



DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE PROPAGACIONES ANÓMALAS EN RADARES METEOROLÓGICOS

*Ernesto Gómez Vargas
Julián Rolando Camargo López
César Andrey Perdomo Charry*



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Doctorado
en Ingeniería
UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS"

Ernesto Gómez Vargas



Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C. (Colombia), Especialista en Telecomunicaciones Móviles de Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C. (Colombia), Magíster en Teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C. (Colombia), Doctor en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana Bogotá D.C. (Colombia), Docente de Planta categoría Titular en el área de Electrónica básica y Telecomunicaciones en la Universidad Distrital Francisco José de la Caldas de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia). Miembro del grupo de investigación LASER de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital, clasificado en categoría B por Colciencias. Autor del libro: “Sistema de Simulación del Flujo de partículas ionizadas penetrantes para el picosatélite Cubesat UD”.

Julián Rolando Camargo López



Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C. (Colombia), Especialista en Diseño y Construcción de Soluciones Telemáticas de la Universidad Autónoma de Colombia Bogotá D.C. (Colombia), Magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C. (Colombia), Docente de Planta categoría Asociado en el área de Microcontroladores y Sistemas Embebidos en la Universidad Distrital Francisco José de la Caldas de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia). Miembro del grupo de investigación LASER de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital, clasificado en categoría B por Colciencias. Autor del libro: “Guía de operación y aplicaciones prácticas de los microcontroladores Freescale MC68HC908JK1, MC68HC908JK3 y MC68HC908JL3”, coautor de los libros: “Introducción al PSoC5LP: Teoría y aplicaciones prácticas”, “Proyectos prácticos con PSoC5LP”.

César Andrey Perdomo Charry



Ingeniero Electrónico de la Universidad Surcolombiana Neiva (Colombia), Magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C. (Colombia), Estudiante de cuarto año del Doctorado de Ingeniería, Docente de Planta categoría Titular en el área de Electrónica Básica en la Universidad Distrital Francisco José de la Caldas de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia). Miembro del grupo de investigación LASER de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital, clasificado en categoría B por Colciencias. Coautor de los libros: “Introducción al PSoC5LP: Teoría y aplicaciones prácticas”, “Proyectos prácticos con PSoC5LP”.



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Doctorado
en Ingeniería
UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS"

DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE PROPAGACIONES ANÓMALAS EN RADARES METEOROLÓGICOS

***Ernesto Gómez Vargas
Julián Rolando Camargo López
César Andrey Perdomo Charry***

Gómez Vargas, Ernesto

Detección y corrección de propagaciones anómalas en radares meteorológicos / Ernesto Gómez Vargas, Julián Rolando Camargo López, César Andrey Perdomo Charry. – 1a. ed. – Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2020.

178 páginas ; 24 cm. – (Doctorado en Ingeniería).

Incluye índice de figuras, índice de tablas. – Contiene bibliografía.

ISBN 978-958-787-239-2 (impreso) – 978-958-787-240-8 (digital)

1. Radar en meteorología 2. Interferencia en radares 3. Ingeniería meteorológica I. Camargo López, Julián Rolando II. Perdomo Charry, César Andrey III. Título

CDD: 551.6353 ed. 23

CO-BoBN– a1057501

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas

© Doctorado en Ingeniería

© Ernesto Gómez Vargas - Julián Rolando Camargo López - César Andrey Perdomo Charry

ISBN Impreso: 978-958-787-239-2

ISBN Digital: 978-958-787-240-8

Primera edición: Bogotá, octubre de 2020

Corrección de estilo y diseño gráfico:

Amadgraf Impresores Ltda.

Impresión:

Amadgraf Impresores Ltda.

Doctorado en Ingeniería

Carrera 7 # 40B-53

Bogotá

Correo electrónico: investigacion.doctoradoing@udistrital.edu.co

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida total ni parcialmente o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sin el permiso previo del Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Hecho el depósito legal.

Impreso y hecho en Colombia

Printed and made in Colombia.

A mi mamá por todo su amor y sacrificio a lo largo de su vida

Ernesto Gómez Vargas

A Martha mi adorada esposa, mi compañera de batalla, que ha sido y es mi apoyo e inspiración incondicional para cada una de mis locuras.

Julián Rolando Camargo López

A mi amada esposa y a mi hijo, son el motor en mi vida.

César Andrey Perdomo Charry

AGRADECIMIENTOS

A la Aeronáutica Civil por el suministro de los datos utilizados para el diseño y desarrollo del modelo presentado en este libro y las visitas a las instalaciones de los radares de El Tablazo y San Andrés Islas.

Tabla de Contenido

Introducción.....	21
-------------------	----

Capítulo 1

Introducción al radar meteorológico.....	23
1.1. Conceptos básicos de microondas.....	23
1.1.1. Sistema de comunicaciones microondas.....	24
1.1.2. Pérdidas espacio libre.....	26
1.2. Funcionamiento del radar.....	27
1.3. Tipos de radar.....	32
1.4. Esquema general del radar.....	36
1.4.1. Transmisor.....	37
1.4.2. Oscilador local.....	38
1.4.3. Atenuador.....	38
1.4.4. Amplificador de alta potencia.....	39
1.4.5. Acoplador direccional.....	40
1.4.6. Filtro de paso bajo.....	40
1.4.7. Control de potencia.....	42
1.4.8. Receptor.....	42
1.4.9. Procesador digital de señales.....	43
1.4.10. Compresión de datos y almacenamiento.....	44
1.4.11. Pantalla y sistema de comunicaciones.....	44
1.5. Bandas de trabajo.....	45

1.6. Empleo del radar meteorológico.....	46
1.6.1. Productos en modo normal	48

Capítulo 2

Ecuación general del radar.....	53
2.1. Características de la antena.....	53
2.1.1. Impedancia de antena.....	54
2.1.2. Radiación.....	55
2.1.3. El ancho de haz de -3 db.....	59
2.1.4. Directividad de antena.....	60
2.1.5. Ganancia de antena.....	60
2.1.6. Área y longitud efectiva.....	61
2.2. Características del transmisor y receptor.....	62
2.2.1. Transmisor.....	62
2.2.2. Receptor.....	63
2.2.3. Ecuación general para blancos puntuales.....	63

Capítulo 3

El radar para blancos meteorológicos.....	71
3.1. Imágenes generadas por un radar meteorológico.....	80
3.1.1. PPI (plan position indicator).....	80
3.1.2. CAPPI (constant altitude plan position indicator).....	81
3.2. Variables polarimétricas.....	82
3.2.1. Diferencial de reflectividad Z_{DR}	82
3.2.2. Diferencial específico de fase K_{DP}	83
3.2.3. La razón de despolarización lineal LDR.....	83
3.2.4. Coeficiente de correlación p_{HV}	84
3.3. Meteoro e hidrometeoro.....	85

Capítulo 4

Análisis de datos.....	87
4.1. Descripción del radar y características de los datos utilizados	87
4.1.1. Características generales del radar Corozal.....	87
4.1.2. Características de los datos generados por el radar.....	89
4.1.3. Modelo de conversión de los datos generados por el radar.....	90

4.1.4. Eventos analizados en el radar de Corozal.....	90
4.2. Conversión de datos a formato <i>netCDF</i> y texto.....	91
4.3. Análisis estadístico de los datos.....	95
4.3.1. Evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	95
4.3.2. Evento 2 de precipitación del 28/06/2013.....	98
4.3.3. Evento 3 de precipitación del 11/07/2013	101
4.3.4. Evento 4 de precipitación del 29/07/2013.....	104
4.3.5. Evento 5 de precipitación del 30/07/2013.....	107

Capítulo 5

Modelo conceptual y diseño del algoritmo.....	111
5.1. Modelo conceptual.....	111
5.2. Diseño del algoritmo de clasificación de eventos.....	124
5.3. Diseño del algoritmo de corrección de propagaciones anómalas...133	

Capítulo 6

Resultados y análisis.....	149
6.1. Resultados evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	150
6.2. Resultados evento 2 de precipitación del 28/06/2013.....	153
6.3. Resultados evento 3 de precipitación del 11/07/2013.....	156
6.4. Resultados evento 4 de precipitación del 29/07/2013	159
6.5. Resultados evento 5 de precipitación del 30/07/2013.....	162
6.6. Resultados finales.....	165

Conclusiones.....	169
-------------------	-----

Bibliografía.....	171
-------------------	-----

Índice de figuras

Figura 1.1.	Sistemas de comunicación por microondas básico.....	25
Figura 1.2.	Parámetros de interés Sistemas microondas.....	26
Figura 1.3.	Principio de funcionamiento del radar.....	27
Figura 1.4.	Lóbulo principal y secundarios del radar.....	28
Figura 1.5.	Energía incidente y energía reflejada por el blanco.....	29
Figura 1.6.	Volumen de tamaño radial $c \cdot t/2$	30
Figura 1.7.	Volúmenes V_{res} consecutivos en instantes de tiempos separados $\Delta t = t/2$	30
Figura 1.8.	Volúmenes muestreados en una exploración radar.....	31
Figura 1.9.	Radar Banda S, Marshall Radar Observatory.....	34
Figura 1.10.	Radar Banda C INM instalado en el Pic de les Agulles, Corbera, cerca a Barcelona.....	35
Figura 1.11.	Radar de banda X del LTHE de Grenoble instalado junto a Marsella.....	36
Figura 1.12.	Esquema general del radar.....	37
Figura 1.13.	Esquema general del Transmisor.....	38
Figura 1.14.	Circuito T de Acople.....	38
Figura 1.15.	Filtro Pasabajo.....	40
Figura 1.16.	Esquema básico del receptor.....	42
Figura 1.17.	Reflectividad máxima.....	49

Figura 1.18.	Altura de los máximos de reflectividad.....	50
Figura 1.19.	Echotops.....	50
Figura 2.1.	Onda electromagnética.....	55
Figura 2.2.	sistema de coordenadas polares.....	56
Figura 2.3.	Potencia Radiada por una antena Isotrópica.....	57
Figura 2.4.	Diagrama de Radiación en tres dimensiones.....	58
Figura 2.5.	Ancho de HAZ de -3 dB.....	59
Figura 2.6.	Radar biestático.....	64
Figura 2.7.	Radar mono estático.....	64
Figura 3.1.	Volumen muestreado.....	73
Figura 3.2.	Sección transversal de retrodispersión. Izquierda Esferas de Agua, Derecha Esferas de hielo. Línea Continua Solución Dispersores de Mie, Línea discontinua Aproximación de Rayleigh. Azul Banda S, Magenta Banda C y Verde Banda X.....	76
Figura 3.3.	Proyección del PPI sobre la horizontal.....	81
Figura 3.4.	Fragmentos de elevación utilizados para generar una imagen CAPPI.....	81
Figura 3.5.	Diferencial de Fase.....	83
Figura 4.1.	Imagen del radar Corozal.....	87
Figura 4.2.	Ubicación geográfica del radar Corozal.....	88
Figura 4.3.	Elevación de los 10 PPIs del radar.....	88
Figura 4.4.	Diagrama de flujo para la conversión de datos generados por el radar.....	90
Figura 4.5.	Código del proceso de conversión del archivo a formato netCDF.....	92
Figura 4.6.	Código para la obtención de datos de los parámetros K_{DP} y Z_{DR}	93
Figura 4.7.	Código para la obtención de datos de los parámetros ϕ_{DP} y p_{HV}	93
Figura 4.8.	Código para la obtención de datos de los parámetros velocidad y clasificador.....	94
Figura 4.9.	Código para la creación de hoja de cálculo con datos del PPI analizador.....	94

