarization radar rainfall algorithm: Application in Colorado precipitation events. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(3), 352-364.

- Dixon, M. J., Wilson, J. W., Weckwerth, T. M., Albo, D. y Thompson, E. J., 2015: A dual-polarization QPE method based on the NCAR Particle ID algorithm Description y preliminary results. In 37th Conf. on Radar Meteorology.
- Fulton, R., J. Breidenbach, D.-J. Seo, D. Miller, y T. O'Bannon, 1998: The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea. Forecasting*, 13, 377–395.
- Gabella, M. y R. Notarpietro, 2002: Ground clutter characterization and elimination in mountainous terrain. Preprints, Second European Conf. on Radar Meteorology, Delft, Netherlands, European Meteorological Society and Copernicus Gesellschaft mbH, 305–311.
- German, U., G. Galli, M. Boscacci, M. Bolliger, and M. Gabella, 2004: Quantitative precipitation estimation in the Alps: Where do we stand? Proc. Third European Conf. on Radar Meteorology and Hydrology (ERAD), Visby, Sweden, Copernicus GmbH, 2–6.
- German, U., A. Hering, M. Berenguer Ferrer, D. Sempere Torres y G. Salvadé, 2007: Ensemble radar precipitation estimation for nowcasting and hydrology in the Alps. A: MAP D-PHASE Scientific Meeting. "1st MAP D-PHASE Scientific Meeting". Vienna: 2006, p. 1-4.
- Giangrande, S. E., & 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 de la red de radares SINARAME. Nota Técnica SMN 2021-103.
- Gou, Y., Chen, H. y Zheng, J., 2019: An improved self-consistent approach to attenuation correction for C-band polarimetric radar measurements and its impact on quantitative precipitation estimation. *Atmospheric Research*, 226, 32-48.
- Gourley, J. J., Tabary P., y Parent-du-Chatelet J., 2007: A fuzzy logic algorithm for the separation of precipitating from nonprecipitating echoes using polarimetric radar observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24, 1439–1451, doi:10.1175/JTECH2035.1.
- Gray, W. y Larsen H., 2005: Radar rainfall estimation in the New Zealand context. *Atmos. Sci. Lett.*, 6, 31–34, doi:10.1002/asl.87.
- Grecu, M. y Krajewski W. F., 2000: An efficient methodology for detection of anomalous propagation echoes in radar reflectivity data using neural networks. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17, 121–129.
- Gu, J.-Y., Ryzhkov, A., Zhang, P., Neilley, P., Knight, M., Wolf, B., y Lee, D.-I.(2011). Polarimetric attenuation correction in heavy rain at c band. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(1):39–58.
- Hall, W., Rico-Ramirez, M. A., & Krämer, S., 2015. Classification and correction of the bright band using an operational C-band polarimetric radar. *Journal of Hydrology*, 531, 248-258.
- Heistermann, M., Jacobi, S., y Pfaff, T., 2013: Technical note: An open source library for processing weather radar data (wradlib). *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2):863–871.
- Helmus, J. J. y Collis, S. M., 2016: The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a Library for Working with Weather Radar Data in the Python Programming Language. 4(1), p.e25. DOI: <http://doi.org/10.5334/jors.119>.
- Jacobi, S. y M. Heistermann, 2016: Benchmarking attenuation correction procedures for six years of single-polarized c-band weather radar observations in south-west germany. *Geomatics, Natural Hazards y Risk*, 7(6):1785–1799.

