

MÉTODO DE CORRECCIÓN DE ATENUACIÓN PARA EL RADAR DE BANDA X SOPHY

Carlos Del-Castillo Velarde¹, Ricardo Reinoso-Rondinel^{2,3}, Danny E. Scipion¹ y Yamina Silva Vidal¹

¹ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

² Civil Engineering, Hydraulics & Geotechnics, KU Leuven, Leuven, Belgium

³ Royal Meteorological Institute of Belgium, Brussels, Belgium

Palabras clave: Banda X, Radar SOPHy, atenuación, meteorología

Citar como Del-Castillo, C., Reinoso-Rondinel, R., Scipion, D., & Silva Vidal, Y. (2024). Método de corrección de atenuación para el radar de banda X SOPHy. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 07, págs. 15-19.

¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para los tomadores de decisiones?

Los radares meteorológicos son una potente herramienta para fortalecer la gestión del riesgo de desastres y los recursos hídricos, especialmente en el contexto del fenómeno El Niño. Sin embargo, es necesaria la investigación y desarrollo para mejorar la exactitud de los datos producidos, como se muestra en el caso de correcciones de atenuación aplicadas al radar SOPHy, desarrollado por el IGP, durante las precipitaciones registradas en la región Piura. Integrar estos datos en la planificación y respuesta ante emergencias puede reducir considerablemente los impactos de eventos climáticos extremos, especialmente en el marco de los Sistemas de Alerta Temprana.

Resumen

El radar SOPHy (Scanning-system for Observation of Peruvian Hydrometeorological) es el primer radar meteorológico de banda X (9.345 GHz) y doble polarización construido en el Perú por el Instituto Geofísico del Perú. Este radar tiene como objetivo investigar la microfísica involucrada en las precipitaciones sólidas y líquidas, así como las condiciones atmosféricas en el Perú, monitorear las precipitaciones y, a la par, ser una herramienta sustancial para la prevención de desastres. Para lograr estos objetivos, es necesario que las mediciones del radar SOPHy pasen por un control de calidad previo que corrija la atenuación causada por las gotas de lluvias intensas. En este estudio se evalúa el impacto de la corrección de la atenuación en dos

eventos de lluvias ocurridos en Piura. Los resultados preliminares muestran una ligera mejora al aplicar la corrección; sin embargo, para valores de reflectividad menores a 20 dBZ, la atenuación específica es sobreestimada.

1. Introducción

Los radares de banda X tienen la característica de ser compactos; además de ello, trabajan con un bajo consumo energético y poseen una alta resolución temporal. A pesar de todos estos atributos, un radar de este tipo tiene como uno de sus principales desafíos el alto grado de atenuación de la señal en un entorno de lluvias intensas, donde la señal puede ser atenuada entre 7 y 10 veces más que en los radares de banda C

y S , respectivamente (Wang et al., 2020). Los radares de doble polarización, a diferencia de los radares convencionales, tienen la capacidad de identificar los tipos de hidrometeoros con base en su tamaño y forma, y reducir los efectos de la atenuación en las mediciones mediante técnicas avanzadas de corrección. Si bien el radar SOPHY es un radar de doble polarización, actualmente solo está disponible una polarización debido a problemas técnicos, lo que limita el número de métodos para corregir la atenuación. Por tal motivo, en esta investigación se busca proponer una metodología que permita corregir la atenuación utilizando una única polarización.

2. Datos

Para esta investigación se usaron los datos del disdrómetro óptico PARSIVEL 2, instrumento que permite medir la distribución de tamaño de gotas (DSD, por sus siglas en inglés) y derivar variables de radar, como reflectividad, con una resolución temporal de 1 minuto (Valdivia et al., 2020; Villalobos et al., 2020). El disdrómetro se encuentra en el Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), ubicado en el Observatorio Geofísico de Huancayo del IGP, en el departamento Junín ($12^{\circ}02'18''S$, $75^{\circ}19'22''W$), y los datos abarcan desde 2018 hasta 2023. El radar SOPHY operó entre el 23 de diciembre de 2023 y el 21 de abril de 2024 en el departamento de Piura ($5^{\circ}10'02''S$, $80^{\circ}41'23''W$), y realizó escaneos de tipo PPI (Plan Position indicator, por sus siglas en inglés) a elevaciones de 1.4° , 3.2° , 5° y 9° . Las especificaciones técnicas se encuentran detalladas en Espinoza et al. (2021).

