



Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Matemática, Astronomía, Física
y Computación

**Estimación de las relaciones Z_H -R y Pol-R para el
radar meteorológico RMA1. Variaciones
estacionales y por distancia**

Trabajo Especial de Licenciatura en Física

Autor: Suárez Matías Ezequiel

Director: Dr. Raúl A. Comes

Córdoba, Septiembre de 2020



Estimación de las relaciones Z-R y Pol-R para el radar meteorológico RMA1. Variaciones estacionales y por distancia. Por Matías Ezequiel Suárez se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi director, Dr. Raúl Comes, quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de cada una de las etapas de este proyecto. También quiero expresar mi agradecimiento al Mg. Denis Poffo por su importante aporte y participación activa en el desarrollo de esta investigación. A ambos les agradezco también el haberme facilitado los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades que implicaron el desarrollo de esta tesis.

Asímismo quiero agradecer al Mg. Ing. Ignacio Montamat y Mg. Ing. Jorge Saffe (Grupo Radar Córdoba) por su tiempo, paciencia y atención a mis consultas. Sin dudas el aporte de ambos ha enriquecido el trabajo realizado. Mi agradecimiento también se extiende al Dr. Andrés Rodríguez y el Ing. Ricardo Ingaramo, quienes con su buena predisposición y colaboración me permitieron difundir resultados parciales de este trabajo en diferentes reuniones y congresos académicos.

Un agradecimiento especial para mi familia, en particular mi abuela y mis padres, por haberme apoyado emocional y económicamente durante todo el transcurso de las distintas etapas de la carrera. Sin su apoyo este trabajo nunca se habría escrito, y por eso, también es de ellos.

También quiero agradecer a Natalia, mi novia y compañera que ha estado a mi lado compartiendo alegrías y angustias, por su apoyo incondicional.

Finalmente quiero agradecer a todos mis amigos y amigas de la Facultad, por todos los buenos momentos compartidos.

A todos, muchas gracias.

Resumen

En este trabajo se propone un nuevo método para encontrar los parámetros de ajuste de las relaciones $Z_H - R$ y $Z_H - Z_{dr} - R$, donde Z_H es el factor de reflectividad horizontal, Z_{dr} la reflectividad diferencial y R la tasa de precipitación, el cual está basado en el método de correlación por ventanas (*Window Correlation Matching Method - WCMM*) y el método del promedio de una malla de 3x3 celdas de radar centrada sobre el pluviómetro (*Window Matching Method - WMM*). El concepto del procedimiento propuesto consiste en relacionar un valor de factor de reflectividad Z_H y reflectividad diferencial Z_{dr} , obtenido a través de un promedio pesado de la malla de 3x3 celdas sobre el pluviómetro, con un valor de tasa de precipitación R medido en superficie. El promedio pesado se establecerá de tal manera de asignar un peso proporcional a las celdas de la malla que superen un cierto valor mínimo del coeficiente de correlación de Pearson.

A fin de comparar esta técnica con otros procedimientos utilizados habitualmente en la bibliografía se construyeron las relaciones $Z_H - R$ y $Z_H - Z_{dr} - R$ utilizando los métodos WCMM, WMM y TMM (*Traditional Matching Method*).

Para estudiar la variación estacional, el procedimiento de correlación se aplicó a una base de datos de cinco tormentas ocurridas en dos estaciones del año: primavera y otoño. En tanto que para estudiar la variación por distancia se dividió el área de estudio en regiones concéntricas con el radar RMA1 en el centro. Posteriormente, con el fin de analizar el desempeño de la técnica propuesta se comparó la precipitación estimada por el radar RMA1, a través de las relaciones encontradas en este trabajo, con lo medido por pluviómetros en superficie durante dos tormentas que ocurrieron con posterioridad a la base de datos analizada.

Los resultados obtenidos muestran que los coeficientes de correlación asociados a las relaciones construidas con el método propuesto son, en general, mayores que las correlaciones de los métodos TMM y WMM, y ligeramente superiores a las correlaciones del método WCMM. Por otra parte, las tormentas ocurridas durante el otoño alcanzan correlaciones mayores que las tormentas ocurridas en primavera sugiriendo una variación estacional de las relaciones $Z_H - R$ y $Z_H - Z_{dr} - R$. Finalmente, los coeficientes de correlación disminuyen con la distancia al radar en la región de la llanura de Córdoba, resultado que coincide con los obtenidos por investigaciones recientes en el área. Sin embargo, no se observa la misma tendencia en las sierras de Córdoba, lo que indica la necesidad de un estudio más profundo en esta región.

Abstract

In this work we present a new method to determine the $Z_H - R$ and $Z_H - Z_{dr} - R$ relationships for the weather radar RMA1 located in Córdoba, Argentina. This new technique is based on the Window Correlation Matching Method (WCMM) and the Window Matching Method (WMM). The proposed method consists of matching an R -value, measured by a rain gauge, with a Z_H and Z_{dr} values obtained from a weighted average of a 3x3 radar bins window centered over the rain gauge. The weighted average will be calculated in such a way as to assign a proportional weight to the cells of the 3x3 window that exceeds a certain minimum value of the Pearson correlation coefficient.

The results obtained show that the correlation coefficients associated with the relationships determined with the proposed method are, in general, greater than the correlation coefficients of the TMM and WMM methods, and slightly higher than the correlation coefficients of the WCMM method.

On the other hand, the fall storms have higher correlation coefficients than spring storms, possibly indicating a seasonal variation of the $Z_H - R$ and $Z_H - Z_{dr} - R$ relationships. Furthermore, the correlation coefficients decrease with distance to the radar in the Córdoba plain region, a result that agrees with recent research on the subject. However, the same trend is not observed in the Córdoba mountains, which could indicate the need for a more in-depth analysis in this region.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Índice de figuras	VII
Índice de cuadros	XI
Objetivos	XIII
1. Introducción	1
2. Radar meteorológico	5
2.1. Radar Meteorológico Argentino I	5
2.2. Principio de funcionamiento	6
2.3. Duración y longitud del pulso	7
2.4. Radares meteorológicos de doble polarización	8
2.5. Productos de radar	9
2.6. Atenuación de la señal	10
2.7. Bloqueo del haz	14
2.8. Datos del radar RMA1	16
3. Pluviómetros	17
3.1. Pluviómetros cangilonados	17
3.2. Datos de pluviómetros	18
4. Relaciones $Z_H - R$ y Pol-R	20
4.1. Relación $Z_H - R$	20
4.2. Relación $Z_H - Z_{dr} - R$	23
5. Técnica de correlación propuesta	24
5.1. Procedimiento de correlación entre las mediciones de radar y del pluviómetro	24

6. Aplicación del método a eventos de precipitación	36
6.1. Obtención y estudio de las relaciones $Z_H - R$ y Pol- R	36
7. Estimaciones de precipitación en tiempo real	52
8. Conclusiones y Trabajos futuros	58
8.1. Conclusiones	58
8.2. Trabajos futuros	59
Bibliografía	60
Apéndices	67
A. Tipos de precipitación	68
B. Algoritmos	69
C. Pluviómetros	80

Índice de figuras

2.1.	Ubicación del Radar Meteorológico Argentino 1 (RMA1) en la Ciudad Universitaria de la UNC en Córdoba, Argentina.	5
2.2.	La región sombreada entre las líneas a y c denota el pulso transmitido por el radar. La resolución del radar es la mitad de la longitud del pulso. Imagen extraída y modificada de [1].	7
2.3.	Atenuación (de ida y vuelta) para la propagación a través de una atmósfera estandar $\lambda = 10\text{cm}$. Imagen extraída de [2].	11
2.4.	Coefficiente de atenuación para tres longitudes de onda en función de la tasa de precipitación. Imagen extraída de [1].	12
2.5.	Factor de reflectividad en banda C (a) y banda S (b) y los correspondientes campos Z_{dr} en banda C y S (c,d). Las regiones con sesgo negativo en reflectividad causadas por la atenuación en banda C son marcadas con las letras A y B en el panel (a). Imagen extraída de [1].	13
2.6.	Elementos considerados para la clasificación del tipo de bloqueo: a es el radio de la sección transversal del haz e y la distancia entre el centro del haz y la topografía. Imagen extraída de [3].	14
2.7.	Ubicación del pluviómetro de Ambul y del radar meteorológico RMA1.	15
2.8.	Perfil de elevación de altura en la dirección del pluviómetro ubicado en Ambul visto desde el radar RMA1.	16
3.1.	Interior (imagen izquierda) y exterior (imagen derecha) de un pluviómetro cangilonado. Imágenes extraídas de [4].	18
3.2.	Red de estaciones meteorológicas utilizadas en este trabajo.	19
4.1.	Variación estacional del perfil vertical de la relación $Z_H - R$ en Kolkata, India (2009). El panel izquierdo muestra la variación del parámetro a mientras que el panel derecho la variación del parámetro b [5].	21
4.2.	Trayectoria y altura (sobre el nivel del mar) de los haces del radar RMA1 para distintas elevaciones teniendo en cuenta la curvatura terrestre y el ensanchamiento del haz.	22
5.1.	Localización del pluviómetro en relación a la malla de 3x3 celdas del radar.	24
5.2.	Área de estudio con sus respectivas divisiones.	26

5.3. Ejemplo de la interpolación cúbica utilizada (azul) comparada con las interpolaciones lineal (naranja) y cuadrática (verde). Los puntos rojos son los datos originales.	27
5.4. Curvas de interpolación de $Z(t)$ (Celdas de 1 a 9) y $R(t)$ (en rojo) extraídas de una tormenta real. Los círculos (●) son los datos medidos mientras que las cruces (×) representan los datos cada 5 minutos.	28
5.5. Curvas de interpolación $Z(t)$ y $R(t)$ extraídas de una tormenta real. Las secciones negativas de las curvas fueron reemplazadas por secciones nulas. Notar que, efectivamente, algunos puntos interpolados tienen valores negativos (triángulos en la parte inferior de la figura).	29
5.6. Curvas interpoladas $Z(t)$ y $R(t)$ sin desfase ($\Delta t = 0$ minutos).	32
5.7. Curvas interpoladas $Z(t)$ y $R(t)$ con desfase $\Delta t = 5$ minutos.	32
5.8. Curvas interpoladas $Z(t)$ y $R(t)$ con desfase $\Delta t = 10$ minutos.	33
5.9. Curvas interpoladas $Z(t)$ y $R(t)$ con desfase $\Delta t = 15$ minutos.	33
5.10. Las celdas ubicadas en la dirección desde donde proviene el viento (C0, C1, B0) contribuyen a la precipitación medida por el pluviómetro, mientras que las celdas ubicadas en la dirección contraria al mismo (A1, A2, B2) no contribuyen.	34
6.1. A la izquierda: Factor de reflectividad horizontal (Z_H) de la tormenta del día 30 de noviembre de 2019 a las 08:51 UTC. A la derecha: Factor de reflectividad horizontal (Z_H) de la tormenta del día 4 de diciembre de 2019 a las 05:31 UTC.	37
6.2. Factor de reflectividad horizontal (Z_H) de la tormenta del día 14 de diciembre de 2019 a las 23:19 UTC.	38
6.3. Puntos $Z_H - R$ formados con el método WCMM para la estación otoño.	41
6.4. Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP80 para la estación otoño.	41
6.5. Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP50 para la estación otoño.	42
6.6. Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP20 para la estación otoño.	42
6.7. Puntos $Z_H - R$ formados con el método WMM para la estación otoño.	43
6.8. Puntos $Z_H - R$ formados con el método TMM para la estación otoño.	43
6.9. Puntos $Z_H - R$ formados con el método WCMM para la estación primavera.	44
6.10. Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP80 para la estación primavera.	44
6.11. Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP50 para la estación primavera.	45
6.12. Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP20 para la estación primavera.	45
6.13. Puntos $Z_H - R$ formados con el método WMM para la estación primavera.	46
6.14. Puntos $Z_H - R$ formados con el método TMM para la estación primavera.	46
6.15. Puntos $R - Z_H - Z_{dr}$ con sus respectivas superficies de ajuste, obtenidas a través del método TP80, para la temporada de otoño.	47
6.16. A la izquierda: Z_H de la tormenta del día 30 de noviembre de 2019 sobre el radar RMA1 (punto rojo central). A la derecha: Z_H de la tormenta del día 15 de diciembre de 2019 sobre el radar RMA1.	48

6.17. Coeficientes de correlación (r) calculados entre los puntos $\log(Z_H)$ y $\log(R)$ en cada semianillo y en cada método para la temporada de otoño.	49
6.18. Coeficientes de correlación (r) calculados entre los puntos $\log(Z_H)$ y $\log(R)$ en cada semianillo y en cada método para la temporada de primavera.	50
6.19. Coeficientes de correlación (r) calculados entre los puntos $\log(Z_H)$ y $\log(R)$ en cada semianillo y en cada método para la región llanura durante las temporadas de otoño (curva naranja) y primavera (curva verde).	50
6.20. Coeficientes de correlación (r) calculados entre los puntos $\log(Z_H)$ y $\log(R)$ en cada semianillo y en cada método para la región sierras durante las temporadas de otoño (curva naranja) y primavera (curva verde).	51
7.1. Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Alta Gracia (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.	53
7.2. Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Santa Rosa de Calamuchita (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.	53
7.3. Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de La Cumbrecita (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.	54
7.4. Precipitación acumulada (derecha) medida por el pluviómetro de Obispo Trejo (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.	54
7.5. Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Villa del Dique (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.	55
7.6. Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Arroyito (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 20 de diciembre de 2019 entre las 10 y 17 UTC.	56
7.7. Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Candelaria (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 20 de diciembre de 2019 entre las 10 y 17 UTC.	56
7.8. Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Ascochinga (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 20 de diciembre de 2019 entre las 10 y 17 UTC.	57

7.9. Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Cosquín (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 20 de diciembre de 2019 entre las 10 y 17 UTC. 57

Índice de cuadros

2.1.	Especificaciones técnicas del radar meteorológico RMA1.	6
5.1.	Altura aproximada (en metros) entre el centro del gate (en las direcciones norte, este, sur y oeste) y el terreno para el radar RMA1.	25
5.2.	Instantes t_j en los cuales fueron medidos el factor de reflectividad Z_j^i y la reflectividad diferencial $Z_{dr_j}^i$ de la celda i e instantes t_k en los cuales fueron medidas las tasas de precipitación R_k	27
5.3.	Instantes \tilde{t}_j en los cuales fueron obtenidos los valores Z_j^i , $Z_{dr_j}^i$ y R_j de la curva de interpolación.	28
5.4.	Coefficientes de correlación calculados entre $\log(Z)$ y $\log(R)$ en las distintas secciones l de la tormenta. En cada sección se obtienen nueve coeficientes de correlación correspondientes a cada celda.	30
5.5.	Coefficientes de correlación calculados entre $\log(Z)$ y $\log(R)$ en las distintas secciones l de la tormenta para $\Delta t = 0$ minutos. En cada sección se obtienen nueve coeficientes de correlación correspondientes a cada celda.	31
5.6.	Correlaciones calculadas entre $\log(Z)$ y $\log(R)$ en las distintas secciones l de la tormenta para $\Delta t = 5, 10, 15$ minutos.	31
6.1.	Valores numéricos de los parámetros de ajuste a y b de la relación $Z_H(R)$ para la estación otoño.	38
6.2.	Valores numéricos de los parámetros de ajuste a y b de la relación $Z_H(R)$ para la estación primavera.	39
6.3.	Valores numéricos de los parámetros de ajuste \tilde{a} , \tilde{b} y \tilde{c} de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ para la estación otoño.	39
6.4.	Valores numéricos de los parámetros de ajuste \tilde{a} , \tilde{b} y \tilde{c} de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ para la estación primavera.	40
6.5.	Cantidad de valores $R - Z_H - Z_{dr}$ con los que se realizaron los ajustes en la estación otoño.	40
6.6.	Cantidad de valores $R - Z_H - Z_{dr}$ con los que se realizaron los ajustes en la estación primavera.	40
1.	Pluviómetros que registraron la tormenta del día 1 de abril de 2019	81
2.	Pluviómetros que registraron la tormenta del día 24 de abril de 2019	82
3.	Pluviómetros que registraron la tormenta del día 30 de noviembre de 2019	83

4.	Pluviómetros que registraron la tormenta del día 4 de diciembre de 2019 . . .	84
5.	Pluviómetros que registraron la tormenta del día 14 de diciembre de 2019 . .	86

Objetivos

El primer objetivo del presente Trabajo Especial de Licenciatura en Física es desarrollar e implementar un método que nos permita correlacionar de manera eficaz datos medidos por estaciones pluviométricas en tierra con mediciones del radar meteorológico RMA1 ubicado en el predio de la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de Córdoba en Argentina.

El segundo objetivo es determinar, por medio de este método, los parámetros de ajuste a y b de la relación empírica $Z_H - R$ y a , b y c de la relación Pol- R $Z_H - Z_{dr} - R$.

El objetivo final del trabajo es estudiar la posible variación de las relaciones empíricas obtenidas con la estación del año, la distancia al radar y la geografía de la Provincia de Córdoba y comparar los resultados de las estimaciones de precipitación obtenidas a través de las relaciones construidas con datos medidos por pluviómetros.

1

Introducción

En las últimas dos décadas los radares meteorológicos han revolucionado la hidrología y meteorología debido a que nos proporcionan estimaciones de la cantidad de precipitación caída sobre una región con una gran resolución temporal y espacial. El conocimiento preciso de estas estimaciones y sus características espaciales es muy importante para la prevención de inundaciones y la optimización de los sistemas de alerta [6, 7].

Las estimaciones de precipitación por radar más conocidas son calculadas a través de relaciones empíricas construidas a partir del factor de reflectividad horizontal Z_H medido en $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ por el radar y la tasa de precipitación R en mm h^{-1} medida en superficie por otros sensores remotos como disdrómetros o pluviómetros. Esto es debido a que los radares meteorológicos no son capaces de estimar por sí mismos la precipitación caída. Estas relaciones empíricas entre Z_H y R tienen la forma $Z_H = aR^b$ donde a y b son parámetros ajustables.

Debido a que el factor de reflectividad Z_H está relacionado con la distribución de tamaños de gotas y dado que esta distribución de tamaños cambia según la tormenta, la región geográfica y la estación del año [8, 9], se han obtenido numerosas relaciones del tipo $Z_H - R$, entre las cuales, las más conocidas en la literatura para diferentes regiones geográficas, climas y tipos de lluvias son

$$Z_H = 200R^{1,6} \quad \text{Lluvias estratiformes (Marshall y Palmer [10], 1948)} \quad (1.1)$$

$$Z_H = 31R^{1,71} \quad \text{Lluvias orográficas (Blanchard [11], 1953)} \quad (1.2)$$

$$Z_H = 486R^{1,37} \quad \text{Lluvias convectivas (Jones [12], 1956)} \quad (1.3)$$

$$Z_H = 316R^{1,5} \quad \text{Suiza (Joss [13], 1998)} \quad (1.4)$$

$$Z_H = 61,75R^{1,61} \quad \text{Climas tropicales (Yeo [14], 2015)} \quad (1.5)$$

$$Z_H = 144R^{1,5} \quad \text{Región central de Tailandia (Chantraket [15], 2016).} \quad (1.6)$$

Sin embargo, lograr estimaciones cuantitativas de precipitación (QPE, por sus siglas en inglés) relativamente precisas es una tarea extremadamente compleja que involucra numerosas cuestiones a tener en cuenta. Algunas de ellas son: llenado incompleto del haz, evaporación debajo de la base de la nube, atenuación de la señal en la atmósfera y en el campo de precipitación, el efecto de la banda brillante, los movimientos verticales y horizontales del

aire, los ecos fijos y la propagación anómala, entre otras [16, 17]. Además, para una correcta calibración hidrológica se necesita tener a disposición una red densa de pluviómetros automáticos con los cuales validar los datos de radar. Esto en muchos casos no es posible debido a los altos costos que implica poner en funcionamiento una red de estaciones meteorológicas y su posterior mantenimiento.

Otro problema que existe en la estimación de precipitación a través del radar es la variabilidad de la relación $Z_H - R$, es decir, los parámetros a y b no son constantes sino que varían con la geografía del lugar, con la estación del año, con el tipo de tormenta e incluso en la misma tormenta [18]. También existen diferencias en los volúmenes de muestreo debido a que el radar mide en altura en grandes celdas mientras que los pluviómetros miden en tierra en apenas algunos centímetros cuadrados [2, 19, 20].

Recientemente, con el avance tecnológico y científico en materia de radares meteorológicos, se ha mejorado mucho la calidad de las estimaciones de precipitación en gran medida debido al desarrollo de los radares polarimétricos, los cuales, son capaces de proveer información del tamaño, cantidad y composición de los hidrometeoros presentes en la atmósfera [21]. La incorporación de variables polarimétricas en los algoritmos para la estimación de precipitación es uno de los principales objetivos en la investigación de radares de doble polarización. Una motivación importante para esto es que la reflectividad diferencial Z_{dr} y la fase diferencial específica K_{dp} son inmunes a las incertezas producidas por la calibración del radar y el bloqueo parcial del haz brindando una oportunidad para la estimación de precipitación en una amplia variedad de condiciones comparadas con el uso del factor de reflectividad Z_H solo. Sin embargo, estas variables tienen sus propias incertezas inherentes a su naturaleza debido a que ninguna de ellas está matemáticamente relacionada a la tasa de precipitación [1].

Al día de hoy se han llevado a cabo numerosas investigaciones para desarrollar algoritmos optimizados que estimen la precipitación con radares de doble polarización y que superen los diversos desafíos existentes. Nuevos algoritmos son continuamente puestos a prueba e implementados si las estimaciones que producen son más precisas que la de algoritmos existentes. Algunas de las relaciones empíricas Pol- R , entre la tasa de precipitación y las variables polarimétricas, más conocidas son [1, 22]

$$R(K_{dp}) = a|K_{dp}|^b \text{sign}(K_{dp}) \quad (1.7)$$

$$R(Z_H, Z_{dr}) = aZ_H^b Z_{dr}^c \quad (1.8)$$

$$R(Z_{dr}, K_{dp}) = a|K_{dp}|^b Z_{dr}^c \text{sign}(K_{dp}), \quad (1.9)$$

donde Z_H está expresado en $[\text{mm}^6 \text{m}^{-3}]$, K_{dp} en $[\text{° km}^{-1}]$, R en $[\text{mm h}^{-1}]$ y Z_{dr} es adimensional.

En la actualidad existen diversos métodos para determinar los parámetros de ajuste de las relaciones $Z_H - R$ y Pol- R , algunos de los más conocidos y utilizados se explican brevemente a continuación.

- *Método de Coincidencia Tradicional o Traditional Matching Method (TMM).*

Consiste en relacionar pares de valores $Z_H - R$ en los cuales el factor de reflectividad

Z_H es obtenido de la celda de radar que tiene las mismas coordenadas geográficas que el pluviómetro. Este método asume que la lluvia cae verticalmente y que la intensidad de lluvia en la altura donde mide el radar es la misma que al nivel del suelo [23].

- *Método de Coincidencia por Ventanas o Window Matching Method (WMM).*
Los pares $Z_H - R$ se forman de manera tal que un valor de precipitación es relacionado con un valor de reflectividad promedio de una malla de celdas de 3x3 centrada en el pluviómetro. Este método representa una mejora con respecto al TMM debido a que intenta tener en cuenta el hecho de que la lluvia no cae verticalmente sino que el viento la desvía [24].
- *Método de Coincidencia de Distribución de Probabilidad o Probability Matching Method (PMM).*
Este método fue desarrollado para poder relacionar mediciones de radar y pluviómetros no simultáneas; esto se logra empleando la función probabilidad acumulada (FPA) y consiste en formar pares de valores Z_H y R que tienen la misma FPA, esto es, se forman pares $Z_{H_i} - R_i$ que satisfacen

$$\int_{Z_{H_i}}^{\infty} P(Z_H) dZ_H = \int_{R_i}^{\infty} P(R) dR, \quad (1.10)$$

donde $P(Z_H)$ es la función densidad de probabilidad de los valores de factor de reflectividad Z_H medidos por el radar y $P(R)$ es la función densidad de probabilidad de los valores R medidos por pluviómetros. Esta manera de relacionar los pares $Z_H - R$ reduce el error por desajuste geográfico y desincronización temporal [23].

- *Método de Coincidencia de Probabilidad por Ventanas o Window Probability Matching Method (WPMM).*
Este método, al igual que el anterior, forma pares de valores $Z_H - R$ que tienen la misma FPA con la diferencia que ahora los factores de reflectividad son tomados de una ventana o malla de 3x3 celdas sobre el pluviómetro. Este método se considera superior al PMM debido a que reduce aún más los errores por desajuste geográfico y desincronización temporal pero tanto este método como el PMM no representan el proceso físico real de la lluvia en una tormenta en donde un valor de Z_H corresponde a un valor de R caído evidenciando una relación causa-efecto [25].
- *Método de Coincidencia por Correlación de Ventanas o Window Correlation Matching Method (WCMM).*
Este método fue desarrollado para relacionar los pares de valores $Z_H - R$ cuando hay presentes errores debido al desfase temporal y geográfico. Estos errores son causados, principalmente, por el viento y por la altura a la que se registra el eco del radar. El método consiste en determinar el valor óptimo del factor de reflectividad Z_H que dé la mejor correspondencia con el valor de tasa de precipitación R . Este valor óptimo de Z_H se determina utilizando la relación $Z_H - R$ en forma logarítmica, entonces a través de un análisis del coeficiente de correlación de Pearson es posible determinar qué celda

de radar es la que mejor se correlaciona con los registros medidos por pluviómetros en tierra [26].

Mediante un análisis de los métodos mencionados anteriormente se propone un nuevo procedimiento basado en la combinación de los métodos WCMM y WMM para determinar las relaciones $Z_H(R)$ y $R(Z_H, Z_{dr})$ válidas para el radar RMA1 en la región central de la Provincia de Córdoba, Argentina, donde Z_{dr} es uno de los productos polarimétricos que proporciona el radar meteorológico RMA1. Este consiste en una variante al *Método de Coincidencia por Correlación de Ventanas* en el cual cada valor Z_H del par $Z_H - R$ se determinará a través de un promedio pesado por el coeficiente de correlación, en donde las celdas con mejor correlación serán las que mayor influencia tendrán en el promedio de los factores de reflectividad.

Finalmente, se compararán las estimaciones de precipitación obtenidas a través de las relaciones empíricas construidas en este trabajo con las medidas por estaciones pluviométricas durante dos eventos de precipitación ocurridos con posterioridad a la base de datos analizada.

2

Radar meteorológico

2.1. Radar Meteorológico Argentino I

El radar meteorológico RMA1, fue construido por la empresa nacional INVAP y se instaló a principios del año 2015 en el predio de la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Está equipado con tecnología Doppler, en Banda C con doble polarización simultánea y tiene un alcance de 480 km en modo vigilancia, 240 km en modo intensidad y 120 km en modo Doppler. Sus características técnicas permiten una altitud de barrido que varía entre -1° y 90° en todas las marcaciones de los 360° acimutales (Tabla 2.1). Su tecnología de doble polarización nos permite distinguir la forma, tamaño y composición de los hidrometeoros presentes en la atmósfera y la tecnología Doppler permite medir la velocidad radial de los mismos midiendo la diferencia de fase entre el pulso emitido y el eco recibido.



Figura 2.1: Ubicación del Radar Meteorológico Argentino 1 (RMA1) en la Ciudad Universitaria de la UNC en Córdoba, Argentina.

Las características técnicas del radar meteorológico RMA1 son las siguientes [27].

Subsistema	Característica
Tipo	Radar Meteorológico en banda C, Dual-pol Doppler
Frecuencia de operación	5625 MHz
Ancho de pulso	0.4 a 3 μ s
Resolución	60m celda@ 0.4 μ s
PRF	300 a 2000 Hz
Rango máximo	480 km
Rango operacional	240 km
Filtro de clutter	>23 dB
Productos	DBZH a TH Factor de reflectividad horizontal VRAD Velocidad radial WRAD Ancho espectral ZDR Reflectividad diferencial PHIDP Fase diferencial KDP Fase diferencial específica RHOHV Coeficiente de correlación Mapa de Clutter
Transmisor	Magnetron coaxial, modulador de estado sólido, potencia de pico de 350 kW
Receptor	Superheterodino, conversión dual, rango dinámico de 93 dB, -110 dB @ pulsos 3 μ s y 3 dB figura de ruido
Dimensiones de antena	4.45 m de diámetro, 182 Kg, reflector Optimat/carbono + Cobre Níquel
Ganancia de antena	\sim 1° de ancho del pulso a potencia media, 45 dB ganancia mínima @ 5635 MHz
Mecanismo de movimiento	Rango de elevación de -1° a 90° , velocidad de barrido max de 6 rpm. Funciones PPI, control manual
Radomo	Paneles sandwich geotalc, máxima velocidad de viento 240 km/h
Procesamiento digital	Receptor de múltiples canales con una frecuencia intermedia de 70 MHz y conversor A/D de 24 bits
CPU	Sistema Operativo GNU/Linux, plataforma paralela y estable con GPG-PU en computador comercial

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas del radar meteorológico RMA1.

2.2. Principio de funcionamiento

El radar meteorológico es un sensor remoto activo que emite, a través de una antena paraboloide rotante, pulsos electromagnéticos espaciados en intervalos de tiempo regulares. La energía emitida en los pulsos se concentra en un haz de forma cónica debido a la difracción y se propaga a través de la atmósfera. Los blancos meteorológicos presentes en la atmósfera (gotas de agua, granizo, nieve, etc) que son iluminados por el haz del radar interceptan la energía emitida y la dispersan en todas direcciones mediante un proceso físico denominado scattering. Parte de la energía dispersada es transmitida en la dirección del radar nuevamente y es captada por el receptor el cual normalmente se ubica en la misma antena emisora. La

fracción de energía captada por la antena es convertida en información útil con el fin de determinar características particulares de los blancos meteorológicos observados.

Los radares con tecnología Doppler y de doble polarización, como lo es el radar RMA1, permiten además estimar la velocidad radial de los blancos meteorológicos y brindan información sobre la geometría de los mismos [28].

2.3. Duración y longitud del pulso

El pulso emitido por el radar consiste en un paquete de ondas de longitud finita l , el cual está compuesto de microondas que oscilan a la frecuencia del radar. La duración del pulso, τ , es simplemente la longitud l sobre la velocidad de la luz,

$$\tau = \frac{l}{c}. \quad (2.1)$$

Típicamente, la longitud del pulso en los radares meteorológicos es del orden de algunos cientos de metros. Por ejemplo, en el caso del radar RMA1, la duración del pulso largo y corto es 3 y 0.4 μs respectivamente. De acuerdo a la Ec. 2.1, estas duraciones corresponden a pulsos de longitud 900 y 120 m respectivamente.

La resolución del radar a lo largo del haz es la mitad de la longitud del pulso, $l/2$. Para entender mejor esto, consideremos la Figura 2.2. Se asumirá que las ubicaciones a , b y c están fijas en el espacio a medida que el pulso se propaga a través de ellas. La energía dispersada hacia el radar de la parte frontal del pulso por un blanco ubicado sobre la línea c coincidirá exactamente con la energía dispersada hacia el radar de la parte trasera del pulso por un blanco ubicado sobre la línea b . Una muestra instantánea de la radiación detectada por el radar tendrá información sobre los blancos ubicados entre las líneas b y c . La distancia entre b y c es exactamente la mitad de la longitud del pulso. Esto implica que, en el caso del radar RMA1, la resolución del haz es de 450 y 60 m para el pulso largo y corto respectivamente.

Por lo tanto, la resolución del radar significa que éste muestrea la atmósfera en volúmenes discretos denominados *celdas* o *gates* de longitud radial dada por la mitad de la longitud del pulso [1].

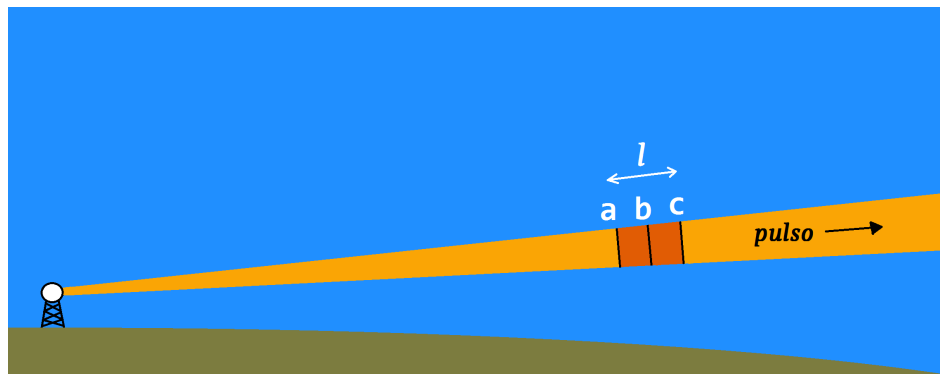


Figura 2.2: La región sombreada entre las líneas a y c denota el pulso transmitido por el radar. La resolución del radar es la mitad de la longitud del pulso. Imagen extraída y modificada de [1].

2.4. Radares meteorológicos de doble polarización

Los radares meteorológicos convencionales que transmiten ondas electromagnéticas polarizadas horizontalmente son diseñados de manera tal de detectar sólo la componente horizontal del eco. Como consecuencia, parte de la información asociada a las propiedades de los blancos meteorológicos se pierde. Estas propiedades están relacionadas al tamaño, número y forma de los blancos en cuestión [29].

Los primeros radares meteorológicos de doble polarización podían detectar simultáneamente la componente horizontal y vertical del eco recibido. Es decir, si se transmitía un pulso polarizado horizontalmente el radar era capaz de detectar las componentes horizontal y vertical del eco recibido. Actualmente, la mayoría de radares de doble polarización o polarimétricos son capaces de emitir y detectar pulsos polarizados horizontal y verticalmente, en donde horizontal significa que el vector campo eléctrico está orientado perpendicularmente a la dirección de propagación del pulso y se encuentra enteramente contenido en un plano horizontal y vertical que dicho vector es perpendicular a la dirección de propagación y que se encuentra enteramente contenido en un plano vertical [1].