Figura 4.10.	Histograma variable Z evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	96
Figura 4.11.	Histograma variable Z_{DR} evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	96
Figura 4.12.	Histograma variable p_{HV} evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	96
Figura 4.13.	Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	97
Figura 4.14.	Histograma variable $SD(Z)$ evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	97
Figura 4.15.	Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	97
Figura 4.16.	Histograma variable Z evento 2 de precipitación del 28/06/2013.....	99
Figura 4.17.	Histograma variable Z_{DR} evento 2 de precipitación del 28/06/2013.....	99
Figura 4.18.	Histograma variable p_{HV} evento 2 de precipitación del 28/06/2013.....	100
Figura 4.19.	Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 2 de precipitación del 28/06/2013.....	100
Figura 4.20.	Histograma variable $SD(Z)$ evento 2 de precipitación del 28/06/2013	100
Figura 4.21.	Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 2 de precipitación del 28/06/2013.....	101
Figura 4.22.	Histograma variable Z evento 3 de precipitación del 11/07/2013.....	102
Figura 4.23.	Histograma variable Z_{DR} evento 3 de precipitación del 11/07/2013.....	102
Figura 4.24.	Histograma variable p_{HV} evento 3 de precipitación del 11/07/2013.....	103
Figura 4.25.	Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 3 de precipitación del 11/07/2013.....	103
Figura 4.26.	Histograma variable $SD(Z)$ evento 3 de precipitación del 11/07/2013.....	103

Figura 4.27.	Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 3 de precipitación del 11/07/2013.....	104
Figura 4.28.	Histograma variable Z evento 4 de precipitación del 29/07/2013.....	105
Figura 4.29.	Histograma variable Z_{DR} evento 4 de precipitación del 29/07/2013.....	105
Figura 4.30.	Histograma variable p_{HV} evento 4 de precipitación del 29/07/2013.....	106
Figura 4.31.	Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 4 de precipitación del 29/07/2013.....	106
Figura 4.32.	Histograma variable $SD(Z)$ evento 4 de precipitación del 29/07/2013	106
Figura 4.33.	Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 4 de precipitación del 29/07/2013.....	107
Figura 4.34.	Histograma variable Z evento 5 de precipitación del 30/07/2013.....	108
Figura 4.35.	Histograma variable Z_{DR} evento 5 de precipitación del 30/07/2013.....	108
Figura 4.36.	Histograma variable p_{HV} evento 5 de precipitación del 30/07/2013.....	109
Figura 4.37.	Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 5 de precipitación del 30/07/2013.....	109
Figura 4.38.	Histograma variable $SD(Z)$ evento 5 de precipitación del 30/07/2013	109
Figura 4.39.	Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 5 de precipitación del 30/07/2013.....	110
Figura 5.1.	Clasificador difuso propuesto.....	121
Figura 5.2.	Filtro espacial.....	122
Figura 5.3.	Operación del filtro.....	122
Figura 5.4.	Coeficientes filtro de media 3×3	123
Figura 5.5.	Modelo propuesto para el sistema de detección y corrección de propagaciones anómalas.....	124
Figura 5.6.	Función trapezoidal típica para un clasificador difuso típico (Schuur et al, 2003)	125

Figura 5.7.	Funciones de pertenencia para el clasificador difuso de eventos meteorológicos.....	126
Figura 5.8.	Ejemplo de asignación de valores generados por el clasificador difuso.....	130
Figura 5.9.	Diagrama de flujo para obtención de datos generados por el clasificador difuso.....	132
Figura 5.10.	Resultados de la clasificación del Evento 1 de precipitación.....	133
Figura 5.11.	Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 1.....	135
Figura 5.12.	Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 2.....	136
Figura 5.13.	Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 3.....	137
Figura 5.14.	Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 4	138
Figura 5.15.	Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 5.....	139
Figura 5.16.	Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 6.....	139
Figura 5.17.	Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 7	140
Figura 5.18.	Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 8.....	140

Figura 5.19.	Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 9.....	141
Figura 5.20.	Punto seleccionado en matriz Z a corregir ventana 3x3.....	141
Figura 5.21.	Resultado del clasificador	142
Figura 5.22.	Matriz Z corregida ventana 3x3.....	143
Figura 5.23.	Punto en matriz Z a corregir ventana 5x5.....	144
Figura 5.24.	Resultado del clasificador.....	144
Figura 5.25.	Matriz Z corregida ventana 5x5.....	147
Figura 6.1.	Evento 1 de precipitación sin modificaciones.....	150
Figura 6.2.	Evento 1 zona modificada con propagaciones anómalas.....	150
Figura 6.3.	Evento 1 de precipitación resultado con ventana 3x3.....	151
Figura 6.4.	Evento 1 de precipitación resultado con ventana 5x5.....	151
Figura 6.5.	Evento 1 de precipitación resultado con ventana 7x7.....	152
Figura 6.6.	Error en evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	152
Figura 6.7.	Evento 2 de precipitación sin modificaciones.....	153
Figura 6.8.	Evento 2 de precipitación zona modificada con propagaciones anómalas.....	153
Figura 6.9.	Evento 2 de precipitación resultado con ventana 3x3.....	154
Figura 6.10.	Evento 2 de precipitación resultado con ventana 5x5.....	154
Figura 6.11.	Evento 2 de precipitación resultado con ventana 7x7.....	155
Figura 6.12.	Error en evento 2 de precipitación del 28/06/2013.....	155
Figura 6.13.	Evento 3 de precipitación sin modificaciones.....	156
Figura 6.14.	Evento 3 zona modificada con propagaciones anómalas.....	156
Figura 6.15.	Evento 3 de precipitación resultado con ventana 3x3.....	157
Figura 6.16.	Evento 3 de precipitación resultado con ventana 5x5.....	157
Figura 6.17.	Evento 3 de precipitación resultado con ventana 7x7.....	158
Figura 6.18.	Error evento 3 de precipitación del 11/07/2013.....	158
Figura 6.19.	Evento 4 de precipitación sin modificaciones.....	159
Figura 6.20.	Evento 4 zona modificada con propagaciones anómalas.....	159
Figura 6.21.	Evento 4 de precipitación resultado con ventana 3x3.....	160
Figura 6.22.	Evento 4 de precipitación resultado con ventana 5x5.....	160
Figura 6.23.	Evento 4 de precipitación resultado con ventana 7x7.....	161
Figura 6.24.	Error evento 4 de precipitación del 29/07/2013.....	161

Figura 6.25. Evento 5 de precipitación sin modificaciones.....	162
Figura 6.26. Evento 5 zona modificada con propagaciones n6malas.....	162
Figura 6.27. Evento 5 de precipitación resultado con ventana 3x3.....	163
Figura 6.28. Evento 5 de precipitación resultado con ventana 5x5.....	163
Figura 6.29. Evento 5 de precipitación resultado con ventana 7x7.....	164
Figura 6.30. Error evento 5 de precipitación del 30/07/2013.....	164
Figura 6.31. Porcentajes de error para cada uno de los eventos.....	165
Figura 6.32. Porcentajes de error para evento 1 con m6ltiples ejecuciones.....	166
Figura 6.33. Porcentajes de error para evento 2 con m6ltiples ejecuciones	167
Figura 6.34. Porcentajes de error para evento 3 con m6ltiples ejecuciones	167
Figura 6.35. Porcentajes de error para evento 4 con m6ltiples ejecuciones.....	168
Figura 6.36. Porcentajes de error para evento 5 con m6ltiples ejecuciones	168

Índice de tablas

Tabla 1.1.	Bandas de frecuencia de señales de microondas.....	24
Tabla 1.2.	Bandas de frecuencias de radares meteorológicos.....	45
Tabla 3.1.	Aplicaciones y ventajas de los observables polarimétricos.....	84
Tabla 4.1.	Formato de los datos generados por el radar de Corozal.....	89
Tabla 4.2.	Descripción de eventos utilizados para el desarrollo del algoritmo de detección y corrección.....	91
Tabla 4.3.	Resultados análisis estadístico datos evento 1 de precipitación del 25/06/2013.....	95
Tabla 4.4.	Resultados análisis estadístico datos evento 2 de precipitación del 28/06/2013.....	98
Tabla 4.5.	Resultados análisis estadístico datos evento 3 de precipitación del 11/07/2013.....	101
Tabla 4.6.	Resultados análisis estadístico datos evento 4 de precipitación del 29/07/2013	104
Tabla 4.7.	Resultados análisis estadístico datos evento 5 de precipitación del 30/07/2013.....	107
Tabla 5.1.	Descripción de entradas difusas para clasificación de eventos meteorológicos.....	112
Tabla 5.2.	Versión final del clasificador de objetivos meteorológicos y no meteorológicos.....	113

Tabla 5.3.	Matriz de pesos para el clasificador difuso de eventos meteorológicos.....	114
Tabla 5.4.	Matriz A normalizada para objetivos meteorológicos.....	115
Tabla 5.5.	Matriz A normalizada para objetivos biológicos	115
Tabla 5.6.	Matriz A normalizada para propagaciones anómalas.....	116
Tabla 5.7.	Matriz A_0 normalizada para objetivos meteorológicos.....	117
Tabla 5.8.	Matriz A_0 normalizada para objetivos biológicos.....	117
Tabla 5.9.	Matriz A_0 normalizada para propagaciones anómalas.....	117
Tabla 5.10.	Matriz W con pesos relativos asignados a cada variable del clasificador.....	118
Tabla 5.11.	Valores de consistencia aleatoria establecidos por T. Saaty.....	119
Tabla 5.12.	Cálculo de la razón de inconsistencia para objetivos meteorológicos.....	120
Tabla 5.13.	Cálculo de la razón de inconsistencia para objetivos biológicos.....	120
Tabla 5.14.	Cálculo de la razón de inconsistencia para propagaciones anómalas.....	121
Tabla 5.15.	Matriz de asignación de pesos para la ventana 3x3 del filtro.....	134
Tabla 5.16.	(a)Ubicación datos, (b)Valor datos, (c)Matriz asignada ventana 3x3, (d) Clasificación	142
Tabla 5.17.	(a)Ubicación datos, (b)Valor datos, (c)Clasificación, (d)Matriz asignada ventana 5x5.....	145
Tabla 6.1.	Porcentajes de error para cada uno de los eventos.....	165
Tabla 6.2.	Resultados múltiples ejecuciones del algoritmo.....	166

Introducción

Los fenómenos climáticos tienen asociados riesgos que pueden ser mitigados si se reacciona oportunamente a través de un adecuado sistema de alerta temprana que sea capaz de identificar correctamente la cantidad y tipo de precipitación presentado en una zona determinada. De esta manera eventos considerados como posibles amenazas, serán informados en el instante que se presenten, para que se tomen las medidas necesarias que eviten pérdidas humanas y minimicen la cantidad de daños materiales.