3. Metodología

Uno de los primeros y más conocidos métodos para corregir la atenuación es el propuesto por Hitschfeld y Bordan (1954). Su solución consiste en calcular la atenuación integrada en el trayecto (Path-Integrated Attenuation-PIA, Ec. 1) mediante la ecuación (2), donde los parámetros α y β son constantes. Finalmente, la reflectividad se corrige utilizando la ecuación (3).

$$PIA = 2 \int_0^r A(s) ds \quad (1)$$

$$A = \alpha Z^{\beta} \quad (2)$$

$$10 \log_{10}(Z_{\text{corregido}}(r)) = 10 \log_{10}(Z_{\text{medido}}(r)) + PIA \quad (3)$$

Donde Z es la reflectividad en mm^6m^{-3} ; A , la atenuación específica en dB/km ; PIA , la atenuación integrada en el trayecto en dB y, finalmente, r es el rango.

A principios del siglo XXI, Krämer y Verworn (2009), y posteriormente, Jacobi et al. (2016), modificaron la solución de Hitschfeld y Bordan (en adelante HB) con dos ajustes para evitar las inestabilidades de este método. El primero consistió en ajustar los parámetros α y β mediante un cálculo iterativo a partir de un rango de valores, mientras que el segundo en limitar el PIA y la reflectividad corregida a 20 dB y 59 dBZ , respectivamente. Al día de hoy, el paquete de Python wradlib implementa la solución de Krämer y Jacobi mediante la función `atten.correct_attenuation_constrained`, donde los valores máximos y mínimos de los parámetros (α y β) fueron determinados mediante las ecuaciones (4) y (5) (Overeem et al., 2021):

$$\alpha_{\min, \max} = \hat{\alpha} \exp(\pm 2\sigma_{\epsilon_{\log(\alpha)}}) \quad (4)$$

$$\beta_{\min, \max} = \hat{\beta} \pm 2\sigma_{\epsilon_{\beta}} \quad (5)$$

$$\epsilon_{\log(\alpha)} = \frac{\log(A) - \log(\hat{\alpha}Z^{\hat{\beta}})}{2} \quad (6)$$

$$\epsilon_{\beta} = \frac{\log(A) - \log(\hat{\alpha}Z^{\hat{\beta}})}{2\log(Z)} \quad (7)$$

Donde σ es la desviación estándar, y $\hat{\alpha}$ y $\hat{\beta}$ denotan los valores promedios de α y β . Las variables de radar (Z y A) fueron simuladas a partir de las mediciones del disdrómetro, siguiendo la metodología de Park et al. (2005) y Gorgucci y Chandrasekar (2005).

4. Resultados

En la Figura 1 se muestra un gráfico de dispersión entre la atenuación específica y la reflectividad usando los datos del disdrómetro. Mediante la regresión lineal se determinó que los parámetros de α y β correspondientes son 0.000162 y 0.719 , respectivamente (línea sólida negra), para $Z > 10 \text{ dBZ}$, con el objetivo de omitir los valores menos significativos. Las líneas punteadas rojas representan el límite máximo y mínimo determinados en función de las incertidumbres $\epsilon_{\log(\alpha)}$ y ϵ_{β} . Los valores mínimos y máximos estimados para α fueron $1.403\text{e-}4$ y

$1.875e-4$, respectivamente, y para β fueron de 0.615 y 0.823 . Para corroborar que los límites definidos son válidos para Piura se superpusieron los puntos de dispersión de las mediciones realizadas durante el mes de febrero de 2024. Así, se observó que los eventos ocurridos durante este mes se ajustan a lo estimado para Huancayo. Los resultados obtenidos fueron muy similares a investigaciones previas, donde el parámetro α suele variar desde $9.78e-5$ hasta $1.08e-4$, y el parámetro β desde 0.757 hasta 0.9 (Park et al., 2005; Das et al., 2020; Burgemeister et al., 2023). El parámetro α se caracteriza por tener mayor variabilidad debido a su dependencia con el DSD (Das et al., 2020). Por otro lado, el parámetro β depende principalmente de la temperatura, por lo que sus valores son más estables (Park et al., 2005).

Se analizaron dos eventos de lluvia ocurridos el 5 y 20 de febrero de 2024, en el departamento de Piura, para medir la efectividad de la corrección de atenuación. Se gráfico la dispersión de A-Z antes y después de la corrección (Figura 2) para todos

los píxeles disponibles de cada evento cuya altura fuese menor a 4000 metros, con el fin de considerar únicamente las precipitaciones en fase líquida.