Puesto que los hidrometeoros, como gotas de agua y partículas de hielo tienen diferentes formas, diferentes orientaciones mientras caen y distintas constantes dieléctricas la energía polarizada vertical y horizontalmente será dispersada (scattering) en diferentes proporciones. De esta manera es posible reconocer y clasificar diferentes tipos de precipitación como lluvia, granizo, graupel y nieve. Para caracterizar los distintos tipos de hidrometeoros los radares polarimétricos proveen parámetros adicionales. Los más importantes y más utilizados son los siguientes [30]

- *Reflectividad diferencial:* $Z_{dr} = 10 \log\left(\frac{Z_H}{Z_V}\right)$, es una medida de la forma promedio de las partículas. Por ejemplo, las gotas de lluvia mientras caen adquieren una forma achatada en donde la razón entre la dimensión vertical y horizontal depende del tamaño de la gota. Esto nos brinda un parámetro complementario para estimar la intensidad de precipitación (Ver Sección 2.5).
- *Desplazamiento de fase diferencial:* Φ_{DP} es la diferencia de fase entre la polarización vertical y horizontal. Esta cantidad provee información de la forma y concentración de los blancos meteorológicos presentes. Sin embargo, Φ_{DP} es una cantidad acumulativa a lo largo de una dirección radial, lo cual lo hace más dificultoso de interpretar.
- *Fase diferencial específica:* K_{dp} es la diferencia de fase entre la polarización vertical y horizontal a lo largo de 1 km de propagación. Este parámetro se mide en $[\text{° km}^{-1}]$ y es de suma importancia para medir la intensidad de lluvia con mayor precisión.
- *Coefficiente de correlación co-polar:* ρ_{HV} de las series temporales de Z_H y Z_V . Este parámetro nos indica la variabilidad de los hidrometeoros en cuanto a su forma, tamaño y fase termodinámica.

2.5. Productos de radar

En esta sección se describen los productos del radar utilizados en este trabajo.

Factor de reflectividad horizontal Z_H

El factor de reflectividad horizontal Z_H es una medida de la energía dispersada hacia el radar por los blancos meteorológicos presentes en la atmósfera y es una de las cantidades más comunes en los radares meteorológicos. Debido a que Z_H es proporcional a la energía dispersada hacia el radar por los hidrometeoros y estos a su vez son proporcionales a la cantidad de agua líquida presente en la atmósfera se sigue que Z_H es una función creciente de la cantidad de agua líquida presente en el volumen que se está muestreando.

Si las gotas de agua son esféricas y tienen diámetros pequeños comparados con la longitud de onda del radar (es decir, en la aproximación de Rayleigh), el factor de reflectividad está definido como la suma, a la sexta potencia, de todos los diámetros de las gotas contenidas en un volumen de tamaño unidad [1, 2],

$$Z_H = \sum_{i=1}^N n_i D_i^6, \quad (2.2)$$

donde n_i es la cantidad de gotas de diámetro D_i por unidad de volumen.

Si se conoce la distribución de tamaños de gotas por unidad de volumen y por unidad del intervalo de diámetros $N(D)$, el factor de reflectividad Z_H puede expresarse como una función continua del tamaño de las gotas [2],

$$Z_H = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD. \quad (2.3)$$

De las ecuaciones 2.2 y 2.3 se deduce que las unidades de Z_H son $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$.

Debido a que Z_H depende del diámetro de las gotas a la sexta potencia los valores que toma en las observaciones de la atmósfera pueden abarcar varios ordenes de magnitud, motivo por el cual se utiliza habitualmente una escala logarítmica,

$$Z_H[\text{dBZ}] = 10 \log \left(\frac{Z_H[\text{mm}^6 \text{m}^{-3}]}{1 \text{mm}^6 \text{m}^{-3}} \right). \quad (2.4)$$

En esta escala, ~ -30 a 0 dBZ indica la presencia de nubes no precipitantes; $\sim 0-10$ dBZ llovizna o nieve ligera; $\sim 10-30$ dBZ lluvia moderada o nevadas intensas; $\sim 30-45$ dBZ nieve derritiéndose; $\sim 30-60$ dBZ lluvias moderadas a intensas y $\sim 60-70$ dBZ o más indica la presencia de granizo [31, 32].

Reflectividad diferencial Z_{dr}

La reflectividad diferencial Z_{dr} es una medida de la diferencia de energía recibida por el radar entre la polarización vertical y horizontal en unidades dB y se define de la siguiente manera

$$Z_{dr}[\text{dB}] = Z_H[\text{dBZ}] - Z_V[\text{dBZ}]. \quad (2.5)$$

Equivalentemente,

$$Z_{dr}[\text{dB}] = 10 \log \left(\frac{Z_H[\text{mm}^6 \text{m}^{-3}]}{Z_V[\text{mm}^6 \text{m}^{-3}]} \right). \quad (2.6)$$

Para blancos meteorológicos pequeños comparados con la longitud de onda del radar (es decir, en el régimen de Rayleigh), valores positivos de Z_{dr} indican que los blancos tienen mayor sección eficaz en polarización horizontal que en vertical, valores negativos de Z_{dr} que tienen mayor sección eficaz en polarización vertical que horizontal y valores próximos a 0 nos sugieren que los blancos son esféricos, con igual sección eficaz en polarización horizontal y vertical.

La reflectividad diferencial Z_{dr} es afectada además por la composición física de los hidrometeoros y/o la densidad de partículas.

Puesto que las gotas de lluvia grandes se deforman por el arrastre aerodinámico y adquieren una forma más achatada que las gotas más pequeñas [33, 34, 35, 36, 37], la lluvia compuesta de gotas grandes tenderá a tener valores de Z_{dr} mayores. Esto es indicativo de que se recibe más potencia en la polarización horizontal que en la vertical. En lluvia, Z_{dr} tiende a aumentar para valores altos de Z_H , esto se debe a que la lluvia intensa es caracterizada por grandes concentraciones de gotas grandes [38].

La reflectividad diferencial varía con el tamaño de las gotas, mientras que Z_H , además de depender del tamaño de las gotas, es directamente proporcional a la concentración de partículas. En consecuencia, para un dado valor de Z_H , existe un rango de valores posibles para Z_{dr} que pueden ser observados dependiendo de la distribución de tamaños de gotas.

En el caso del granizo Z_{dr} varía en función del tamaño, forma y contenido de agua líquida sobre o dentro del granizo. Si el granizo se voltea caóticamente mientras cae se observarán valores de Z_{dr} próximos a 0 debido a que el granizo tendrá una apariencia esférica en un sentido estadístico [38, 39, 40, 41].

2.6. Atenuación de la señal

La atenuación de la señal es la disminución de la intensidad que sufre el pulso electromagnético emitido por el radar a lo largo de su trayectoria debido a la interacción de la radiación con el medio por el que se propaga. Esta pérdida de la energía transmitida se da a través de dos procesos: **absorción** y **dispersión o scattering**. En el primer proceso la atenuación se da porque las moléculas absorben parte de la energía de la señal para luego re-emitirla en distintas frecuencias. Mientras que en el segundo se genera una atenuación debido a que las partículas, cuando interactúan con la radiación, generan dispersión en todas las direcciones.

La atenuación por dispersión o scattering depende principalmente de la relación entre el tamaño de las partículas y la longitud de onda de la radiación electromagnética. Los aerosoles, con radios cercanos a 1 μm , no producen una dispersión significativa ya que su tamaño no es

comparable con la longitud de onda a la que opera un radar en banda C (7,5-3,7 cm), por lo que puede despreciarse la dispersión producida por gases atmosféricos y por microgotas de nube con diámetros inferiores a $30 \mu\text{m}$ [42].

En la atenuación por absorción de los gases atmosféricos, el O_2 y el vapor de agua son los que más contribuyen en la región de banda C, mientras que el efecto que producen los demás gases puede despreciarse [43].

La atenuación por gases atmosféricos es uno de los componentes que contribuyen a la disminución de la señal pero no es el único, también existe atenuación por microgotas, gotas de lluvia, cristales de hielo, copos de nieve y granizo.

En el contexto asociado a la interpretación de las mediciones de los radares polarimétricos, la atenuación introduce incertezas en las cantidades medidas por el radar, y en la mayoría de los casos, es un efecto indeseable. Sin embargo, en algunas aplicaciones, los científicos emplean radares polarimétricos y miden la **atenuación diferencial** entre radares que operan a diferentes longitudes de onda para obtener información meteorológica sobre la atmósfera.

Para profundizar sobre la atenuación se puede consultar Doviak & Zrníc [2] y Rauber & Nesbitt [1].

Atenuación por gases atmosféricos

Como se mencionó anteriormente los principales componentes moleculares atmosféricos que contribuyen a la atenuación de la señal es el vapor de agua y el oxígeno.

La atenuación gaseosa no sólo depende de la distancia que recorrió el pulso del radar, sino también de la profundidad de la tropósfera atravesada. Esta dependencia se ilustra en la Figura 2.3, la cual fue graficada para una longitud de onda $\lambda = 10 \text{ cm}$ [2]:

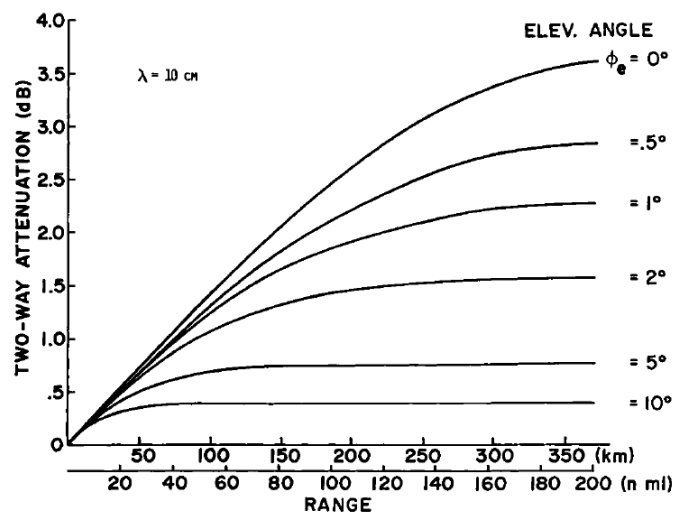


Figura 2.3: Atenuación (de ida y vuelta) para la propagación a través de una atmósfera estándar $\lambda = 10\text{cm}$. Imagen extraída de [2].

Para un radar que opera en una longitud de onda $\lambda = 10$ cm, la pérdida por absorción en el trayecto de ida y vuelta de la señal puede superar los 3.5 dB para blancos distantes y cercanos al horizonte.

Para más detalles puede consultarse el trabajo de Blake [44], el cual provee las curvas de atenuación para longitudes de onda desde 3 m a 3 cm.

Atenuación en lluvia

La atenuación de la señal del radar por lluvia depende de la longitud de onda y la temperatura. Para cuantificarla se utilizará una cantidad definida por Rauber & Nesbitt [1] denominada **tasa de atenuación en lluvia** K ,

$$K(\text{dB km}^{-1}(\text{mm h}^{-1})^{-1}) = k_r R^{-1}, \quad (2.7)$$

definida como la razón entre el coeficiente de atenuación en lluvia (k_r) y la tasa de precipitación R . En la Figura 2.4 se muestra el coeficiente K en función de la tasa de precipitación R .

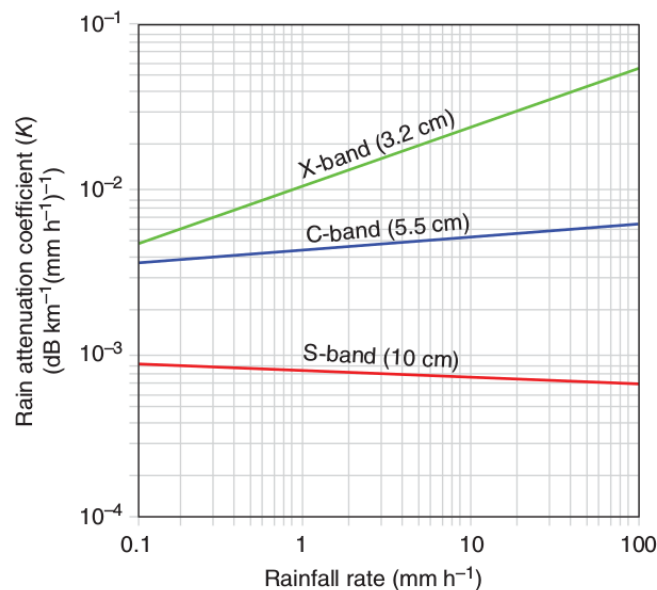


Figura 2.4: Coeficiente de atenuación para tres longitudes de onda en función de la tasa de precipitación. Imagen extraída de [1].

De esta figura se puede observar que un radar en banda S, en lluvia leve ($R \sim 1 \text{ mm h}^{-1}$), tiene una atenuación específica de aproximadamente $0.0008 \text{ dB km}^{-1}$, mientras que en lluvia intensa ($R \sim 100 \text{ mm h}^{-1}$), la atenuación específica es $0.0007 \text{ dB km}^{-1}(\text{mm h}^{-1})^{-1} \times (100 \text{ mm h}^{-1}) = 0.07 \text{ dB km}^{-1}$. Basado en estos valores resulta evidente que para que haya

atenuación significativa en un radar que opera en banda S, el pulso debe propagarse a través de una región extensa de precipitación intensa.

Algo diferente ocurre en los radares de longitud de onda más corta, donde la atenuación puede ser importante. Si se observa nuevamente la Figura 2.4, la atenuación específica en lluvia moderada ($R \sim 50 \text{ mm h}^{-1}$) es de 0.25 dB km^{-1} en banda C y alrededor de 2 dB km^{-1} en banda X [1].

Para ilustrar mejor esto, la Figura 2.5 muestra los barridos de dos radares, el WSR-88DKOUN de banda S y el OU-PRIME de banda C, ambos ubicados en Norman, Oklahoma. Para observar los efectos de la atenuación, notar, de los paneles superiores, en los puntos A y B la reducción de reflectividad en banda C comparado con el radar en banda S, justo detrás de una región de eco intenso. El efecto en la reflectividad diferencial Z_{dr} es incluso peor, con valores de Z_{dr} tan bajos como -8.5 dB en la banda C en regiones donde los valores de Z_{dr} del radar en banda S son de 0.5 y 1.5 dB .

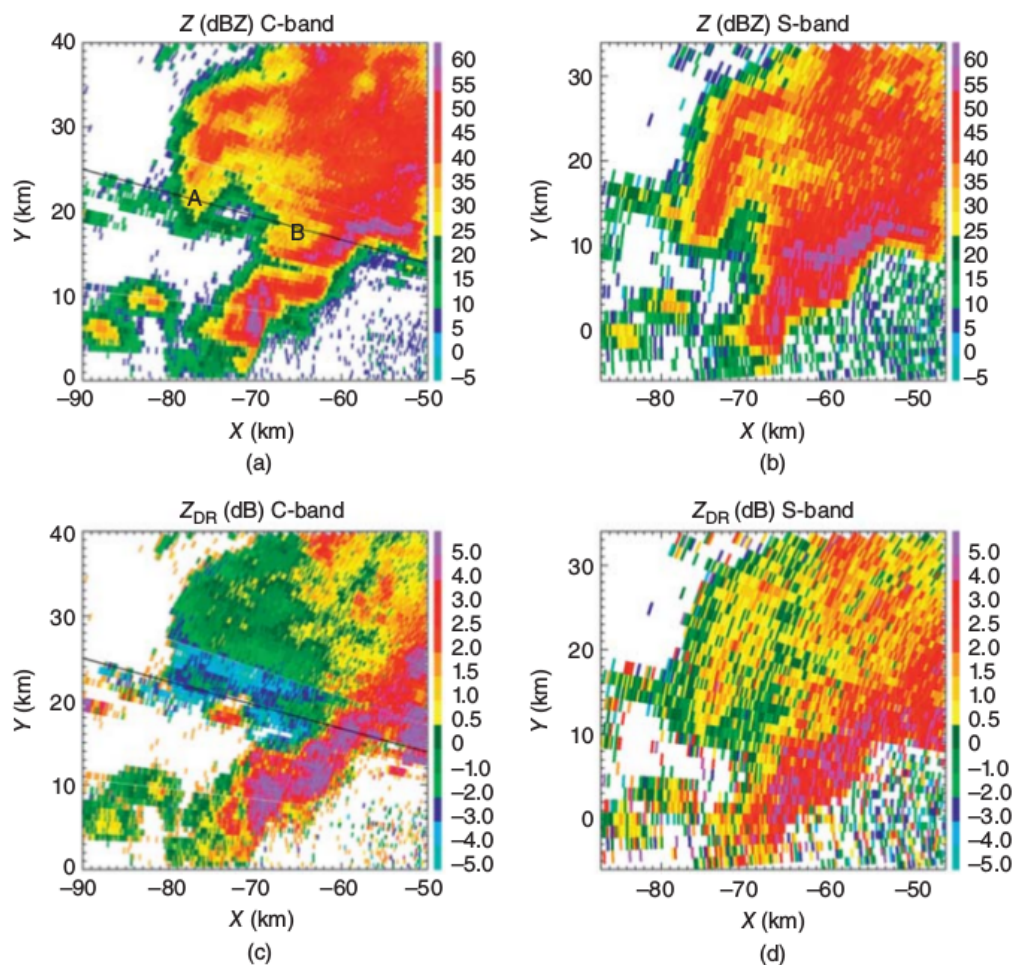


Figura 2.5: Factor de reflectividad en banda C (a) y banda S (b) y los correspondientes campos Z_{dr} en banda C y S (c,d). Las regiones con sesgo negativo en reflectividad causadas por la atenuación en banda C son marcadas con las letras A y B en el panel (a). Imagen extraída de [1].

Bajo ciertas condiciones los radares polarimétricos permiten corregir por atenuación utilizando las mediciones de fase diferencial (Φ_{dp}) y fase diferencial específica (K_{dp}), las cuales son inmunes a los efectos de la atenuación debido a que son medidas de la fase.

La primera técnica para corregir por atenuación se basó en formulas simples [45],

$$\begin{aligned}\Delta Z_H &= \alpha \Phi_{dp} \\ \Delta Z_{dr} &= \beta \Phi_{dp},\end{aligned}$$

donde el coeficiente α es la razón entre la atenuación específica A_H y K_{dp} , y el coeficiente β es la razón entre la atenuación diferencial específica A_{dp} y K_{dp} . Sin embargo, estimar los parámetros α y β no es trivial ya que las correcciones dependen de la temperatura y la naturaleza de la distribución de tamaños de gotas que caracterizan la precipitación (por ejemplo estratiforme, convectiva y tropical).

A la actualidad se han realizado diversos esfuerzos para desarrollar algoritmos para corregir por atenuación en radares de banda C [46, 47, 48, 49, 50, 51].

Finalmente, es importante resaltar que la lluvia sobre el radomo que protege al radar atenúa significativamente la señal del mismo [2, 52]. Para profundizar más en el área el lector puede consultar Rauber & Nesbitt [1].

2.7. Bloqueo del haz

El bloqueo del haz ocurre cuando el haz del radar se ve bloqueado parcial o totalmente por algún obstáculo cercano, usualmente edificios, árboles o montañas. El efecto del bloqueo puede restringir severamente la utilización de la elevación más baja de la antena, la cual provee la información más importante para la estimación de la tasa de precipitación al nivel de la superficie [53, 54, 55].

El bloqueo parcial o total del haz puede ser definido en función del radio de la sección transversal del haz a y la diferencia de la altura media del terreno y el centro del haz del radar y (Figura 2.6); dependiendo de la posición relativa de la altura del haz respecto a la topografía, y puede ser positivo o negativo.

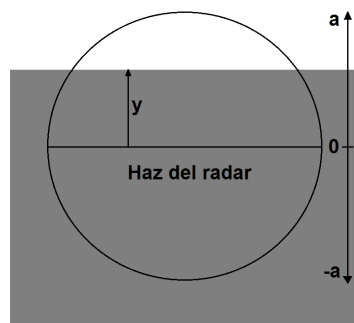


Figura 2.6: Elementos considerados para la clasificación del tipo de bloqueo: a es el radio de la sección transversal del haz e y la distancia entre el centro del haz y la topografía. Imagen extraída de [3].

De acuerdo a estas definiciones, el bloqueo parcial del haz ocurre cuando $-a < y < a$, el bloqueo total cuando $y \geq a$ y finalmente, si $y \leq -a$ no hay bloqueo de ningún tipo [3].

Bloqueo del haz por las sierras

Debido a la altura de las Sierras de Córdoba y su cercanía al radar meteorológico RMA1 los barridos o PPI más bajos son bloqueados parcial y, en algunos casos, totalmente por la presencia de las mismas (Ver Fig. 4.2). Esto lleva a que, para monitorear la atmósfera detrás de las sierras, deban utilizarse mayores ángulos de elevación de la antena del radar para evitar la obstrucción de la señal.

Un caso para mostrar esto se da en la localidad de Ambul ubicada en traslasierra a unos 82 km en dirección oeste de la ciudad de Córdoba Capital. El pluviómetro de la localidad de Ambul se encuentra a unos 7 km al oeste de la misma y sus coordenadas geográficas son 31.4822° S, 65.1281° W (Fig. 2.7). En la Figura 2.8 se puede observar el perfil de altura del segmento que une el radar meteorológico RMA1 con la localidad de Ambul y se puede ver, a unos 60 km del radar, un pico de montaña de 2288 msnm de altura que, de acuerdo a la Figura 4.2, bloquea totalmente los PPI 1 (0.5°), 2 (0.9°) y 3 (1.3°) y bloquea parcialmente el PPI 4 (1.8°) mientras que los PPI mayores a 5 ($\geq 2.3^\circ$) no son afectados.

Observar que el PPI 5 (2.3°), el más bajo libre de interferencia por bloqueo, sobre el pluviómetro de Ambul está escaneando la atmósfera a una altura de 4600 msnm (Fig. 4.2) mientras que el pluviómetro está ubicado a una altura de 1000 msnm, esto nos da una diferencia de altura de 3600 m entre lo que mide el radar y lo que mide el pluviómetro.

Esta gran diferencia de altura ocasiona que las mediciones de radar no se correspondan con las mediciones en tierra y tiene como consecuencia la imposibilidad de obtener relaciones $Z_H(R)$ y $R(Z_H, Z_{dr})$ confiables.

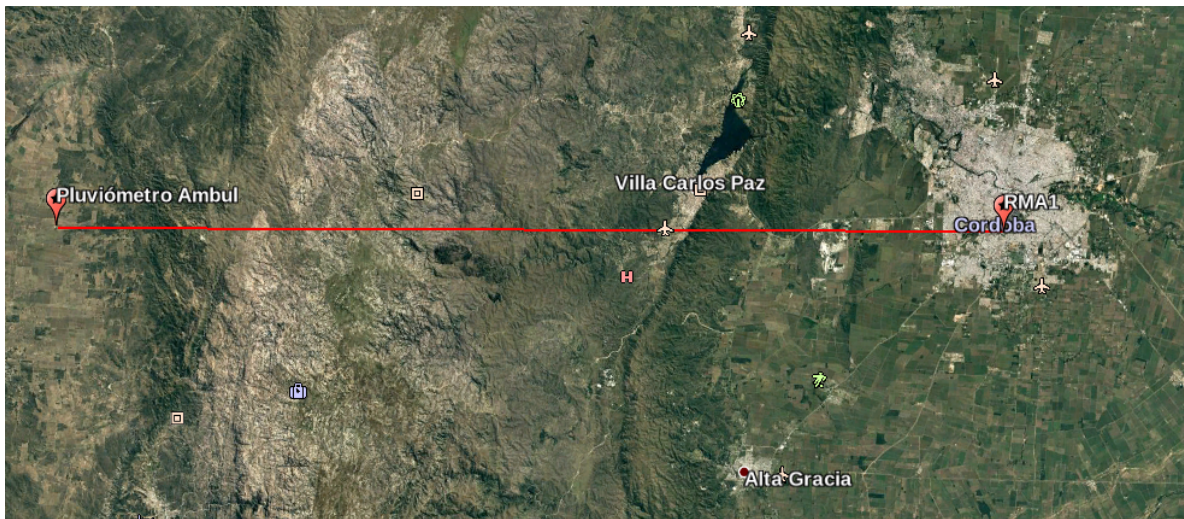


Figura 2.7: Ubicación del pluviómetro de Ambul y del radar meteorológico RMA1.

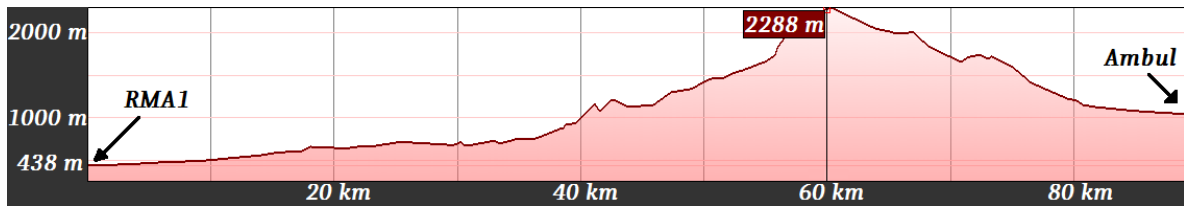


Figura 2.8: Perfil de elevación de altura en la dirección del pluviómetro ubicado en Ambul visto desde el radar RMA1.

2.8. Datos del radar RMA1

Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron los registros del radar meteorológico RMA1 facilitados por el Grupo Radar Córdoba (GRC). Los datos utilizados fueron el factor de reflectividad horizontal Z_H y la reflectividad diferencial Z_{dr} . Ambas mediciones son obtenidas de un archivo en formato NetCDF.

A través de algoritmos desarrollados en Python (Ver Apéndice B) y en conjunto con el módulo Py-ART [56] desarrollado y utilizado por el Atmospheric Radiation Measurement (ARM) se seleccionaron los datos correspondientes a los días y horarios en los cuales se produjeron las tormentas analizadas y se procesaron para obtener los valores Z y Z_{dr} de las mallas sobre cada uno de los pluviómetros ubicados en los anillos mencionados anteriormente.

En la región llanura se utilizó el PPI (*Plan Position Indicator*) más bajo que corresponde a una elevación de antena de 0.5° mientras que en la región sierras se utilizaron los PPI 2, 3 y 4 que corresponden a los ángulos de elevación de 0.9° , 1.3° y 1.78° respectivamente debido a que las sierras obstruyen parcial y, en ocasiones, totalmente el haz del PPI más bajo (Ver Apéndice C para la ubicación y PPI utilizado en cada pluviómetro).

En todos los casos, se utilizó la duración del pulso que corresponde a un gate de 450 m de longitud.

Frecuencia de las mediciones Z_H , Z_{dr}

El radar meteorológico barre la atmósfera a través de una antena paraboloide que gira continuamente 360° en azimut para distintos ángulos de elevación. El barrido comienza con la antena apuntando hacia la dirección norte en la elevación más baja $\theta = 0.5^\circ$ y luego de girar 360° (en sentido norte-oeste-sur-este) en azimut pasa a la siguiente elevación $\theta = 0.9^\circ$, y así sucesivamente en las siguientes elevaciones. El tiempo que tarda la antena entre dos barridos completos consecutivos de la atmósfera es de aproximadamente 10-15 minutos.

3

Pluviómetros

Un pluviómetro es un instrumento que recolecta y mide la precipitación. Existen distintos tipos, los más simples consisten en recipientes milimetrados de lectura visual. También existen los de operación automática, que están basados en diferentes mecanismos de funcionamiento. Algunos de las formas más frecuentes de medición en éstos son: por cangilón, pesado, flotante, capacitancia y también existen dispositivos acústicos, ópticos y diversos tipos de disdrómetros.

3.1. Pluviómetros cangilonados

El pluviómetro cangilonado es probablemente el instrumento de medición de precipitación más común en el ámbito de la meteorología. La lluvia es recolectada por un cilindro de 20 a 30 cm de diámetro el cual está canalizado a una de dos pequeñas cubetas sobre un balancín (Fig. 3.1 Der.). Cada cubeta está diseñada para recolectar una cierta cantidad de precipitación, luego de llenarse la primer cubeta está baja para descargar su contenido y lleva a la segunda cubeta en la posición bajo el canal del cilindro. Cada vez que una cubeta baja a descargar el contenido de agua se envía una señal eléctrica a un dispositivo electrónico que las graba (Fig. 3.1 Izq.). La cantidad total de precipitación que cayó en un dado periodo de tiempo (usualmente 1 hora) es calculado contando el número de señales eléctricas enviadas cada 10 minutos.

Los errores en la medición pueden ocurrir durante lluvia intensa debido a que la precipitación se pierde durante el movimiento del balancín subestimando la precipitación real. También pueden ocurrir cuando el fulcro está muy próximo a la parte superior del cilindro provocando que la lluvia salpique hacia fuera del cilindro. Los fuertes vientos pueden producir movimientos involuntarios del balancín provocando resultados de precipitación erróneos [4, 57].

Para la realización de este trabajo se utilizaron pluviómetros cangilonados pertenecientes a distintos organismos gubernamentales como instrumentos que midieron la precipitación en



Figura 3.1: Interior (imagen izquierda) y exterior (imagen derecha) de un pluviómetro cangilonado. Imágenes extraídas de [4].

superficie. Estos dispositivos tienen la característica de medir la precipitación acumulada cada 10 minutos por lo que la tasa de precipitación fue computada a partir de estos registros cada 10 minutos.

Tasa de precipitación R

La Tasa de Precipitación es una medida de la intensidad de lluvia que se calcula con la cantidad de precipitación caída por unidad de tiempo asumiendo que la intensidad de la precipitación es constante en dicho intervalo. La tasa de precipitación se expresa habitualmente en mm h^{-1} .

3.2. Datos de pluviómetros

Los registros de superficie fueron obtenidos de una red de 76 estaciones meteorológicas o pluviómetros ubicados en el área de estudio, delimitada por una circunferencia de 120 km de radio alrededor del radar RMA1.

Estas estaciones pertenecen a la Bolsa de Cereales, al Ministerio de Servicios Públicos, al Ministerio de Agricultura y Ganadería, entre otros organismos y municipios de la Provincia de Córdoba.

En la Figura 3.2 se muestran las ubicaciones de las estaciones,

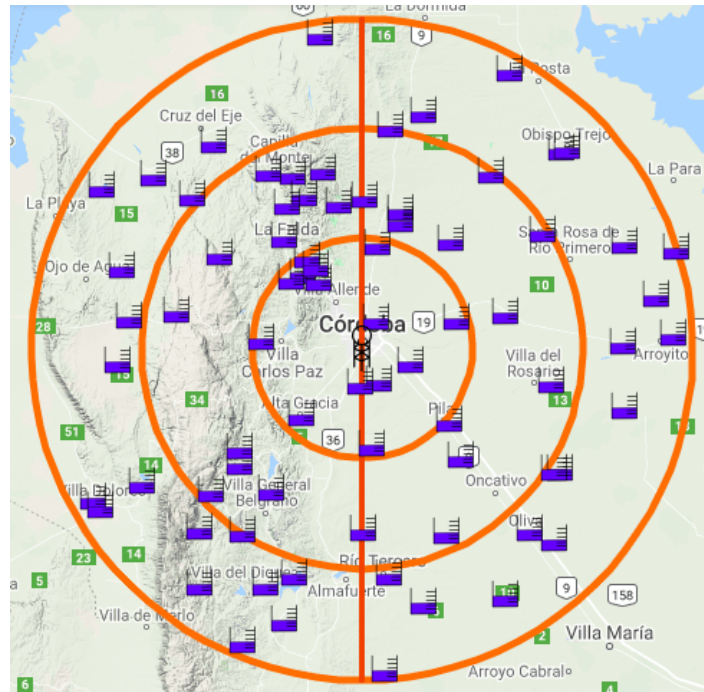


Figura 3.2: Red de estaciones meteorológicas utilizadas en este trabajo.

Frecuencia de las mediciones R

Los instrumentos que registran la precipitación en superficie son los pluviómetros. La red de pluviómetros miden la precipitación acumulada R_a , en milímetros, cada 10 minutos y a partir de estos datos es posible calcular la tasa de precipitación R correspondiente a dicho intervalo con la siguiente expresión

$$R = \left(\frac{60}{10} \text{ h}^{-1}\right) R_a, \quad (3.1)$$

donde R es la tasa de precipitación en mm h^{-1} en el intervalo de tiempo en cuestión. Notar que el cálculo fue realizado suponiendo que la tasa de precipitación fue constante en el intervalo de tiempo.

4

Relaciones $Z_H - R$ y Pol- R

Los radares meteorológicos no miden directamente la cantidad de precipitación caída sobre una región o lugar, para ello utilizan relaciones empíricas entre las variables que mide el radar y la tasa de precipitación. En este capítulo se describen las relaciones $Z_H - R$ y Pol- R , donde Z_H es el factor de reflectividad horizontal, R la tasa de precipitación en superficie y Pol hace referencia a las variables polarimétricas que mide el radar (en este trabajo Z_{dr}).

4.1. Relación $Z_H - R$

Una de las relaciones empíricas más utilizadas y conocidas es la relación entre el factor de reflectividad horizontal Z_H [$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$] y la tasa de precipitación R [mm h^{-1}] denominada *relación $Z_H - R$* de la forma

$$Z_H = aR^b, \quad (4.1)$$

donde a y b son parámetros ajustables.

En 1948, Marshall & Palmer [10] desarrollaron una relación de este tipo y en su investigación ellos encontraron que $a = 200$ y $b = 1,6$. Actualmente, la relación de Marshall & Palmer es la más conocida y es utilizada por defecto en numerosos radares meteorológicos.

Sin embargo existen numerosas relaciones $Z_H - R$ tabuladas en la literatura científica, algunas de ellas fueron desarrolladas para un tipo de tormenta en particular (convectiva, estratiforme o una mezcla de ambas (Ver Apéndice A)), otras para una región geográfica en particular y otras para un clima en particular o para una estación del año. Battan [58] en 1973 presentó una lista de 69 relaciones $Z_H - R$ y Raghavan en 2013 otras 30 [59].

Variabilidad de la relación $Z_H - R$

Una de los factores que restringen la calidad de las estimaciones cuantitativas de precipitación a través de la relación $Z_H - R$ está asociada a la variabilidad de los coeficientes a y b .

En la actualidad, muchos estudios han documentado la variación de la relación $Z_H - R$ en el espacio y el tiempo, de una tormenta a otra e incluso en una misma tormenta [60, 61]. Más aún, investigaciones recientes, demostraron que la variabilidad de la relación $Z_H - R$ es causada por la variabilidad de la distribución de tamaños de gotas (DSD) en la tormenta y por lo tanto dicha variación es más el resultado de la dinámica, termodinámica y microfísica de la tormenta que una clasificación del tipo convectivo/estratiforme de la misma [18].

Hoy en día se sabe que el coeficiente a de la relación $Z_H - R$ toma valores de unas pocas decenas a varios cientos, mientras que el coeficiente b está limitado a un rango más corto: de 1 a 3 [58, 62, 63]. Además, el coeficiente a aumenta con la actividad convectiva, mientras que b aumenta con la estratificación de la tormenta [64].

Con la estación del año

Debido a que las características de la precipitación dependen de la distribución de tamaños de gotas (DSD) y a su vez los coeficientes a y b de la relación $Z_H - R$ dependen de la DSD es posible que la variación de las características de la precipitación en la Provincia de Córdoba influya en los valores de los coeficientes a y b de la relación $Z_H - R$.