En los últimos años el Estado Colombiano ha realizado importantes esfuerzos en la adquisición de cuatro radares meteorológicos Banda C de similares características técnicas ubicados en: Medellín (Santa Elena), Subachoque (El tablazo), Corozal (Aeropuerto de brujas) y San Andrés Islas. No obstante, la inversión realizada, los beneficios recibidos por la misma, no son los mejores ya que en la actualidad no se cuenta con los respectivos estudios ni las investigaciones tendientes a desarrollar algoritmos propios que caractericen las diferentes precipitaciones que se presentan en las regiones colombianas sobre las cuales existe cobertura de radares.

Los radares meteorológicos instalados en Colombia tienen incorporado dentro de su lógica de procesamiento algoritmos para de clasificación que han sido desarrollados y probados para condiciones meteorológicas di-

ferentes a las zonas ecuatoriales; los modelos de Park y Marzano definen categorías de hidrometeoros tales como: granizo blando, graupel, nieve, cristales, nieve húmeda y otras que no corresponden a los tipos de precipitación presentes en la región Colombiana (Park et al. 2008), (Marzano et al. 2008). Adicionalmente, no se cuenta con algoritmos que permitan la corrección de propagaciones anómalas y por ende dichas propagaciones pueden ser mal clasificadas.

Por lo anterior es necesario definir y caracterizar el comportamiento de las propagaciones anómalas y diseñar un modelo de detección acorde a esta región, ya que, de continuar utilizándose los modelos incorporados en los radares adquiridos, la estimación cuantitativa de la precipitación va a estar más distante de la realidad. Un modelo de detección y corrección ajustado a nuestras latitudes sin duda alguna permitirá establecer de una manera más exacta el tipo de hidrometeoro presente en cada celda de radar y de esta manera mejorar la estimación cuantitativa de la precipitación.

Teniendo en cuenta que los dos algoritmos mencionados anteriormente fueron probados, obteniendo resultados satisfactorios en lo que a eficacia de corrección se refiere, es importante conocer el grado de eficacia que es posible lograr en la clasificación de hidrometeoros, aplicando los algoritmos de Park y Marzano a datos de radar con lecturas propias de la región Colombiana.

Capítulo 1

Introducción al radar meteorológico

1.1. Conceptos básicos de microondas.

Las microondas, para propósitos prácticos, se consideran las ondas electromagnéticas cuya frecuencia (f) se encuentra entre 1GHz, y 300 GHz; del espectro radioeléctrico. Estas frecuencias se relacionan con otros parámetros físicos; como la velocidad de la luz en el vacío (o también velocidad de propagación de ondas electromagnéticas en el espacio libre), representada con la letra c , y la longitud de onda, representada con la letra griega λ , la relación entre estos parámetros se indica en la ecuación 1.1.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

En la tabla 1.1 se puede apreciar el nombre de las bandas de frecuencias usadas en microondas y sus distintos rangos:

Desde	Hasta	Banda
1 GHz	2 GHz	L
2 GHz	4 GHz	S
4 GHz	8 GHz	C
8 GHz	12 GHz	X
12 GHz	18 GHz	Ku
18 GHz	26.5 GHz	K
26.5 GHz	40 GHz	Ka
30 GHz	50 GHz	Q
40 GHz	60 GHz	U
50 GHz	75 GHz	V
60 GHz	90 GHz	E
75 GHz	110 GHz	W
90 GHz	140 GHz	F
110 GHz	170 GHz	D

Tabla 1.1: Bandas de frecuencia de señales de microondas.

1.1.1. Sistema de comunicaciones microondas

La Comunicación es la transferencia de información con sentido desde un lugar (remitente, origen, fuente, transmisor) a otro lugar (destino, receptor). Un sistema de comunicaciones por microondas básicamente está compuesto de un transmisor con su antena que transmite una determinada potencia, el medio que es el espacio libre el cual introduce algunas pérdidas y un receptor con su respectiva antena el cual detecta y recibe una potencia.

En la figura 1.1 se muestra un diagrama de bloques del modelo básico de un sistema de comunicaciones, en éste se muestran los principales componentes que permiten la comunicación.



Figura 1.1: Sistemas de comunicación por microondas básico.

Fuente: Propia

Desde el punto de vista del cómputo del balance de potencia en sistemas de comunicaciones, es conveniente referir la potencia recibida P_L , a la potencia Transmitida $P_{radiada}$, entendida en este caso como la entregada y radiada por la antena. La ecuación 1.2 de transmisión resultante se escribe en términos de la ganancias de las antenas y el factor de pérdidas L' que incluye las pérdidas debido al espacio libre, conectores, desvanecimiento, etc.

$$\frac{P_{radiada}}{P_L} = -L_o + G_T + G_R - L' \quad (1.2)$$

Donde:

$P_{radiada}$	= Potencia Radiada.
P_L	= Potencia en el receptor.
G_T	= Ganancia antena transmisora.
G_R	= Ganancia antena receptora.
L'	= Pérdidas totales.
L_o	= Sensibilidad del receptor.

En un sistema de comunicaciones ha de establecerse el balance de potencia entre el transmisor y el receptor, ya que el mínimo nivel de señal detectable en este ultimo fija la potencia mínima que ha de suministrar el primero. En un sistema de comunicaciones como el mostrado en la figura 1.2, la potencia en la carga se puede calcular con la siguiente expresión:

$$P_L = \frac{P_{radiada}}{4\pi r^2} D_T A_{efR} \quad (1.3)$$

Donde:

- P_L = Potencia en la Carga.
 D_T = Directividad Antena Transmisora.
 $P_{radiada}$ = Potencia Radiada.
 A_{efR} = Área efectiva antena receptora.

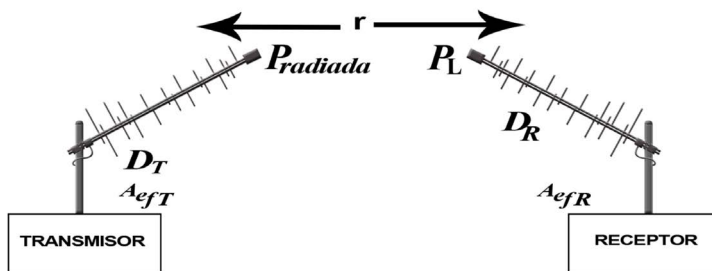


Figura 1.2: Parámetros de interés en sistemas microondas
Fuente: Propia

1.1.2. Pérdidas espacio libre.

La mayoría de la potencia de una señal de radio se disipará en el aire. Aún en el vacío perfecto, las ondas de radio perderán algo de su energía (por el principio de Huygens) debido a que parte de la energía se irradia siempre en direcciones distintas a la del eje del enlace. Observe que esto no está relacionado con el aire, la niebla, la lluvia o cualquier otro factor que agregue pérdidas adicionales.

La pérdida en el espacio libre (fSL , Free space loss) mide la pérdida de potencia en el espacio libre sin considerar cualquier tipo de obstáculos. La señal de radio se debilita en el espacio libre debido a la expansión en una superficie esférica. La fSL es proporcional al cuadrado de la distancia y también proporcional al cuadrado de la frecuencia de radio. En decibelios, esto resulta en la siguiente ecuación

$$\alpha fSL = 92,4 + 20 \log f + 20 \log D \quad (1.4)$$

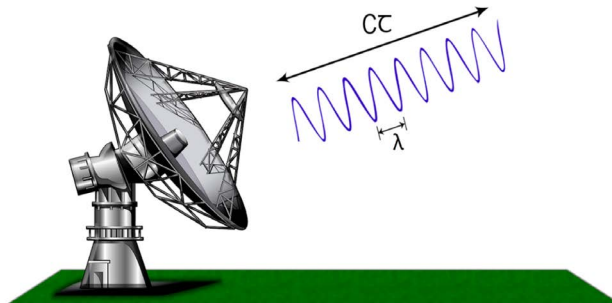
Donde:

α_{FSL}	= Pérdidas por espacio libre.
f	= Frecuencia (GHz)
D	= Distancia (Km).

1.2. Funcionamiento del radar

Existen cuatro componentes clave en el funcionamiento de un radar cualquiera: el emisor, el receptor, la antena y un equipo informático. El emisor es el responsable de la generación de un pulso electromagnético que se transmite en una determinada dirección a través de la antena. La energía que emite el radar se propaga por la atmósfera y, en caso de encontrar un obstáculo, se dispersa en todas direcciones, de modo que una parte es devuelta de nuevo en dirección al radar, donde es captada por el receptor. A partir del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso electromagnético se conoce la distancia a la que se encuentra el obstáculo interceptado. Finalmente, el equipo informático se encarga de procesar la señal recibida para convertirlo en un producto comprensible a nivel de usuario.

El principio de funcionamiento del radar es el de emitir a través de una antena un pulso de energía electromagnética de duración t (del orden de los ms) y de longitud de onda λ (del orden de los centímetros, ya que el blanco deseado son las gotas de agua).



*Figura 1.3: Principio de funcionamiento del radar.
Fuente: Propia*

Esa energía se concentra en un haz que al emitirse al exterior y por efecto de la difracción toma una forma cónica. En el interior de ese cono la energía no se distribuye de forma uniforme sino en forma de lóbulo: es mucho mayor en el centro y decrece rápidamente al alejarse de éste.

Debido a que es imposible confinar toda la energía en dicho cono parte de ésta escapa fuera de él. Como resultado la energía emitida se distribuye en forma de un lóbulo central (que es el que contiene la mayor parte de la energía) y una serie de lóbulos secundarios de menor energía.

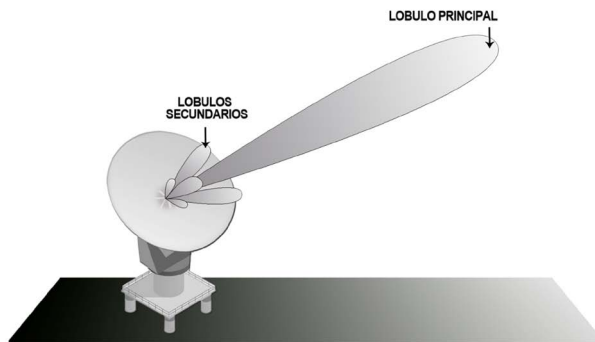


Figura 1.4: Lóbulo principal y secundarios del radar.
Fuente: (Cogollo, 2005)

Cuando esa energía es interceptada por un “blanco” (por ejemplo, una gota de agua) se dispersa en todas direcciones de forma que una fracción es devuelta en dirección al radar y captada por el receptor (normalmente localizado en la misma antena). La distancia al “blanco” se determina registrando el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de la energía y sabiendo que dicha energía se transmite a la velocidad de la luz.