Durante el evento del 5 de febrero (Figuras 2a, c), se observó que la relación A-Z estimada para SOPHy se ajusta a los parámetros α_{max} y β_{max} . Al aplicarse la corrección de atenuación, el error se redujo de 1.05 dBZ a 0.86 dBZ, mientras que el sesgo de 1.28% a -0.51% , mostrando una mejora considerable para reflectividades mayores a 30 dBZ. Para reflectividades menores a 20 dBZ, la atenuación no es tan severa, por lo que apenas se aprecia variación entre los valores antes y después de la corrección; sin embargo, en este rango, la atenuación específica tiende a ser sobreestimada, alejándose de la curva de ajuste.

Por su parte, el evento del 20 de febrero (Figuras 2b, d) se ajusta a los parámetros máximos y centrales ($\alpha_{max}, \beta_{max}, \hat{\alpha}$ y $\hat{\beta}$) y, en algunos casos, a los parámetros mínimos. La alta variabilidad es consecuencia del tipo de evento de lluvia: el 20 de febrero fue uno de

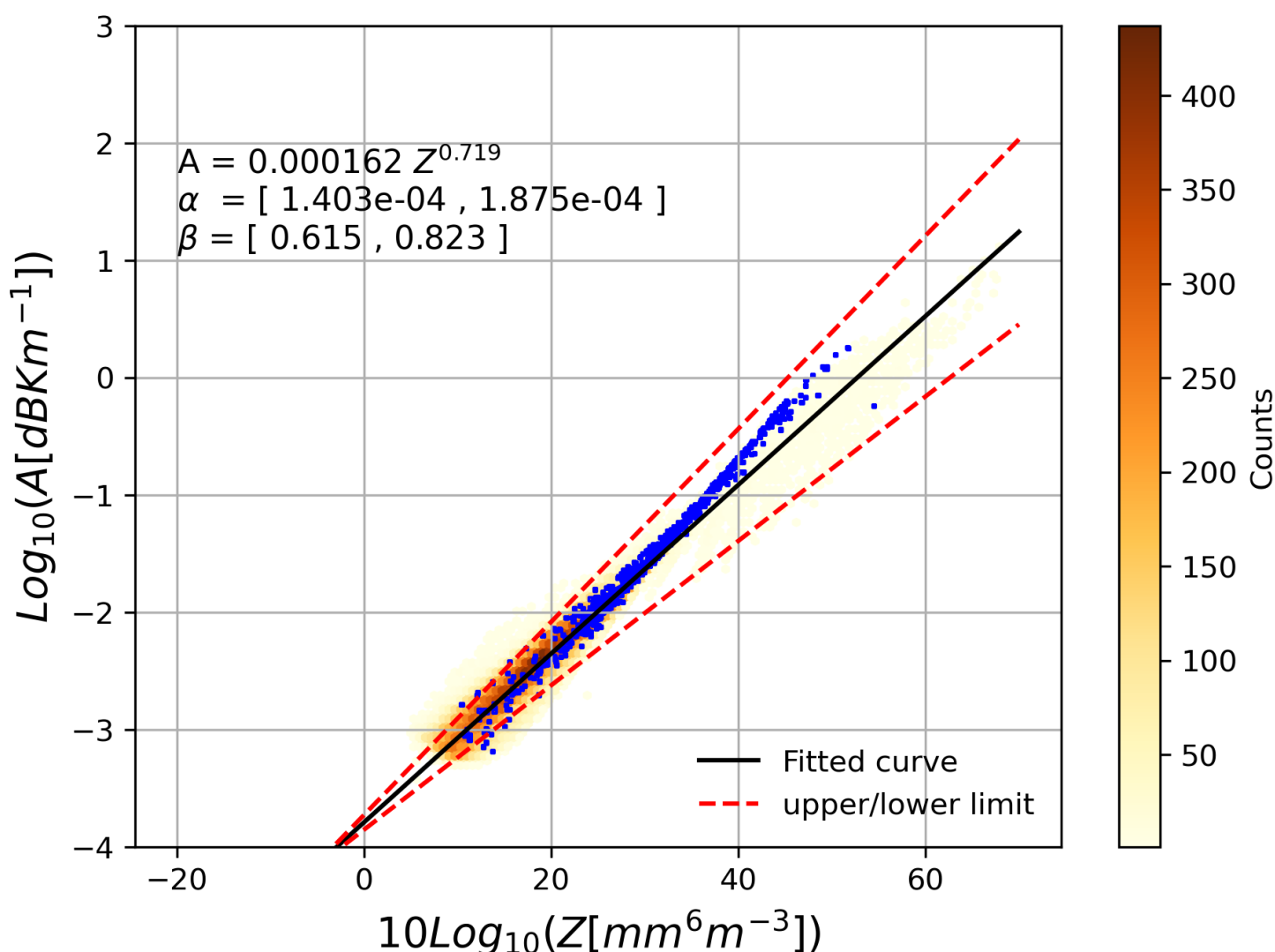


Figura 1. Gráfico de dispersión de la atenuación específica y la reflectividad derivada a partir de datos de disdrómetro. La línea sólida negra representa la curva determinada por la regresión lineal, mientras que las líneas punteadas rojas muestran las curvas determinadas mediante los valores máximos y mínimos de los parámetros α y β . Los puntos azules corresponden a las mediciones de disdrómetro realizadas en Piura el 5 y 20 de febrero de 2024.