Con respecto a esto existen algunos antecedentes en la bibliografía: Kozu T. et al [65] sugieren una variación de la DSD entre las estaciones del año y por lo tanto una variación de la relación $Z_H - R$ que debe tenerse en cuenta si se quieren resultados más precisos. Das S. et al [5], encuentran una variación estacional significativa de la relación $Z_H - R$ la cual es evidencia de los diferentes procesos de formación de la lluvia en la región de Kolkata, India. Además, en su trabajo muestran las variaciones de los parámetros a y b con la altura durante los meses de julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre del 2009 (Figura 4.1). Esta variación con la altura y la estación del año es atribuida a los distintos tipos de precipitación (convectivo y estratiforme) y, por lo tanto, a la variación de la distribución de los tamaños de gotas (DSD).

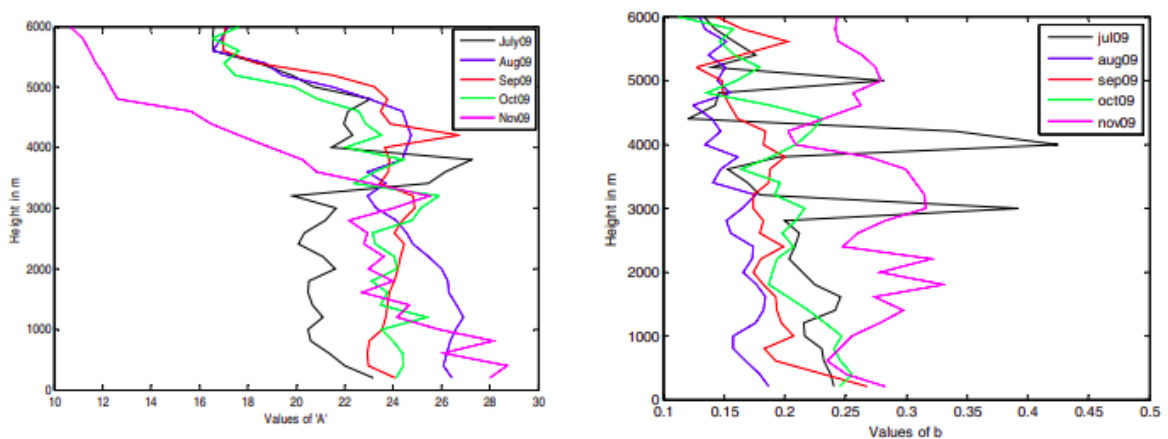


Figura 4.1: Variación estacional del perfil vertical de la relación $Z_H - R$ en Kolkata, India (2009). El panel izquierdo muestra la variación del parámetro a mientras que el panel derecho la variación del parámetro b [5].

En la actualidad es común encontrar estudios donde los autores derivan distintas relaciones $Z_H - R$ aplicables a las distintas estaciones del año en un intento de mejorar la precisión de las estimaciones de precipitación basadas en observaciones por radar.

Con la distancia

Debido a la curvatura terrestre el haz del radar no mantiene una altura constante a medida que se propaga. Este efecto se vuelve más evidente cuando el rango o distancia al radar aumenta.

Por ejemplo, en el caso del radar meteorológico RMA1, el ángulo de elevación más bajo es $\theta = 0.5^\circ$, el haz a una distancia aproximada de 7 km del radar tiene una altura de ≈ 550 msnm mientras que a una distancia de 52 km tiene una altura de ≈ 1075 msnm. Esto se ilustra en la siguiente imagen (Fig. 4.2), donde puede observarse el efecto de la curvatura terrestre para distintas elevaciones de la antena.

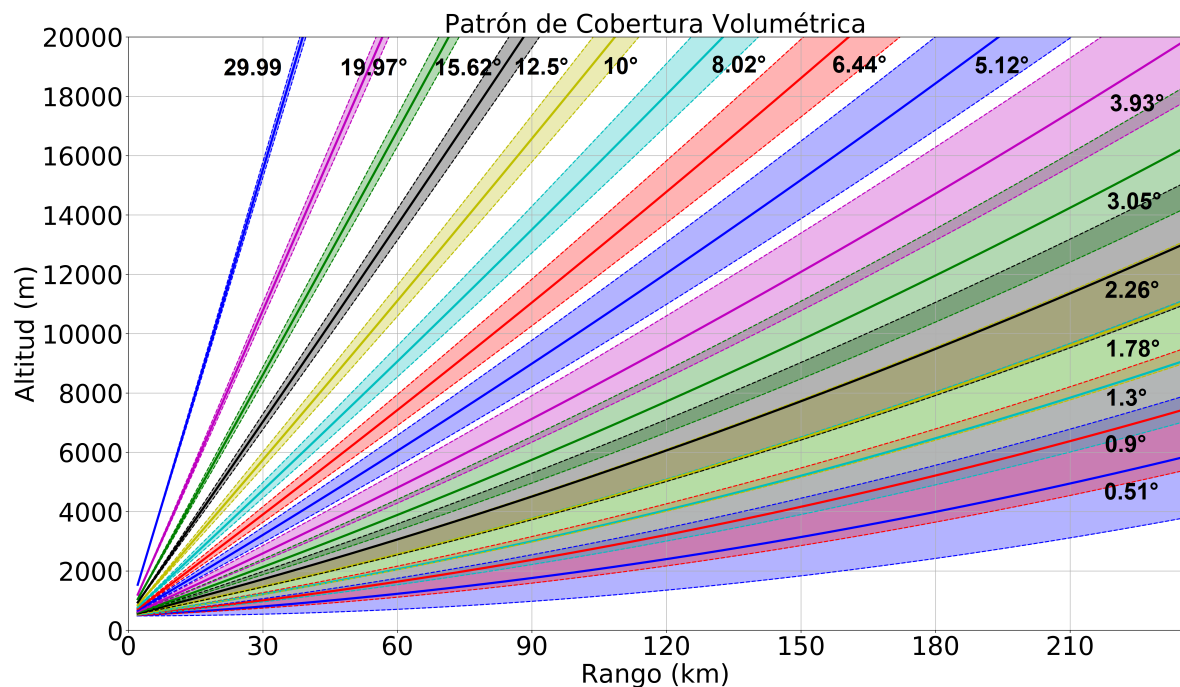


Figura 4.2: Trayectoria y altura (sobre el nivel del mar) de los haces del radar RMA1 para distintas elevaciones teniendo en cuenta la curvatura terrestre y el ensanchamiento del haz.

Por otra parte, como el haz emitido por el radar tiene forma cónica, su volumen aumenta a medida que se propaga y por lo tanto el volumen muestreado es cada vez mayor (Fig. 4.2). Esto produce un aumento del error en la estimación de precipitación a través de la relación $Z_H - R$ [66].

En la literatura científica pueden encontrarse algunos estudios al respecto, Fabry F. et al [67], concluyen que en el caso de tormentas estratiformes se pueden conseguir estimaciones confiables hasta los 120 km, mientras que en el caso de tormentas convectivas el rango se

extiende hasta los 150 km. Compliew S. et al [66], realizan un estudio en detalle del efecto de la distancia y del ensanchamiento del haz del radar en las estimaciones de precipitación y proponen una transformación de escala para reducir el error en las estimaciones.

Sebastianelli S. et al [68], cuantifica el error en las estimaciones de precipitación en función del rango comparando los registros de pluviómetros en superficie con las estimaciones del radar.

Por último, Simpson M. et al [22], muestran que una relación Pol- R del tipo $R(Z_H, Z_{dr})$ es más robusta que una del tipo $R(Z_H)$, al menos dentro de los 125 km de distancia. Finalmente, en el mismo trabajo afirman que más allá de los 150 km la calidad de las estimaciones de precipitación se reduce enormemente.

Para llegar a esta conclusión ellos estudiaron 300 horas de precipitación durante 46 días en el estado de Missouri (EEUU) y compararon 55 relaciones empíricas, entre las cuales se encuentran las relaciones $R(Z_H)$ tradicionales y relaciones Pol- R del tipo $R(Z_{dr}, Z_H)$, $R(K_{dp})$ y $R(Z_{dr}, K_{dp})$. En su trabajo encuentran que la relación $R(Z_{dr}, Z_H)$ tiene el mejor desempeño con un error de 250 mm en la precipitación estimada, mientras que la relación ($R(Z_{dr}, K_{dp})$) con peor desempeño tiene un error de 2000 mm en la precipitación estimada. Además, encuentran que la mayoría de los 55 algoritmos se ven degradados a medida que la distancia al radar aumenta. Los coeficientes de correlación no superan el valor 0.5 a distancias mayores a 130 km.

4.2. Relación $Z_H - Z_{dr} - R$

Los radares de doble polarización ofrecen una mayor variedad de opciones y ventajas para la estimación cuantitativa de la precipitación (QPE) que los radares de simple polarización. En la actualidad gran parte de los radares operativos de EEUU, Europa y algunos países de Asia son de doble polarización debido a las mejoras que estos proveen [69, 70, 71].

Haciendo uso de esta tecnología, distintos autores proponen utilizar relaciones del tipo $R(Z_H, Z_{dr})$, la cual ha demostrado ser más robusta y precisa que una relación $Z_H(R)$ tradicional [22, 72, 73].

La forma de este tipo de relación es [1, 29]

$$R = aZ_H^b Z_{dr}^c, \quad (4.2)$$

donde Z_H es el factor de reflectividad horizontal en $[\text{mm}^6 \text{m}^{-3}]$, $Z_{dr} = 10^{\frac{Z_{dr}[\text{dB}]}{10}}$ es la reflectividad diferencial, R es la tasa de precipitación en $[\text{mm h}^{-1}]$ y a , b , c son parámetros a determinar.

5

Técnica de correlación propuesta

5.1. Procedimiento de correlación entre las mediciones de radar y del pluviómetro

El método propuesto para determinar los pares $Z_H - R$ consiste en tomar una rejilla o malla de 3x3 celdas centrada en el pluviómetro (Figura 5.1), es decir, haciendo coincidir las coordenadas geográficas de la celda central de la malla con las coordenadas geográficas del pluviómetro.

La elección de una malla de 3x3 celdas es una manera de considerar el efecto que produce el viento en la trayectoria de la precipitación mientras cae. Cuando una tormenta es acompañada por vientos, la precipitación medida por un pluviómetro posiblemente no provenga de la región de la tormenta inmediatamente encima del pluviómetro sino de la región ubicada en la dirección del viento.

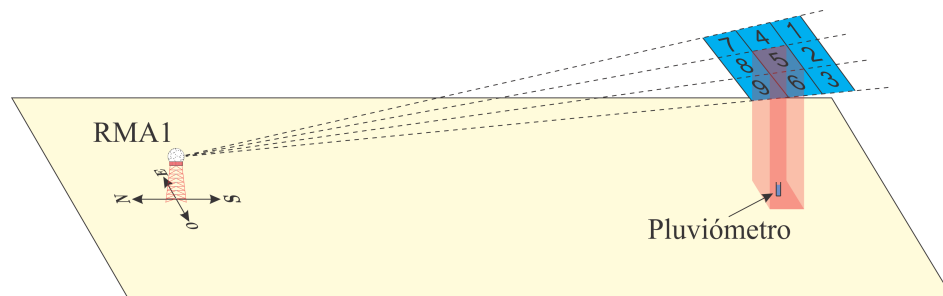


Figura 5.1: Localización del pluviómetro en relación a la malla de 3x3 celdas del radar.

Por otra parte, el tiempo que tarda la precipitación debe tenerse presente al momento de proponer un método. Esto se debe a la diferencia de altura entre las mediciones del radar y de los pluviómetros (Ver Tabla 5.1). Para contrarrestar esta diferencia de alturas se debe relacionar un valor de factor de reflectividad Z_H a un tiempo t con un valor de tasa de precipitación R a un tiempo posterior $t + \Delta t$ donde Δt se determinará desfasando las curvas de

factor de reflectividad sobre la de precipitación en 5, 10 y 15 minutos y tomando el tiempo correspondiente al máximo del coeficiente de correlación.

Tabla 5.1: Altura aproximada (en metros) entre el centro del gate (en las direcciones norte, este, sur y oeste) y el terreno para el radar RMA1.

Rango	Norte	Este	Sur	Oeste
2 km	100	100	100	100
20 km	200	340	260	0
40 km	370	660	510	-40
60 km	590	1025	775	-1030
80 km	930	1400	1230	400
100 km	1290	1900	1550	1070
120 km	1500	2300	2000	2060

Si bien es posible que Δt no sea exactamente un múltiplo de 5, en esta tesis se trabajó con desfases de 5, 10 y 15 minutos siguiendo los lineamientos de los desfases utilizados en trabajos similares para otros radares. La comparación de los resultados obtenidos a partir de datos obtenidos de una curva de interpolación con una frecuencia mayor (por ejemplo cada 1 minuto) será motivo de futuras investigaciones así como también el análisis de la calidad de la interpolación como estimador de los datos.

Para determinar las celdas de radar que contribuyen a la tasa de precipitación medida por el pluviómetro en tierra se utilizará la forma de la relación $Z_H - R$ (Ec. 4.1). Tomando logaritmo a ambos miembros se obtiene

$$\log(Z_H(t)) = \log(a) + b \log(R(t + \Delta t)). \quad (5.1)$$

La Ecuación 5.1 indica que $Z_H(R)$ en escala logarítmica es una ecuación lineal de pendiente b y ordenada $\log a$. Con la relación $Z_H - R$ en esta forma es posible determinar, a través del coeficiente de correlación lineal de Pearson, qué celdas son las que mejor se correlacionan con los datos medidos en superficie. Posteriormente, cada valor de R se relacionará con un valor \overline{Z}_H y \overline{Z}_{dr} que resultan del promedio pesado de los valores Z_i y $Z_{dr,i}$ respectivamente de las celdas con mayores coeficientes de correlación. Finalmente, con los pares $R - \overline{Z}_H$ y $R - \overline{Z}_H - \overline{Z}_{dr}$ determinados se realizará un ajuste de cuadrados mínimos para determinar el valor numérico de los coeficientes a , b de la relación $Z_H - R$ y \tilde{a} , \tilde{b} y \tilde{c} de la relación $R - Z_H - Z_{dr}$.

Las relaciones $Z_H - R$ y $R - Z_H - Z_{dr}$ se derivarán en diferentes subregiones dentro del área de estudio, la cual está formada por un área circular de 40 km de radio, dos anillos que se extienden de 40 a 80 km y de 80 a 120 km con el radar RMA1 en el centro. Estas tres regiones a su vez están divididas con una línea imaginaria Norte-Sur que pasa por el radar.

Para simplificar el nombre de las distintas subregiones que conforman el área de estudio las regiones ubicadas al oeste de la línea N-S se denominarán 1S (área semicircular de 0 a 40 km), 2S (semianillo de 40 a 80 km) y 3S (semianillo de 80 a 120 km). Mientras que las regiones ubicadas al este de la línea N-S se denominarán 1L (área semicircular de 0 a 40 km),

2L (semianillo de 40 a 80 km) y 3L (semianillo de 80 a 120 km). En esta notación, las letras S y L se refieren a las regiones de las sierras (oeste de la línea N-S) y llanura (este de la línea N-S) de Córdoba respectivamente.

La distancia límite de 120 km en el área de estudio se basó en distintas investigaciones en las cuales se concluye que a distancias mayores la calidad de las estimaciones cuantitativas de precipitación se reduce enormemente debido a que el radar muestrea la atmósfera a una altura cada vez mayor por la curvatura terrestre y a la menor resolución del mismo [66, 67, 68].

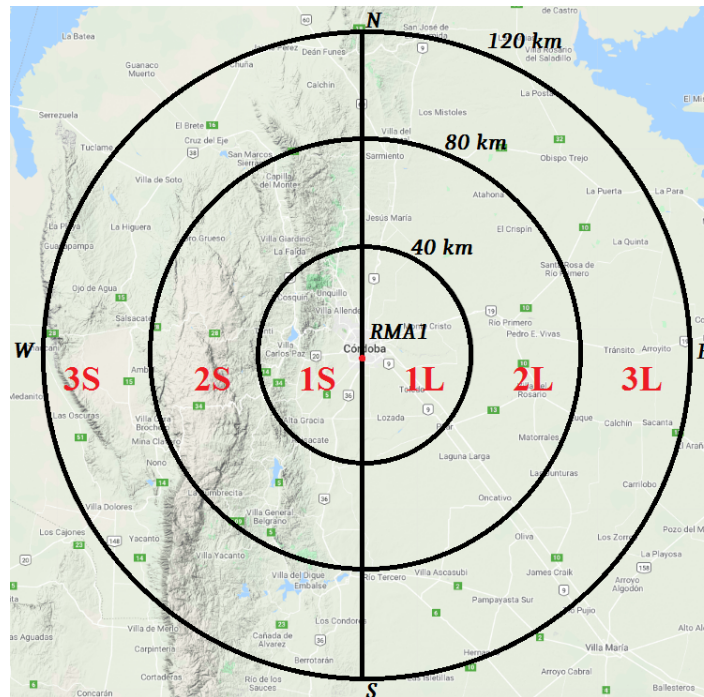


Figura 5.2: Área de estudio con sus respectivas divisiones.

Estas divisiones en el área de estudio permitirán estudiar si existe variación en la precisión de las estimaciones de precipitación cuando la distancia al radar aumenta. Al mismo tiempo la división con la línea Norte-Sur posibilitará analizar por separado la llanura y la zona de las sierras de Córdoba con el fin de estudiar si la topografía del terreno incide en la forma de las relaciones $Z_H - R$, $R - Z_H - Z_{dr}$ y/o precisión de las estimaciones de precipitación por radar.

Adicionalmente, para estudiar la posible variación de las relaciones obtenidas con la estación del año se analizaron tormentas que ocurrieron en los meses de abril y diciembre del año 2019, es decir, tormentas de la temporada de otoño y primavera respectivamente.

Descripción de la técnica

Para describir de manera detallada cada paso del procesamiento de los registros del radar meteorológico RMA1 y de las estaciones pluviométricas se considerará un caso general.

Suponiendo que durante una tormenta se miden los factores de reflectividad y las tasas de precipitación en los instantes t_i y t'_i respectivamente (en general $t_i \sim t'_i$ pero no son iguales debido a que el radar no mide en simultáneo con los pluviómetros), los cuales se exhiben en la siguiente tabla (se prescindirá del subíndice H de Z_H para mayor claridad)

t [HH : MM]	Z [dBZ]	Z_{dr} [dB]	t' [HH : MM]	R [mm h ⁻¹]
t_1	Z_1^i	$Z_{dr_1}^i$	t'_1	R_1
t_2	Z_2^i	$Z_{dr_2}^i$	t'_2	R_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
t_N	Z_N^i	$Z_{dr_N}^i$	$t'_{N'}$	$R_{N'}$

Tabla 5.2: Instantes t_j en los cuales fueron medidos el factor de reflectividad Z_j^i y la reflectividad diferencial $Z_{dr_j}^i$ de la celda i e instantes t'_k en los cuales fueron medidas las tasas de precipitación R_k .

Donde el superíndice i en el factor de reflectividad Z y en la reflectividad diferencial Z_{dr} corresponde a las distintas celdas de la malla 3x3 (Fig. 5.1). Es decir, en cada instante t_i hay nueve mediciones de Z y nueve de Z_{dr} que corresponden a cada una de las celdas de la malla.

El siguiente paso del procedimiento es interpolar los datos de la Tabla 5.2. Para ello se debe expresar Z en unidades lineales y $Z_{dr} = 10^{\frac{Z_{dr}[\text{dB}]}{10}}$. Tanto las mediciones del radar como las del pluviómetro en función del tiempo se interpolaron con una interpolación *spline* cúbica (Fig. 5.3).

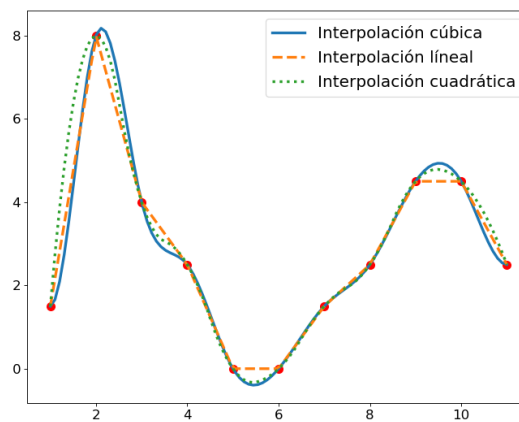


Figura 5.3: Ejemplo de la interpolación cúbica utilizada (azul) comparada con las interpolaciones lineal (naranja) y cuadrática (verde). Los puntos rojos son los datos originales.

A partir de las curvas interpoladas es posible obtener los valores de Z , Z_{dr} y R con una frecuencia de 5 minutos. En otras palabras, la Tabla 5.2 queda de la siguiente manera

\tilde{t} [HH : MM]	\tilde{Z} [$\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$]	\tilde{Z}_{dr}	\tilde{R} [mm h^{-1}]
\tilde{t}_1	\tilde{Z}_1^i	$\tilde{Z}_{dr_1}^i$	\tilde{R}_1
\tilde{t}_2	\tilde{Z}_2^i	$\tilde{Z}_{dr_2}^i$	\tilde{R}_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\tilde{t}_{\tilde{N}}$	$\tilde{Z}_{\tilde{N}}^i$	$\tilde{Z}_{dr_{\tilde{N}}}^i$	$\tilde{R}_{\tilde{N}}$

Tabla 5.3: Instantes \tilde{t}_j en los cuales fueron obtenidos los valores Z_j^i , $Z_{dr_j}^i$ y R_j de la curva de interpolación.

La Tabla 5.3 indica que se tienen los valores Z , Z_{dr} y R al tiempo \tilde{t} obtenidos a partir de las curvas de interpolación.

En algunos casos puntuales puede suceder que la curva de interpolación resulta negativa en algunos tramos cuando la tasa de precipitación o el factor de reflectividad toma valores próximos a 0 o decae abruptamente en un intervalo corto de tiempo. Estos tramos en los cuales $R(t) < 0$ y $Z(t) < 0$ no tienen sentido físico. En estos casos, todos los valores negativos que surgen de las curvas de interpolación son obligados a ser 0.

En la Figura 5.4 se pueden observar las curvas de interpolación $Z_H(t)$ y $R(t)$ para un caso real, mientras que en la Figura 5.5 las secciones negativas de las curvas de interpolación de la tasa de precipitación y el factor de reflectividad son obligadas a ser 0.

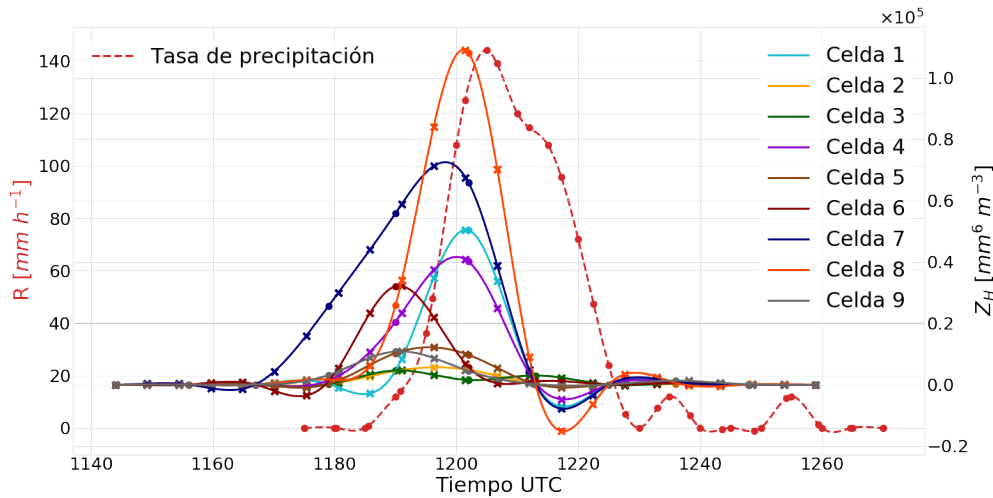


Figura 5.4: Curvas de interpolación de $Z(t)$ (Celdas de 1 a 9) y $R(t)$ (en rojo) extraídas de una tormenta real. Los círculos (●) son los datos medidos mientras que las cruces (×) representan los datos cada 5 minutos.

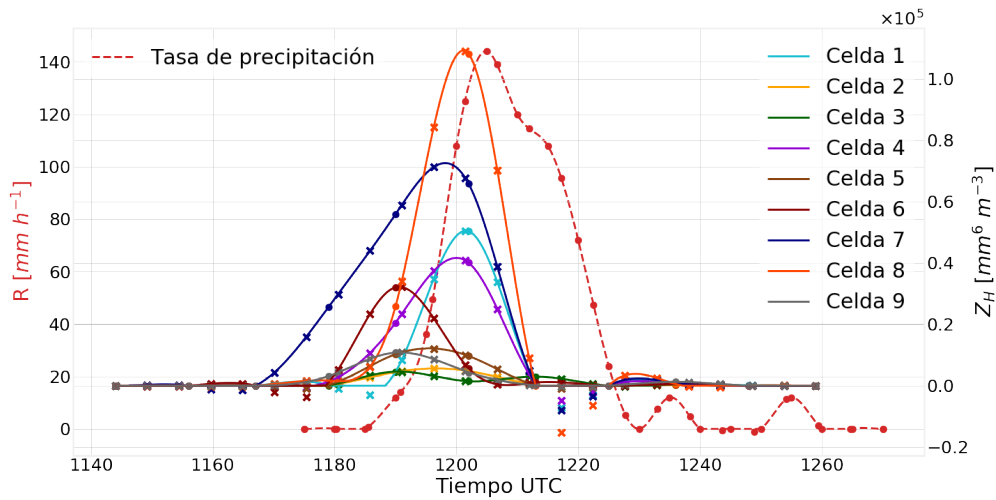


Figura 5.5: Curvas de interpolación $Z(t)$ y $R(t)$ extraídas de una tormenta real. Las secciones negativas de las curvas fueron reemplazadas por secciones nulas. Notar que, efectivamente, algunos puntos interpolados tienen valores negativos (triángulos en la parte inferior de la figura).

De esta manera es posible calcular el coeficiente de correlación entre los datos del radar con los de los pluviómetros.

Recordando que la expresión para el coeficiente lineal de Pearson cuando se tiene un conjunto de n pares de valores $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ está dada por

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (5.2)$$

Se puede calcular la correlación entre los valores de tasa de precipitación y los factores de reflectividad horizontal de cada celda, teniendo en cuenta que los datos tienen que estar en el formato que establece la Ec. 5.1, es decir, se calculará la correlación de Pearson entre $\log(\tilde{R}_1), \log(\tilde{R}_2), \dots, \log(\tilde{R}_{\tilde{N}})$ y $\log(\tilde{Z}_1^i), \log(\tilde{Z}_2^i), \dots, \log(\tilde{Z}_{\tilde{N}}^i)$ para cada celda $i = 1, 2, \dots, 9$.

Debido a la dinámica de la tormenta y a los cambios de dirección en el viento durante la misma es posible que la celda o celdas que contribuyen a la tasa de precipitación en superficie varíe en el tiempo, por este motivo se propone correlacionar los factores de reflectividad horizontal con los datos de pluviómetros en secciones de una hora de duración. Es decir que por cada hora de tormenta se calcularán nueve coeficientes de correlación, uno por cada celda de la malla. A partir de estos coeficientes de correlación se calcularán los pesos asociados a esa hora de tormenta, con los cuales se formarán los conjuntos de valores $R - Z_H - Z_{dr}$. Luego, en la siguiente hora de tormenta se repetirá el mismo procedimiento y se obtendrán nueve coeficientes de correlación distintos a los asociados a la hora anterior. Este proceso se repetirá hasta completar la duración de la tormenta.

Para encuadrar lo anterior en el ejemplo ilustrado en la Tabla 5.3, se deberá calcular el coeficiente de correlación r_l^i donde $i = 1, \dots, 9$ representa la celda y l representa la sección de la tormenta en cuestión, es decir, si la tormenta dura 5 horas entonces $l = 1, 2, 3, 4, 5$.

Debido a que la frecuencia de los valores de R , Z_H y Z_{dr} es de 5 minutos habrá en cada hora de tormenta 12 valores de estas variables para cada celda.

En la siguiente tabla se resume lo anterior; la primer columna representa las secciones de la tormenta, la segunda el instante en el que se obtuvo el valor de las variables, las siguientes tres columnas son los datos y la última columna (r) representa el coeficiente de correlación de Pearson calculado a partir de los pares $\log(Z)$ y $\log(R)$, aquí el superíndice i indica la celda,

Sección de la tormenta	\tilde{t}	$\log(\tilde{Z})$	$\log(\tilde{Z}_{dr})$	$\log(\tilde{R})$	r
$l = 1$	\tilde{t}_1	$\log(\tilde{Z}_1^i)$	$\log(\tilde{Z}_{dr1}^i)$	$\log(\tilde{R}_1)$	r_1^i
	\tilde{t}_2	$\log(\tilde{Z}_2^i)$	$\log(\tilde{Z}_{dr2}^i)$	$\log(\tilde{R}_2)$	
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
	\tilde{t}_{12}	$\log(\tilde{Z}_{12}^i)$	$\log(\tilde{Z}_{dr12}^i)$	$\log(\tilde{R}_{12})$	
$l = 2$	\tilde{t}_{13}	$\log(\tilde{Z}_{13}^i)$	$\log(\tilde{Z}_{dr13}^i)$	$\log(\tilde{R}_{13})$	r_2^i
	\tilde{t}_{14}	$\log(\tilde{Z}_{14}^i)$	$\log(\tilde{Z}_{dr14}^i)$	$\log(\tilde{R}_{14})$	
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
	\tilde{t}_{24}	$\log(\tilde{Z}_{24}^i)$	$\log(\tilde{Z}_{dr24}^i)$	$\log(\tilde{R}_{24})$	
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

Tabla 5.4: Coeficientes de correlación calculados entre $\log(Z)$ y $\log(R)$ en las distintas secciones l de la tormenta. En cada sección se obtienen nueve coeficientes de correlación correspondientes a cada celda.

A continuación es necesario determinar el valor de Δt , para lo cual se debe calcular el coeficiente de correlación desfasando gradualmente los pares $\log(Z_j^i)$, $\log(R_j)$.

Es decir, primero se debe calcular el coeficiente de correlación para los pares correspondientes a $\Delta t = 0$: $[\log(\tilde{Z}_1^i), \log(\tilde{R}_1)]$, $[\log(\tilde{Z}_2^i), \log(\tilde{R}_2)]$, ..., $[\log(\tilde{Z}_{\hat{N}}^i), \log(\tilde{R}_{\hat{N}})]$ luego se deben desfasar los valores y calcular nuevamente el coeficiente de correlación, es decir, a partir de los pares $[\log(\tilde{Z}_1^i), \log(\tilde{R}_2)]$, $[\log(\tilde{Z}_2^i), \log(\tilde{R}_3)]$, ..., $[\log(\tilde{Z}_{\hat{N}-1}^i), \log(\tilde{R}_{\hat{N}})]$ se obtendrá el coeficiente de correlación correspondiente a $\Delta t = 5$ minutos. Este procedimiento se realizará para $\Delta t = 0, 5, 10, 15$ minutos.

La siguiente tabla resume esto para una mayor claridad.

Sección de la tormenta	$\log(\tilde{Z})$	$\log(\tilde{R})$	$r(\Delta t = 0)$
$l = 1$	$\log(\tilde{Z}_1^i)$	$\log(\tilde{R}_1)$	r_1^i
	$\log(\tilde{Z}_2^i)$	$\log(\tilde{R}_2)$	
	\vdots	\vdots	
	$\log(\tilde{Z}_{12}^i)$	$\log(\tilde{R}_{12})$	
$l = 2$	$\log(\tilde{Z}_{13}^i)$	$\log(\tilde{R}_{13})$	r_2^i
	$\log(\tilde{Z}_{14}^i)$	$\log(\tilde{R}_{14})$	
	\vdots	\vdots	
	$\log(\tilde{Z}_{24}^i)$	$\log(\tilde{R}_{24})$	
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

Tabla 5.5: Coeficientes de correlación calculados entre $\log(Z)$ y $\log(R)$ en las distintas secciones l de la tormenta para $\Delta t = 0$ minutos. En cada sección se obtienen nueve coeficientes de correlación correspondientes a cada celda.

Prescindiendo de la primer columna por simplicidad, los pares con los que se calculan los coeficientes de correlación para $\Delta t = 5, 10, 15$ minutos se muestran en la siguiente tabla,

$\Delta t = 5 \text{ min}$		$\Delta t = 10 \text{ min}$		$\Delta t = 15 \text{ min}$	
$\log(\tilde{Z})$	$\log(\tilde{R})$	$\log(\tilde{Z})$	$\log(\tilde{R})$	$\log(\tilde{Z})$	$\log(\tilde{R})$
$\log(\tilde{Z}_1^i)$	$\log(\tilde{R}_2)$	$\log(\tilde{Z}_1^i)$	$\log(\tilde{R}_3)$	$\log(\tilde{Z}_1^i)$	$\log(\tilde{R}_4)$
$\log(\tilde{Z}_2^i)$	$\log(\tilde{R}_3)$	$\log(\tilde{Z}_2^i)$	$\log(\tilde{R}_4)$	$\log(\tilde{Z}_2^i)$	$\log(\tilde{R}_5)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\log(\tilde{Z}_9^i)$	$\log(\tilde{R}_{10})$	$\log(\tilde{Z}_9^i)$	$\log(\tilde{R}_{11})$	$\log(\tilde{Z}_9^i)$	$\log(\tilde{R}_{12})$
$\log(\tilde{Z}_{10}^i)$	$\log(\tilde{R}_{11})$	$\log(\tilde{Z}_{10}^i)$	$\log(\tilde{R}_{12})$	$\log(\tilde{Z}_{10}^i)$	–
$\log(\tilde{Z}_{11}^i)$	$\log(\tilde{R}_{12})$	$\log(\tilde{Z}_{11}^i)$	–	$\log(\tilde{Z}_{11}^i)$	–
$\log(\tilde{Z}_{12}^i)$	–	$\log(\tilde{Z}_{12}^i)$	–	$\log(\tilde{Z}_{12}^i)$	–
$\log(\tilde{Z}_{13}^i)$	$\log(\tilde{R}_{14})$	$\log(\tilde{Z}_{13}^i)$	$\log(\tilde{R}_{15})$	$\log(\tilde{Z}_{13}^i)$	$\log(\tilde{R}_{16})$
$\log(\tilde{Z}_{14}^i)$	$\log(\tilde{R}_{15})$	$\log(\tilde{Z}_{14}^i)$	$\log(\tilde{R}_{16})$	$\log(\tilde{Z}_{14}^i)$	$\log(\tilde{R}_{17})$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\log(\tilde{Z}_{21}^i)$	$\log(\tilde{R}_{22})$	$\log(\tilde{Z}_{21}^i)$	$\log(\tilde{R}_{23})$	$\log(\tilde{Z}_{21}^i)$	$\log(\tilde{R}_{24})$
$\log(\tilde{Z}_{22}^i)$	$\log(\tilde{R}_{23})$	$\log(\tilde{Z}_{22}^i)$	$\log(\tilde{R}_{24})$	$\log(\tilde{Z}_{22}^i)$	–
$\log(\tilde{Z}_{23}^i)$	$\log(\tilde{R}_{24})$	$\log(\tilde{Z}_{23}^i)$	–	$\log(\tilde{Z}_{23}^i)$	–
$\log(\tilde{Z}_{24}^i)$	–	$\log(\tilde{Z}_{24}^i)$	–	$\log(\tilde{Z}_{24}^i)$	–
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

Tabla 5.6: Correlaciones calculadas entre $\log(Z)$ y $\log(R)$ en las distintas secciones l de la tormenta para $\Delta t = 5, 10, 15$ minutos.