En la figura 1.5 se puede observar el esquema de la energía captada y reflejada por una gota. Sabiendo que la energía se transmite a la velocidad de la luz c , y registrando el tiempo τ entre la emisión y recepción de la señal, la distancia a la gota se puede expresar como:

$$d = \frac{c\tau}{2} \quad (1.5)$$

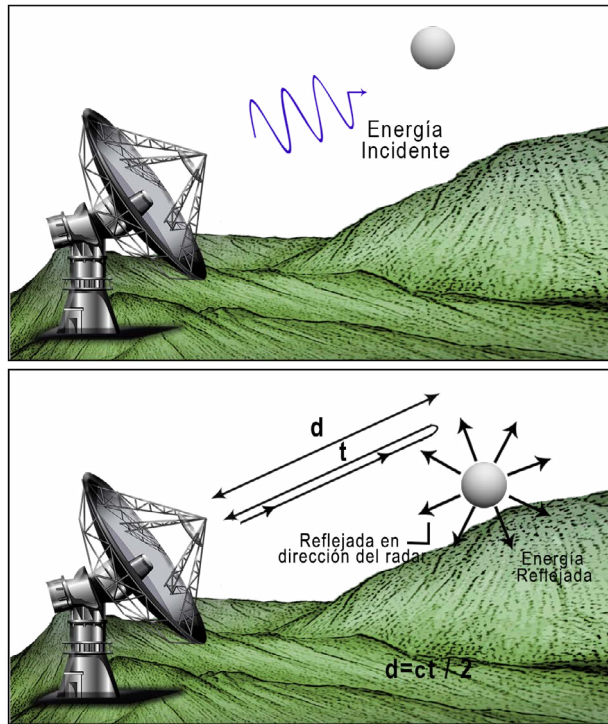


Figura 1.5: Energía incidente y energía reflejada por el blanco
Fuente: Propia

En realidad lo que registra el radar es la energía de vuelta en su dirección por las gotas de agua situadas en el interior de un cierto volumen V_{res} esa energía, que se mide en forma de potencia.

La potencia se expresa como media debido a que el radar usualmente emite un tren de n pulsos; así para un volumen situado a una distancia r_0 se miden n valores de potencia que luego se promedian. Este valor de potencia depende de varios factores, entre ellos las características propias del radar, como la potencia de transmisión, la ganancia de las antenas, la distancia al blanco (r_0) y en general de las características de reflectividad del blanco.

El motivo de tomar n medidas de un volumen es que de esta forma la medida final es más robusta (ya que la potencia varía en el tiempo debido al movimiento de las gotas en el interior del volumen).

En la figura 1.6 se puede observar el volumen de tamaño radial $c t/2$ que se corresponde con la energía medida en un instante determinado y asociada a una distancia dada.

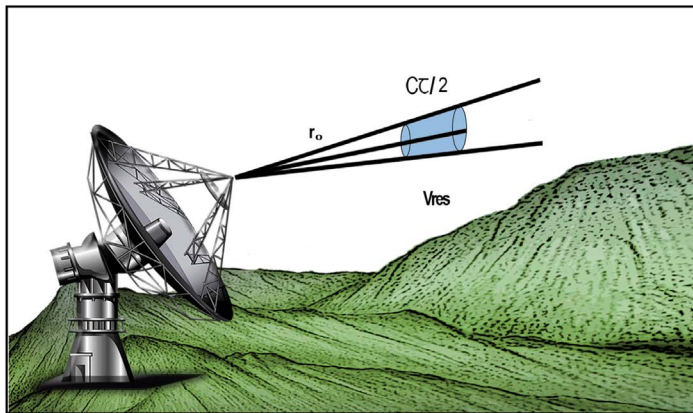


Figura 1.6: Volumen de tamaño radial $ct/2$.
Fuente: Propia

Tras emitir un pulso, la potencia que el radar capta en distintos instantes se corresponde con la energía de vuelta por diferentes volúmenes situados a lo largo del eje del haz y a distancia creciente de éste.

Para que el muestreo espacial tenga una cierta continuidad lo que se suele hacer es registrar la potencia cada cierto Δt , de forma que Δt sea el tiempo que tarda en llegar al radar la potencia devuelta por volúmenes V_{res} consecutivos, es decir $\Delta t = t/2$.

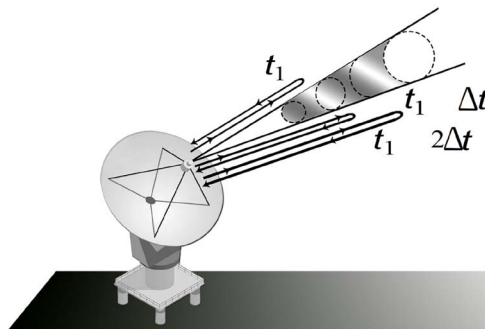


Figura 1.7: Volúmenes V_{res} consecutivos en instantes de tiempos separados $\Delta t = t/2$
Fuente: : (Cogollo, 2005)

Así, el radar emite un tren de n pulsos, y a continuación se produce un periodo de escucha en el que se registran las potencia devuelta por m volúmenes consecutivos para cada uno de los n pulsos. Como resultado para cada volumen se determinan n lecturas de potencia que finalmente se promedian (con $i = 1$ hasta m).

El procedimiento anterior de emisión-escucha se repite para cada dirección radial en la que se realiza un muestreo. De esta forma, fijado un cierto ángulo de la antena respecto a la horizontal, usualmente llamado elevación, el radar efectúa un barrido de la atmósfera girando 360 grados y realizando un número determinado de muestreos radiales (el tiempo de emisión-escucha es tan breve que no es necesario parar el movimiento para realizar cada medida por lo que la rotación del radar es de hecho continua) como se muestra en la figura 1.8.

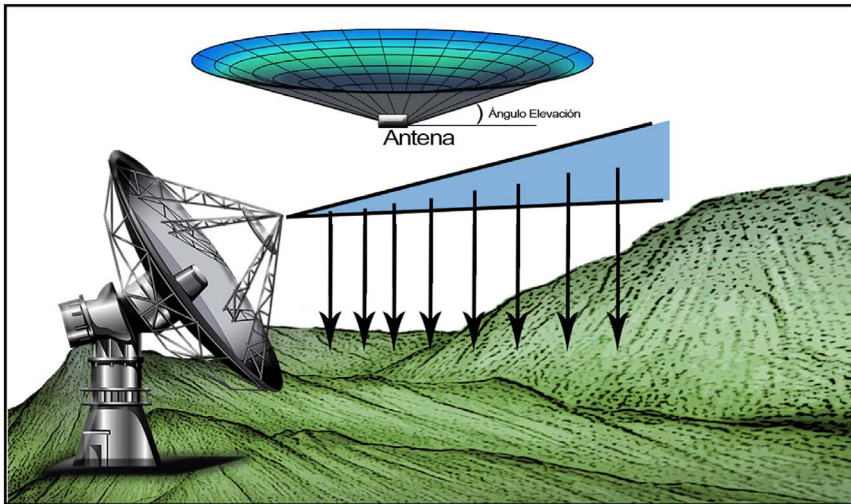


Figura 1.8: Volúmenes muestreados en una exploración radar.

Fuente: Propia

A partir de dicha información registrada en las diversas elevaciones se suelen generar dos tipos de imágenes:

- **Plan Position Indicator (PPI):** Correspondiente con la reflectividad registrada en cada una de las elevaciones y que se proyecta sobre el plano horizontal.
- **Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI) :** Este segundo tipo de imagen trata de representar la reflectividad registrada sobre un plano a una altura constante. Para generar este segundo tipo de imagen se utilizan aquellos fragmentos de información de las diversas elevaciones que se encuentran más cerca de la altura para la que se quiere generar el CAPPI.

Otra forma de muestreo alternativa es la de medir la reflectividad sobre la vertical del radar a lo largo del tiempo. Para ello se utilizan radares de verticales de alta resolución que lo que generan son registros muy detallados de lo que ocurre sobre la vertical del radar. De esta forma la imagen representa un corte vertical del campo de lluvia con una gran resolución.

Otra posibilidad de muestreo es mantener la antena fija en una dirección (o azimut respecto al noreste) y realizar una lectura incrementando el ángulo de elevación de la antena. Es lo que se conoce como muestreo en Range Height Indicator (RHI). El resultado es un corte vertical del campo de precipitación, que tiene coordenadas altura-distancia al radar.

1.3. Tipos de radar

Hay muchas formas de clasificar los radares, por su uso, por la frecuencia de la portadora, por la movilidad, por la forma de la señal transmitida. A continuación se hace un breve recuento sobre estas maneras de clasificar los radares.

Desde el punto de vista de movilidad hay dos tipos de radares: los radares fijos y los radares móviles. Los radares móviles son aquellos que se instalan en plataformas o armazones aéreos o satélites. Tienen la ventaja de trabajar con longitudes de onda más largas y de adaptarse, sea cual sea la condición atmosférica en la que realicen sus tareas de observación. Este tipo de radares se utiliza con gran éxito en zonas de gran nubosidad o precipitaciones ya que su sistema (las microondas no interactúan con el agua o la niebla que se encuentra en el cielo) resulta más preciso que el de los radares de tipo fijo. Muchos países han desarrollado sus propios sistemas de radares móviles, entre los que destacan: el ERS-1 de tecnología europea, el Radarsat de Canadá, el Jers de Japón o el SAR (Synthetic aperture radar). En función de la señal transmitida se distinguen dos tipos de radares, el radar de pulsos y el radar de onda continua.

Radar de pulsos: El radar de pulsos envía señales en ráfagas muy cortas (millonésimas de segundo) pero de una potencia muy elevada. Para poder determinar la distancia el radar de pulsos mide el tiempo que la señal tarda en alcanzar el objetivo y volver al receptor (tiempo de vuelo). A partir de este tiempo y la velocidad de propagación de una onda electromagnética se calcula la distancia. Muchos radares meteorológicos utilizan esta tecnología ya que es interesante localizar una tormenta o un huracán pero su velocidad no es tan elevada como para ser medida haciendo uso del radar.

Radar de onda continua: Los radares de onda continua, como su nombre indica, utilizan señales continuas en vez de ráfagas cortas. Se diferencian dos tipos, el radar doppler y el radar FM. El radar doppler se utiliza para realizar medidas precisas de la velocidad de un objeto. Este tipo de radar transmite una onda continua de frecuencia fija. Cuando esta señal encuentra un objeto en movimiento la frecuencia de la onda reflejada cambia con respecto a la transmitida que se toma de referencia. Utilizando esta variación de frecuencia el radar determina la velocidad del objetivo.

Según la frecuencia de trabajo los radares se clasifican como:

- Radares banda S
- Radares banda C
- Radares banda X

Radares banda S: La banda S está comprendida en un rango de frecuencias que va desde los 2.0 a los 4.0 GHz y su longitud de onda está entre 8 y 15 cm. Este tipo de radar es utilizado mayormente por radares meteorológicos. Una de las ventajas del uso de radar en banda S es que no se ven afectados por la atenuación, en otras palabras tiene mejor definición en condiciones climatológicas adversas donde el radar en banda X no responde adecuadamente, razón por cual a veces se interconmutan ambos radares. Dentro de las principales desventajas se encuentran las grandes dimensiones que se necesitan para las antenas y en general para toda los mecanismos y electrónica requerida lo cual eleva considerablemente los costos. En la figura 1.9 se puede apreciar un radar banda S del Marshall Radar Observatory de Montreal Canadá.