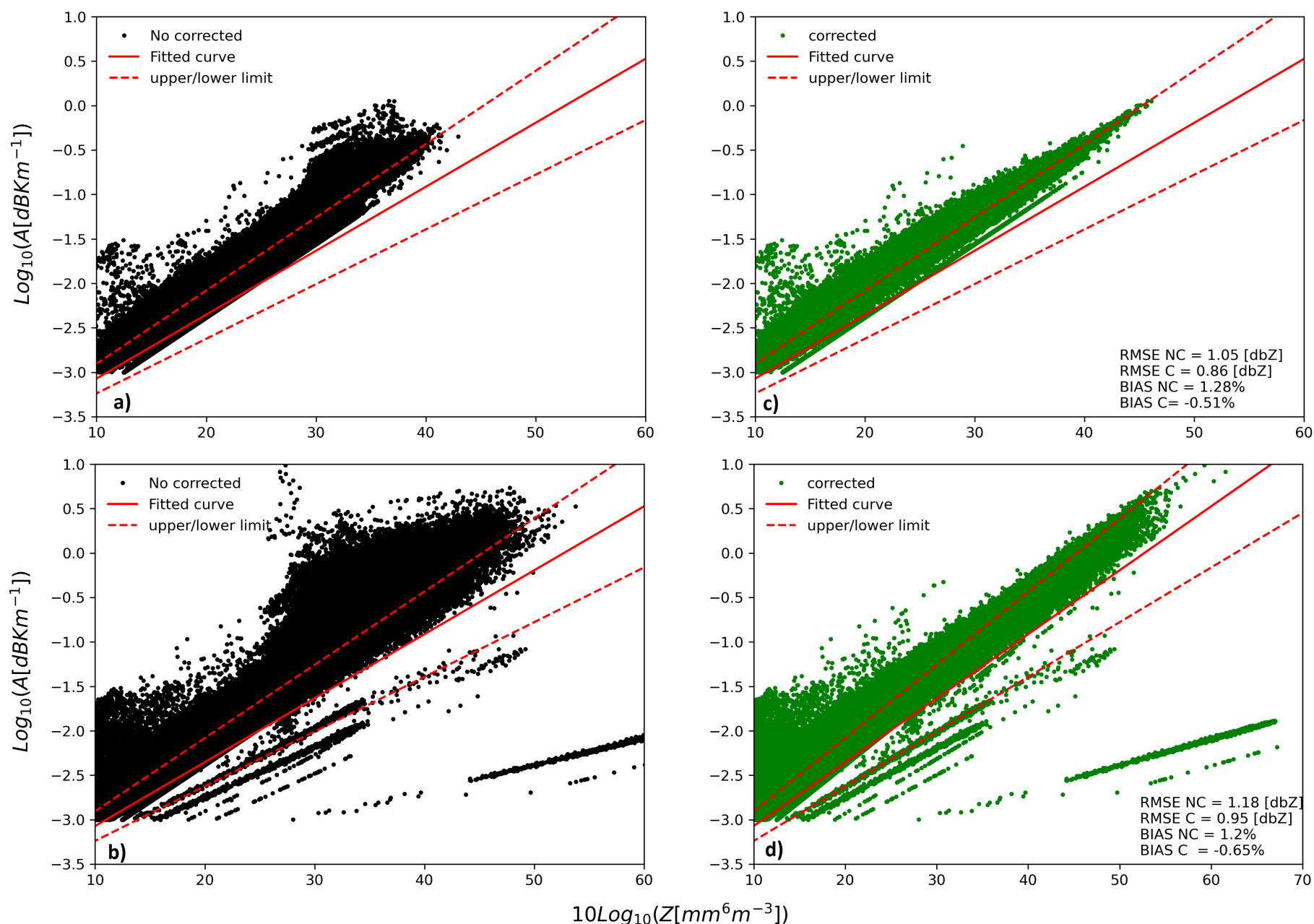


Figura 2. Gráfico de dispersión de la atenuación específica y la reflectividad derivada a partir de todos los píxeles de los PPI a 1.4°, 3.2°, 5° y 9°, con alturas menores a 4000 m para los eventos del 5 de febrero (a, c) y 20 de febrero (b, d). Los puntos negros son los píxeles sin corregir; los puntos verdes, los píxeles corregidos; la línea sólida roja, la línea de ajuste y, finalmente, las líneas punteadas rojas indican los límites máximos y mínimos.

tipo convectivo, a diferencia del 5 de febrero que fue de tipo estratiforme. Durante este evento, se observó que, para valores de reflectividad menores a 20 dBZ, la atenuación específica es sobreestimada, al igual que durante el 5 de febrero.