Los coeficientes de correlación calculados alcanzarán, eventualmente, un máximo para cierto valor de Δt el cual determinará el desfase óptimo.

En las siguientes figuras se pueden ver los gráficos de las curvas. La Fig. 5.6 muestra las curvas originales con $\Delta t = 0$ minutos, es decir, con el retraso debido a la diferencia de altura entre las mediciones de radar y del pluviómetro y en las Fig. 5.7, 5.8, 5.9 pueden observarse las correspondientes curvas desfasadas 5, 10 y 15 minutos respectivamente (notar que el desfase correspondiente a $\Delta t = 5$ minutos es el óptimo).

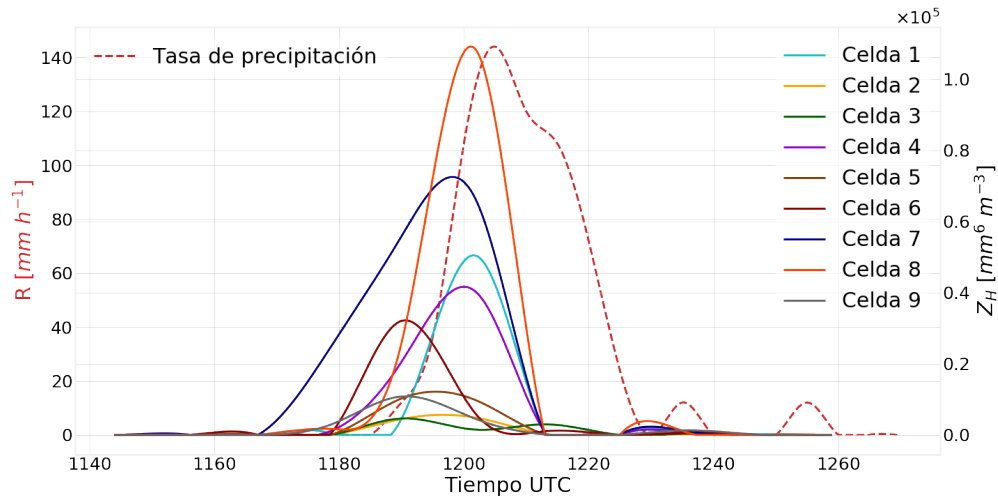


Figura 5.6: Curvas interpoladas $Z(t)$ y $R(t)$ sin desfase ($\Delta t = 0$ minutos).

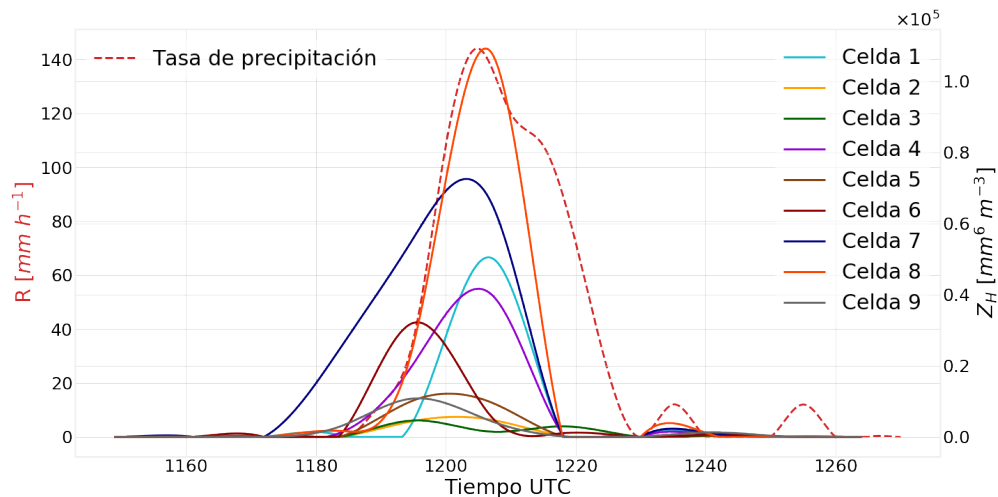


Figura 5.7: Curvas interpoladas $Z(t)$ y $R(t)$ con desfase $\Delta t = 5$ minutos.

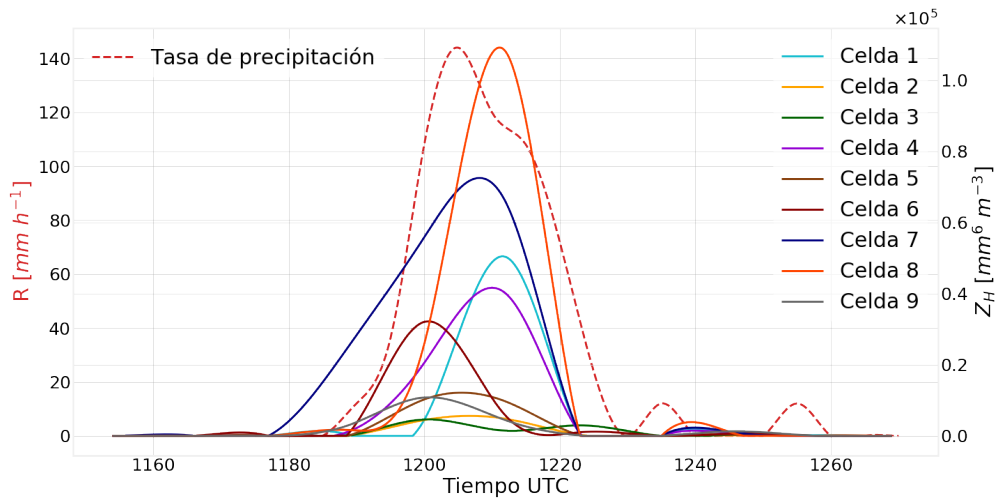


Figura 5.8: Curvas interpoladas $Z(t)$ y $R(t)$ con desfase $\Delta t = 10$ minutos.

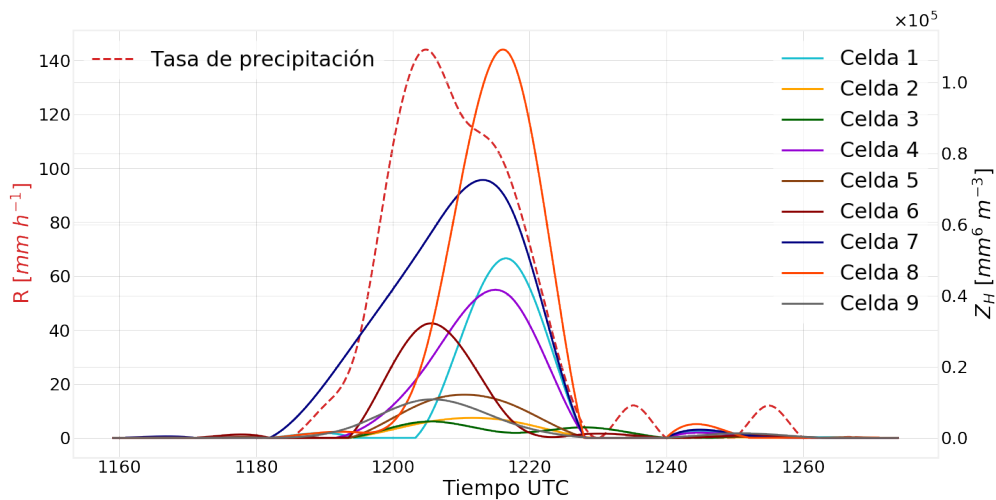


Figura 5.9: Curvas interpoladas $Z(t)$ y $R(t)$ con desfase $\Delta t = 15$ minutos.

En algunos casos puede suceder que una o varias celdas alcancen el máximo coeficiente de correlación en distintos Δt , en estos casos el criterio propuesto en este trabajo es elegir el valor de Δt que corresponde a la celda que haya alcanzado el máximo absoluto en el coeficiente de correlación con respecto a las demás, esto quiere decir que si por ejemplo las celdas 1, 3, 4 y 8 alcanzan el máximo en $\Delta t = 5$ minutos y las celdas 2, 5, 6, 7 y 9 alcanzan el máximo en $\Delta t = 10$ minutos y, suponiendo que la celda 3 tiene el mayor coeficiente de correlación entonces el tiempo de desfase óptimo será $\Delta t = 5$ minutos.

Una vez determinado el valor de desfase óptimo Δt es posible formar las parejas $Z - R$ y $Z - Z_{dr} - R$ a través de un promedio pesado de los valores asociados a ese Δt .

Esto se realizará de la siguiente manera, debido a que cada \tilde{t}_j está asociado a nueve valores de $\log(\tilde{Z})$, nueve de $\log(\tilde{Z}_{dr})$ y un valor de tasa de precipitación $\log(\tilde{R})$ (Tablas

5.5 y 5.6), entonces se procederá a expresar los factores de reflectividad en $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$, la reflectividad diferencial en unidades lineales y la tasa de precipitación en mm h^{-1} , luego se hará un promedio pesado de los nueve factores de reflectividad Z y este valor formará un par $Z - R$ con el correspondiente valor R . De manera similar, los nueve valores Z_{dr} se promediarán con el mismo peso anterior y se formará el conjunto $Z - Z_{dr} - R$ con el par $Z - R$ anterior.

Es decir, si el desfase óptimo es de 10 minutos entonces los pares $Z - R$ estarán formados por $[\bar{Z}_1, \tilde{R}_3], [\bar{Z}_2, \tilde{R}_4], [\bar{Z}_3, \tilde{R}_5], \dots$ y los conjuntos $R - Z - Z_{dr}$ estarán formados por $[\bar{Z}_1, \bar{Z}_{dr,1}, \tilde{R}_3], [\bar{Z}_2, \bar{Z}_{dr,2}, \tilde{R}_4], [\bar{Z}_3, \bar{Z}_{dr,3}, \tilde{R}_5], \dots$ donde \bar{Z}_j y $\bar{Z}_{dr,j}$ están dados por las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} \bar{Z}_j = & w_1 \tilde{Z}_j^1 + w_2 \tilde{Z}_j^2 + w_3 \tilde{Z}_j^3 + w_4 \tilde{Z}_j^4 + w_5 \tilde{Z}_j^5 + w_6 \tilde{Z}_j^6 \\ & + w_7 \tilde{Z}_j^7 + w_8 \tilde{Z}_j^8 + w_9 \tilde{Z}_j^9 \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{dr,j} = & w_1 \tilde{Z}_{dr,j}^1 + w_2 \tilde{Z}_{dr,j}^2 + w_3 \tilde{Z}_{dr,j}^3 + w_4 \tilde{Z}_{dr,j}^4 + w_5 \tilde{Z}_{dr,j}^5 + w_6 \tilde{Z}_{dr,j}^6 \\ & + w_7 \tilde{Z}_{dr,j}^7 + w_8 \tilde{Z}_{dr,j}^8 + w_9 \tilde{Z}_{dr,j}^9. \end{aligned} \quad (5.4)$$

La Ec. 5.3 (Ec. 5.4) indica que cada valor de tasa de precipitación R se asocia con un valor \bar{Z} (\bar{Z}_{dr}) que es el resultado del promedio pesado de los factores de reflectividad \tilde{Z}^i (reflectividad diferencial \tilde{Z}_{dr}^i) de las nueve celdas de la malla.

Debido a que, probablemente, la precipitación detectada por el pluviómetro proviene de las celdas de radar ubicadas en la dirección del viento es necesario evitar que las celdas en la dirección contraria al mismo contribuyan al promedio (Fig. 5.10).

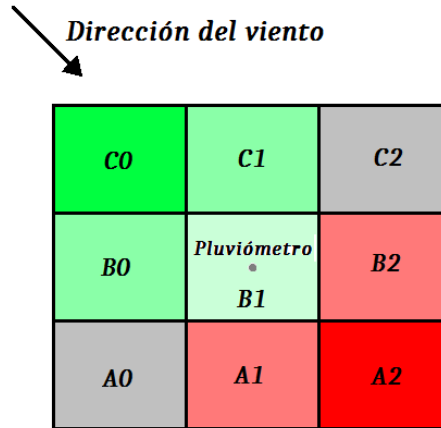


Figura 5.10: Las celdas ubicadas en la dirección desde donde proviene el viento (C0, C1, B0) contribuyen a la precipitación medida por el pluviómetro, mientras que las celdas ubicadas en la dirección contraria al mismo (A1, A2, B2) no contribuyen.

Para lograr esto se establecerá un valor mínimo para el coeficiente de correlación, de tal manera que las celdas de radar con coeficientes de correlación menores a este mínimo

no contribuirán al promedio final. En este trabajo se encontrarán las relaciones $Z_H - R$ y $Z_H - Z_{dr} - R$ a través del método propuesto utilizando tres valores mínimos distintos para el coeficiente de correlación, ellos son 80 %, 50 % y 20 % del coeficiente de correlación máximo de la malla de celdas. Por otra parte se derivarán las relaciones $Z_H - R$ y $Z_H - Z_{dr} - R$ a través de tres métodos utilizados habitualmente en la literatura, ellos son:

- Media aritmética de las nueve celdas de la malla (WMM). Consiste en relacionar un valor de R con la media aritmética de los nueve valores Z_H y la media aritmética de los nueve valores de Z_{dr} de las celdas de la malla con un retraso dado por el Δt óptimo calculado por el método anterior.
- Celda central (TMM). Consiste en relacionar un valor de R con un valor de Z_H y Z_{dr} tomado de la celda central de la malla con un retraso dado por el Δt óptimo calculado por el método anterior.
- Celda con mejor coeficiente de correlación (WCMM). Consiste el relacionar un valor de R con el valor de Z_H y Z_{dr} de la celda que tiene el mayor coeficiente de correlación con un retraso dado por el Δt óptimo calculado por el método anterior.

Considerando esto, los pesos w estarán calculados de manera tal de que las celdas con mejor correlación sean dominantes en el promedio y que las celdas con correlación menor al valor mínimo no contribuyan. Es decir, por cada hora de tormenta serán calculados nueve coeficientes de correlación r_1, r_2, \dots, r_9 correspondientes a cada una de las celdas de la malla, dentro de los cuales habrá uno que es el máximo del conjunto, por ejemplo $r_{max} = r_5$. Entonces, los coeficientes de correlación mínimos r_{min} con los que se calcularán las relaciones $Z_H - R$ y $Z_H - Z_{dr} - R$ estarán dados por

$$r_{min,1} = 0,8r_{max} \quad (5.5)$$

$$r_{min,2} = 0,5r_{max} \quad (5.6)$$

$$r_{min,3} = 0,2r_{max}. \quad (5.7)$$

Por último, los pesos asociados a los coeficientes de correlación mayores a r_{min} serán calculados con la siguiente ecuación

$$w_i = \frac{r_i}{S}, \quad (5.8)$$

donde $S = \sum_i r_i$ para $r_{min} \leq r_i \leq r_{max}$.

La técnica propuesta definida de esta manera permitirá tener en cuenta el tiempo que tarda la precipitación en caer y además considerar el desvío de la trayectoria de la misma por efecto del viento. Por otra parte, la elección de un límite inferior para el coeficiente de correlación evitará que las celdas de radar ubicadas en la dirección contraria al viento contribuyan al promedio pesado.

6

Aplicación del método a eventos de precipitación

El método propuesto fue aplicado a las tormentas que ocurrieron los días:

- 1 de abril de 2019.
Se produjo entre las 03 UTC y las 22 UTC del día 1 de abril de 2019.
- 24 de abril de 2019.
Se produjo entre las 02 UTC y las 23 UTC del 24 de abril de 2019.
- 30 de noviembre de 2019.
Se produjo entre las 17:30 UTC del día 29 y las 14 UTC del 30 de noviembre de 2019.
- 4 de diciembre de 2019.
Se produjo entre las 04:15 UTC y las 19:30 UTC del 4 de diciembre de 2019.
- 14 de diciembre de 2019.
Se produjo entre las 23 UTC del día 14 y las 09 UTC del día 15 de diciembre de 2019.

6.1. Obtención y estudio de las relaciones $Z_H - R$ y $Pol-R$

Para analizar la variación de las relaciones obtenidas según la estación del año se agruparon las tormentas analizadas en dos conjuntos según el mes en el que ocurrieron: la estación primavera y la estación otoño. La estación primavera está conformada por las tormentas que ocurrieron los días:

- 30 de noviembre de 2019
- 4 de diciembre de 2019
- 14 de diciembre de 2019

mientras que la estación otoño está conformada por las tormentas de los días:

- 1 de abril de 2019
- 24 de abril de 2019

Debido a que al momento de realizar este trabajo no se contaba con herramientas que permitieran corregir por atenuación la señal del radar se eligieron tormentas que no se dieran en el lugar de emplazamiento del radar RMA1, o al menos que permanecieran poco tiempo sobre el mismo (Ver Sección 2.6) con el fin de minimizar la atenuación de la señal (Ver Figuras 6.1-6.2).

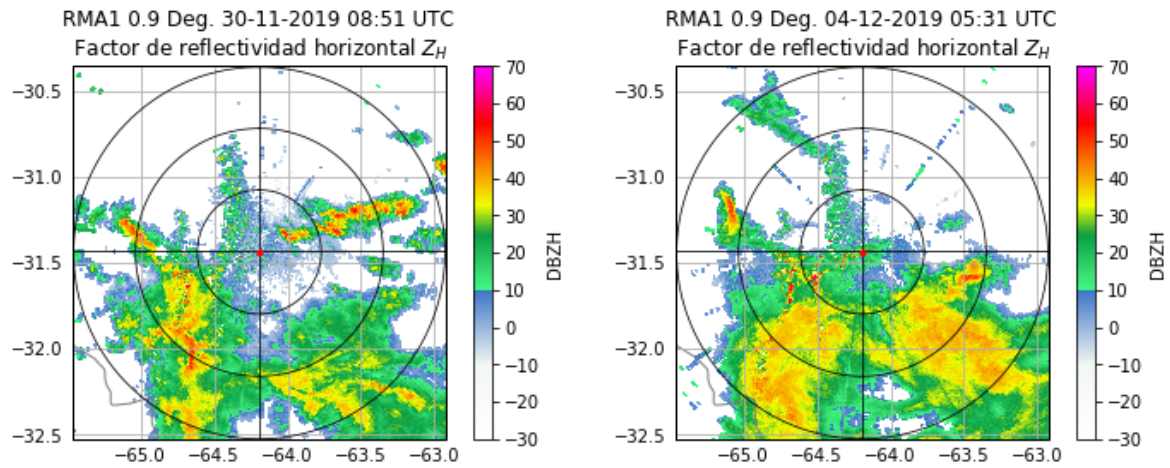


Figura 6.1: A la izquierda: Factor de reflectividad horizontal (Z_H) de la tormenta del día 30 de noviembre de 2019 a las 08:51 UTC. A la derecha: Factor de reflectividad horizontal (Z_H) de la tormenta del día 4 de diciembre de 2019 a las 05:31 UTC.

En cada estación (primavera, otoño) y para cada uno de los métodos propuestos se obtuvieron los conjuntos de valores $Z_H - R$ y $Z_H - Z_{dr} - R$ para cada semianillo (Ver Fig. 5.2). Estos valores fueron obtenidos por medio del procedimiento explicado en la Sección 5.1.

Las relaciones $Z_H(R)$ y $R(Z_H, Z_{dr})$ finalmente fueron construidas ajustando por cuadrados mínimos los conjuntos de datos mencionados anteriormente en cada semianillo para las dos estaciones.

Para no incluir factores de reflectividad asociados a nubes no precipitantes y tasas de precipitación bajas que no pueden ser medidas por los pluviómetros, debido al umbral de sensibilidad del instrumento, se aplicó un límite inferior para los valores de R y Z_H , más allá de los cuales no fueron considerados. Estos valores límites fueron 1.2 mm/h en el caso de R y 15 dBZ en el caso de Z_H . Además, los datos de radar con $\rho_{HV} \leq 0,9$ fueron enmascarados.

Para simplificar la notación se utilizarán las siguientes abreviaturas para cada uno de los métodos con los que se derivaron las relaciones $Z_H - R$ y $Z_H - Z_{dr} - R$. TP80 (promedio pesado con $r_{min} = 0,8r_{max}$); TP50 (promedio pesado con $r_{min} = 0,5r_{max}$); TP20 (promedio pesado con $r_{min} = 0,2r_{max}$); WMM (promedio simple); TMM (celda central) y WCMM (celda con mejor coeficiente de correlación).

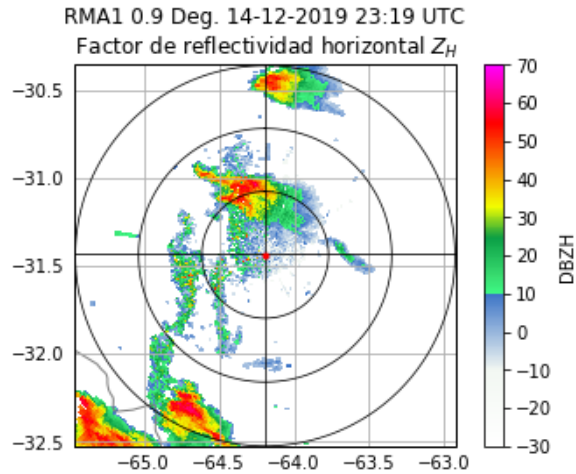


Figura 6.2: Factor de reflectividad horizontal (Z_H) de la tormenta del día 14 de diciembre de 2019 a las 23:19 UTC.

Los parámetros a y b de la relación $Z_H - R$ para las estaciones otoño y primavera se muestran en las Tablas 6.1-6.2 y los valores \tilde{a} , \tilde{b} y \tilde{c} de la relación $Z_H - Z_{dr} - R$ en las Tablas 6.3-6.4

		Estación Otoño											
Región	Rango	WCMM		TP80		TP50		TP20		WMM		TMM	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Llanura	$0 < r < 40$ km	121	1.36	221	1.16	153	1.36	182	1.3	182	1.29	256	1.13
	$40 < r < 80$ km	94	1.52	131	1.39	129	1.39	131	1.38	111	1.43	92	1.45
	$80 < r < 120$ km	66	1.45	66	1.47	77	1.41	75	1.42	85	1.36	82	1.42
Sierras	$0 < r < 40$ km	126	1.06	100	1.13	102	1.13	105	1.12	109	1.15	95	1.19
	$40 < r < 80$ km	1145	0.99	344	1.36	330	1.39	314	1.41	276	1.45	71	1.83
	$80 < r < 120$ km	393	1.36	571	1.13	-	-	2863	0.45	2584	0.5	538	1.25

Tabla 6.1: Valores numéricos de los parámetros de ajuste a y b de la relación $Z_H(R)$ para la estación otoño.

Los valores de los coeficientes de las relaciones $Z_H(R)$ y $R(Z_H, Z_{dr})$ se obtuvieron en base al procesamiento de 40 horas de tormentas durante el mes de abril (estación otoño) y 46 horas de tormentas durante el mes de diciembre (estación primavera). En las Tablas 6.5-6.6 se muestra la cantidad de conjuntos $R - Z_H - Z_{dr}$ formados con cada método para las estaciones otoño y primavera respectivamente.

Como se muestra en las Tablas 6.1-6.4 los parámetros de ajuste de algunas relaciones $Z_H(R)$ y $R(Z_H, Z_{dr})$ no se obtuvieron debido a que no fue posible encontrar los parámetros que minimicen las distancias al cuadrado entre los datos medidos y la curva de ajuste.

En las Figuras 6.3-6.8 se muestran los gráficos con los pares $Z_H - R$ formados con los métodos WCMM, TP80, TP50, TP20, WMM y TMM respectivamente y sus correspondientes

Estación Primavera													
Región	Rango	WCMM		TP80		TP50		TP20		WMM		TMM	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Llanura	$0 < r < 40$ km	1735	0.8	2987	0.59	4105	0.58	3950	0.59	3857	0.6	3801	0.4
	$40 < r < 80$ km	689	0.78	543	0.97	472	1.07	506	1.06	332	1.22	625	0.93
	$80 < r < 120$ km	1102	0.93	836	1.1	796	1.1	773	1.1	1032	0.99	986	0.99
Sierras	$0 < r < 40$ km	3161	0.87	2826	0.9	3599	0.99	3541	0.98	3496	0.98	8246	0.95
	$40 < r < 80$ km	8342	0.55	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	$80 < r < 120$ km	1023	0.93	878	0.97	44	1.83	79	1.7	16	2.1	1	2.79

Tabla 6.2: Valores numéricos de los parámetros de ajuste a y b de la relación $Z_H(R)$ para la estación primavera.

Estación Otoño											
Región	Rango	WCMM			TP80			TP50			
		\tilde{a}	\tilde{b}	\tilde{c}	\tilde{a}	\tilde{b}	\tilde{c}	\tilde{a}	\tilde{b}	\tilde{c}	
Llanura	$0 < r < 40$ km	0.331	0.398	0.017	0.699	0.317	-0.627	0.587	0.327	-0.456	
	$40 < r < 80$ km	0.411	0.408	-0.324	0.365	0.434	-0.564	0.350	0.447	-0.783	
	$80 < r < 120$ km	0.249	0.498	-0.529	0.188	0.531	-0.487	0.153	0.559	-0.550	
Sierras	$0 < r < 40$ km	1.28	0.191	0.198	1.157	0.220	0.073	1.053	0.222	0.179	
	$40 < r < 80$ km	0.003	0.933	-1.784	0.014	0.756	-0.849	0.017	0.726	-0.772	
	$80 < r < 120$ km	0.533	0.078	5.257	0.292	0.180	4.604	0.003	0.928	-1.136	
		TP20			WMM			TMM			
Llanura	$0 < r < 40$ km	0.556	0.321	-0.317	0.509	0.362	-0.845	0.979	0.227	-0.082	
	$40 < r < 80$ km	0.337	0.451	-0.812	0.301	0.467	-0.972	0.280	0.474	-0.712	
	$80 < r < 120$ km	0.170	0.554	-0.732	0.165	0.542	-0.372	–	–	–	
Sierras	$0 < r < 40$ km	1.107	0.212	0.189	1.082	0.209	0.253	1.476	0.181	0.023	
	$40 < r < 80$ km	0.017	0.723	-0.721	0.023	0.682	-0.447	0.024	0.684	-0.739	
	$80 < r < 120$ km	0.003	0.932	-1.132	0.003	0.931	-1.139	0.283	0.197	4.166	

Tabla 6.3: Valores numéricos de los parámetros de ajuste \tilde{a} , \tilde{b} y \tilde{c} de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ para la estación otoño.

curvas de ajuste para las tormentas de abril (estación otoño), las Figuras 6.9-6.14 muestran los mismos gráficos para las tormentas de diciembre (estación primavera) y la Figura 6.15 presenta los puntos $R - Z_H - Z_{dr}$ formados con el método TP80 y sus respectivas superficies de ajuste para la temporada de otoño.

Estación Primavera										
Región	Rango	WCMM			TP80			TP50		
		\tilde{a}	\tilde{b}	\tilde{c}	\tilde{a}	\tilde{b}	\tilde{c}	\tilde{a}	\tilde{b}	\tilde{c}
Llanura	$0 < r < 40$ km	0.624	0.351	-0.636	0.860	0.340	-1.059	0.346	0.533	-2.304
	$40 < r < 80$ km	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$80 < r < 120$ km	0.473	0.369	-0.634	0.369	0.405	-0.791	0.337	0.411	-0.725
Sierras	$0 < r < 40$ km	1.085	0.216	0.01	0.897	0.233	0.087	0.756	0.202	0.721
	$40 < r < 80$ km	-	-	-	1.259	0.238	-0.626	1.141	0.246	-0.598
	$80 < r < 120$ km	0.039	0.658	-0.9	-	-	-	0.111	0.532	-0.466
		TP20			WMM			TMM		
Llanura	$0 < r < 40$ km	0.348	0.532	-2.33	0.256	0.563	-2.353	2.648	0.213	-1.395
	$40 < r < 80$ km	-	-	-	0.154	0.485	-0.119	0.159	0.41	0.942
	$80 < r < 120$ km	0.340	0.409	-0.733	0.52	0.367	-0.906	0.44	0.381	-0.728
Sierras	$0 < r < 40$ km	0.729	0.216	0.601	-	-	-	-	-	-
	$40 < r < 80$ km	1.110	0.248	-0.577	-	-	-	0.635	0.322	-0.745
	$80 < r < 120$ km	0.080	0.562	-0.471	0.069	0.572	-0.512	0.087	0.553	-0.809

Tabla 6.4: Valores numéricos de los parámetros de ajuste \tilde{a} , \tilde{b} y \tilde{c} de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ para la estación primavera.

# puntos - Estación Otoño						
Región	WCMM	TP80	TP50	TP20	WMM	TMM
1L	478	495	499	502	499	460
2L	844	850	860	866	872	805
3L	1208	1214	1219	1232	1274	1146
1S	262	273	281	283	282	248
2S	204	205	207	209	209	171
3S	64	64	64	64	67	60

Tabla 6.5: Cantidad de valores $R - Z_H - Z_{dr}$ con los que se realizaron los ajustes en la estación otoño.

# puntos - Estación Primavera						
Región	WCMM	TP80	TP50	TP20	WMM	TMM
1L	243	250	252	252	259	235
2L	575	582	586	586	590	565
3L	815	818	831	834	840	791
1S	203	206	206	206	210	204
2S	428	434	440	441	446	405
3S	214	217	219	222	230	189

Tabla 6.6: Cantidad de valores $R - Z_H - Z_{dr}$ con los que se realizaron los ajustes en la estación primavera.

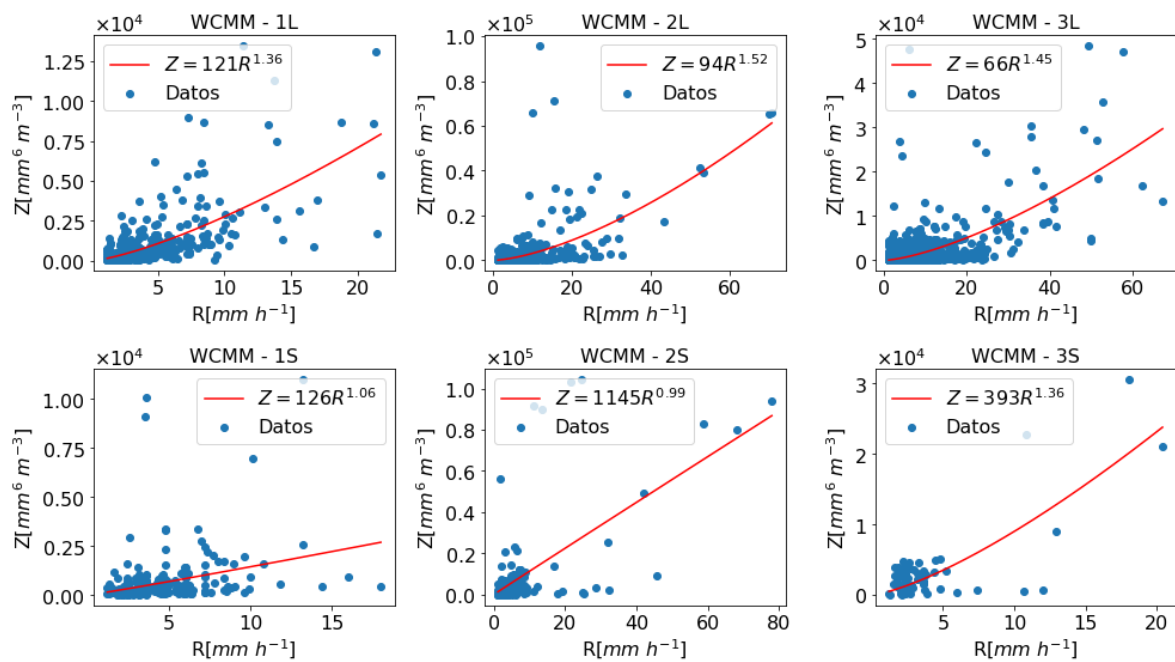


Figura 6.3: Puntos $Z_H - R$ formados con el método WCMM para la estación otoño.

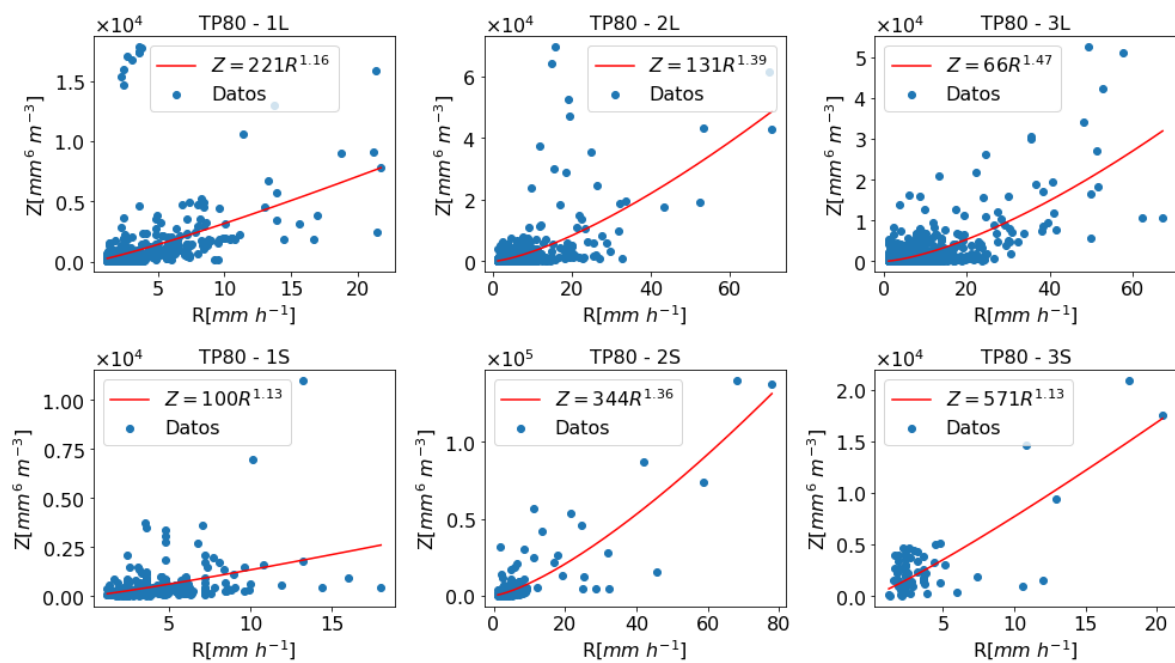


Figura 6.4: Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP80 para la estación otoño.