- Jorgensen, D. P. y P. T. Willis, 1982: A Z-R relationship for hurricanes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 21(3), 356-366.
- Kirstetter, P. E. A. Hervé, G. Delrieu y B. Boudevillain, 2010: Identification of Vertical Profiles of Reflectivity for Correction of Volumetric Radar Data Using Rainfall Classification. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 49, 2167–2180.
- Krajewski, W. F., Ciach, G. J., y Habib, E., 2003. An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. *Hydrological sciences journal*, 48(2), 151-162.
- Lakshmanan, V., Fritz A., Smith T., Hondl K., y Stumpf G. J., 2007: An automated technique to quality control radar reflectivity data. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 288–305, doi:10.1175/JAM2460.1.
- Lakshmanan, V., Zhang J., y Howard K., 2010: A technique to censor biological echoes in weather radar images. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 453–462, doi:10.1175/2009JAMC2255.1.
- Lim, S., Chandrasekar V., y Bringi V. N., 2005: Hydrometeor classification system using dual-polarization radar measurements: Model improvements y in situ verification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43, 792–801, doi:10.1109/TGRS.2004.843077.
- Liu, C. y W. F. Krajewski, 1996: A Comparison of Methods for Calculation of Radar-rainfall Hourly Accumulations. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 32(2), 305-315.
- Marshall, J. S., R. C. Langille y W. M. Palmer, 1947: Measurement of rainfall by radar. *Journal of Meteorology*, 4(6), 186–192.
- Marshall, J. S. y W. M. Palmer, 1948: The distribution of rain-drops with size. *Journal of Meteorology*, 5(4), 165-166.
- Marzano, F. S., D. Scaranari, M. Montopoli y G. Vulpiani, 2008: Supervised classification and estimation of hydrometeors from C-band dual-polarized radars: A Bayesian approach. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46, 85–98, doi:10.1109/TGRS.2007.906476.
- Matrosov, S. Y., 2021: Distinguishing between Warm y Stratiform Rain Using Polarimetric Radar Measurements. *Remote Sensing*, 13(2), 214.
- Nielsen, J. E., S. Thorndahl y M. R. Rasmussen, 2014: A numerical method to generate high temporal resolution precipitation time series by combining weather radar measurements with a nowcast model. *Atmospheric research*, 138, 1-12.
- Park, H. S., Ryzhkov A. V., Zmić D. S., y Kim K.-E., 2009: The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description y application to an MCS. *Wea. Forecasting*, 24, 730–748, doi:10.1175/2008WAF2222205.1
- Pulkkinen, S., Nerini, D., Pérez Hortal, A. A., Velasco-Forero, C., Seed, A., Ger-mann, U., y Foresti, L., 2019: Pysteps: an open-source python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1. 0). *Geoscientific Model Development*, 12(10):4185–4219.
- Qi, Y. y J. Zhang, 2013: Correction of radar QPE errors associated with partial bright band observations near the ground. *J. Hydrometeor.*, 14, 1933–1943, doi:10.1175/JHM-D-13-040.1.
- Qi, Y., J. Zhang y P. Zhang, 2013a: A real-time automated convective and stratiform precipitation segregation algorithm in native radar coordinates. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* doi:10.1002/qj.2095.

- 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. Hydrometeorol.*, 14, 1672–1682.
- Qi, Y., J. Zhang, P. Zhang y Q. Cao, 2013c: VPR correction of bright band effects in radar QPEs using polarimetric radar observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 3627–3633, doi: 10.1002/jgrd.50364.
- Rosenfeld, D., D. B. Wolff y D. Atlas, 1993: General probability-matched relations between radar reflectivity y rain rate. *J. Appl. Meteorol.*, 32(1), 50–72.
- Sánchez-Diezma, R., Zawadzki, I., y Sempere-Torres, D., 2000. Identification of the bright band through the analysis of volumetric radar data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D2), 2225-2236.
- Seo, B. C. W. F. Krajewski, 2015: Correcting temporal sampling error in radar-rainfall: Effect of advection parameters and rain storm characteristics on the correction accuracy. *J. Hydrology*, 531, 272-283.
- Steiner, M., Houze Jr, R. A., & Yuter, S. E., 1995. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 34(9), 1978-2007.
- Szturc, J., K. Ośródką y A. Jurczyk, 2011: Quality index scheme for quantitative uncertainty characterization of radar-based precipitation. *Meteorological Applications*, 18(4), 407–420.
- Tabary, P., 2007: The New French Operational Radar Rainfall Product. Part I: Methodology. *Weather Forecast*, 22, 393–408.
- Tang, L., J. Zhang, Y. Qi, C. Langston, and K. W. Howard, 2013: Non-standard blockage mitigation for national radar QPE products. 36th Conf. on Radar Meteorology, Breckenridge, CO, Amer. Meteor. Soc., 354.
- Testud, J., Oury S., Black R. A., Amayenc P. y Dou X., 2001: The concept of “normalized” distribution to describe raindrop spectra: A tool for cloud physics and cloud remote sensing. *J. Appl. Meteorol.*, 40, 1118–1140.
- Thorndahl, S., J. E. Nielsen y M. R. Rasmussen, 2014: Bias adjustment and advection interpolation of long-term high resolution radar rainfall series. *J. Hydrology*, 508, 214-226.
- Thurai, M., V. N. Bringi y P. T. May, 2010: CPOL radar-derived drop size distribution statistics of stratiform y convective rain for two regimes in Darwin, Australia. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 932–942.
- Ulbrich, C. W. y D. Atlas, 2002: On the separation of tropical convective y stratiform rains. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 41, 188–195.
- Vaccarone, M., C. V. Chandrasekar, R. Bechini y R. Cremonini, 2019: Survey on Electromagnetic Interference in Weather Radars in Northwestern Italy. *Environments*, 6(12), 126.
- Villarini, G. W. F. Krajewski, 2010: Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall. *Surveys in Geophysics*, 31(1), 107-129.
- Vieux, B. E. y P. B. Bedient, 1998: Estimation of rainfall for flood prediction from WSR-88D reflectivity: a case study, 17-18 October 1994. *Weather and Forecasting*, 13(2), 407–415.
- Virtanen, P. y co-autores, 2019: SciPy 1.0 – Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. arXiv e-prints, p. arXiv:1907.10121.