5. Conclusiones

La corrección de atenuación aplicada mostró un buen desempeño para valores de reflectividad mayores a 30 dBZ; sin embargo, la atenuación específica estimada para valores de reflectividad menores a 20 dBZ está sobreestimada. Esta sobreestimación de la atenuación específica podría originar errores en la estimación del PIA y, al mismo tiempo, conducir a una sobreestimación de la precipitación ligera, especialmente si se emplea la ecuación A-R ($A = aR^b$).

Por tal motivo, sería necesario ajustar los parámetros de A-Z y disponer de un periodo de validación más amplio para mejorar la corrección de la atenuación. Además, se debe considerar que los parámetros de la atenuación podrían ser diferentes para Piura y Huancayo, por lo cual es importante calibrar la atenuación con datos específicos para cada región.

Referencias

Burgemeister, F., Clemens, M., & Ament, F. (2023). Reanalysis of multi-year high-resolution X-band weather radar observations in Hamburg, *Earth System Science Data*, 16(5), 2317–2332. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2317-2024>
 Das, S. K., Krishna, U. V. M., Kolte, Y. K., Deshpande, S. M., & Pandithurai, G. (2020). Assessment of Ground-based X-band Radar Reflectivity: Attenuation Correction and its Comparison with Space-borne Radars over the Western Ghats, India. *Earth and Space Science*, 7(11), e2019EA000861. <https://doi.org/10.1029/2019EA000861>

Espinoza, J.C., Scipión, D., Valdez, A., & Verástegui, J. (2021). *SOPHY: Scanning-system for Observations of Peruvian Hydrometeorological-events*. 2021 IEEE International Conference on Aerospace and Signal Processing (INCAS). <https://doi.org/10.1109/INCAS53599.2021.9666928>

Gorgucci, E., & Chandrasekar, V. (2005). Evaluation of Attenuation Correction Methodology for Dual-Polarization Radars: Application to X-Band Systems. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(8), 1195-1206. <https://doi.org/10.1175/JTECH1763.1>

Hitschfeld, W., & Bordan, J. (1954). Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. *Journal of Atmospheric Sciences*, 11(1), 58-67. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1954\)011<0058:EIITRM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1954)011<0058:EIITRM>2.0.CO;2)

Jacobi, S., & Heistermann, M. (2016). Benchmarking attenuation correction procedures for six years of single-polarized C-band weather radar observations in South-West Germany. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(6), 1785-1799. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1155080>

Krämer, S., & Verworn, H. (2009). Improved radar data processing algorithms for quantitative rainfall estimation in real time. *Water Science and Technology*. 60(1). 175-84. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.282>

Overeem, A., de Vries, H., Al Sakka, H., Uijlenhoet, R., & Leijnse, H. (2021). Rainfall-Induced Attenuation Correction for Two Operational Dual-Polarization C-Band Radars in the Netherlands. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38(6), 1125-1142. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0113.1>

Park, S., Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Maki, M., & Iwanami, K. (2005). Correction of Radar Reflectivity and Differential Reflectivity for Rain Attenuation at X Band. Part I: Theoretical and Empirical Basis. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(11), 1621-1632. <https://doi.org/10.1175/JTECH1803.1>

Valdivia, J. M., Scipión, D. E., Milla, M., & Silva, Y. (2020). Multi-Instrument Rainfall-Rate Estimation in the Peruvian Central Andes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37(10), 1811-1826. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0105.1>

Villalobos-Puma, E., Martinez-Castro, D., Flores-Rojas, J.L., Saavedra-Huanca M., & Silva-Vidal, Y. (2020) Diurnal Cycle of Raindrops Size Distribution in a Valley of the Peruvian Central Andes. *Atmosphere*, 11(1), 38. <https://doi.org/10.3390/atmos11010038>

Wang, C., Wu, C., Liu, L., Liu, X., & Chen, C. (2020). Integrated Correction Algorithm for X Band Dual-Polarization Radar Reflectivity Based on CINRAD/SA Radar. *Atmosphere*. 11(1), 119. <https://doi.org/10.3390/atmos11010119>