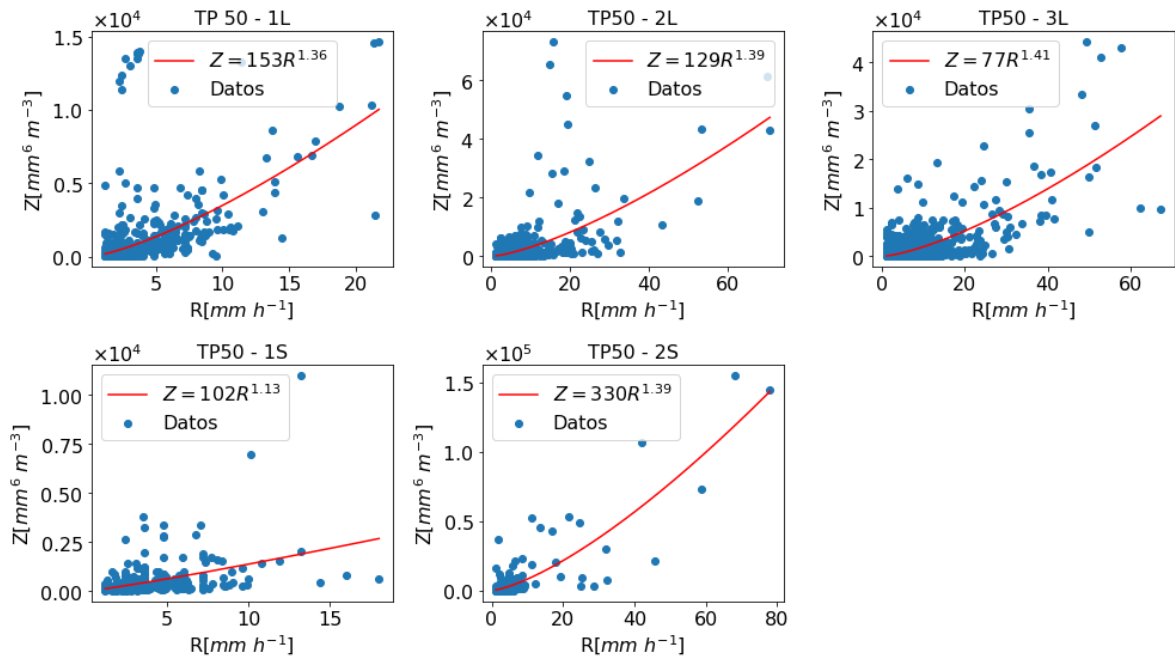


Figura 6.5: Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP50 para la estación otoño.

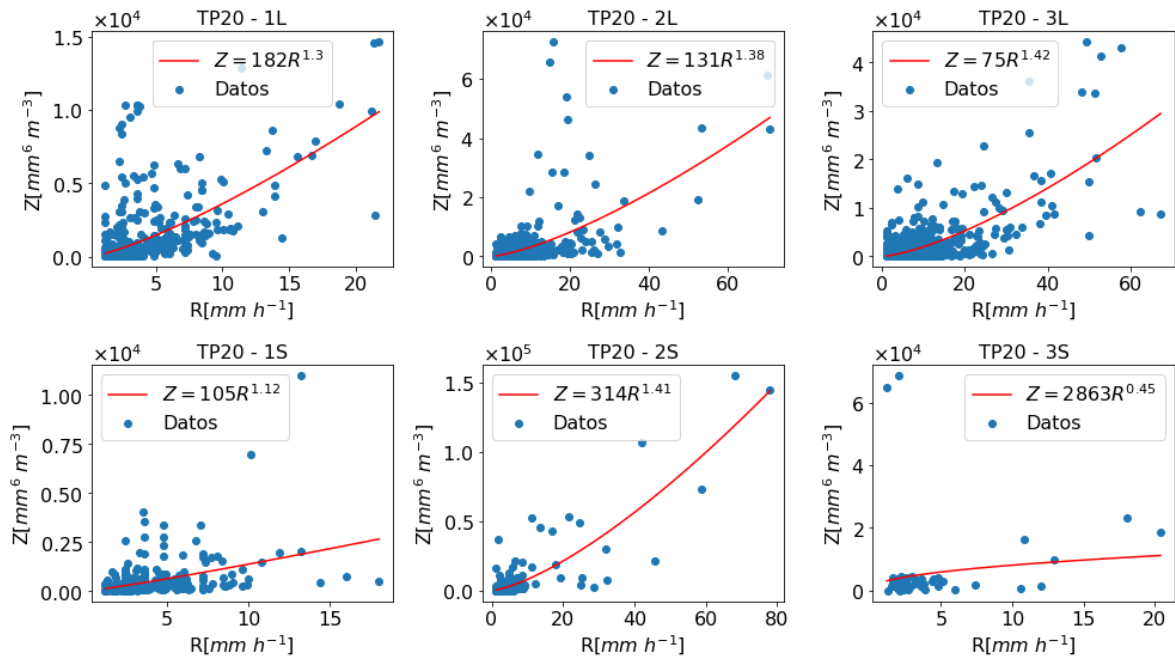


Figura 6.6: Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP20 para la estación otoño.

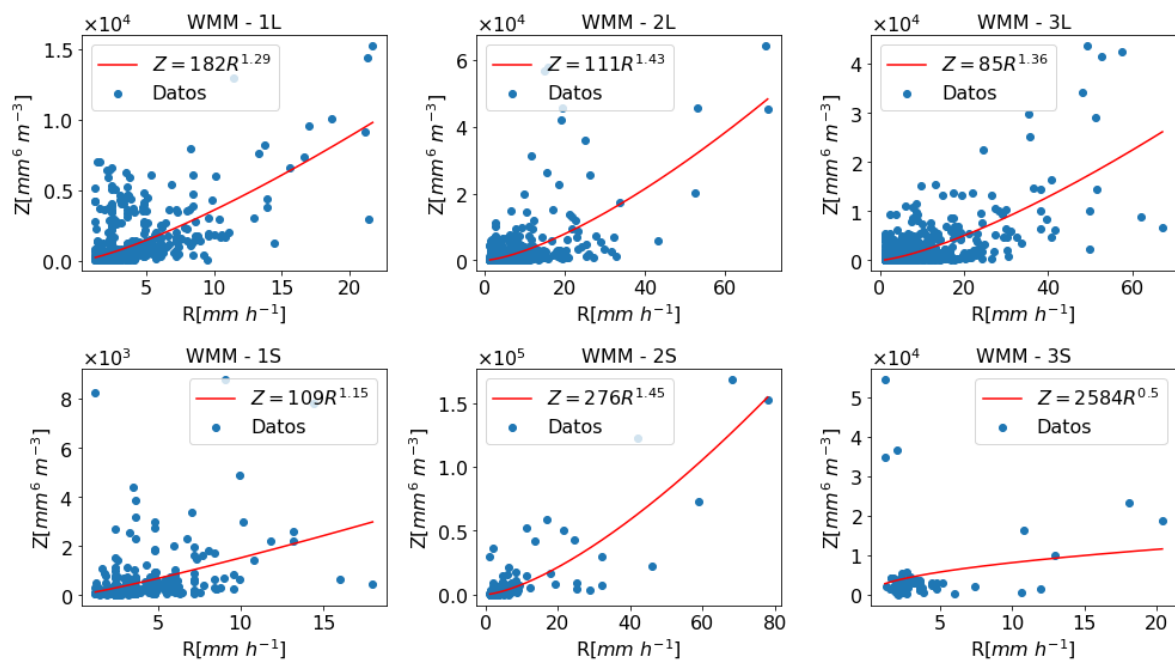


Figura 6.7: Puntos $Z_H - R$ formados con el método WMM para la estación otoño.

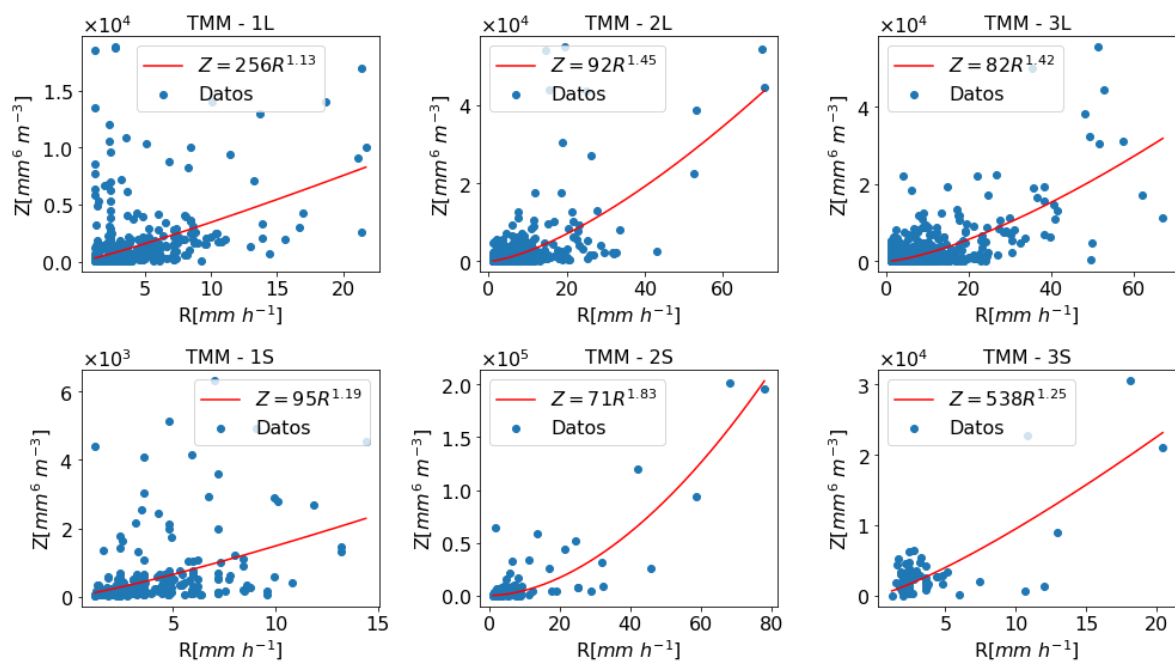


Figura 6.8: Puntos $Z_H - R$ formados con el método TMM para la estación otoño.

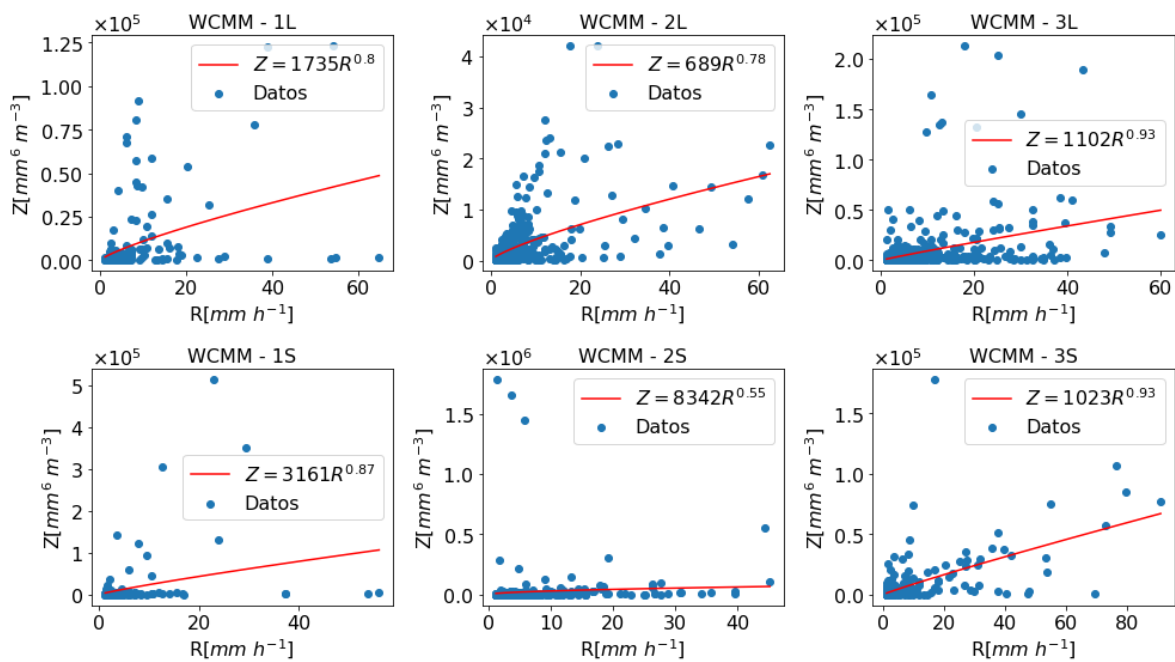


Figura 6.9: Puntos $Z_H - R$ formados con el método WCMM para la estación primavera.

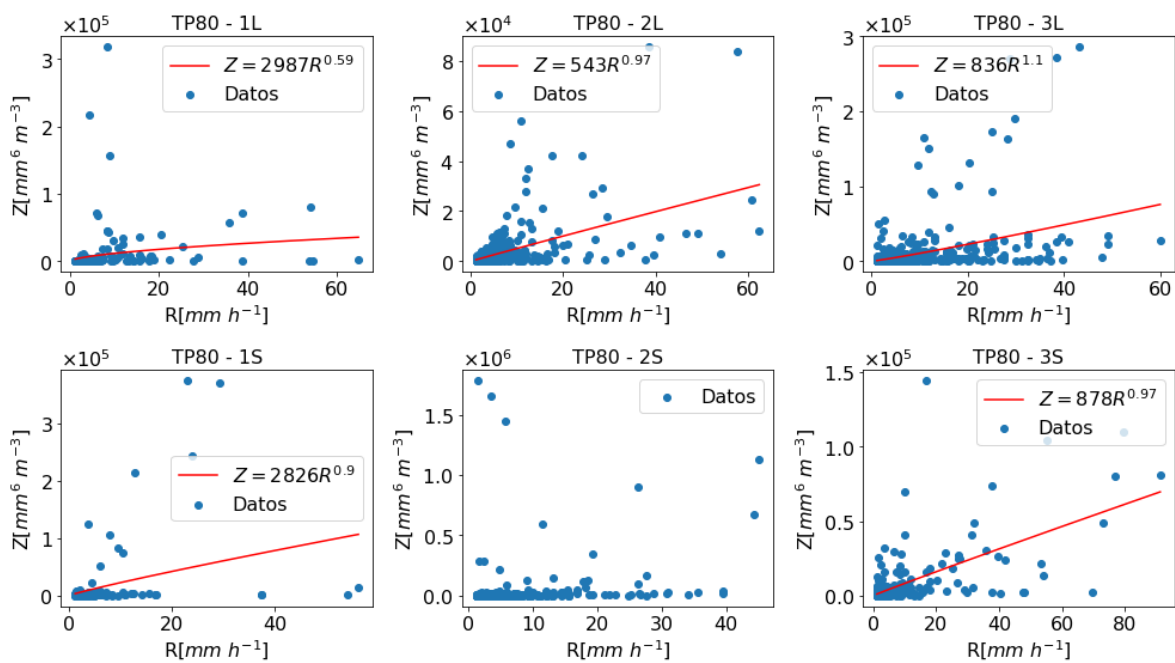


Figura 6.10: Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP80 para la estación primavera.

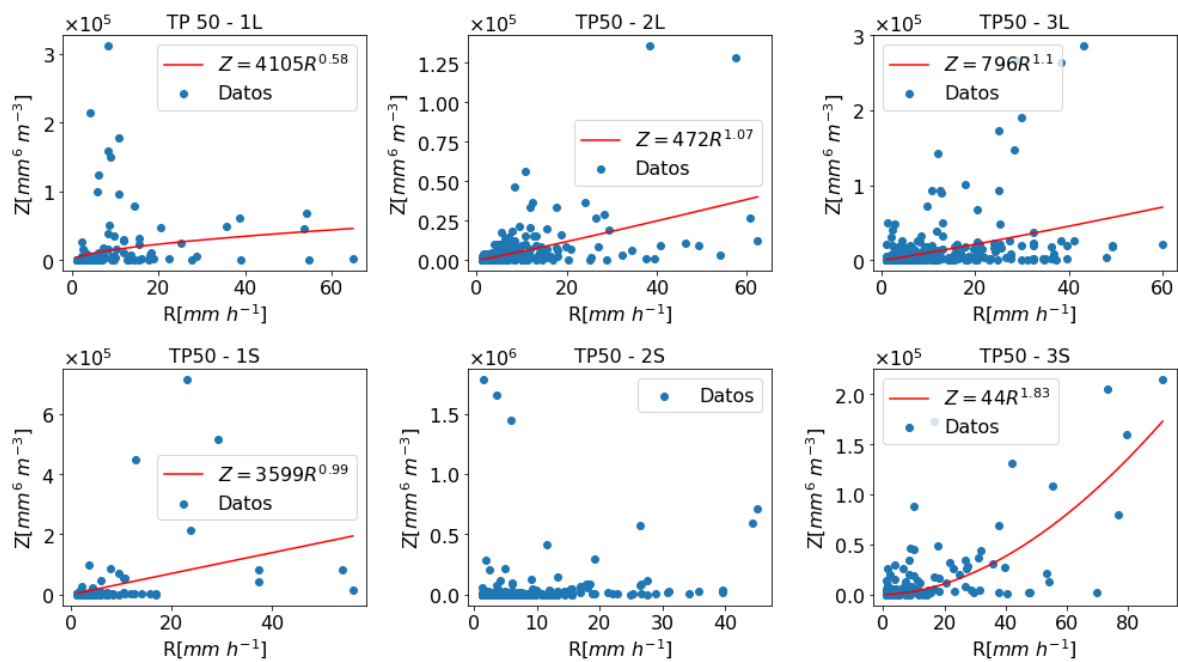


Figura 6.11: Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP50 para la estación primavera.

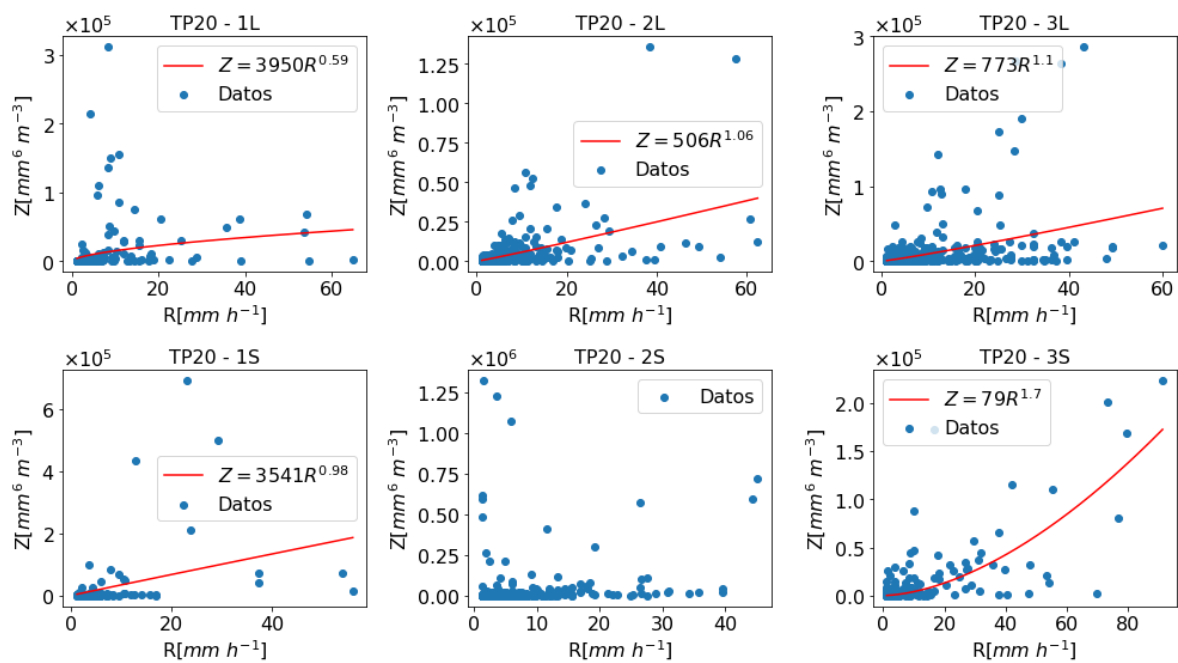


Figura 6.12: Puntos $Z_H - R$ formados con el método TP20 para la estación primavera.

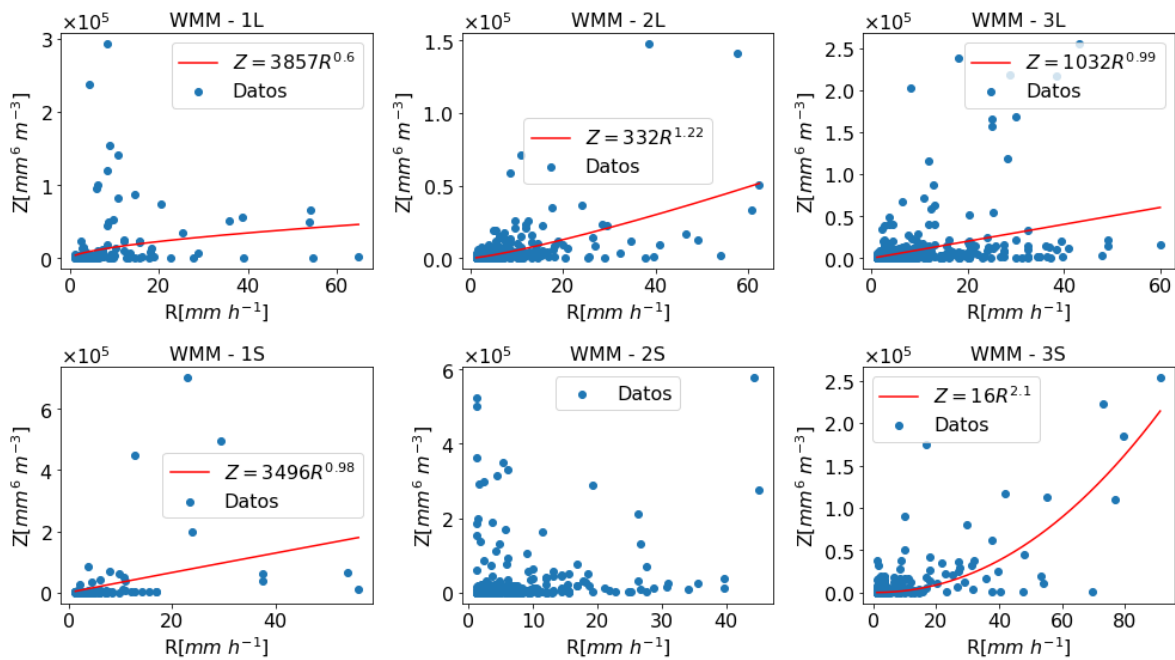


Figura 6.13: Puntos $Z_H - R$ formados con el método WMM para la estación primavera.

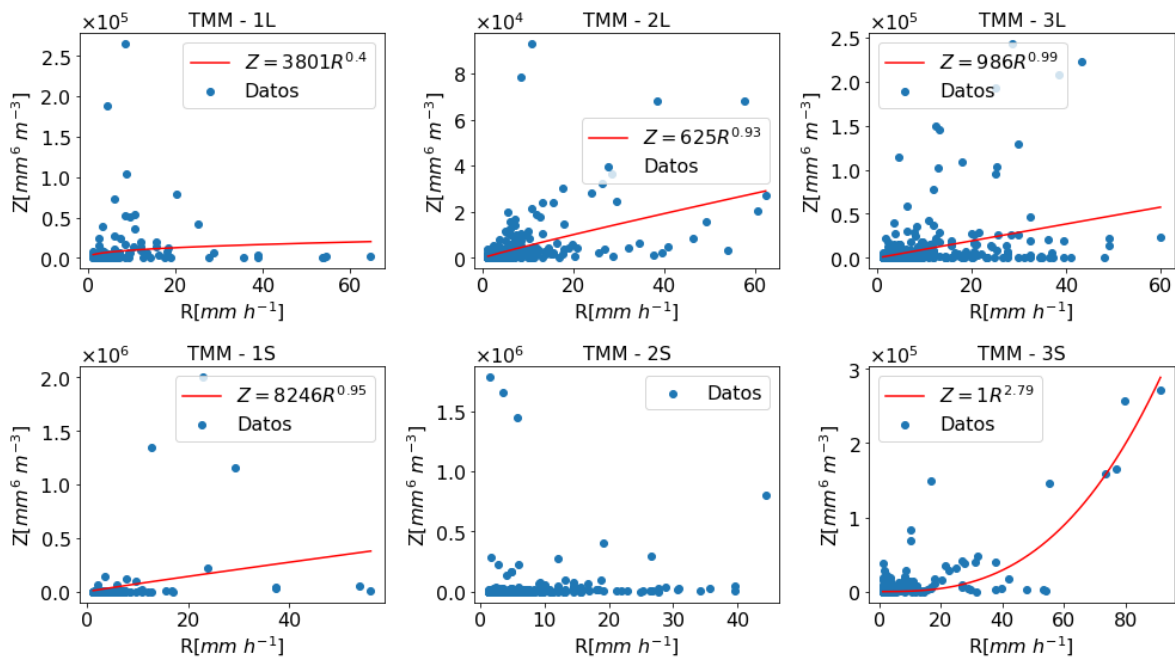


Figura 6.14: Puntos $Z_H - R$ formados con el método TMM para la estación primavera.

En las figuras correspondientes a la estación primavera en el segundo semianillo de la región sierras no se incluyeron las curvas de ajuste debido a que el valor del parámetro a era

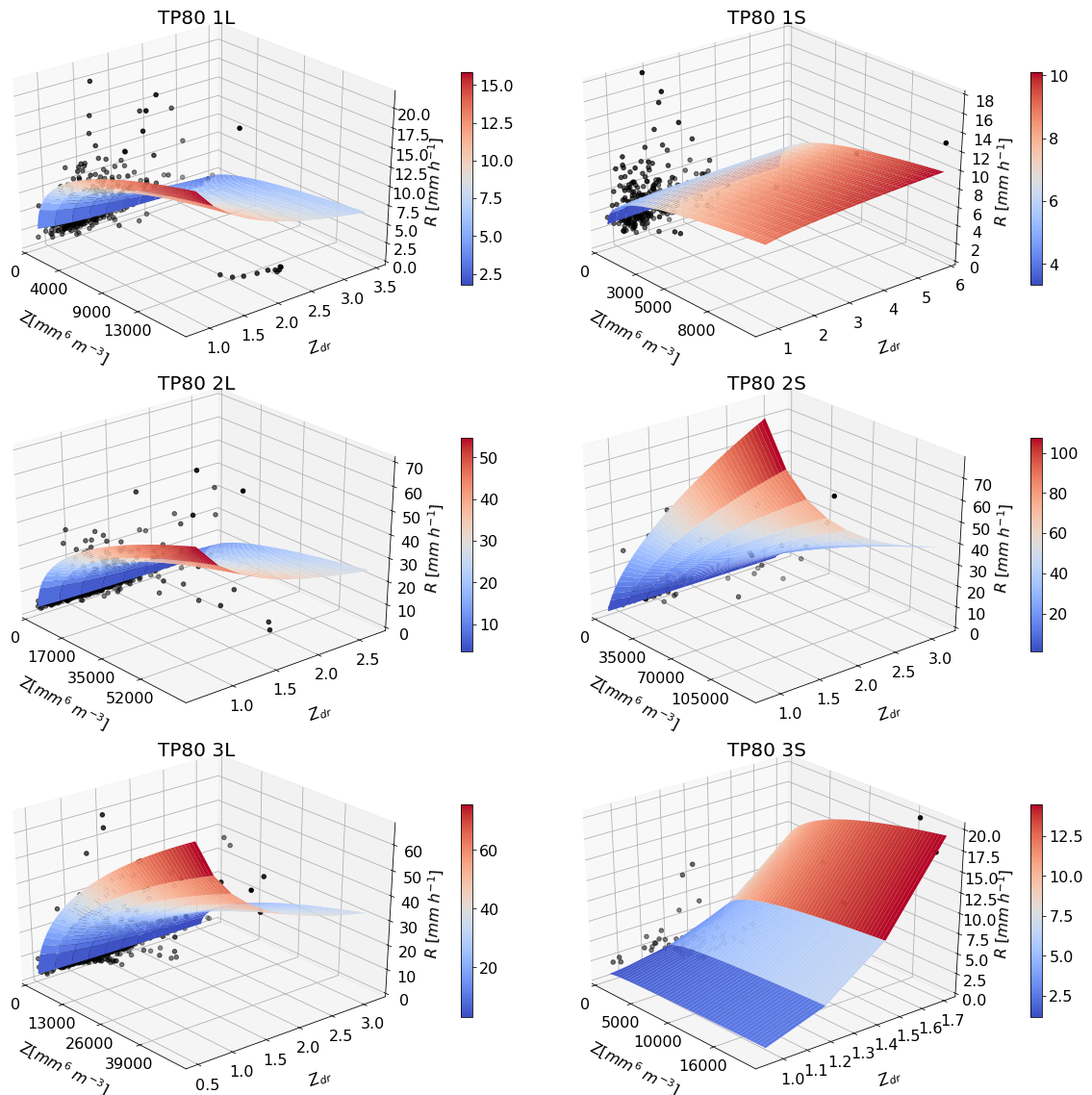


Figura 6.15: Puntos $R - Z_H - Z_{dr}$ con sus respectivas superficies de ajuste, obtenidas a través del método TP80, para la temporada de otoño.

muy próximo a 0. Esto se debió a que gran parte de los valores de R fueron asociados con valores relativamente bajos de Z_H posiblemente debido a la atenuación de la señal del radar en las tormentas analizadas. Si bien se intentó trabajar con tormentas que no se dieran sobre el radar RMA1 algunas de ellas se desarrollaron sobre la Ciudad de Córdoba (Ver Figura 6.16) lo que podría haber contribuido a la atenuación de la señal causando que valores altos de tasas de precipitación fueran asociados con valores bajos del factor de reflectividad. Sin embargo, también es posible que los pluviómetros hayan sobreestimado la precipitación caída durante la tormenta dando lugar a asociaciones erróneas de los pares $Z_H - R$.

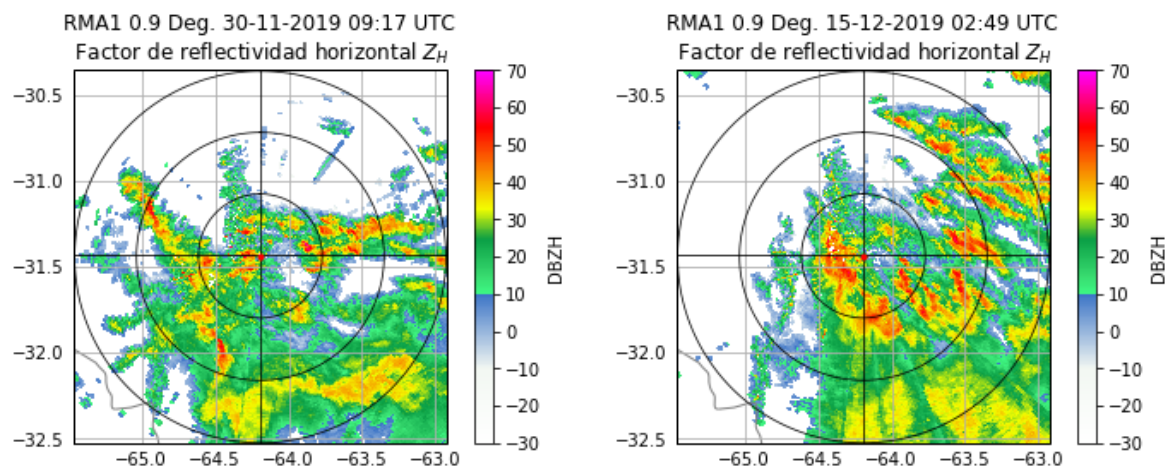


Figura 6.16: A la izquierda: Z_H de la tormenta del día 30 de noviembre de 2019 sobre el radar RMA1 (punto rojo central). A la derecha: Z_H de la tormenta del día 15 de diciembre de 2019 sobre el radar RMA1.

Para comparar los distintos métodos se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre los valores $\log(Z_H)$ y $\log(R)$ en cada semianillo y para cada temporada en la que ocurrieron las tormentas.

En la Figura 6.17 se muestran los coeficientes de correlación calculados en las tormentas de otoño para cada uno de los métodos. De la Figura 6.17, para la región llanura (curva verde), se puede observar una disminución gradual de la correlación con la distancia al radar en los métodos WCMM, TP80 y TP50. Esto coincide con los resultados de algunos trabajos que indican que la calidad de las estimaciones de precipitación disminuyen con la distancia al radar (Ver Sección 4.1). Por otro lado, en los métodos TP20, WMM y TMM no se observa la misma tendencia sino que la correlación disminuye en los tres semianillos, en particular en el primero.

En la región sierras (curva marrón) no se observa una disminución de la correlación con la distancia, sino que se alcanza un máximo en el segundo semianillo $40 < r < 80$ km. De los seis métodos estudiados, los métodos WCMM y TP80 maximizan la correlación en el caso de la región llanura mientras que en la región sierras el método TP80 maximiza los coeficientes de correlación calculados.