Figura 1.9: Radar Banda S, Marshall Radar Observatory

Fuente: Fotografía de Robbie Sproule (Montreal, Canada). <http://flickr.com/photos/85278812@N00/2837673>

Radars banda C: La banda C está comprendida en un rango de frecuencias que va desde los 4.0 a los 8.0 GHz y su longitud de onda es de 4 a 8 cm. Este tipo de radar es utilizado en rangos intermedios y próximos al radar (distancias menores a 120 Km). Son mucho más económicos que los banda S, debido entre otras cosas por la dimensión más pequeña de su antena y mecanismos asociados. El radar Banda C tiene entre sus desventajas que se afecta mucho mas por factores de atenuación que el radar banda S. En la figura 1.10 se puede apreciar un radar banda C.



*Figura 1.10: Radar Banda C INM instalado en el Pic de les Agulles, Corbera, cerca a Barcelona.
Fuente: Fotografía de Joaquimgr~commonswiki*

Radars banda X: El radar banda X usa frecuencias comprendidas entre 8 GHz a 12 GHz y longitudes de onda entre 2.5 cm y 4 cm, se usa en rangos de menos de 60 Km. El radar de banda X tiene varias modalidades de uso como por ejemplo, radar de uso civil, militar e instituciones gubernamentales, en aplicaciones como radar meteorológico, tráfico de control aéreo, defensa militar y otras. Los sistemas de radar de banda X han suscitado un gran interés en las últimas décadas. La longitud de onda relativamente corta en esta banda de frecuencias, permite obtener una resolución bastante alta en la proyección de imagen del radar, para la identificación y discriminación del blanco.

Una de las ventajas es que son muy sensitivos a los objetos de pequeño tamaño, y son útiles para el estudio del desarrollo de nubes, además la menor dimensión en el tamaño de la antena los hace más económicos y portables. La desventaja principal del radar en banda X es que se ven muy afectados por la atenuación y los ecos no meteorológicos.



Figura 1.11: Radar de banda X del LTHE de Grenoble instalado junto a Marsella
Fuente: http://www.crahi.upc.edu/curs/html_pages/trasp3.html

Los radares tienen diferentes modos de trabajo, en modo normal hacen detección volumétrica de las zonas de precipitación sin datos de vientos, en modo doppler hacen detección de zonas de precipitación y perfiles de vientos y en polarización dual proporcionan información sobre el tipo de precipitación y el tamaño de las gotas.

1.4. Esquema general del radar

El propósito de este capítulo es identificar los diferentes componentes del radar, así mismo se hace un recorrido por cada uno de ellos identificando sus funciones principales, características importantes y su relación con los demás componentes, en la figura 1.12 se puede apreciar el diagrama básico del Radar:

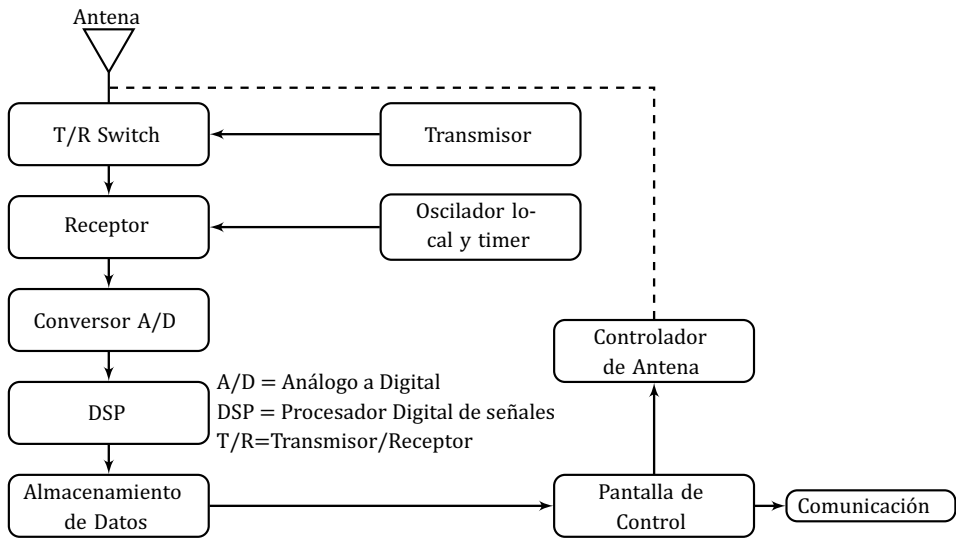


Figura 1.12: Esquema general del radar
 Fuente: : (Rinehart, 2007)

1.4.1. Transmisor

La función del transmisor es amplificar una portadora de RF modulada con la señal deseada, añadiendo un mínimo de distorsión de la información codificada. Básicamente tres componentes principales forman el transmisor: un amplificador de alta potencia (HPA, High power amplifier), un generador de funciones llamado oscilador local (LO, Local oscillator) y una antena.

El sistema de antena sirve para dos propósitos: transmisión y recepción. Las propiedades del sistema de antena cuando se utiliza como un transmisor son similares en casi todos los aspectos a las propiedades de la misma antena cuando se utiliza como receptor de energía de una onda de radio. Por lo tanto, la respuesta de la antena a las ondas que llegan de diferentes direcciones, es exactamente la misma que la radiación en diferentes direcciones desde la misma antena cuando está siendo usada como antena transmisora. En la figura 1.13 se puede observar los diferentes componentes del transmisor:

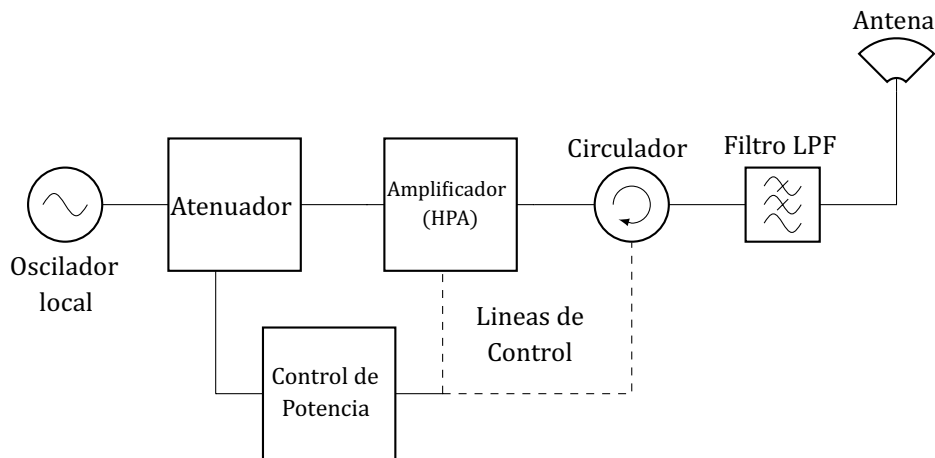


Figura 1.13: Esquema general del Transmisor
Fuente: (Rinehart, 2007)

1.4.2 Oscilador local

El oscilador local es el generador de forma de onda, al igual que cualquier sistema de comunicación el radar requiere de un generador muy sofisticado, estable, preciso, con bajo ruido de fase, tiempo de bloqueo de frecuencia rápido y bajo consumo de energía. El transmisor y el receptor requieren del oscilador local como se puede apreciar en la Figura 1.12.

1.4.3 Atenuador

El atenuador se utiliza para aumentar el aislamiento entre el oscilador y la entrada del amplificador de alta potencia. Un atenuador puede ser tan simple como un circuito T que se muestra en la figura 1.14.

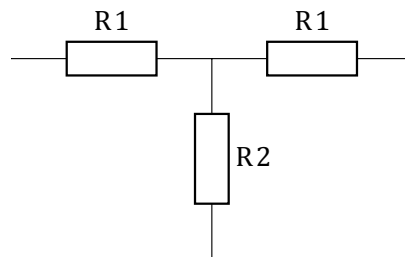


Figura 1.14: Circuito T de Acople
Fuente: Propia

Para diseñar un atenuador, es importante conocer la impedancia relativa Z_o de la red para calcular la pérdida de inserción A_L , como se observa a continuación:

$$A_L = 1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{Z_o}{R_2} \quad (1.6)$$

En la práctica, la pérdida de inserción se conoce como parte de los requisitos del sistema, y los componentes pueden estimarse para una impedancia dada.

1.4.4 Amplificador de alta potencia.

Los amplificadores de alta potencia (HPA, High-power amplifier) pueden ser tubos de ondas progresivas (TWT, Traveling-wave tub), magnetrones o klystrones. Estos amplificadores deben proporcionar las características esenciales de los sistemas de radares modernos en términos de la rapidez en la exploración de frecuencia. La selección de cualquiera de los tubos depende de la aplicación.

Un klystron es un generador de microondas, por lo general mide alrededor de 1,83m de largo y funciona de la siguiente manera:

- El cañón de electrones produce un flujo de electrones.
- La cavidad agrupamiento regula la velocidad de los electrones para que lleguen en grupo a la cavidad de salida.
- El grupo de electrones excita las microondas en la cavidad de salida del klystron.
- Las microondas fluyen en la guía de onda hacia el acelerador. Un acelerador es un aparato que se utiliza para producir una

alta velocidad en un haz de partículas cargadas de alta energía, tales como electrones, protones o iones pesados.

1.4.5 Acoplador direccional

El acoplador direccional, también llamado circulador, es la interfaz entre el HPA y el amplificador RF del transmisor. Este ofrece una impedancia muy baja y pérdidas insignificantes en la dirección del flujo de microondas. Este acoplador funciona de tal manera que cuando los puertos asignados son activos, los otros puertos proporcionan un aislamiento suficiente a la energía microondas. El factor de acoplamiento debe ser lo suficientemente alto a la salida del HPA en el ajuste más bajo con el fin de evitar los armónicos de acoplamiento debido a los diodos de detección en la configuración de alta potencia.

1.4.6 Filtro pasa bajo

Después del acoplador direccional se coloca el filtro pasa bajo (LPF, Low-pass filter), cuya finalidad es atenuar los armónicos de la señal transmitida. Un LPF puede ser tan simple como se muestra en la figura 1.15:

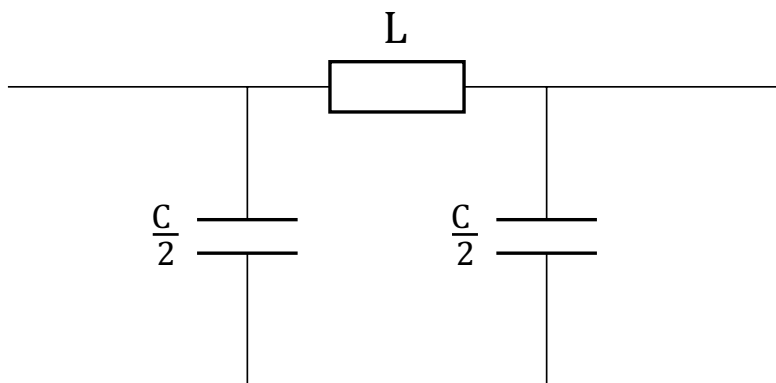


Figura 1.15: Filtro Pasabajo
Fuente: Propia

Un filtro pasabajo es una red diseñada para una atenuación cero hasta una determinada frecuencia (llamada frecuencia de corte) y una atenuación alta por encima de esta. La frecuencia de corte se puede escribir como:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.7)$$

Donde:

- f_0 = Frecuencia de Corte.
- L = Valor inductivo del Filtro.
- C = Valor Capacitivo del Filtro.