- Vulpiani, G., Marzano F. S., Chandrasekar V. y Lim S., 2005: Constrained iterative technique with embedded neural network for dual-polarization radar correction of rain path attenuation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43, 2305–2314.
- Vulpiani, G., P. Tabary, J. Parent du Châtelet y F. S. Marzano, 2008: Comparison of advanced radar polarimetric techniques for operational attenuation correction at C band. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(7), 1118-1135.
- Vulpiani, G., M. Montopoli, L. Delli Passeri, A. Gioia, P. Giordano y F. S. Marzano, 2012: On the use of dual-polarized C-band radar for operational rainfall retrieval in mountainous areas. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 51, 405–425.
- Wang, H., Ran, Y., Deng, Y., y Wang, X., 2017. Study on deep-learning-based identification of hydrometeors observed by dual polarization Doppler weather radars. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017(1), 1-9.
- Wang, Y., Tang, L., Chang, P. L. y Tang, Y. S., 2019: Separation of convective y stratiform precipitation using polarimetric radar data with a support vector machine method. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1-23.
- Willie, D., H. Chen, V. Chandrasekar, R. Cifelli, C. Campbell, R. Reynolds, S. Matrosov y Y. Zhang, 2016: Evaluation of Multisensor Quantitative Precipitation Estimation in Russian River Basin. *J. Hydrol. Eng.*, 21, 1–11.
- Wu, W., Zou, H., Shan, J. y Wu, S., 2018: A Dynamical Z-R Relationship for Precipitation Estimation Based on Radar Echo-Top Height Classification. *Advances in Meteorology*, vol. 2018, Article ID 8202031, 11 pages.
- Zhang, J., S. Wang y B. Clarke, 2004: WSR-88D reflectivity quality control using horizontal y vertical reflectivity structure. 11th Conf. on Aviation, Range, y Aerospace Meteorology, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc., 5.4.
- Zhang, J., Langston, C., Howard, K., 2008. Brightband identification based on vertical profiles of reflectivity from the WSR-88D. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 25, 1859–1872.
- Zhang, J. y Qi, Y., 2010: A real-time algorithm for the correction of brightband effects in radar-derived QPE. *Journal of Hydrometeorology*, 11(5), 1157-1171.
- Zhang, J., Qi, Y., Kingsmill, D., & Howard, K., 2012. Radar-based quantitative precipitation estimation for the cool season in complex terrain: Case studies from the NOAA Hydrometeorology Testbed. *Journal of Hydrometeorology*, 13(6), 1836-1854.
- Zhang, J. y co-autores, 2014: Initial operating capabilities of quantitative precipitation estimation in the multi-radar multi-sensor system. 28th Conf. on Hydrology, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., 5.3.
- Zhang, J., y co-autores, 2016: Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities. *Bull. Am. Metereol. Soc.*, 97, 621–638.
- Zhuang, W. y L. Liu, 2012: A reflectivity climatology algorithm for hybrid scans and its application to radar coverage over the Tibetan Plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, 26(6), 746-757.
- Zhuang, W., L. P. Liu, and Z. Q. Hu, 2013: Application of bright band identification and correction in radar-based QPE over Tibetan Plateau. *Meteorological Monthly*, 39, 1004–1013.
- Zrníc, D. S., & Ryzhkov, A. (1996). Advantages of rain measurements using specific differential phase. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13(2), 454-464.

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 (lvidal@smn.gov.ar) o Martin 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).