En el caso de las tormentas de primavera (Fig. 6.18), los coeficientes de correlación calculados en la región llanura muestran la misma tendencia que en las tormentas de otoño, disminuyen con la distancia al radar en los métodos WCMM, TP80 y TP50. En la región sierras, a diferencia de las tormentas de otoño, se puede ver un aumento de la correlación con la distancia en los métodos WCMM y TP80, y un aumento de la correlación en el primer semianillo y un posterior descenso del mismo en el segundo semianillo en los métodos TP50, TP20, WMM y TMM. En esta temporada, los métodos TP50 y TP20 alcanzan los mayores coeficientes de correlación en la región llanura. En la región sierras, los métodos

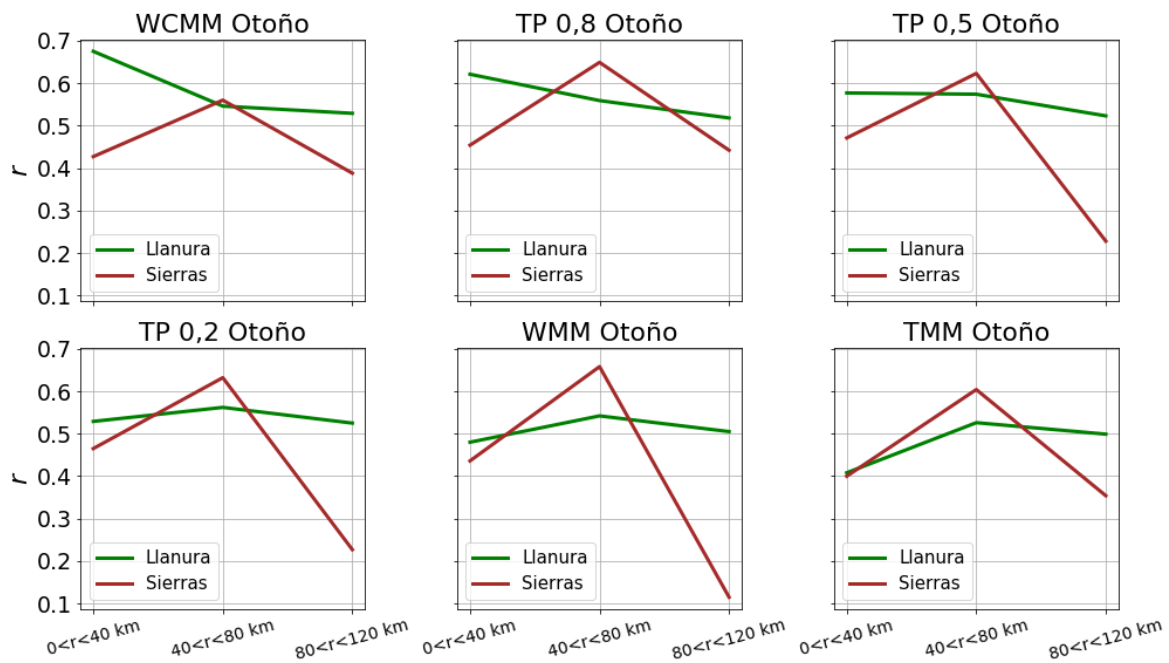


Figura 6.17: Coeficientes de correlación (r) calculados entre los puntos $\log(Z_H)$ y $\log(R)$ en cada semianillo y en cada método para la temporada de otoño.

TP50 y TP20 maximizan las correlaciones en el primer y tercer semianillo, y el método TP80 maximiza la correlación en el segundo semianillo.

En la Figura 6.19 se comparan los coeficientes de correlación calculados en cada método para ambas estaciones en la región llanura. Como se puede notar, las tormentas ocurridas en otoño alcanzan correlaciones mayores que las tormentas ocurridas en diciembre en los métodos WCMM, TP80 y TP50. La misma situación parece darse en los métodos TP20, WMM y TMM pero de una manera menos definida. Esto podría deberse a las diferencias en las características de las tormentas. Las tormentas de diciembre (primavera) se caracterizaron por ser localizadas espacial y temporalmente con altas tasas de precipitación asociadas (~ 60 mm/h en algunos casos) y posiblemente grandes movimientos de masas de aire que produzcan que la precipitación registrada por el pluviómetro provenga de celdas de radar distantes y en consecuencia disminuyendo la correlación entre los datos. La distribución espacial y temporal más uniforme de las tormentas de abril (otoño) y probablemente, el escaso movimiento de masas de aire comparado con las tormentas de diciembre, podrían haber producido que la precipitación registrada por los pluviómetros provenga de alguna de las celdas de la malla provocando un aumento en los coeficientes de correlación calculados. Otras posibles causas que produzcan la disminución de los coeficientes de correlación durante la estación primavera podrían ser la ausencia de un método de corrección por atenuación de la señal de radar o la reducida cantidad de horas de tormentas analizadas.

Según el panel inferior de la Figura 6.19 los métodos TP20, WMM y TMM provocan que la correlación entre los datos de radar y de los pluviómetros disminuya significativamente,

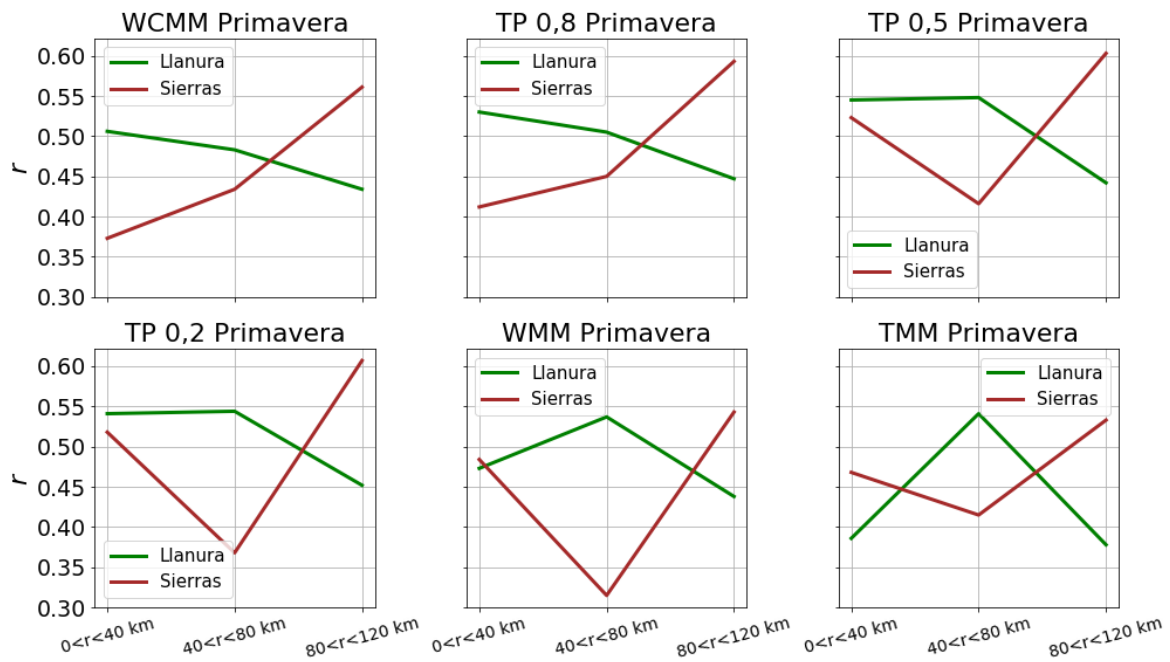


Figura 6.18: Coeficientes de correlación (r) calculados entre los puntos $\log(Z_H)$ y $\log(R)$ en cada semianillo y en cada método para la temporada de primavera.

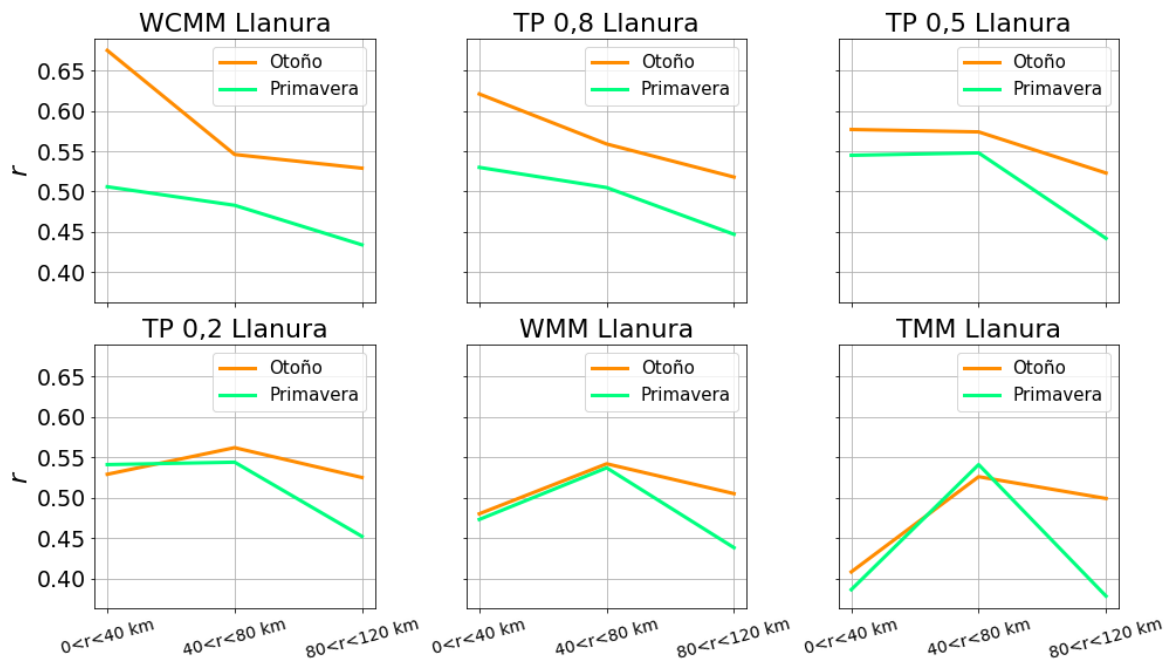


Figura 6.19: Coeficientes de correlación (r) calculados entre los puntos $\log(Z_H)$ y $\log(R)$ en cada semianillo y en cada método para la región llanura durante las temporadas de otoño (curva naranja) y primavera (curva verde).

lo cual podría deberse a que los métodos TP20 y WMM asumen que las celdas de la malla contribuyen de manera similar a la tasa de precipitación registrada por el pluviómetro, mientras que el método TMM asume que la lluvia cae absolutamente vertical y que el viento no desvía su trayectoria. Esto también explicaría porque los métodos WCMM, TP80 y TP50 producen un aumento en los coeficientes de correlación debido a que estos tienen en cuenta que el viento desvía la trayectoria de las gotas de lluvia.

En la Figura 6.20 se comparan los coeficientes de correlación calculados en cada método para ambas estaciones en la región sierras.

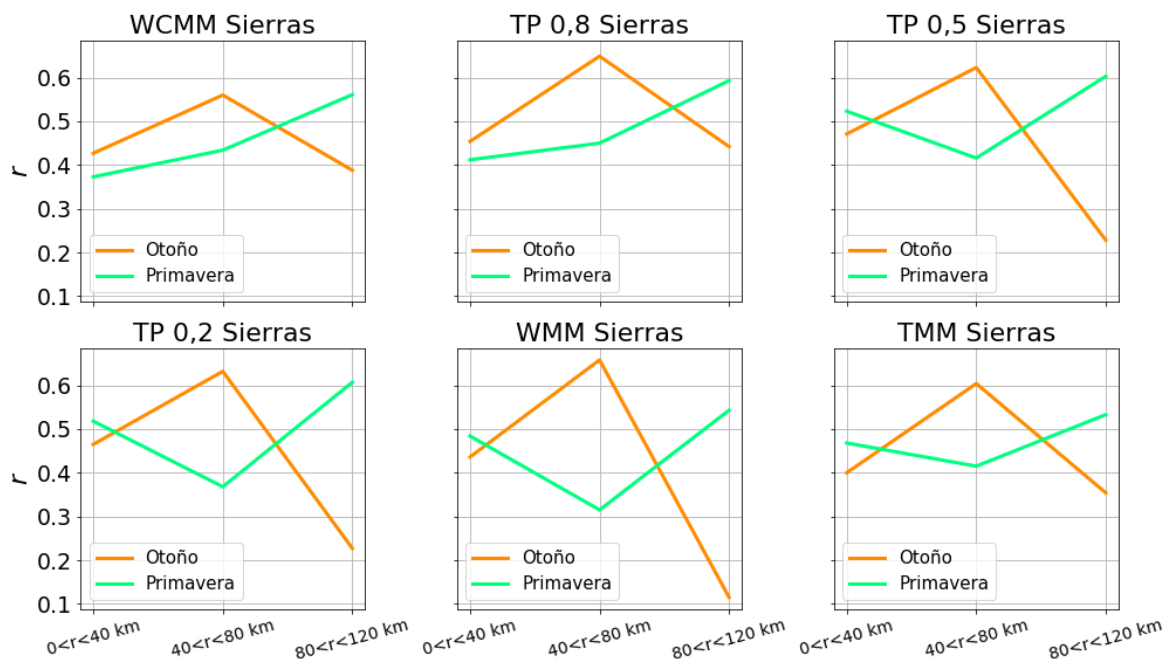


Figura 6.20: Coeficientes de correlación (r) calculados entre los puntos $\log(Z_H)$ y $\log(R)$ en cada semianillo y en cada método para la región sierras durante las temporadas de otoño (curva naranja) y primavera (curva verde).

En este caso, a diferencia de la región llanura, no se observa la disminución del coeficiente de correlación con la distancia. Una posible explicación para este hecho podría estar en la mayor altitud a la que se encuentran los pluviómetros situados en las sierras comparados con los pluviómetros de la llanura, esta mayor altitud podría disminuir la diferencia de altura en la que se toman las medidas del radar sobre los pluviómetros y por lo tanto provocar un aumento del coeficiente de correlación. Otro posible factor que podría afectar las correlaciones calculadas es la cantidad de datos con los que se realizaron los ajustes: en la región llanura se obtuvieron una mayor cantidad de datos que en la región sierras (Ver Tablas 6.5-6.6) debido a que las tormentas analizadas se dieron en mayor medida en la región llanura.

7

Estimaciones de precipitación a través de las relaciones $Z_H - R$ y Pol- R en tiempo real

Para verificar preliminarmente las estimaciones de precipitación utilizando las relaciones derivadas en este trabajo, se consideraron dos tormentas ocurridas los días 22 de abril de 2019 de 03 a 09 UTC y 20 de diciembre de 2019 de 10 a 17 UTC y se comparó la precipitación acumulada estimada por el radar a través de las relaciones $R(Z_H)$ y $R(Z_H, Z_{dr})$ con la precipitación medida por los pluviómetros. El factor de reflectividad y la reflectividad diferencial utilizada para calcular la precipitación estimada corresponde a la celda central de la malla.

La Figura 7.1 muestra las estimaciones de precipitación para el caso del pluviómetro ubicado en la localidad de Alta Gracia (31.6543° S, 64.4265° W) durante la tormenta del día 22 de abril de 2019.

De la Figura 7.1 es posible observar que la precipitación acumulada calculada a través de las relaciones $R(Z_H, Z_{dr})$ sobreestima la precipitación registrada por el pluviómetro en mayor medida que las relaciones $R(Z_H)$. En particular la relación $R(Z_H)$ obtenida a través del método WMM muestra la mejor estimación.

El caso del pluviómetro ubicado en la localidad de Santa Rosa de Calamuchita (32.0327° S, 64.6478° W) se presenta en la Figura 7.2. En este caso las relaciones $R(Z_H, Z_{dr})$ obtenidas a través de los métodos TP80, TP50, WMM y TMM junto con las relaciones $R(Z_H)$ obtenidas a través de los métodos TP80, TP50, TP20 y WMM representan las mejores estimaciones de la precipitación medida por el pluviómetro.

La Figura 7.3 muestra lo estimado por el radar para el caso del pluviómetro ubicado en la localidad de La Cumbrecita (31.9014° S, 64.7689° W). En este pluviómetro, al igual que en el anterior, las relaciones $R(Z_H, Z_{dr})$ asociadas a los métodos TP80, TP50, WMM y TMM junto con las relaciones $R(Z_H)$ asociadas a los métodos TP80, TP50, TP20 y WMM representan las mejores estimaciones de la precipitación medida por el pluviómetro.

Otro caso de interés es el correspondiente al pluviómetro de la localidad de Obispo Trejo (30.7830° S, 63.4314° W). En este ejemplo, el radar sobreestima la precipitación un 60 % con las relaciones $R(Z_H)$ y $R(Z_H, Z_{dr})$ por igual. Esta gran sobreestimación puede darse,

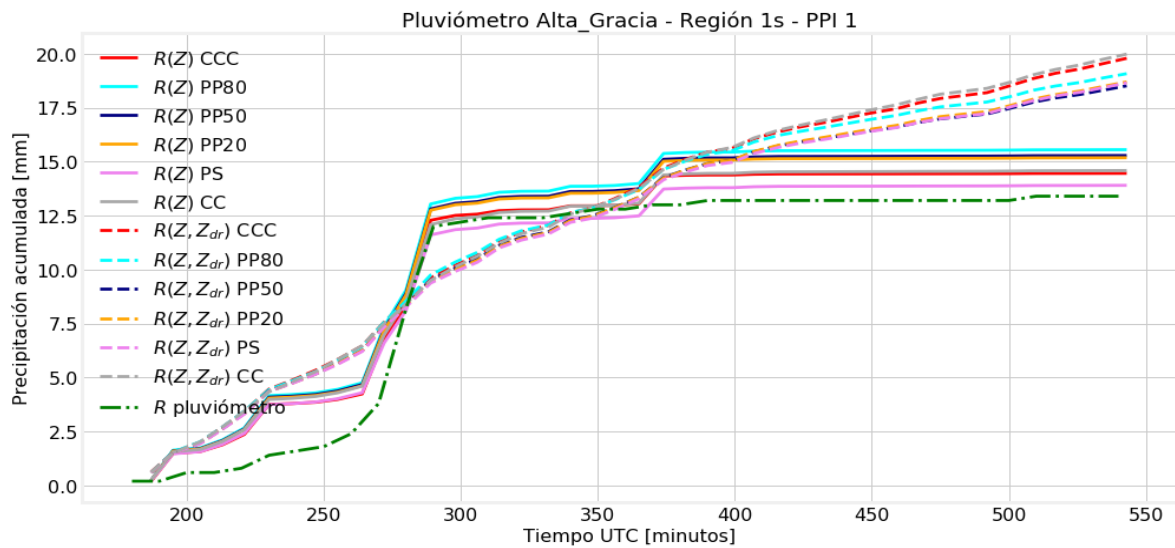


Figura 7.1: Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Alta Gracia (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.

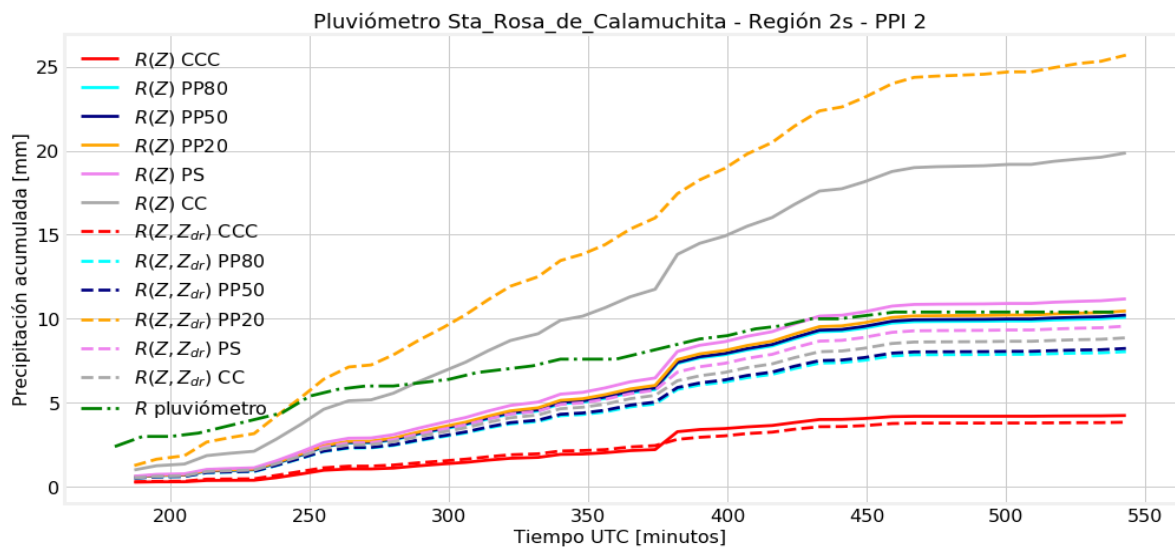


Figura 7.2: Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Santa Rosa de Calamuchita (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.

posiblemente, por la disminución de la calidad de las estimaciones con la distancia ya que el pluviómetro de Obispo Trejo se encuentra a ~ 105 km del radar RMA1.

Otro ejemplo donde el radar sobreestima excesivamente la precipitación es el pluviómetro de Villa del Dique, (32.1706° S, 64.4530° W) a unos ~ 85 km del radar RMA1. En este caso (Fig. 7.5) puede observarse que las relaciones $R(Z_H, Z_{dr})$ obtenidas de los métodos

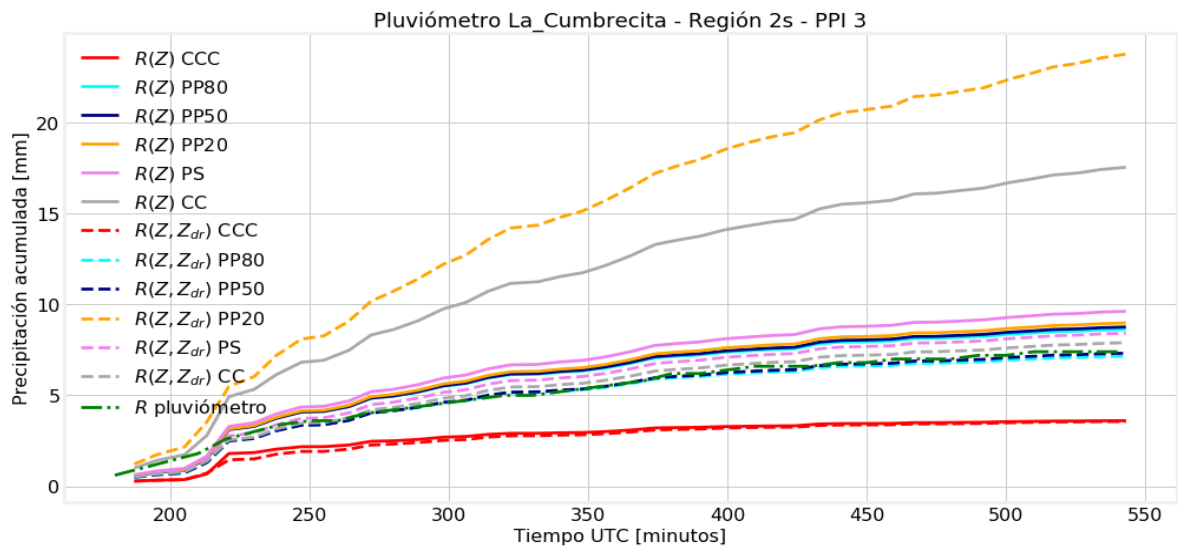


Figura 7.3: Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de La Cumbrecita (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.

TMM, TP80 y WCMM sobreestiman la precipitación acumulada más del 400 % mientras que las relaciones asociadas a los demás métodos estiman con una buena aproximación la precipitación medida por el pluviómetro.

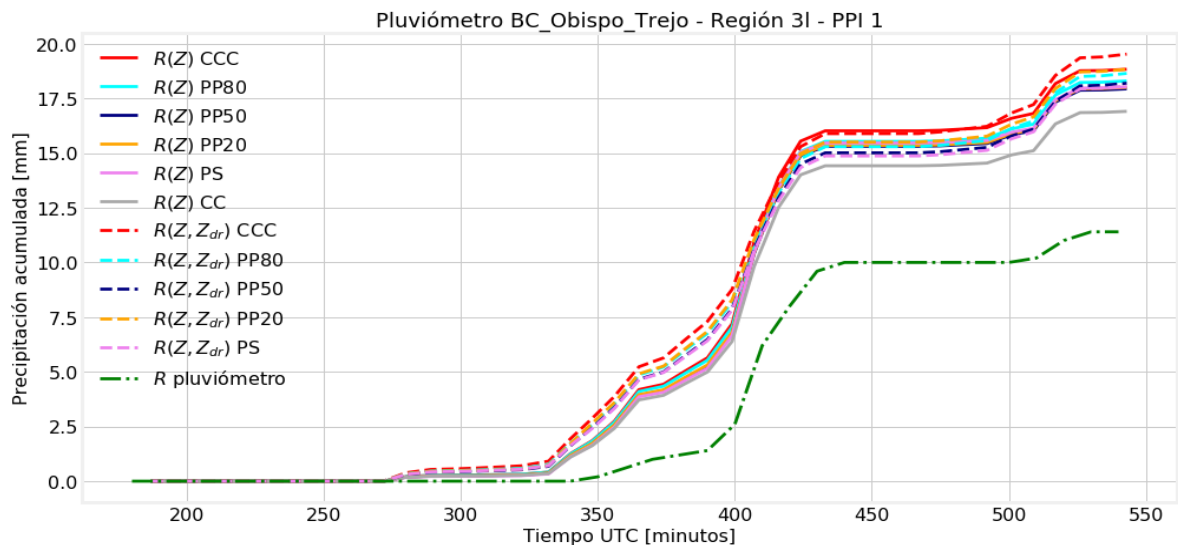


Figura 7.4: Precipitación acumulada (derecha) medida por el pluviómetro de Obispo Trejo (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.

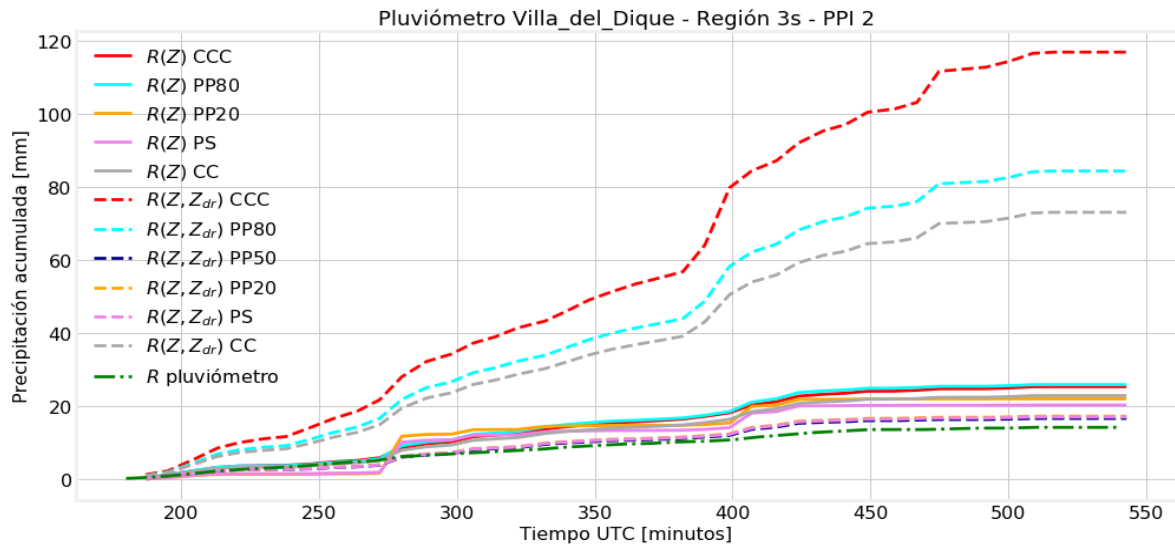


Figura 7.5: Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Villa del Dique (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 22 de abril de 2019 entre las 03 y 09 UTC.

En la temporada de primavera la calidad de las estimaciones de precipitación por radar se reduce notablemente en comparación con las estimaciones de precipitación de la temporada de otoño. Para llegar a esta conclusión se comparó la precipitación estimada por el radar, a través de las relaciones derivadas en este trabajo, con cuatro pluviómetros que registraron la tormenta del día 20 de diciembre de 2019 de 10 a 17 UTC. La Figura 7.6 muestra esta comparación para el caso del pluviómetro ubicado en la localidad de Arroyito (31.3911° S, 63.0014° W) donde se puede ver que la precipitación medida por el pluviómetro es sobreestimada, aproximadamente, por un factor dos con todas las relaciones. La situación mejora levemente para el caso del pluviómetro ubicado en la localidad de Candelaria (30.8601° S, 63.7011° W) donde la precipitación medida es subestimada 30 % en promedio por las distintas relaciones (Fig. 7.7).

En el pluviómetro ubicado en la localidad de Ascochinga (30.9598° S, 64.2831° W) (Fig. 7.8), en la región de las sierras, la precipitación medida es subestimada ligeramente por las relaciones $R(Z_H, Z_{dr})$ asociadas a los métodos TP80, TP50, TP20 y TMM mientras que la relación $R(Z_H)$ asociada al método WCMM la sobreestima excesivamente.

Finalmente, se realizó la comparación para el pluviómetro ubicado en la localidad de Cosquín (31.2060° S, 64.4597° W) donde puede observarse (Fig. 7.9) que la precipitación medida es subestimada un 35 % por las relaciones $R(Z_H, Z_{dr})$ y alrededor del 80 % por las relaciones $R(Z_H)$.

Por último, como se mencionó anteriormente, las estimaciones de precipitación fueron calculadas a partir de los datos de radar extraídos de la celda inmediatamente arriba del pluviómetro, lo cual podría no ser correcto en el caso de que la tormenta tenga asociados vientos

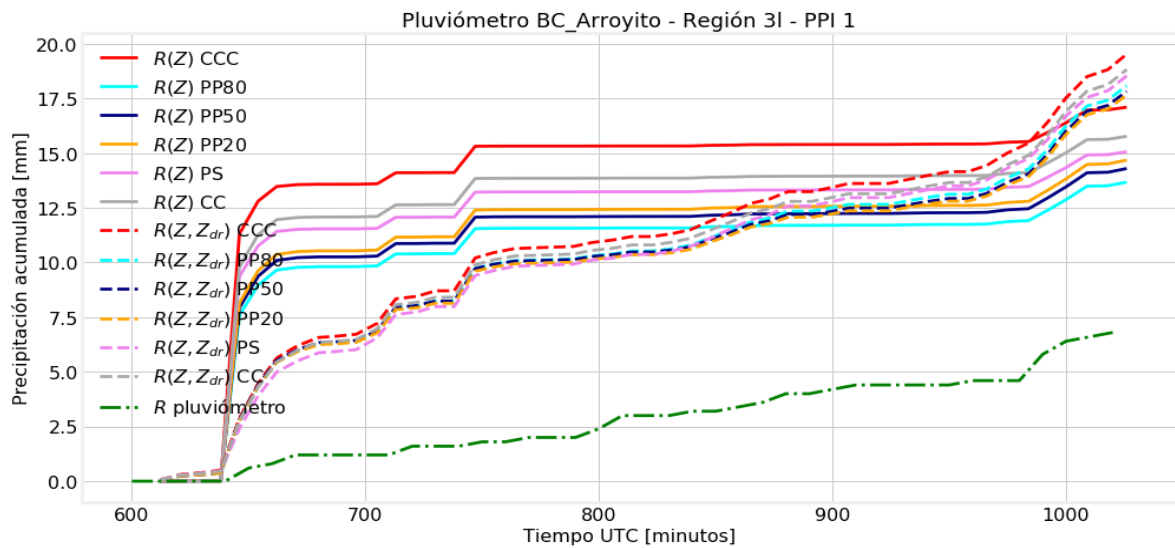


Figura 7.6: Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Arroyito (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 20 de diciembre de 2019 entre las 10 y 17 UTC.

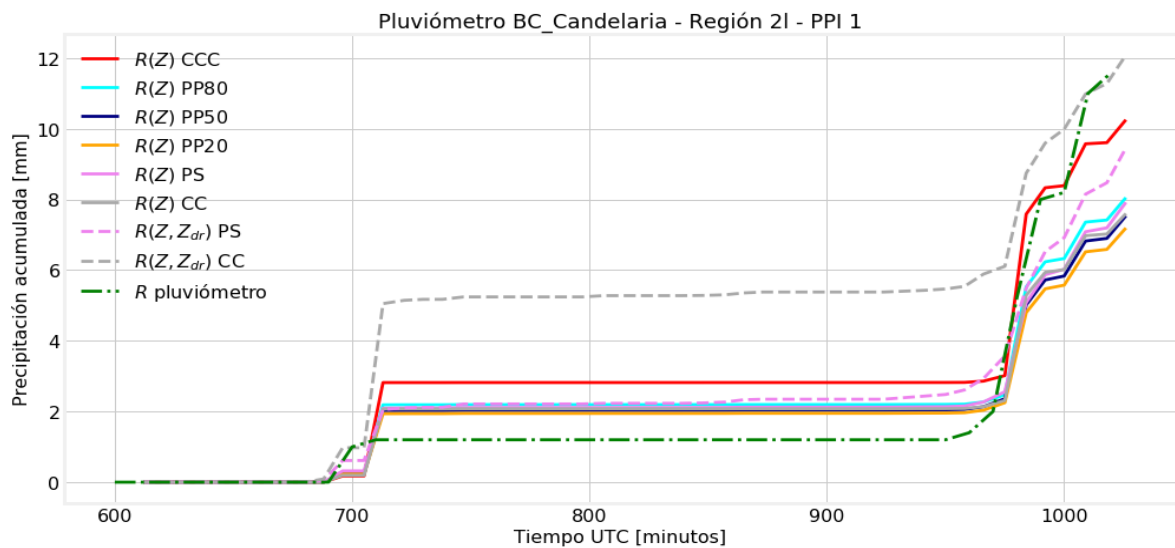


Figura 7.7: Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Candelaria (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 20 de diciembre de 2019 entre las 10 y 17 UTC.

intensos o movimientos de masas de aire que produzcan que la precipitación registrada por el pluviómetro provenga de alguna celda contigua.

Del análisis anterior se puede observar que las estimaciones de precipitación obtenidas a través de las relaciones $Z_H - R$ y $Pol-R$ determinadas en este trabajo tienen un desempeño aceptable en la región llanura y en las cercanías del radar RMA1, sin embargo, también es

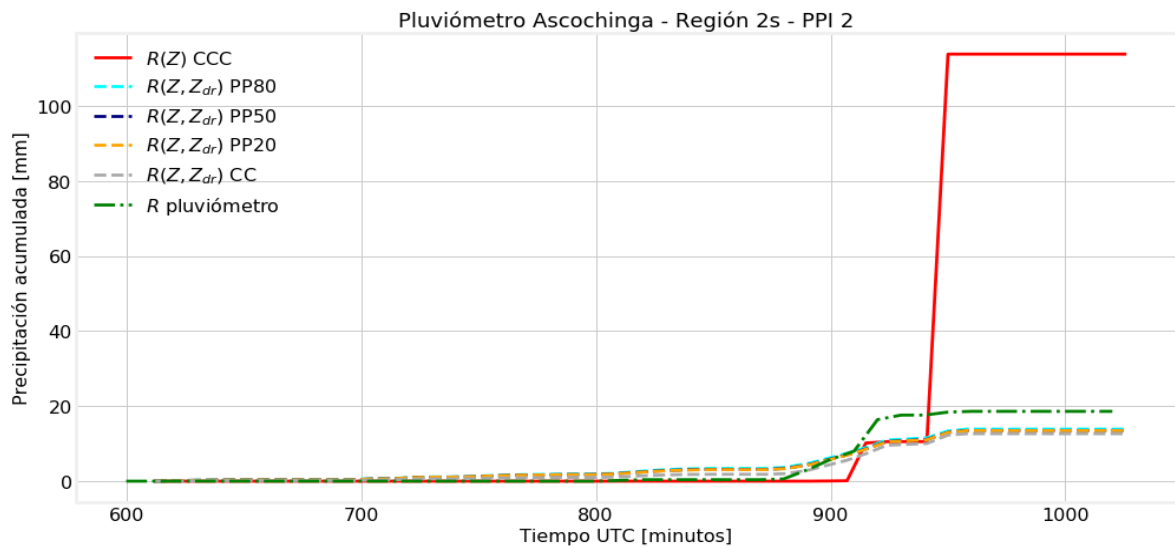


Figura 7.8: Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Ascochinga (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 20 de diciembre de 2019 entre las 10 y 17 UTC.