La impedancia característica puede ser expresada como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C(1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2})}} \quad (1.8)$$

Donde:

- ω_o = $2\pi f_o$
- ω = $2\pi f$
- f = Frecuencia de propagación.

El ángulo de fase, entre la entrada y salida, será determinado por Z_o y se puede expresar como:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \sqrt{LC \left(1 - \frac{\omega^2 LC}{4} \right)}}{1 - \frac{\omega^2 LC}{2}} \right) \quad (1.9)$$

El ángulo de fase β , puede variar entre 0 grados (cuando $\omega = 0$) hasta 180 grados (cuando $\omega = \omega_o$).

1.4.7 Control de potencia.

El modulo de control de potencia se utiliza para disminuir el tiempo de encendido del transmisor y para de esta manera minimizar la generación de componentes espectrales de canales adyacentes. Se debe tener precaución de no introducir inestabilidad de baja frecuencia en el circuito de control. Las señales de diagnóstico están destinadas a controlar la corriente y temperatura final del amplificador de alta potencia.

1.4.8 Receptor

El receptor está compuesto de una serie de componentes tales como: filtros de radiofrecuencia (RF, Radio frequency), amplificadores RF, mezcladores y amplificadores de frecuencia intermedia (IF, Intermediate frequency) entre otros, en la figura 1.16 se puede observar el esquema básico del receptor:

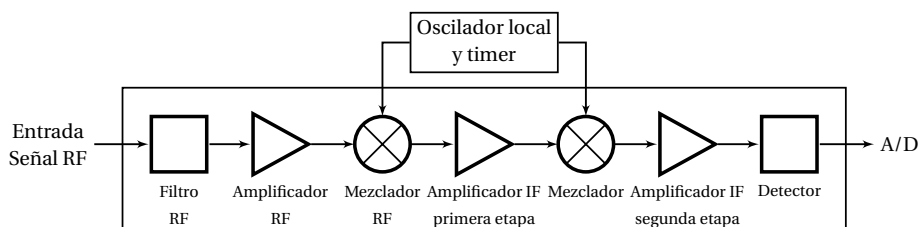


Figura 1.16: Esquema básico del receptor

Fuente: Propia

La señal recibida se mezcla en un dispositivo no lineal con la señal de un oscilador local (LO, Local oscillator) para producir una señal de frecuencia intermedia (IF), esta señal es amplificada para mejorar su calidad con un amplificador de frecuencia intermedia. Los métodos de detección utilizados típicamente en el receptor son la detección directa y la detección coherente.

La detección coherente emplea un dispositivo que produce una señal eléctrica proporcional a la intensidad de la señal óptica incidente. En la detección coherente la señal recibida es un pulso de la misma frecuencia del oscilador local y proporcional a la intensidad de campo recibido.

A diferencia de la detección directa, el detector coherente está sujeto a ruido térmico, y requiere recuperar la fase de la portadora en el receptor; por tanto, necesita circuitos especiales de estimación de fase. La detección coherente, idealmente requiere dos condiciones:

- Pureza del espectro de la señal de la fuente.
- Que la señal recibida y la señal del oscilador local deben tener frentes de fase espacial, casi perfectamente alineados, a lo largo el área activa del detector.

El filtro de radiofrecuencia a la entrada del receptor básicamente tiene las siguientes funciones:

- Limitar el ancho de banda del espectro que llega al mezclador para minimizar la distorsión de intermodulación la cual es causada por la no linealidad de los componentes del sistema, introduciendo productos de suma y diferencia de las frecuencias de aplicación.
- Atenuar el ruido en el receptor.
- Suprimir la energía del oscilador local en el receptor.

1.4.9 Procesador digital de señales

El procesador digital de señales (DSP, Digital signal processor) es necesario para procesar los datos a la salida del conversor analógico-digital. El DSP extrae la información de ecos del radar, con el fin de clasificar y caracterizar los objetivos y fenómenos geofísicos en cada aplicación específica del radar. El procesamiento de señales es manejado por un dispositivo DSP con algoritmos adaptados a las necesidades de cada radar en particular. La mayoría de los radares modernos realizan la función de análisis de espectro de la señal utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT, Fast fourier transform).

1.4.10 Compresión de datos y almacenamiento

Una gran cantidad de datos son a menudo adquiridos durante los escaneos o barridos del radar. Un ejemplo de esto son los datos adquiridos por los radares SkyWave, que son destacados particularmente por su amplia área de exploración y de barrido. Los datos sin procesar adquiridos a menudo pueden ocupar una gran capacidad. Antes y después de ser procesados los datos también pueden ser grandes y requieren mucho tiempo para su transferencia y procesamiento. En una situación operacional en donde se requiera tiempo real, el tiempo es un elemento fundamental para cumplir con el verdadero objetivo en la investigación. Para asegurar un transporte rápido y la entrega de datos a su destino, es necesario utilizar un proceso de compresión.

La compresión de datos es el proceso de convertir una secuencia de datos de entrada (datos originales en bruto) en un flujo de datos de salida más pequeños (flujo comprimido). Los datos comprimidos se guardan en un dispositivo de almacenamiento digital (disco compacto, por ejemplo) y cuando se recuperan son descomprimidos desde el dispositivo.

1.4.11 Pantalla y sistema de Comunicaciones

En los sistemas de radar modernos, los datos son altamente procesados antes de la visualización. La unidad de visualización proporciona una presentación para toda la gama de señales recibidas. El dispositivo de visualización es una consola, que es conceptualmente similar a un monitor de computador. En algunos casos, a través de comandos la unidad de visualización se utiliza para activar las señales de control para dirigir la antena del radar en la dirección deseada. Un modulo de comunicación asegura que los sistemas de comunicación internos y externos cumplan con los requisitos de voz y texto, en el lugar y momento preciso y su localización a través del sistema de posicionamiento global (GPS, Global positioning system).

1.5 Bandas de trabajo

Para la detección de los blancos meteorológicos, el radar puede trabajar entre las longitudes de onda (λ) de 2 cm a 10 cm. De acuerdo con la aplicación en que se va a emplear el radar se deben tener las siguientes consideraciones: A menor λ equipos más pequeños y baratos, mayor eficacia en detectar menores partículas y mayor atenuación; a su vez para detectar grandes eventos de precipitación se deben emplear mayores que redundan en altos costos. La precipitación atenúa el haz del radar y este efecto es mayor para el radar de longitud de onda corta. Por otra parte, el radar de longitud de onda larga no detecta la lluvia ligera ni la nieve tan fácilmente como lo hace un equipo de longitud de onda corta.

En la Tabla 1.2 se muestran las frecuencias que emplean los equipos radar:

Frecuencia Nominal (GHz)	Longitud de onda Nominal (cm)	Banda	Aplicación meteorológica típica
1-2	30-15	L	Seguimiento de globos de viento por radar.
2-4	15-8	S	Avisos sobre condiciones meteorológicas desfavorables, diagnósticos de supresión de granizo, medición de precipitación.
4-8	8-4	C	Radar meteorológico, investigación sobre nubes, medición de precipitación.
8-12	4-2,5	X	Investigación sobre nubes
18-27	1,7-1,2	K	Mediciones de atenuación de precipitación.

Tabla 1.2: Bandas de frecuencias de radares meteorológicos
Fuente: (Adaptado de Battan 1973 y Rhinehart 2007)

Para escoger la mejor longitud de onda que deberá emplearse en la observación de las gotas de agua, deben considerarse algunos otros factores además de la reflectividad. Uno de los más importantes, llamado atenuación, es el debilitamiento que sufren las ondas incidente y reflejada debido a las nubes y gotas de lluvia que las interfieren. Se ha descubierto que la atenuación es tanto más intensa cuanto más corta es la longitud de onda. Por esta razón, cuando deben observarse tormentas de lluvias que cubren regiones extensas, resultan mejores los equipos de radar que funcionan en longitudes de onda mayores (10 a 20 cm), pues las atenuaciones que sufren las señales por la absorción y la dispersión, resultan sumamente reducidos en comparación con el efecto que estos mismos factores tienen sobre las longitudes de onda más cortas (de 1 a 3 cm). (Battan, 1962).

1.6. Empleo del radar meteorológico

El diseño de un radar destinado a medir la precipitación implica llegar a una solución de compromiso entre varios parámetros, principalmente la longitud de onda, lo ancho del haz y el costo del aparato. La elección de las longitudes de onda es importante, ya que las longitudes más cortas (1 cm por ejemplo) son objeto de atenuación debido a los hidrometeoros y a la absorción de vapor de agua. Por otra parte, estas longitudes de onda más cortas permiten obtener un ancho de haz con una antena más pequeña. Se requiere un haz mas pequeño con el objeto de:

- Reducir en la mayor medida posible los ecos permanentes.
- Reducir al mínimo los ecos ampliados que se producen por intersección con la capa de fusión.
- Detectar los pequeños volúmenes de precipitación.

En estas circunstancias en las zonas tropicales es conveniente utilizar una longitud de onda de 10 cm (banda S) con una antena de 8 m de diámetro. En las zonas templadas se prefiere una longitud de onda de 5,6 cm (banda C) con una antena de 4m de diámetro. Con un equipo de proce-

samiento de datos bien diseñado y con sus correspondientes programas, es posible lograr medidas zonales comparables a las que se obtienen con las redes pluviométricas que tengan una densidad, de un pluviómetro por cada 50 Km² a 500 km², por ejemplo, en función del tipo de terreno. Por otra parte se puede decir que incluso en las zonas montañosas en condiciones ideales es posible obtener precisiones del orden de $\pm 15\%$ en las cantidades totales horarias de lluvia cuando se trata de pequeñas cuencas de captación secundarias. (Collier y Murray, 1976) (OMM, 1981).

El equipo de procesamiento de datos también puede utilizarse para convertir los datos en una forma adecuada que permita su transmisión por un teléfono común, por enlaces de microondas, o por redes telemétricas, que ulteriormente se reconstituyen visualmente en un lugar distante, o bien se integran mediante un computador, junto con los datos procedentes de varias estaciones de radar, en una sola imagen. Los datos también pueden clasificarse en cantidades totales por cuencas secundarias de captación y transmitirse después de un momento dado para ser impresos directamente o presentados en un terminal de visualización o para alimentar otro computador, a fin de que los datos sean nuevamente procesados, en modelos de drenaje urbano, por ejemplo. También es posible medir la cantidad de lluvia caída mediante la atenuación de ondas electromagnéticas entre dos puntos. Esto se hace mejor con cortas longitudes de onda, tales como 0,86 cm (banda K) en las que el coeficiente de atenuación es mayor. Los trabajos que se están llevando a cabo en esta materia tienen principalmente un carácter experimental. Se han logrado algunos resultados alentadores con sistemas de doble longitud de onda, de 0,86 cm y 3 cm la primera de las cuales se dedica a medir la atenuación y la segunda la reflectividad. (OMM, 1981).