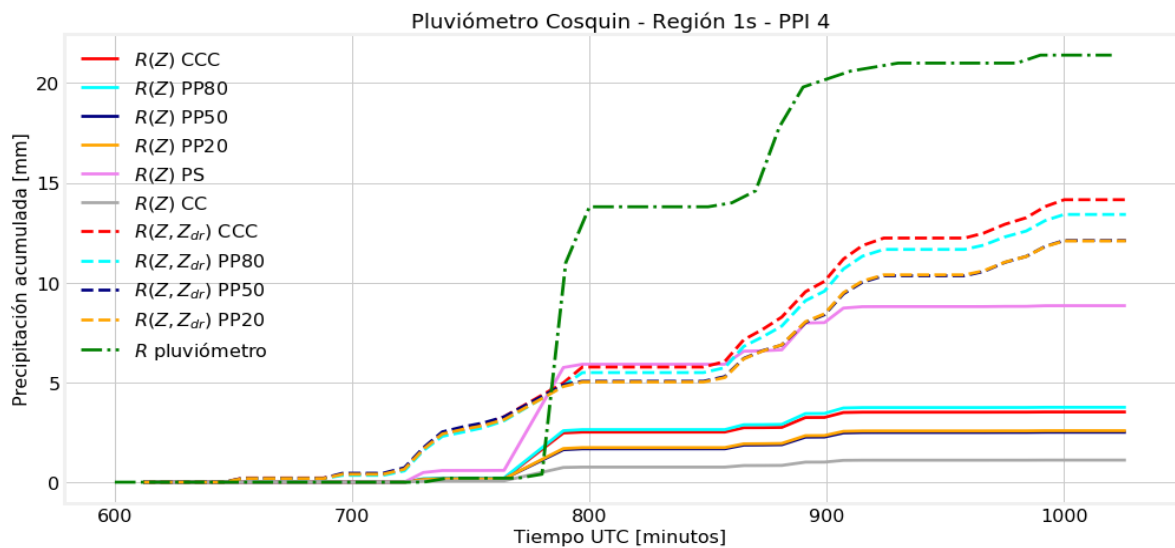


Figura 7.9: Precipitación acumulada medida por el pluviómetro de Cosquín (curva verde discontinua), estimada a través de la relación $R(Z_H)$ y estimada a través de la relación $R(Z_H, Z_{dr})$ durante la tormenta del día 20 de diciembre de 2019 entre las 10 y 17 UTC.

posible notar la disminución de la calidad de las mismas a medida que aumenta la distancia al radar y en la región de las sierras y traslasierra.

8

Conclusiones y Trabajos futuros

8.1. Conclusiones

A partir de este trabajo fue posible desarrollar un método de correlación nuevo basado en la combinación de dos métodos (*Window Correlation Matching Method* y *Window Matching Method*) y compararlo con tres métodos utilizados habitualmente en la bibliografía científica (celda central; celda con mejor correlación y promedio de las nueve celdas de la malla). Este nuevo algoritmo permite relacionar las mediciones obtenidas del radar meteorológico RMA1 con registros de tasa de precipitación obtenidas de pluviómetros en tierra de una manera más eficiente ya que tiene en cuenta el grado de correlación que tienen los datos de radar de las distintas celdas con los datos medidos en superficie.

Con el análisis de cinco tormentas de dos estaciones diferentes (primavera y otoño) a través de tres variantes de este nuevo método (TP80, TP50 y TP20) fue posible determinar los parámetros de ajuste que dan forma a las relaciones $Z_H(R)$ y $R(Z_H, Z_{dr})$ (Tablas 6.1, 6.2, 6.3, 6.3). Para estudiar las posibles variaciones de dichas relaciones con la distancia al radar se dividió el área de cobertura del radar RMA1 en semianillos centrados en el mismo: tres en la región sierra y tres en la llanura. Cada semianillo tiene un rango determinado, el primero abarca la región comprendida entre $0 < r < 40$ km, el segundo $40 < r < 80$ km y el tercero $80 < r < 120$ km (Fig. 5.2). Se logró observar que los coeficientes de correlación de las relaciones obtenidas en la región llanura, por medio de los métodos WCMM, TP80 y TP50, disminuyen a medida que aumenta la distancia al radar (Fig. 6.19). Esto se dió en las tormentas de ambas estaciones (otoño y primavera). Por otra parte, los coeficientes de correlación de las relaciones construidas con los métodos TP20, WMM y TMM son en general menores que los obtenidos con los métodos WCMM, TP80 y TP50. Esto posiblemente se deba a que los métodos TP20, WMM y TMM asumen que las celdas de la malla y la celda central contribuyen de manera similar a la precipitación medida por el pluviómetro y por lo tanto desestiman los efectos del viento y los movimientos de las masas de aire durante la tormenta.

Los coeficientes de correlación asociados a las relaciones construidas en la región de las sierras no disminuyen con la distancia al radar sino que exhiben un aumento y una reducción en el segundo semianillo de la temporada de otoño y primavera respectivamente (Fig. 6.20).

Una de las posibles causas que podrían influir en el coeficiente de correlación es el número reducido de datos con los que se trabajó en esta región en comparación con la región llanura (Tablas 6.5-6.6). La cantidad de datos obtenida en las sierras fue limitada debido a que las tormentas permanecieron un mayor tiempo en la región llanura.

Los resultados obtenidos de las estimaciones de precipitación a través de las relaciones $Z_H - R$ y $R - Z_H - Z_{dr}$ derivadas para la estación otoño muestran una aproximación razonable a lo medido en superficie para los semianillos $0 < r < 40$ km y $40 < r < 80$ km mientras que se advierte una reducción de la precisión de las estimaciones para los semianillos más distantes al radar $80 < r < 120$ km. En cuanto a las estimaciones de precipitación en la estación primavera se puede ver que, tal como sucede en la estación otoño, la calidad de las mismas se ve reducida en el semianillo $80 < r < 120$ km. Esto posiblemente se acentúe por la ausencia de una corrección por atenuación de la señal del radar y la menor cantidad de datos analizados en comparación con la estación otoño. Adicionalmente, se observa que las estimaciones, en particular las calculadas a partir de las relaciones $Z_H - R$, subestiman considerablemente la precipitación en el semianillo $0 < r < 40$ km de la región sierras.

Por último, los métodos WCMM, TP80, TP50 incrementan los coeficientes de correlación de la región llanura durante las tormentas de otoño y primavera. Mientras que en la región sierras, el método TP80 maximiza los coeficientes de correlación para las tormentas de otoño y los métodos TP80 y TP50 lo maximizan para las tormentas de primavera.

8.2. Trabajos futuros

A continuación se presentan algunos trabajos futuros que pueden desarrollarse como resultado de este trabajo o que, por exceder el alcance del mismo, no han podido ser tratados con la suficiente profundidad:

- Definir e incluir un valor $Z_{H,lim}$ para el factor de reflectividad de modo de obtener distintas relaciones $Z_H - R$ y $R - Z_H - R$ para $Z_H < Z_{H,lim}$ y $Z_H \geq Z_{H,lim}$.
- Construir las relaciones $Z_H - R$ y $Pol-R$ a partir de una mayor base de datos de tormentas (> 1 año).
- Realizar un análisis estadístico de la precipitación medida por los pluviómetros y la precipitación estimada por el radar.
- Construir relaciones $Z_H - R$ y $R - Z_H - R$ sin dividir el área de estudio en semianillos y comparar el desempeño de estas con las obtenidas dividiendo el área de estudio para analizar la calidad de las estimaciones de precipitación en ambos casos.
- Construir relaciones $Z_H - R$ y $R - Z_H - R$ sin interpolar los datos y compararlas con aquellas obtenidas interpolando los datos para analizar de que manera impacta en las estimaciones de precipitación.
- Incluir una distinción entre tipos de tormentas (convectivo y estratiforme) al momento de derivar las relaciones $Z_H - R$ y $R - Z_H - R$.

Bibliografía

- [1] R. M. Rauber y S. L. Nesbitt, *Radar Meteorology: A First Course*. John Wiley & Sons, 2018.
- [2] R. J. Doviak, D. S. Zrnic, y R. M. Schotland, “Doppler radar and weather observations,” *Applied Optics*, vol. 33, p. 4531, 1994.
- [3] J. Bech, S. d. M. de Catalunya, S. B. Codina, J. Lorente, y D. Bebbington, “P7. 3 anomalous propagation effects on weather radar beam blockage corrections,” en *Conference on Radar Meteorology of the American Meteorological Society*, vol. 30. American Meteorological Society, 2001, p. 267.
- [4] M. Henkel, *21st Century Homestead: Sustainable Agriculture III: Agricultural Practices*. Lulu.com, 2015.
- [5] S. Das, S. Talukdar, A. Bhattacharya, A. Adhikari, y A. Maitra, “Vertical profile of zr relationship and its seasonal variation at a tropical location,” en *2011 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*. IEEE, 2011, pp. 1–4.
- [6] S. Thorndahl, T. Einfalt, P. Willems, J. E. Nielsen, M.-C. ten Veldhuis, K. Arnbjerg-Nielsen, M. R. Rasmussen, y P. Molnar, “Weather radar rainfall data in urban hydrology,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, núm. 3, pp. 1359–1380, 2017.
- [7] F. E. Horita, R. Vilela, R. Martins, D. Bressiani, G. Palma, y J. P. de Albuquerque, “Determining flooded areas using crowd sensing data and weather radar precipitation: a case study in brazil.” en *ISCRAM*, 2018.
- [8] F. Tapiador, R. Checa, y M. De Castro, “An experiment to measure the spatial variability of rain drop size distribution using sixteen laser disdrometers,” *Geophysical Research Letters*, vol. 37, núm. 16, 2010.
- [9] B. Chapon, G. Delrieu, M. Gosset, y B. Boudevillain, “Variability of rain drop size distribution and its effect on the $z-r$ relationship: A case study for intense mediterranean rainfall,” *Atmospheric Research*, vol. 87, núm. 1, pp. 52–65, 2008.
- [10] J. S. Marshall y W. M. K. Palmer, “The distribution of raindrops with size,” *Journal of meteorology*, vol. 5, núm. 4, pp. 165–166, 1948.

- [11] D. C. Blanchard, "Raindrop size-distribution in hawaiian rains," *Journal of Meteorology*, vol. 10, núm. 6, pp. 457–473, 1953.
- [12] D. Jones, "Rainfall drop size-distribution and radar reflectivity," Illinois State Water Survey, Rep. Tec., 1956.
- [13] J. Joss, B. Schädler, G. Galli, R. Cavalli, M. Boscacci, E. Held, G. Della Bruna, G. Kappenberger, V. Nespor, y R. Spiess, *Operational use of radar for precipitation measurements in Switzerland*. vdf Hochschulverl. an der ETH Zürich, 1998.
- [14] J. X. Yeo, Y. H. Lee, y J. Ong, "Radar measured rain attenuation with proposed z-r relationship at a tropical location," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 69, núm. 1, pp. 458–461, 2015.
- [15] P. Chantraket, C. Detyothin, S. Pankaew, y S. Kirtsaeng, "An operational weather radar-based calibration of zr relationship over central region of thailand," *Int. J. Eng. Issues*, vol. 2, pp. 92–100, 2016.
- [16] E. Brandes, J. Vivekanandan, y J. Wilson, "Radar rainfall estimates of the buffalo creek flash flood using wr-88d and polarimetric radar data," en *Preprints, 28th Conf. on Radar Meteorology, Austin, TX, Amer. Meteor. Soc.*, 1997, pp. 123–124.
- [17] C. A. Pérez Sánchez, F. Gamboa Romero, Z. Rivero Jaspe, y I. Pomares Ponce, "El error en la estimación de la precipitación por radar y su relación con el intervalo de muestreo," 2004.
- [18] A. D. Ochou, E.-P. Zahiri, B. Bamba, y M. Koffi, "Understanding the variability of zr relationships caused by natural variations in raindrop size distributions (dsd): Implication of drop size and number," *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 1, núm. 03, p. 147, 2011.
- [19] I. Strangeways, "A history of rain gauges," *Weather*, vol. 65, núm. 5, pp. 133–138, 2010.
- [20] P. Tait, *Introduction to radar target recognition*. IET, 2005, vol. 18.
- [21] D.-J. Seo, E. Habib, H. Andrieu, y E. Morin, "Hydrologic applications of weather radar," *Journal of Hydrology*, vol. 531, pp. 231–233, 2015.
- [22] M. J. Simpson y N. I. Fox, "Dual-polarized quantitative precipitation estimation as a function of range," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 22, núm. 6, pp. 3375–3389, 2018.
- [23] R. Calheiros y I. Zawadzki, "Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in brazil," *Journal of climate and applied meteorology*, vol. 26, núm. 1, pp. 118–132, 1987.
- [24] B. Méndez-Antonio, R. Domínguez-Mora, V. Magaña-Rueda, E. Caetano, *et al.*, "Calibración hidrológica de radares meteorológicos," *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 21, núm. 4, pp. 43–64, 2015.

- [25] D. Rosenfeld, D. B. Wolff, y E. Amitai, “The window probability matching method for rainfall measurements with radar,” *Journal of applied meteorology*, vol. 33, núm. 6, pp. 682–693, 1994.
- [26] T. Piman, M. Babel, A. D. Gupta, y S. Weesakul, “Development of a window correlation matching method for improved radar rainfall estimation,” 2007.
- [27] A. Rodríguez, C. Lacunza, J. Serra, A. C. Saulo, H. H. Ciappesoni, G. M. Caranti, J. C. Bertoni, y A. Martina, “Sinarama: El primer sistema integrado de radares hidrometeorológicos de latinoamérica,” 2017.
- [28] L. Vidal *et al.*, “Sinarama: Sistema nacional de radares meteorológicos,” 2013.
- [29] A. V. Ryzhkov y D. S. Zrnić, *Radar Polarimetry for Weather Observations*. Springer, 2019.
- [30] P. Meischner, *Weather radar: principles and advanced applications*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [31] M. E. Anderson, L. D. Carey, W. A. Petersen, y K. R. Knupp, “C-band dual-polarimetric radar signatures of hail,” *Electron. J. Oper. Meteor*, vol. 12, núm. 2, pp. 1–30, 2011.
- [32] R. Houze, “A., jr., 1993: Cloud dynamics,” *International Geophysics Series*, vol. 53.
- [33] H. R. Pruppacher y K. Beard, “A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 96, núm. 408, pp. 247–256, 1970.
- [34] H. R. Pruppacher y R. Pitter, “A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops,” *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 28, núm. 1, pp. 86–94, 1971.
- [35] E. A. Brandes, G. Zhang, y J. Vivekanandan, “Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment,” *Journal of Applied Meteorology*, vol. 41, núm. 6, pp. 674–685, 2002.
- [36] K. V. Beard y C. Chuang, “A new model for the equilibrium shape of raindrops,” *Journal of the Atmospheric sciences*, vol. 44, núm. 11, pp. 1509–1524, 1987.
- [37] M. Thurai y V. Bringi, “Drop axis ratios from a 2d video disdrometer,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 22, núm. 7, pp. 966–978, 2005.
- [38] M. R. Kumjian, “Principles and applications of dual-polarization weather radar. part i: Description of the polarimetric radar variables.” *Journal of Operational Meteorology*, vol. 1, 2013.
- [39] K. Aydin, T. Seliga, y V. Balaji, “Remote sensing of hail with a dual linear polarization radar,” *Journal of climate and applied meteorology*, vol. 25, núm. 10, pp. 1475–1484, 1986.

- [40] V. Bringi, J. Vivekanandan, y J. Tuttle, “Multiparameter radar measurements in colorado convective storms. part ii: Hail detection studies,” *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 43, núm. 22, pp. 2564–2577, 1986.
- [41] R. M. Wakimoto y V. Bringi, “Dual-polarization observations of microbursts associated with intense convection: The 20 July storm during the mist project,” *Monthly weather review*, vol. 116, núm. 8, pp. 1521–1539, 1988.
- [42] J. P. Burrows, U. Platt, y P. Borrell, *The remote sensing of tropospheric composition from space*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [43] A. Papatosoris y P. Watson, “Calculation of absorption and dispersion spectra of atmospheric gases at millimetre-wavelengths,” en *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, vol. 140, núm. 6. IET, 1993, pp. 461–468.
- [44] L. V. Blake, “Prediction of radar range,” en *Radar handbook*. McGraw-Hill, 1970, pp. 2–26.
- [45] V. Bringi, V. Chandrasekar, N. Balakrishnan, y D. Zrnić, “An examination of propagation effects in rainfall on radar measurements at microwave frequencies,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 7, núm. 6, pp. 829–840, 1990.
- [46] J.-Y. Gu, A. Ryzhkov, P. Zhang, P. Neille, M. Knight, B. Wolf, y D.-I. Lee, “Polarimetric attenuation correction in heavy rain at c band,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 50, núm. 1, pp. 39–58, 2011.
- [47] V. N. Bringi, T. Keenan, y V. Chandrasekar, “Correcting c-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: A self-consistent method with constraints,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 39, núm. 9, pp. 1906–1915, 2001.
- [48] G. Vulpiani, P. Tabary, J. Parent du Chatelet, y F. S. Marzano, “Comparison of advanced radar polarimetric techniques for operational attenuation correction at c band,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 25, núm. 7, pp. 1118–1135, 2008.
- [49] E. Gorgucci, G. Scarchilli, y V. Chandrasekar, “Error structure of radar rainfall measurement at c-band frequencies with dual polarization algorithm for attenuation correction,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 101, núm. D21, pp. 26 461–26 471, 1996.
- [50] E. Gorgucci y L. Baldini, “Attenuation and differential attenuation correction of c-band radar observations using a fully self-consistent methodology,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, núm. 2, pp. 326–330, 2007.
- [51] M. A. Rico-Ramirez, “Adaptive attenuation correction techniques for c-band polarimetric weather radars,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 50, núm. 12, pp. 5061–5071, 2012.

- [52] C. G. Collier y C. G. Collier, *Applications of weather radar systems: a guide to uses of radar data in meteorology and hydrology*. Ellis Horwood Chichester, 1989.
- [53] K. J. Westrick, C. F. Mass, y B. A. Colle, “The limitations of the wrs-88d radar network for quantitative precipitation measurement over the coastal western united states,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 80, núm. 11, pp. 2289–2298, 1999.
- [54] C. B. Young, B. R. Nelson, A. A. Bradley, J. A. Smith, C. D. Peters-Lidard, A. Kruger, y M. L. Baeck, “An evaluation of nexrad precipitation estimates in complex terrain,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 104, núm. D16, pp. 19 691–19 703, 1999.
- [55] T. Pellarin, G. Delrieu, G.-M. Saulnier, H. Andrieu, B. Vignal, y J.-D. Creutin, “Hydrologic visibility of weather radar systems operating in mountainous regions: Case study for the ardèche catchment (france),” *Journal of Hydrometeorology*, vol. 3, núm. 5, pp. 539–555, 2002.
- [56] J. J. Helmus y S. M. Collis, “The python arm radar toolkit (py-art), a library for working with weather radar data in the python programming language,” *Journal of Open Research Software*, vol. 4, 2016.
- [57] D. T. Bailey, *Meteorological monitoring guidance for regulatory modeling applications*. DIANE Publishing, 2000.
- [58] L. J. Battan, “Radar observation of the atmosphere,” Rep. Tec., 1973.
- [59] S. Raghavan, *Radar meteorology*. Springer Science & Business Media, 2013, vol. 27, pp. 268–269.
- [60] D. Atlas, C. W. Ulbrich, F. D. Marks Jr, E. Amitai, y C. R. Williams, “Systematic variation of drop size and radar-rainfall relations,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 104, núm. D6, pp. 6155–6169, 1999.
- [61] G. W. Lee y I. Zawadzki, “Variability of drop size distributions: Time-scale dependence of the variability and its effects on rain estimation,” *Journal of applied meteorology*, vol. 44, núm. 2, pp. 241–255, 2005.
- [62] N. Mahavik, T. Satomura, y S. Baimuang, “Investigation zr relationships of precipitation characteristic by weather radar in thailand.”
- [63] J. A. Smith y W. F. Krajewski, “A modeling study of rainfall rate-reflectivity relationships,” *Water Resources Research*, vol. 29, núm. 8, pp. 2505–2514, 1993.
- [64] M. Fujiwara, “Raindrop-size distribution from individual storms,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 22, núm. 5, pp. 585–591, 1965.

- [65] T. Kozu, K. K. Reddy, S. Mori, M. Thurai, J. T. Ong, D. N. Rao, y T. Shimomai, “Seasonal and diurnal variations of raindrop size distribution in asian monsoon region,” *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, vol. 84, pp. 195–209, 2006.
- [66] S. Compliew y B. Khuanyuen, “The effect of radar range on radar rainfall estimation,” *APHW 3rd ProceedingÀ, Suntec City, Singapore*, 2004.
- [67] F. Fabry, G. Austin, y D. Tees, “The accuracy of rainfall estimates by radar as a function of range,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 118, núm. 505, pp. 435–453, 1992.
- [68] S. Sebastianelli, F. Russo, F. Napolitano, L. Baldini, y L. Baldini, “A test bed for verification of a methodology to correct the effects of range dependent errors on radar estimates,” en *Proceeding of the 7th European Conf. Radar Meteorology and Hydrology, Météo France, Toulouse, France*, 2012.
- [69] Y. Zhang, L. Liu, S. Bi, Z. Wu, P. Shen, Z. Ao, C. Chen, y Y. Zhang, “Analysis of dual-polarimetric radar variables and quantitative precipitation estimators for landfall typhoons and squall lines based on disdrometer data in southern china,” *Atmosphere*, vol. 10, núm. 1, p. 30, 2019.
- [70] G. Zhang, V. N. Mahale, B. J. Putnam, Y. Qi, Q. Cao, A. D. Byrd, P. Bukovic, D. S. Zrnica, J. Gao, M. Xue, *et al.*, “Current status and future challenges of weather radar polarimetry: Bridging the gap between radar meteorology/hydrology/engineering and numerical weather prediction,” *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 36, núm. 6, pp. 571–588, 2019.
- [71] J. Chrisman, “6 improving and exploiting polarimetric weather radar data—plans and status richard l. ice and jg cunningham us air force, air weather agency, operating location k, norman, oklahoma.”
- [72] Y. Gou, H. Chen, y J. Zheng, “Polarimetric radar signatures and performance of various radar rainfall estimators during an extreme precipitation event over the thousand-island lake area in eastern china,” *Remote Sensing*, vol. 11, núm. 20, p. 2335, 2019.
- [73] J. Yoon, J.-S. Park, H.-L. Kim, M.-K. Suk, y K.-Y. Nam, “An empirical qpe method based on polarimetric variable adjustments.”
- [74] E. N. Anagnostou, “A convective/stratiform precipitation classification algorithm for volume scanning weather radar observations,” *Meteorological Applications*, vol. 11, núm. 4, pp. 291–300, 2004.
- [75] P. M. Austin y R. A. Houze Jr, “Analysis of the structure of precipitation patterns in new england,” *Journal of applied meteorology*, vol. 11, núm. 6, pp. 926–935, 1972.

- [76] D. D. Churchill y R. A. Houze Jr, “Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 december 1978,” *Journal of the atmospheric sciences*, vol. 41, núm. 6, pp. 933–960, 1984.
- [77] M. Steiner, R. A. Houze Jr, y S. E. Yuter, “Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data,” *Journal of Applied Meteorology*, vol. 34, núm. 9, pp. 1978–2007, 1995.
- [78] Z. Yang, P. Liu, y Y. Yang, “Convective/stratiform precipitation classification using ground-based doppler radar data based on the k-nearest neighbor algorithm,” *Remote Sensing*, vol. 11, núm. 19, p. 2277, 2019.
- [79] M. Deng, P. Kollias, Z. Feng, C. Zhang, C. N. Long, H. Kalesse, A. Chandra, V. V. Kumar, y A. Protat, “Stratiform and convective precipitation observed by multiple radars during the dynamo/ame experiment,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 53, núm. 11, pp. 2503–2523, 2014.

Apéndices

A. Tipos de precipitación

La precipitación puede ser clasificada en dos tipos, *estratiforme* y *convectiva*. Los sistemas convectivos están asociados con campos de velocidades verticales muy intensos, áreas de cobertura reducida y altas tasas de precipitación mientras que los sistemas estratiformes tienen campos de velocidades verticales relativamente débiles, mayor homogeneidad horizontal y menores tasas de precipitación. Sin embargo, si bien la tasa de precipitación estratiforme es mucho menor que la tasa de precipitación convectiva de las celdas adyacentes, los sistemas estratiformes cubren áreas mucho más grandes y contribuyen con una porción significativa (40-50 %) del volumen de precipitación total, incluso para aquellos sistemas convectivos más grandes [74].

De acuerdo a Houze [32] ambos tipos de precipitación pueden ser definidos de acuerdo a sus escalas de velocidades verticales. La precipitación estratiforme se define como un proceso de precipitación en la cual el movimiento vertical del aire es pequeño comparado con la velocidad de caída de los cristales de hielo; de manera más específica, la velocidad vertical del aire w satisface la condición

$$|w| < V_{hielo}, \quad (1)$$

donde V_{hielo} representa la velocidad terminal de caída de los cristales de hielo ($\sim 1-3 \text{ m s}^{-1}$). Por otra parte, la precipitación convectiva difiere de la estratiforme debido a que esta se define como aquella precipitación en la que no se satisface la condición dada por la Ec. 1. En este caso la velocidad vertical del aire es de $\sim 1-10 \text{ m s}^{-1}$, la cual es igual o excede las velocidades terminales de caída típicas de los cristales de hielo.

Debido a que distinguir los sistemas convectivos y estratiformes es beneficioso para la investigación en meteorología y el pronóstico del tiempo, se han desarrollado diversos algoritmos basados en mediciones de instrumentos en tierra para clasificar la precipitación. Entre ellos se pueden mencionar los basados en datos de pluviómetros [32, 75], los cuales clasifican una precipitación en convectiva si ha superado un cierto límite en la tasa de precipitación. Este método generalmente identifica el núcleo convectivo de la tormenta. Esta técnica fue extendida a dos dimensiones usando observaciones del factor de reflectividad del radar, donde fue identificado el núcleo convectivo y, a través de un radio fijo de influencia, se asigna la región de precipitación convectiva [76]. Steiner et al.[77] mejoraron esta aproximación y en lugar de considerar un radio fijo consideró un radio y límite de tasas de precipitación variables.

En la actualidad, se han presentado algoritmos de clasificación que utilizan redes neuronales entrenadas y validadas con datos de radar [74], algoritmos de machine learning y algoritmos basados en observaciones por radares nube cuya frecuencia de operación es de 35 GHz y longitud de onda $\lambda = 8.6 \text{ mm}$ [74, 78, 79].

A pesar de esto, en este trabajo no se realizará una distinción entre tormentas convectivas y estratiformes debido a que excede el alcance del mismo.

B. Algoritmos

A continuación se muestra la estructura general del código de Python que se utilizó para realizar este trabajo. Para simplificar y facilitar la lectura del algoritmo algunos de los cálculos más simples fueron realizados por funciones que se guardaron en módulos complementarios al código principal.

El primer paso consiste en importar los volúmenes de radar de la tormenta, los cuales fueron guardados en un directorio específico para su posterior análisis. Para ello el siguiente bloque guarda todos los nombres de los volúmenes de radar NetCDF contenidos en un directorio en una variable llamada *file_names*,

```
import numpy as np
import os

file_names = [()]

path = '/home/user/Documents/'

for root, dirs, files in os.walk(path):
    for filename in sorted(files):
        i = filename[0:32]
        file_names = np.append(file_names, i)
```

Luego, las siguientes líneas de código cargan el primer volumen de radar e imprime en pantalla los campos guardados en el mismo,

```
import pyart
radar_test = pyart.io.read(path+'/' + file_names[0])
radar_test.fields.keys()
```

Esto es útil para saber bajo que nombre se encuentra guardado el factor de reflectividad horizontal (*TH* o *DBZH*). Este dato será utilizado más adelante.

Debido a que algunos volúmenes de radar pueden no contener uno o algunos de los campos que serán utilizados en este trabajo es necesario explorar cada uno de ellos para verificar su existencia. Para esto, el siguiente bloque examina si los volúmenes contienen los campos de factor de reflectividad horizontal (Z_H), factor de reflectividad vertical (Z_V) y coeficiente de correlación co-polar (ρ_{HV}),

```
for k in file_names:
    filename = path+k
    radar = pyart.io.read(filename)

    if 'DBZH' in radar.fields.keys():
        continue
    elif 'TH' in radar.fields.keys():
        continue
```

```

else:
    print('Falta el factor de reflectividad horizontal en el archivo '+k)
    print(radar.fields.keys())

if 'DBZV' in radar.fields.keys():
    continue
elif 'TV' in radar.fields.keys():
    continue
else:
    print('Falta el factor de reflectividad vertical en el archivo '+k)
    print(radar.fields.keys())

if 'RHOHV' in radar.fields.keys():
    continue
else:
    print('Falta el RHOHV en el archivo '+k)
    print(radar.fields.keys())

print(' ***** Listo ***** ')

```

de esta manera es posible quitar los volúmenes incompletos del directorio original.

El siguiente paso es obtener el factor de reflectividad horizontal y la reflectividad diferencial (Z_{dr}) de la malla de nueve celdas sobre cada uno de los pluviómetros. Para lograr esto se diseñó un bloque de código que, a través de un *loop* sobre los volúmenes de radar, determine la celda de radar ubicada sobre el pluviómetro y luego, a través de un segundo *loop*, guarda los valores de Z_H y Z_{dr} de la malla de celdas en un archivo,

```

# Importamos el paquete para el trabajo con datos de radar y el de
  representacion
import pyart
import colores
import numpy as np
import gc
import math

# Indicamos que vamos a imprimir dentro de la notebook
%matplotlib inline

nombre_ZH = 'TH'      # Nombre del campo que contiene el factor de
  reflectividad horizontal
nombre_ZV = 'TV'      # Nombre del campo que contiene el factor de
  reflectividad vertical
nombre_RHOHV = 'RHOHV' # Nombre del campo que contiene el CC co-polar
ro_lim = 0.9          # Celdas con valores de rho_hv menores a ro_lim
  son ignoradas

path_estaciones = '/home/user/Documents/'

```

```

latitude , longitud = np.genfromtxt(path_estaciones+'
    Estaciones_a_verificar.txt',
                                   unpack=True, usecols=(1,2))
estacion = np.genfromtxt(path_estaciones+'Estaciones_a_verificar.txt',
                          unpack=True, usecols=(0),
                          dtype='str')
elevacion = np.genfromtxt(path_estaciones+'Estaciones_a_verificar.txt',
                           unpack=True, usecols=(3),
                           dtype='int')

# Loop de los archivos de radar .nc
for k in file_names:

    radar_time = k[22:24]+'_'+k[24:26] # Hora del correspondiente
    volumen .nc en formato HH:MM

    filename = path+k
    radar = pyart.io.read(filename)

    if 'ZDR' in radar.fields.keys():
        nombre_ZDR = 'ZDR'
    else:
        ZDR = radar.fields[nombre_ZH]['data'] - radar.fields[nombre_ZV][
'data']
        radar.add_field_like(nombre_ZH, 'ZDR', ZDR, replace_existing=True
        )
        nombre_ZDR = 'ZDR'

    # Filtro DBZH y ZDR con valores de RHOHV menores a ro_lim

    aux1 = np.ma.masked_where(radar.fields[nombre_RHOHV]['data'] < ro_lim
, radar.fields[nombre_ZH]['data'])

    aux2 = np.ma.masked_where(radar.fields[nombre_RHOHV]['data'] < ro_lim
, radar.fields['ZDR']['data'])

    # Los valores filtrados anteriormente son puestos como enmascarados
    —
    # Con las siguientes lineas se convierten en nan
    aux1 = np.ma.filled(aux1, np.nan)
    aux2 = np.ma.filled(aux3, np.nan)

    # Agrego los campos filtrados al archivo radar
    radar.add_field_like(nombre_ZH, 'DBZH_filtrado', aux1, replace_existing
=True)

    radar.add_field_like(nombre_ZDR, 'ZDR_filtrado', aux2, replace_existing
=True)

```

```

# Abro un archivo y escribo la hora de la medicion del radar
radar_time_files = open("RESULTADOS/tiempo_radar.txt", "a+")
radar_time_files.write("%\r" % str(radar_time))
radar_time_files.close()

# Loop de las estaciones
for lat, long, name, ppi_n in zip(latitude, longitude, estacion,
elevacion): # Loop para barrer todos los pluviometros

    x,y = pyart.core.geographic_to_cartesian_aeqd(long, lat,
-64.19192000, -31.44133000) # Calculo coordenadas x,y del pluviometro

    loc_estacion(x,y) # Funcion que devuelve el azimuth y la distancia
radial del radar al pluviometro

    # Distancia al pluviometro en km. Alfa contando desde el norte
geografico en sentido horario
    r_km = r/1000 # Paso r de metros a r_km en kilometros

    # Calculo la distancia al 1er gate desde el radar y la distancia
entre gates
    first_gate_latitude = radar.gate_latitude['data'][0, 0] # Latitud
del primer gate con azimuth 0 grados
    first_gate_longitude = radar.gate_longitude['data'][0, 0] #
Longitud del primer gate con azimuth 0 grados
    first_x, first_y = pyart.core.geographic_to_cartesian_aeqd(
first_gate_longitude, first_gate_latitude, -64.19192000, -31.44133000)
# Coord. x y del primer gate con azimuth 0
    r_first = math.sqrt(first_x*first_x+first_y*first_y) # Distancia
al primer gate

    second_gate_latitude = radar.gate_latitude['data'][0, 1] #
Latitud del segundo gate con azimuth 0 grados
    second_gate_longitude = radar.gate_longitude['data'][0, 1] #
Latitud del segundo gate con azimuth 0 grados
    second_x, second_y = pyart.core.geographic_to_cartesian_aeqd(
second_gate_longitude, second_gate_latitude, -64.19192000,
-31.44133000) # Coord. x y del segundo gate con azimuth 0
    r_second = math.sqrt(second_x*second_x+second_y*second_y) #
Distancia al segundo gate

    dist_bet_gates = r_second - r_first # Distancia entre gates

    gate = round((r-r_first)/dist_bet_gates) # (dist. pluv. - dist. 1
st gate) / dist. entre gates = numero de gate

# Latitud, longitud y altitud del gate mas cercano al pluviometro
gate_latitude = radar.gate_latitude['data'][alfa, gate]
gate_longitude = radar.gate_longitude['data'][alfa, gate]
gate_altitude = radar.gate_altitude['data'][alfa, gate]

```

```

    # Control para verificar que la distancia entre el pluviometro y
    el gate mas cercano no exceda ciertos valores

    x_gate, y_gate = pyart.core.geographic_to_cartesian_aeqd(
    gate_longitude, gate_latitude, -64.19192000, -31.44133000)
    dist_gate_pluv = abs(np.sqrt((x-x_gate)**2+(y-y_gate)**2)) # En
    metros

    celdas(radar, alfa, gate, ppi_n) # Funcion que guarda los valores
    de Z y ZDR de la malla de celdas

gc.collect()

```

La función *celdas* tiene la siguiente estructura,

```

    if ppi_n == 1: # PPI 1 es el angulo de elevacion mas bajo

        reflectividades_1PPI = open("RESULTADOS/1PPI_Z_"+name+".txt",
        "a+")
        ZDR_1PPI = open("RESULTADOS/1PPI_ZDR_"+name+".txt", "a+")

        # Factor de reflectividad de cada celda en dBZ
        A0 = radar.fields['DBZH_filtrado']['data'][alfa-1][gate-1]
        A1 = radar.fields['DBZH_filtrado']['data'][alfa][gate-1]
        A2 = radar.fields['DBZH_filtrado']['data'][alfa+1][gate-1]
        B0 = radar.fields['DBZH_filtrado']['data'][alfa-1][gate]
        B1 = radar.fields['DBZH_filtrado']['data'][alfa][gate]
        B2 = radar.fields['DBZH_filtrado']['data'][alfa+1][gate]
        C0 = radar.fields['DBZH_filtrado']['data'][alfa-1][gate+1]
        C1 = radar.fields['DBZH_filtrado']['data'][alfa][gate+1]
        C2 = radar.fields['DBZH_filtrado']['data'][alfa+1][gate+1]
        # ZDR de cada celda en dBZ
        A0_ZDR = radar.fields['ZDR_filtrado']['data'][alfa-1][gate-1]
        A1_ZDR = radar.fields['ZDR_filtrado']['data'][alfa][gate-1]
        A2_ZDR = radar.fields['ZDR_filtrado']['data'][alfa+1][gate-1]
        B0_ZDR = radar.fields['ZDR_filtrado']['data'][alfa-1][gate]
        B1_ZDR = radar.fields['ZDR_filtrado']['data'][alfa][gate]
        B2_ZDR = radar.fields['ZDR_filtrado']['data'][alfa+1][gate]
        C0_ZDR = radar.fields['ZDR_filtrado']['data'][alfa-1][gate+1]
        C1_ZDR = radar.fields['ZDR_filtrado']['data'][alfa][gate+1]
        C2_ZDR = radar.fields['ZDR_filtrado']['data'][alfa+1][gate+1]

        reflectividades_1PPI.write("%s %s %s %s %s %s %s %s %s\n" %
        (str(A0), str(A1), str(A2), str(B0), str(B1), str(B2), str(C0), str(C1), str(
        C2)))
        ZDR_1PPI.write("%s %s %s %s %s %s %s %s %s\n" % (str(A0_ZDR)
        , str(A1_ZDR), str(A2_ZDR), str(B0_ZDR), str(B1_ZDR), str(B2_ZDR), str(
        C0_ZDR), str(C1_ZDR), str(C2_ZDR)))

        reflectividades_1PPI.close()
        ZDR_1PPI.close()

```


La información de los pluviómetros, su ubicación, semianillos a los que pertenecen y ángulo de elevación de la antena de radar a utilizar para evitar el bloqueo parcial del haz es introducido a través de un archivo llamado *Estaciones_a_verificar.txt*.