El radar es un instrumento importante para la detección de tormentas y ciclones tropicales y para ello es esencial utilizar la longitud de onda de 10 cm, que sufre una atenuación relativamente pequeña en comparación con otras longitudes de onda más cortas. Con un equipo de radar bien ubicado resulta posible detectar la precipitación fuerte asociada con estas tormentas y ciclones incluso a distancias superiores a 400 Km, espe-

cialmente si existe una propagación anómala de las ondas electromagnéticas. Estas ondas se desplazan normalmente con una trayectoria cuyo radio medio es de cuatro veces el radio de la Tierra aproximadamente, lo cual impide la detección de cualquier posible objetivo por debajo de una altura de 9.4 Km a una distancia de 400 km. En general, es posible identificar los ecos recibidos de varias tormentas convectivas, que tienen una forma característica cuando se muestran visualmente. Así pues, es posible seguir la trayectoria de distintas tormentas y vigilar su desarrollo y disipación. El radar Doppler es capaz de medir la componente radial del movimiento de objetivos en dispersión. Permite pues determinar la velocidad y turbulencia del viento dentro de las tormentas fuertes, facilitando así su seguimiento. Sin embargo, su alcance efectivo es considerablemente inferior al del radar clásico. Actualmente, se están realizando experimentos pensando en la futura utilización práctica de este tipo de radar. Dependiendo el modo de empleo del radar meteorológico podemos definir sus usos.

1.6.1. Productos en modo normal.

En el modo normal podemos tener los siguientes productos:

- PPI (Plan Position Indicator)
- CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator)
- Reflectividad máxima
- Altura de los máximos de reflectividad
- Echotops
- VIL (Vertical Integrated Liquid)

PPI (Plan Position Indicator)

El indicador de posición es el más común tipo de salida de la pantalla de radar. La antena del radar es representada usualmente en el centro de la pantalla, tal que la distancia desde él pueda representarse como círculos

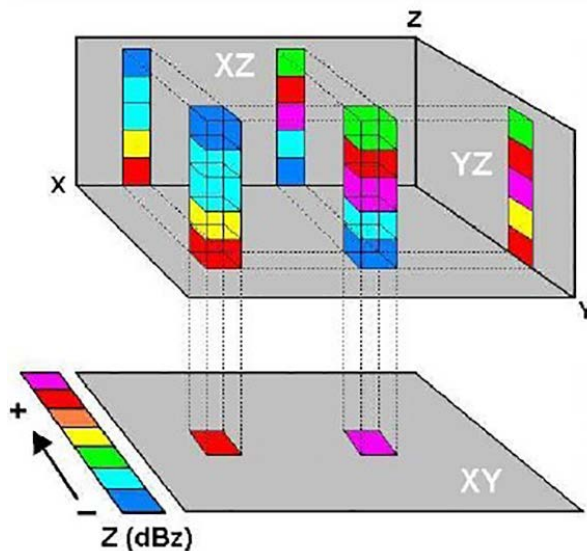
concéntricos. La señal representada es la reflectividad a solo una elevación de la antena, por lo que es posible tener muchos PPI al mismo tiempo, uno por cada elevación de antena.

CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*)

Este segundo tipo de imagen trata de representar la reflectividad registrada sobre un plano a una altura constante. Para generar este segundo tipo de imagen se utilizan aquellos fragmentos de información de las diversas elevaciones que se encuentran más cerca de la altura para la que se quiere generar el CAPPI.

Reflectividad máxima

Este producto del radar meteorológico no es más que la proyección sobre los planos XZ de lo máximos de reflectividad en la dirección norte-sur y sobre el plano YZ de los máximos de reflectividad en la dirección oeste-este, como se observa en la figura 1.17:



*Figura 1.17: Reflectividad máxima.
Fuente: : (Tamayo, 2009)*

Altura de los máximos de reflectividad

Representación plana de la altura a la cual se alcanza el máximo de reflectividad en cada punto (x,y).

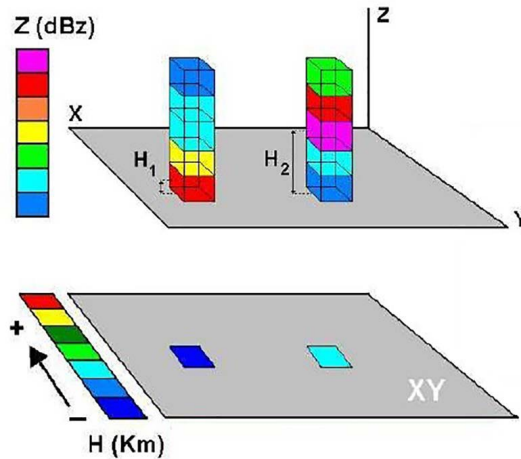


Figura 1.18: Altura de los máximos de reflectividad
Fuente: : (Tamayo, 2009)

Echotops

Esta es la representación de la máxima altura de una z de referencia (por ejemplo 12 dBz). En la siguiente gráfica se observa la representación de las alturas máximas de una z de referencia.

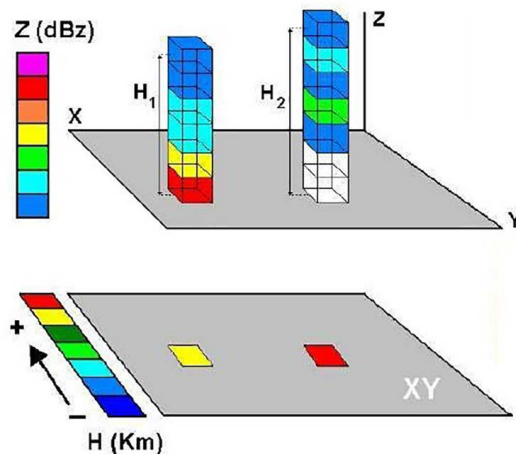


Figura 1.19: Echotops
Fuente: : (Tamayo, 2009)

VIL (Vertical Integrated Liquid)

Medida radárica del contenido de agua líquida de una célula por unidad de área (Kg/m²)

$$VIL = \int 3,44 * 10^{-6} \left(\frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \right)^{4/7} dh \quad (1.10)$$

Donde : La integral es en altura desde la base del radar.

Z_i y Z_{i+1} : Reflectividades en la capa de espesor dh .

Capítulo 2

Ecuación general del radar

El presente capítulo tiene como objetivo definir una expresión matemática que describa todas las variables a tener en cuenta para determinar el comportamiento y las características de la información que entrega el radar meteorológico, para ello es necesario revisar unos conceptos previos que hacen referencia a la caracterización de las antenas, el transmisor y el receptor del radar.

2.1. Características de la antena

Muchas son las definiciones que podemos tener de una antena, pero básicamente la podemos resumir como la parte de un sistema transmisor y receptor diseñado específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas, o en otras palabras esta es la región de transición entre una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre. Algunas de las características de las antenas necesarias para llegar a la expresión de la ecuación del radar se describen a continuación:

2.1.1. Impedancia de antena

La impedancia de una antena es la relación entre la tensión y la corriente de entrada ($Z=V/I$), la impedancia es un número complejo, la parte real de la impedancia se denomina Resistencia de antena (R_{Antena}) y la parte imaginaria es la Reactancia (X_{Antena}).

$$Z_{Antena} = R_{Antena} + jX_{Antena} \quad (2.1)$$

La resistencia de antena es la suma de la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas.

$$R_{Antena} = R_{Radiación} + R_{Pérdida} \quad (2.2)$$

La antena ha de conectarse a un transmisor y radiar el máximo de potencia posible con un mínimo de pérdidas en ella. La antena y el transmisor han de adaptarse para una máxima transferencia de potencia en el sentido clásico de los circuitos.

Dado que la antena radia energía, hay una pérdida neta de potencia hacia el espacio debida a radiación, que puede ser asignada a una resistencia de radiación $R_{Radiación}$, definida como el valor de la resistencia que disiparía ohmicamente la misma potencia que la radiada por la antena:

$$P_{radiada} = I^2 R_{Radiación} \quad (2.3)$$

Se pueden tener pérdidas debidas a la antena, habitualmente ohmica debida a los conductores. Todas las pérdidas se pueden globalizar en una resistencia de pérdidas como se muestra en la siguiente expresión:

$$P_{entregada} = P_{radiada} + P_{Pérdida} = I^2 R_{Radiación} + I^2 R_{Pérdida} \quad (2.4)$$

La existencia de pérdidas en la antena hace que no toda la potencia entregada por el transmisor sea radiada, por lo que se puede definir un rendimiento o eficiencia (η).

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_{Radiación}}{R_{Pérdida} + R_{Radiación}} \quad (2.5)$$

2.1.2. Radiación

La radiación de ondas electromagnéticas es la propiedad más importante de la antena. La onda electromagnética se compone de un campo eléctrico E (V/m) y un campo magnético H (A/m). Ambos son magnitudes vectoriales y están ligados por las ecuaciones de Maxwell. El campo magnético variable producido genera a su vez un campo eléctrico variable, se obtiene entonces un campo eléctrico y un campo magnético que se van generando mutuamente en el espacio, de manera que se alejan del punto original de generación, produciendo la onda electromagnética.

Estos campos oscilan temporalmente en forma sinusoidal a medida que se propagan, y pueden describirse matemáticamente. En la figura 2.1 se puede apreciar que el campo eléctrico es perpendicular al campo magnético:

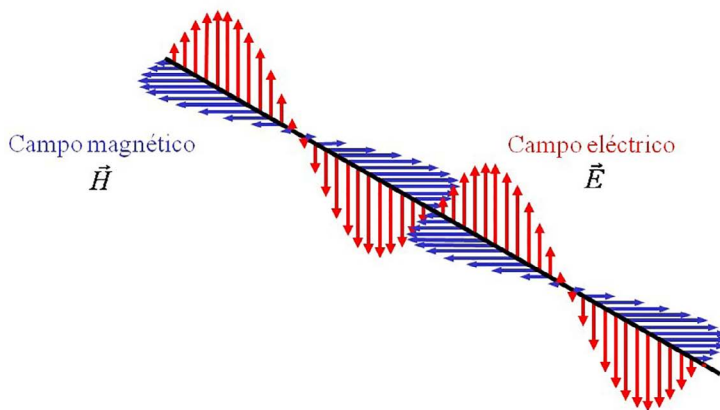


Figura 2.1: Onda electromagnética
Fuente: Propia

Un parámetro importante para el análisis de las antenas es la densidad de potencia radiada ($\rho(\theta, \phi)$), la cual se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección, para poder interpretar mejor este concepto es necesario considerar un sistema de coordenadas polares el cual se aprecia a continuación en la figura 2.2 en donde cada punto en el espacio depende de una distancia r , unos ángulos θ y ϕ .

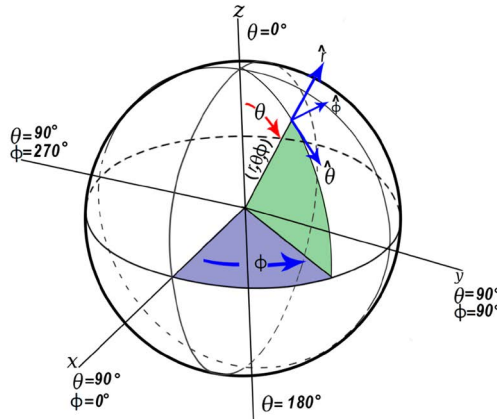


Figura 2.2: sistema de coordenadas polares.
Fuente: (Anguera, J. Perez, 2008)

El vector de densidad de potencia en cualquier punto en el espacio dependerá del vector de campo eléctrico y magnético en ese punto y se relacionarán con la siguiente expresión:

$$\vec{\rho}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}) w / m^2 \quad (2.6)$$

Donde:

- θ, ϕ = Densidad de potencia.
- $\vec{E}$ = Vector de campo Eléctrico.
- $\vec{H}$ = Vector de Campo Magnético.