Luego, con los datos de radar obtenidos en el bloque anterior y las tasas de precipitación registrada por los pluviómetros se debe calcular el coeficiente de correlación y los promedios de los factores de reflectividad y reflectividad diferencial para formar los conjuntos de valores $Z_H-Z_{dr}-R$,

```

from matplotlib import style
from matplotlib import pylab
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats.stats import pearsonr
from scipy import interpolate

style.use('fivethirtyeight')
plt.switch_backend('agg')

%matplotlib inline

fill_val = np.nan # Fill value para los datos faltantes

elevacion = np.genfromtxt(path_estaciones+'Estaciones_a_verificar.txt',
                           unpack=True, usecols=(3),
                           dtype='int')
estacion, zona = np.genfromtxt(path_estaciones+'Estaciones_a_verificar.
                               txt',
                               unpack=True, usecols=(0,4),
                               dtype='str')

# CONVIERTE EL TIEMPO EN FORMATO HH:MM EN MINUTOS ACUMULADOS DESDE LAS
# 00:00HS
def get_min(time_str):
    h, m = time_str.split(':')
    return int(h) * 60 + int(m)

for nombre_estacion, ppi_estacion, region in zip(estacion, elevacion,
                                                zona):

    read_files(ppi_estacion) # Funcion para leer los archivos con los
    datos

    # Ingreso el archivo con las tasas de precipitacion
    R = np.genfromtxt('RESULTADOS/datos_pluviometro/pluv_rate_'+
                     nombre_estacion+'.txt', unpack=True)

    # Ingreso el archivo con el tiempo del radar
    with open('RESULTADOS/tiempo_radar.txt', "r") as f:
        t_r = f.read().splitlines()

```

```

# Ingreso del archivo con el tiempo del pluviometro
with open('RESULTADOS/datos_pluviometro/tiempo_pluv_'+nombre_estacion
+'.txt', 'r') as g:
    t_p = g.read().splitlines()

# Abro un archivo para guardar los resultados obtenidos en cada
estacion
resultado_estacion = open("RESULTADOS/Resultado/resultado_"+
nombre_estacion+".txt", "a+")

conv_tiempo(t_r,t_p) # Funcion para convertir los tiempos del radar y
del pluviometro en minutos acumulados desde las 00hs

Z_a_lineal(A0,A1,A2,B0,B1,B2,C0,C1,C2) # Funcion que pasa Z a
unidades lineales

ZDR_a_lineal(A0_zdr,A1_zdr,A2_zdr,
             B0_zdr,B1_zdr,B2_zdr,
             C0_zdr,C1_zdr,C2_zdr) # Funcion que pasa ZDR a unidades
lineales

duracion_total_tormenta = abs(tiempo_final - tiempo_inicial)
intervalos_cada_60_minutos = int(duracion_total_tormenta/60)

for i in range(intervalos_cada_60_minutos):

    # Interpolo los datos de ambas curvas
    R_interpolado = interpolate.interpld(pluv_time , R, kind='cubic')

    ignore_nan(A0,A1,A2,B0,B1,B2,C0,C1,C2,
              A0_zdr,A1_zdr,A2_zdr,
              B0_zdr,B1_zdr,B2_zdr,
              C0_zdr,C1_zdr,C2_zdr)# Funcion para ignorar los
nan y poder interpolar las curvas

    interp(tiempo_radar,Z_ZDR_finitos,Z_ZDR) # Funcion que interpola
las curvas de Z(t) y ZDR(t) y elimina los valores negativos de ambas

    initial_time = tiempo_inicial # tiempo inicial es igual al inicio
de la tormenta
    final_time = tiempo_inicial + 60 # tiempo final es igual al
inicio de la tormenta + 60 minutos

    duracion = abs(final_time - initial_time) # Cantidad de minutos
entre el tiempo inicial y final

    # definidos
anteriormente
    interv_cada_5_min = round(duracion/5) # Cociente de la
variable duracion y 5
    print('paso:',interv_cada_5_min) # Print de control

```

```

    # Puntos equiespaciados desde tiempo inicial hasta tiempo final
    # con un espaciado cada 5 minutos
    new_time = np.linspace(initial_time , final_time , num=
interv_cada_5_min , endpoint=False)

    # Paso de R a Log(R)
    logy_R = np.log10(R_interpolado , out=np.zeros_like(R_interpolado)
, where=(R_interpolado!=0))

    corr_t0(logy_R , logA0 , logA1 , logA2 , logB0 , logB1 , logB2 , logC0 , logC1 ,
logC2) # Calcula el CC entre Log(R) y Log(Z) a t=0 y guarda los
resultados en un vector corr_celda

# Guardo los datos en variables temporales
temp2_zdr = A0_zdr_interpolado; temp3_zdr = A1_zdr_interpolado;
temp4_zdr = A2_zdr_interpolado; temp5_zdr = B0_zdr_interpolado;
temp6_zdr = B1_zdr_interpolado; temp7_zdr = B2_zdr_interpolado;
temp8_zdr = C0_zdr_interpolado; temp9_zdr = C1_zdr_interpolado;
temp10_zdr = C2_zdr_interpolado

log_R_t0 = temp    # Estas lineas son para que los factores de
reflectividad y la tasa de precipitacion
                    # con desfase delta_t=0 se guarden en las
variables log_R , log_A0 , ...
log_A0_t0 = temp2; log_A1_t0 = temp3; log_A2_t0 = temp4;
log_B0_t0 = temp5; log_B1_t0 = temp6; log_B2_t0 = temp7; log_C0_t0 =
temp8; log_C1_t0 = temp9; log_C2_t0 = temp10

A0zdr_t0 = temp2_zdr; A1zdr_t0 = temp3_zdr; A2zdr_t0 = temp4_zdr;
B0zdr_t0 = temp5_zdr; B1zdr_t0 = temp6_zdr; B2zdr_t0 = temp7_zdr;
C0zdr_t0 = temp8_zdr; C1zdr_t0 = temp9_zdr; C2zdr_t0 = temp10_zdr

for k in [5,10,15]:

    # Borro el primer dato de R para desfasar las curvas
    R_new = np.delete(temp , 0)

    # Borro el ultimo dato de Z de cada celda para desfasar las
curvas
    A0_new = np.delete(temp2 , -1); A1_new = np.delete(temp3 , -1);
    A2_new = np.delete(temp4 , -1); B0_new = np.delete(temp5 , -1); B1_new
= np.delete(temp6 , -1); B2_new = np.delete(temp7 , -1); C0_new = np.
delete(temp8 , -1); C1_new = np.delete(temp9 , -1); C2_new = np.delete(
temp10 , -1)

    # Borro el ultimo dato de ZDR de cada celda para desfasar las
curvas
    A0_zdr_new = np.delete(temp2_zdr , -1); A1_zdr_new = np.delete
(temp3_zdr , -1); A2_zdr_new = np.delete(temp4_zdr , -1); B0_zdr_new =
np.delete(temp5_zdr , -1); B1_zdr_new = np.delete(temp6_zdr , -1);
B2_zdr_new = np.delete(temp7_zdr , -1); C0_zdr_new = np.delete(

```

```

temp8_zdr, -1); C1_zdr_new = np.delete(temp9_zdr, -1); C2_zdr_new = np
.delete(temp10_zdr, -1)

    sfunc(k) # Esta funcion IF guarda los datos de Log(R) y Log(Z
) a los distintos delta de tiempo (5, 10 y 15 minutos)

    # Calculo el coef de corr de Pearson entre los datos Log(R) y
Log(Z) para cada una de las nueve celdas
    corrA0 = np.ma.corrcoef(R_new, A0_new, allow_masked=True);
corrA1 = np.ma.corrcoef(R_new, A1_new, allow_masked=True); corrA2 = np
.ma.corrcoef(R_new, A2_new, allow_masked=True)
    corrB0 = np.ma.corrcoef(R_new, B0_new, allow_masked=True);
corrB1 = np.ma.corrcoef(R_new, B1_new, allow_masked=True); corrB2 = np
.ma.corrcoef(R_new, B2_new, allow_masked=True); corrC0 = np.ma.
corrcoef(R_new, C0_new, allow_masked=True); corrC1 = np.ma.corrcoef(
R_new, C1_new, allow_masked=True); corrC2 = np.ma.corrcoef(R_new,
C2_new, allow_masked=True)

    # Guardo los coef de corr en vectores
    corr_A0 = np.append(corr_A0, corrA0[0][1]); corr_A1 = np.
append(corr_A1, corrA1[0][1]); corr_A2 = np.append(corr_A2, corrA2
[0][1]); corr_B0 = np.append(corr_B0, corrB0[0][1]); corr_B1 = np.
append(corr_B1, corrB1[0][1]); corr_B2 = np.append(corr_B2, corrB2
[0][1]); corr_C0 = np.append(corr_C0, corrC0[0][1]); corr_C1 = np.
append(corr_C1, corrC1[0][1]); corr_C2 = np.append(corr_C2, corrC2
[0][1])

    # Redefino el vector modificado para volver a realizar el
loop
    temp = R_new; temp2 = A0_new; temp3 = A1_new; temp4 = A2_new;
temp5 = B0_new; temp6 = B1_new; temp7 = B2_new; temp8 = C0_new; temp9
= C1_new; temp10 = C2_new

    temp2_zdr = A0_zdr_new; temp3_zdr = A1_zdr_new; temp4_zdr =
A2_zdr_new; temp5_zdr = B0_zdr_new; temp6_zdr = B1_zdr_new; temp7_zdr
= B2_zdr_new; temp8_zdr = C0_zdr_new; temp9_zdr = C1_zdr_new;
temp10_zdr = C2_zdr_new

    delta_tiempo = np.array([0,5,10,15]) # Creo un vector con los
deltas de tiempo posibles

    # Vector de 9 elementos formado por el coef. de corr. maximo
alcanzado por cada celda (a distintos deltas de t)
    vector_maximas_correlaciones = np.array([np.nanmax(corr_A0), np.
nanmax(corr_A1), np.nanmax(corr_A2),
                                                np.nanmax(corr_B0), np.
nanmax(corr_B1), np.nanmax(corr_B2),
                                                np.nanmax(corr_C0), np.
nanmax(corr_C1), np.nanmax(corr_C2)])

    # Busco el indice del coef. de corr. maximo

```



```

        correlaciones2[correlaciones2 < 0.5*maximo_coef_correlacion] = 0
# Aquellos CC
#
menores al 50% del maximo CC les
#
asigno valor 0

        correlaciones3[correlaciones3 < 0.2*maximo_coef_correlacion] = 0
# Aquellos CC
#
menores al 20% del maximo CC les
#
asigno valor 0

        print('correlaciones con piso igual al 80% del CC maximo ',
correlaciones)
        print('correlaciones con piso igual al 50% del CC maximo ',
correlaciones2)
        print('correlaciones con piso igual al 20% del CC maximo ',
correlaciones3)

# Loop para calcular el promedio (pesado y simple) de Z y ZDR en
cada instante de tiempo
for i in range(len(R_final)):

# Vectores que tienen como componentes cada valor de Z y ZDR
de las nueve celdas
temp_arr = np.array([A0_final[i],A1_final[i],A2_final[i],
B0_final[i],B1_final[i],B2_final[i],C0_final[i],C1_final[i],C2_final[i]
])
temp_arr2 = np.array([A0zdr_final[i],A1zdr_final[i],
A2zdr_final[i],B0zdr_final[i],B1zdr_final[i],B2zdr_final[i],
C0zdr_final[i],C1zdr_final[i],C2zdr_final[i]])

# Vectores con los CC con pisos de 80, 50 y 20% del CC maximo
temp_arr3 = np.array([correlaciones[0],correlaciones[1],
correlaciones[2],correlaciones[3],correlaciones[4],correlaciones[5],
correlaciones[6],correlaciones[7],correlaciones[8]])
temp_arr4 = np.array([correlaciones2[0],correlaciones2[1],
correlaciones2[2],correlaciones2[3],correlaciones2[4],correlaciones2
[5],correlaciones2[6],correlaciones2[7],correlaciones2[8]])
temp_arr5 = np.array([correlaciones3[0],correlaciones3[1],
correlaciones3[2],correlaciones3[3],correlaciones3[4],correlaciones3
[5],correlaciones3[6],correlaciones3[7],correlaciones3[8]])

# Enmascaro los nan en los vectores anteriores para
ignorarlos en el siguiente calculo
ma_temp_arr = np.ma.MaskedArray(temp_arr, mask=np.isnan(
temp_arr))
ma_temp_arr2 = np.ma.MaskedArray(temp_arr2, mask=np.isnan(
temp_arr2))

```

```

        ma_temp_arr3 = np.ma.MaskedArray(temp_arr3, mask=np.isnan(
temp_arr3))
        ma_temp_arr4 = np.ma.MaskedArray(temp_arr4, mask=np.isnan(
temp_arr4))
        ma_temp_arr5 = np.ma.MaskedArray(temp_arr5, mask=np.isnan(
temp_arr5))

        promedio_pesado_80 = np.ma.average(ma_temp_arr, weights=
ma_temp_arr3)
        promedio_pesado_zdr_80 = np.ma.average(ma_temp_arr2, weights=
ma_temp_arr3)

        promedio_pesado_50 = np.ma.average(ma_temp_arr, weights=
ma_temp_arr4)
        promedio_pesado_zdr_50 = np.ma.average(ma_temp_arr2, weights=
ma_temp_arr4)

        promedio_pesado_20 = np.ma.average(ma_temp_arr, weights=
ma_temp_arr5)
        promedio_pesado_zdr_20 = np.ma.average(ma_temp_arr2, weights=
ma_temp_arr5)

        promedio_simple = np.nanmean(temp_arr)
        promedio_simple_zdr = np.nanmean(temp_arr2)

        resultado_estacion.write("%s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s
%s\r" % (str(R_final[i]), str(promedio_pesado_80), str(
promedio_pesado_zdr_80), str(promedio_pesado_50), str(
promedio_pesado_zdr_50), str(promedio_pesado_20), str(
promedio_pesado_zdr_20), str(promedio_simple), str(promedio_simple_zdr),
str(B1_final[i]), str(B1zdr_final[i]), str(celda_con_mejor_correlacion_z
[i]), str(celda_con_mejor_correlacion_zdr[i])))

        # Reasigno el tiempo inicial para volver a hacer el loop con el
siguiente intervalo de tiempo
        tiempo_inicial = final_time
        resultado_estacion.close()

```

Finalmente, con el conjunto de valores Z_H - Z_{dr} - R se pueden calcular, a través de un ajuste de cuadrados mínimos, los parámetros de ajuste.

C. Pluviómetros

En este apéndice se describen los pluviómetros con los que se trabajó en cada tormenta. Se incluye el nombre del pluviómetro, su ubicación (latitud y longitud), PPI utilizado por el radar y semianillo al que pertenece.

- 1 de abril de 2019.

Nombre Pluviómetro	Latitud	Longitud	PPI	Semianillo
Alta Gracia - Bolsa de Cereales	-31.692	-64.4293	1	1S
Arroyito - Bolsa de Cereales	-31.3911	-63.0014	1	3L
Calchín - Bolsa de Cereales	-31.6285	-63.1868	1	2L
Candelaria - Bolsa de Cereales	-30.8601	-63.7011	1	2L
Capilla de Sitón - Bolsa de Cereales	-30.5224	-63.6292	1	3L
Cosme Sur - Bolsa de Cereales	-31.7503	-64.1564	1	1L
Jesús María - Bolsa de Cereales	-30.9822	-64.0441	1	2L
La Cruz - Bolsa de Cereales	-32.3189	-64.4915	2	3S
Las Gramillas - Bolsa de Cereales	-31.0912	-63.188	1	3L
Monte Cristo - Bolsa de Cereales	-31.3404	-63.8293	1	1L
Obispo Trejo - Bolsa de Cereales	-30.783	-63.4314	1	3L
Pilar - Bolsa de Cereales	-31.6736	-63.8564	1	2L
Toledo - Bolsa de Cereales	-31.4807	-64.0042	1	1L
Va. del Totoral - Bolsa de Cereales	-30.6594	-63.9557	1	3L
Cno. 60 Cuadras AgriculturaCba	-31.5414	-64.1266	1	1L
Alta Gracia - APRHi	-31.6543	-64.4265	1	1S
Ascochinga - APRHi	-30.9598	-64.2831	2	2S
Characato - APRHi	-31.1296	-64.7361	3	2S
Cno. La Cumbre - APRHi	-30.9373	-64.412	3	2S
Colonia Almada AgriculturaCba	-32.0366	-63.8668	1	2L
Colonia Caroya AgriculturaCba	-31.0199	-64.0448	1	2L
Colonia Hogar - APRHi	-30.8514	-64.3423	2	2S
Cuenca Colanchanga - APRHi	-31.138923	-64.40179	3	1S
La Cumbrecita AgriculturaCba	-31.9014	-64.7689	3	2S
Laguna Larga AgriculturaCba	-31.7866	-63.812	1	2L
Las Junturas AgriculturaCba	-31.8332	-63.4548	1	3L
Obispo Trejo - APRHi	-30.77743	-63.407706	3	3L
Oliva AgriculturaCba	-32.0278	-63.55	1	3L
Pampa del Gato - APRHi	-30.9401	-64.1798	1	2L
Río Primero AgriculturaCba	-31.3187	-63.6446	1	2L
Sta. Rosa de Calamuchita - APRHi	-32.0327	-64.6478	2	2S
Toro Pujio AgriculturaCba	-31.1084	-62.9898	1	3L
Tránsito AgriculturaCba	-31.4207	-63.1932	1	3L
Va. Amancay AgriculturaCba	-32.2024	-64.5626	2	3S
Va. del Dique AgriculturaCba	-32.1706	-64.453	2	3S
Va. del Totoral AgriculturaCba	-30.7074	-64.0819	1	3L

Tabla 1: Pluviómetros que registraron la tormenta del día 1 de abril de 2019

- 24 de abril de 2019.

Nombre Pluviómetro	Latitud	Longitud	PPI	Semianillo
Alta Gracia - Bolsa de Cereales	-31.692	-64.4293	1	1S
Arroyito - Bolsa de Cereales	-31.3911	-63.0014	1	3L
Calchín - Bolsa de Cereales	-31.6285	-63.1868	1	2L
Candelaria - Bolsa de Cereales	-30.8601	-63.7011	1	2L
Capilla de Sitón - Bolsa de Cereales	-30.5224	-63.6292	1	3L
Cosme Sur - Bolsa de Cereales	-31.7503	-64.1564	1	1L
El Crispin - Bolsa de Cereales	-31.0549	-63.4999	1	2L
General Paz - Bolsa de Cereales	-31.0953	-64.1338	1	1L
Las Gamas - Bolsa de Cereales	-32.4817	-64.1032	1	3L
Monte Cristo - Bolsa de Cereales	-31.3404	-63.8293	1	1L
Obispo Trejo - Bolsa de Cereales	-30.783	-63.4314	1	3L
Pilar - Bolsa de Cereales	-31.6736	-63.8564	1	2L
Toledo - Bolsa de Cereales	-31.4807	-64.0042	1	1L
Va. del Rosario - Bolsa de Cereales	-31.5467	-63.4672	1	2L
Va. del Totoral - Bolsa de Cereales	-30.6594	-63.9557	1	3L
Alta Gracia - APRHi	-31.6543	-64.4265	1	1S
Obispo Trejo - APRHi	-30.77743	-63.407706	3	3L
Tránsito AgriculturaCba	-31.4207	-63.1932	1	3L
Va. del Totoral AgriculturaCba	-30.7074	-64.0819	1	3L

Tabla 2: Pluviómetros que registraron la tormenta del día 24 de abril de 2019

■ 30 de noviembre de 2019.

Nombre Pluviómetro	Latitud	Longitud	PPI	Semianillo
Alta Gracia - Bolsa de Cereales	-31.692	-64.4293	1	1S
Ambul - Bolsa de Cereales	-31.4822	-65.1281	5	3S
Arroyito - Bolsa de Cereales	-31.3911	-63.0014	1	3L
Las Gramillas - Bolsa de Cereales	-31.0912	-63.188	1	3L
Las Junturas - Bolsa de Cereales	-31.8315	-63.4327	1	3L
Pilar - Bolsa de Cereales	-31.6736	-63.8564	1	2L
Tancacha - Bolsa de Cereales	-32.2647	-63.9551	1	3L
Toledo - Bolsa de Cereales	-31.4807	-64.0042	1	1L
Va. del Rosario - Bolsa de Cereales	-31.5467	-63.4672	1	2L
Cno. 60 Cuadras AgriculturaCba	-31.5414	-64.1266	1	1L
Arroyo Chiviquin - MunUnquillo	-31.1871	-64.4161	3	1S
Ascochinga - APRHi	-30.9598	-64.2831	2	2S
Bouwer AgriculturaCba	-31.5503	-64.1979	1	1L
Cañada del Sauce - APRHi	-32.3887	-64.6477	2	3S
Capilla del Carmen - APRHi	-32.2042	-64.8153	2	3S
Cerro Obrero - APRHi	-30.8655	-64.4568	3	2S

Characato - APRHi	-31.1296	-64.7361	3	2S
Colonia Hogar - APRHi	-30.8514	-64.3423	2	2S
Cosquin AgriculturaCba	-31.206	-64.4597	4	1S
Cruz del Eje - APRHi	-30.76271	-64.75644	3	3S
Dique La Viña - APRHi	-31.8727	-65.0363	3	3S
Huerta Grande AgriculturaCba	-31.0715	-64.4874	4	2S
La Candelaria - APRHi	-30.9362	-64.8402	3	3S
La Cumbre - APRHi	-30.9624	-64.4787	4	2S
La Cumbrecita AgriculturaCba	-31.9014	-64.7689	3	2S
La Tordilla AgriculturaCba	-31.2636	-63.0667	1	3L
Oliva AgriculturaCba	-32.0278	-63.55	1	3L
Pampayasta Norte AgriculturaCba	-32.2405	-63.6426	1	3L
Río Espinillo - APRHi	-31.8134	-64.6626	3	2S
Río Primero AgriculturaCba	-31.3187	-63.6446	1	2L
Río San Guillermo - APRHi	-31.31639	-64.90380	4	2S
Río San Pedro - APRHi	-31.7610	-64.6590	3	2S
Río Tercero AgriculturaCba	-32.1700	-64.0877	1	3L
Salsacate - APRHi	-31.3355	-65.0819	4	3S
San Carlos Minas AgriculturaCba	-31.1704	-65.1087	3	3S
Sta. Rosa de Calamuchita - APRHi	-32.0327	-64.6478	2	2S
San Pedro AgriculturaCba	-31.9253	-65.2188	4	3S
Toro Pujio AgriculturaCba	-31.1084	-62.9898	1	3L
Tránsito AgriculturaCba	-31.4207	-63.1932	1	3L
Va. Ciudad Parque AgriculturaCba	-31.8949	-64.5416	3	2S
Va. de Soto AgriculturaCba	-30.8684	-64.9895	3	3S
Yacanto Norte - APRHi	-32.0202	-64.8116	2	3S

Tabla 3: Pluviómetros que registraron la tormenta del día 30 de noviembre de 2019

■ 4 de diciembre de 2019.

Nombre Pluviómetro	Latitud	Longitud	PPI	Semianillo
Alta Gracia - Bolsa de Cereales	-31.692	-64.4293	1	1S
Ambul - Bolsa de Cereales	-31.4822	-65.1281	5	3S
Candelaria - Bolsa de Cereales	-30.8601	-63.7011	1	2L
Cosme Sur - Bolsa de Cereales	-31.7503	-64.1564	1	1L
El Crispin - Bolsa de Cereales	-31.0549	-63.4999	1	2L
General Paz - Bolsa de Cereales	-31.0953	-64.1338	1	1L
James Craik - Bolsa de Cereales	-32.0571	-63.4583	1	3L
Jesús María - Bolsa de Cereales	-30.9822	-64.0441	1	2L
Las Gramillas - Bolsa de Cereales	-31.0912	-63.188	1	3L
Las Junturas - Bolsa de Cereales	-31.8315	-63.4327	1	3L

Obispo Trejo - Bolsa de Cereales	-30.783	-63.4314	1	3L
Pilar - Bolsa de Cereales	-31.6736	-63.8564	1	2L
Toledo - Bolsa de Cereales	-31.4807	-64.0042	1	1L
Va. del Rosario - Bolsa de Cereales	-31.5467	-63.4672	1	2L
Ascochinga - APRHi	-30.9598	-64.2831	2	2S
Characato - APRHi	-31.1296	-64.7361	3	2S
Colonia Almada AgriculturaCba	-32.0366	-63.8668	1	2L
Colonia Caroya AgriculturaCba	-31.0199	-64.0448	1	2L
Cosquin AgriculturaCba	-31.206	-64.4597	4	1S
DCCBA Los Chorrillos	-31.403	-64.5769	4	1S
Huerta Grande AgriculturaCba	-31.0715	-64.4874	4	2S
La Cumbre - APRHi	-30.9624	-64.4787	4	2S
Las Junturas AgriculturaCba	-31.8332	-63.4548	1	3L
Obispo Trejo - APRHi	-30.77743	-63.407706	3	3L
Oliva AgriculturaCba	-32.0278	-63.55	1	3L
Pampa del Gato - APRHi	-30.9401	-64.1798	1	2L
Río Primero AgriculturaCba	-31.3187	-63.6446	1	2L
Río San Guillermo - APRHi	-31.31639	-64.90380	4	2S
Salsacate - APRHi	-31.3355	-65.0819	4	3S
Tinoco AgriculturaCba	31.0791	-63.850986	1	2L
Va. del Totoral AgriculturaCba	-30.7074	-64.0819	1	3L

Tabla 4: Pluviómetros que registraron la tormenta del día 4 de diciembre de 2019

■ 14 de diciembre de 2019.

Nombre Pluviómetro	Latitud	Longitud	PPI	Semianillo
Alta Gracia - Bolsa de Cereales	-31.692	-64.4293	1	1S
Arroyito - Bolsa de Cereales	-31.3911	-63.0014	1	3L
Calchín - Bolsa de Cereales	-31.6285	-63.1868	1	2L
Capilla de Sitón - Bolsa de Cereales	-30.5224	-63.6292	1	3L
Cosme Sur - Bolsa de Cereales	-31.7503	-64.1564	1	1L
El Crispin - Bolsa de Cereales	-31.0549	-63.4999	1	2L
General Paz - Bolsa de Cereales	-31.0953	-64.1338	1	1L
James Craik - Bolsa de Cereales	-32.0571	-63.4583	1	3L
Jesús María - Bolsa de Cereales	-30.9822	-64.0441	1	2L
Las Gamas - Bolsa de Cereales	-32.4817	-64.1032	1	3L
Las Gramillas - Bolsa de Cereales	-31.0912	-63.188	1	3L
Las Junturas - Bolsa de Cereales	-31.8315	-63.4327	1	3L
Obispo Trejo - Bolsa de Cereales	-30.783	-63.4314	1	3L
Pilar - Bolsa de Cereales	-31.6736	-63.8564	1	2L
Tancacha - Bolsa de Cereales	-32.2647	-63.9551	1	3L

Toledo - Bolsa de Cereales	-31.4807	-64.0042	1	1L
Va. del Rosario - Bolsa de Cereales	-31.5467	-63.4672	1	2L
Va. del Totoral - Bolsa de Cereales	-30.6594	-63.9557	1	3L
Cno. 60 Cuadras AgriculturaCba	-31.5414	-64.1266	1	1L
Arroyo Chiviquin - MunUnquillo	-31.1871	-64.4161	3	1S
Ascochinga - APRHi	-30.9598	-64.2831	2	2S
Cañada del Sauce - APRHi	-32.3887	-64.6477	2	3S
Capilla del Carmen - APRHi	-32.2042	-64.8153	2	3S
Cerro Obrero - APRHi	-30.8655	-64.4568	3	2S
Characato - APRHi	-31.1296	-64.7361	3	2S
Colonia Almada AgriculturaCba	-32.0366	-63.8668	1	2L
Colonia Caroya AgriculturaCba	-31.0199	-64.0448	1	2L
Colonia Hogar - APRHi	-30.8514	-64.3423	2	2S
Corralito Municipalidad	-32.0277	-64.1880	1	2L
Cosquin AgriculturaCba	-31.206	-64.4597	4	1S
Cruz del Eje - APRHi	-30.76271	-64.75644	3	3S
Cuenca Colanchanga - APRHi	-31.138923	-64.40179	3	1S
Dean Funes AgriculturaCba	-30.4047	-64.3540	2	3S
Dique El Cajón - APRHi	-30.854	-64.5497	3	2S
Dique Pichanas - APRHi	-30.9061	-65.1848	4	3S
Huerta Grande AgriculturaCba	-31.0715	-64.4874	4	2S
La Candelaria - APRHi	-30.9362	-64.8402	3	3S
La Cumbre - APRHi	-30.9624	-64.4787	4	2S
La Cumbrecita AgriculturaCba	-31.9014	-64.7689	3	2S
La Tordilla AgriculturaCba	-31.2636	-63.0667	1	3L
Las Junturas AgriculturaCba	-31.8332	-63.4548	1	3L
Obispo Trejo - APRHi	-30.77743	-63.407706	3	3L
Oliva AgriculturaCba	-32.0278	-63.55	1	3L
Pampa del Gato - APRHi	-30.9401	-64.1798	1	2L
Pampayasta Norte AgriculturaCba	-32.2405	-63.6426	1	3L
Río Espinillo - APRHi	-31.8134	-64.6626	3	2S
Río Primero AgriculturaCba	-31.3187	-63.6446	1	2L
Río San Guillermo - APRHi	-31.31639	-64.90380	4	2S
Río Tercero AgriculturaCba	-32.1700	-64.0877	1	3L
Sta. Rosa de Calamuchita - APRHi	-32.0327	-64.6478	2	2S
Tinoco AgriculturaCba	-31.0791	-63.850986	1	2L
Toro Pujio AgriculturaCba	-31.1084	-62.9898	1	3L
Tránsito AgriculturaCba	-31.4207	-63.1932	1	3L
Va. Amancay AgriculturaCba	-32.2024	-64.5626	2	3S
Va. Ciudad Parque AgriculturaCba	-31.8949	-64.5416	3	2S
Va. del Dique AgriculturaCba	-32.1706	-64.453	2	3S
Va. Retiro AgriculturaCba	-31.3382	-64.1389	1	1L
Va. de Soto AgriculturaCba	-30.8684	-64.9895	3	3S

Va. del Totoral AgriculturaCba	-30.7074	-64.0819	1	3L
Va. Dolores - APRHi	-31.9540	-65.1941	3	3S
Yacanto Norte - APRHi	-32.0202	-64.8116	2	3S

Tabla 5: Pluviómetros que registraron la tormenta del día 14 de diciembre de 2019