Para los campos radiados, los módulos de campo eléctrico y del campo magnético están relacionados por la impedancia característica del medio (n), que en el vacío vale $120\pi\Omega$.

Por lo tanto la densidad de potencia radiada se puede calcular a partir de las componentes transversales de campo eléctrico como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\vec{\rho}(\theta, \phi) = \frac{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}{n} \quad (2.7)$$

Donde:

E_ϕ y E_θ = Componentes Transversales de Campo eléctrico.
 n = Impedancia característica del medio

La potencia total radiada se puede obtener con la doble integral de la densidad de potencia en una superficie esférica que encierra a la antena.

$$P_{radiada} = \int \int_s \vec{\rho}(\theta, \phi) \cdot ds \quad (2.8)$$

En el caso de una antena isotrópica la cual radia potencia en todas las direcciones, podemos apreciar en la figura 2.3 que la densidad de potencia en cualquier punto en el espacio ubicado a una distancia r de la antena depende de la potencia transmitida es decir la potencia radiada por la antena y el área de la circunferencia formada a una distancia r de la antena:

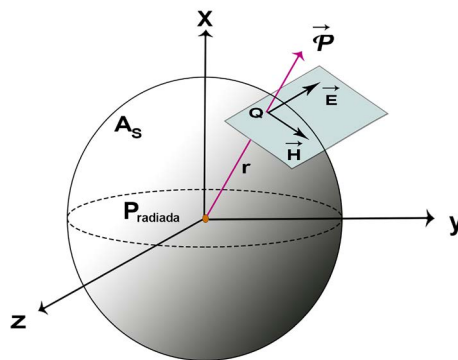


Figura 2.3: Potencia Radiada por una antena Isotrópica
 Fuente: (Anguera, J. Perez, 2008)

La densidad de potencia de la antena isotrópica se relaciona en la siguiente expresión:

$$\rho_{iso}(\theta, \phi) = \frac{P_{radiada}}{Area_esfera} \quad (2.9)$$

Como el área de la esfera equivale a $4\pi r^2$ por lo tanto se tiene la siguiente expresión para la densidad de potencia:

$$\rho_{iso}(\theta, \phi) = \frac{P_{radiada}}{4\pi r^2} \quad (2.10)$$

Diagramas de radiación

Un diagrama de radiación es la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las distintas direcciones del espacio. Para antenas linealmente polarizadas se define el plano E como el que forman la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección. De la misma forma el plano H es el formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección. Ambos planos son perpendiculares y su intersección determina la dirección de máxima radiación de la antena. En la figura 2.4 se puede apreciar el diagrama de radiación de una antena, aquí se puede observar y apreciar claramente la dirección de máxima radiación.

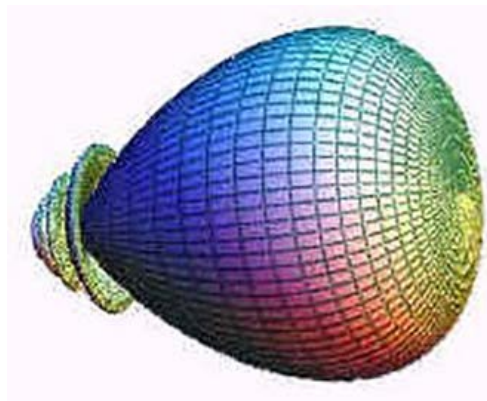


Figura 2.4: Diagrama de Radiación en tres dimensiones.
Fuente: (Anguera, J. Perez, 2008)

Al producto de la potencia radiada por una antena por la directividad, o de la potencia entregada por la ganancia, se le denomina potencia isotrópica radiada equivalente, PIRE.

$$PIRE = PrD = PeG \quad (2.11)$$

2.1.3 El ancho de haz de -3 dB

El ancho de banda de -3 dB, es la separación angular en el que la densidad de potencia radiada es igual a la mitad de la potencia máxima (en la dirección principal de radiación). En el diagrama de campo es la excurción angular entre las direcciones en las que el valor del campo eléctrico ha caído a 7, 07 del valor máximo. Es un parámetro de radiación, ligado al diagrama de radiación. En la Figura 2.5 de puede observar el diagrama de radiación polar de una antena, allí entre líneas rojas se apreciar el ancho de banda de -3dB para este caso particular.

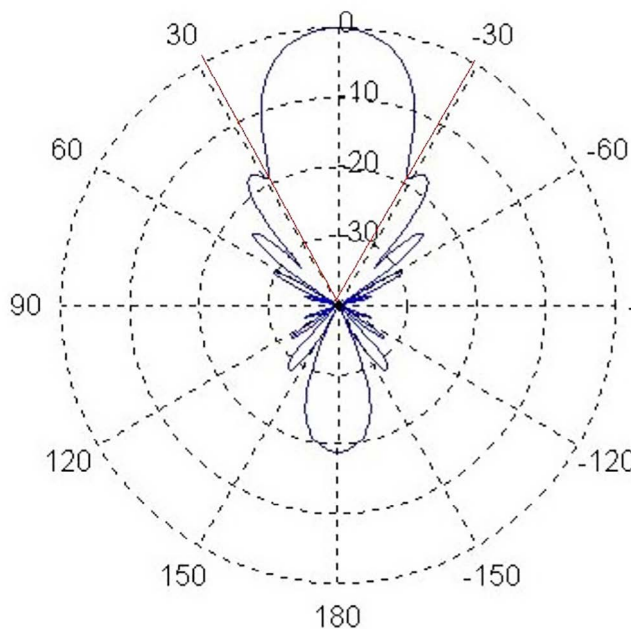


Figura 2.5: Ancho de HAZ de -3 dB
Fuente: Propia

2.1.4 Directividad de antena

La directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isotrópica.

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{\rho_{iso}(\theta, \phi)} \quad (2.12)$$

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_{radiada}/(4\pi r^2)}$$

Donde:

$D(\theta, \phi)$ = Directividad de la antena.

$\rho(\theta, \phi)$ = Densidad de potencia

$\rho_{iso}(\theta, \phi)$ = Densidad de potencia antena isotrópica.

Si no se especifica la dirección angular, se refiere a la dirección de máxima radiación.

$$D = \frac{\rho_{m\acute{a}x}}{P_{radiada}/(4\pi r^2)} \quad (2.13)$$

2.1.5. Ganancia de antena

Un segundo parámetro directamente relacionado con la directividad es la ganancia de antena G . Su definición es semejante, pero la comparación no se establece con la potencia radiada, sino con la entregada por la antena. Ello permite tener en cuenta las posibles pérdidas en la antena, ya que entonces no toda la potencia entregada es radiada al espacio. La ganancia y la directividad están relacionadas, en consecuencia, por la eficiencia de la antena, como se muestra a continuación.

$$G(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{\frac{P_{entregada}}{4\pi r^2}} = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} \frac{\rho(\theta, \phi)}{\frac{P_{radiada}}{4\pi r^2}} = \eta D(\theta, \phi)$$

Donde:

$$\begin{aligned} G(\theta, \phi) &= \text{Ganancia de la antena.} \\ \eta &= \text{Eficiencia de la antena.} \end{aligned}$$

Si la antena no posee pérdidas, algo muy frecuente en altas frecuencias, los dos parámetros (ganancia y directividad) son equivalentes.

2.1.6. Área y longitud efectiva

La antena extrae potencia del frente de onda incidente, por lo que representa una cierta área de captación o área efectiva A_{ef} , definida como relación entre la potencia que entrega la antena a su carga (P_L) y la densidad de potencia de la onda incidente como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A_{ef} = \frac{P_L}{\rho} \quad (2.14)$$

En otras palabras la potencia en la antena receptora (P_L) es igual a la densidad de potencia en ese punto por el área efectiva de la antena:

$$P_L = A_{ef} \rho \quad (2.15)$$

Existe una relación entre directividad y el área efectiva de cualquier antena, la cual se muestra en la siguiente expresión y que nos permite tener el área efectiva en función de la directividad y la longitud de onda de trabajo de la antena:

$$\frac{A_{ef}}{D} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.16)$$

Donde:

A_{ef}
 λ = Área efectiva de la antena.
 D = Longitud de onda.
= Directividad de la antena.

2.2. Características del transmisor y receptor

2.2.1. Transmisor

El funcionamiento del radar implica que el transmisor emita una gran cantidad de energía para recibir, detectar y cuantificar una mínima fracción de toda la energía de radio devuelta en forma de eco. Una forma de solucionar el problema de detectar este eco ínfimo en presencia de la enorme señal emitida, es el sistema de impulsos. Durante un lapso de 0,1 a 5 microsegundos se emite un impulso de energía; a continuación, el transmisor permanece en silencio durante un espacio de centésimas o milésimas de microsegundo. Durante la fase de impulso o emisión, el receptor queda aislado de la antena por medio de un conmutador TR (transmisor - receptor). El radar de onda continua emite una señal continua en vez de impulsos. El radar Doppler, que se utiliza para medir la velocidad de objetos, transmite con frecuencia constante. Las señales reflejadas por objetos en movimiento respecto a la antena presentarán diferentes frecuencias a causa del efecto Doppler. La diferencia de frecuencias guarda la misma relación con la emitida que la existente entre las velocidades del objetivo y la de la luz.

El radar de frecuencia modulada (FM, Frequency modulation) emite una señal continua cuya frecuencia va cambiando de manera uniforme. La diferencia entre la frecuencia del eco y la del transmisor en el momento de la recepción de aquél permite calcular la distancia existente entre transmisor y objetivo. Estos sistemas son más exactos que los de impulsos, aunque tienen alcance menor. Un aspecto importante del transmisor y que se tiene en cuenta en la ecuación del radar es la potencia de radiación, la

cual debe ser lo suficientemente grande para que una vez reflejada por el blanco sea detectable en el receptor.

2.2.2 Receptor

El receptor ideal debe ser capaz de amplificar y medir una señal muy débil con una frecuencia muy elevada. Hasta el momento no se ha conseguido construir un amplificador móvil que cumpla esta función de forma satisfactoria, la señal se convierte a una frecuencia intermedia (IF) de 30 MHz y se amplifica. La alta frecuencia de la señal del radar exige un oscilador y un mezclador con una precisión muy superior a la que se utiliza en los receptores normales de radio; no obstante, ya se han construido circuitos apropiados que utilizan como osciladores tubos de microondas de alta potencia. La conversión a frecuencia intermedia se efectúa y se envía a continuación a una computadora.

Uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta en el receptor del radares la sensibilidad, ya que se debe asegurar que la potencia reflejada por el blanco sea detectable o de lo contrario es imposible establecer la posición y características de este.

2.2.3 Ecuación general para blancos puntuales.

Un caso particular de la ecuación de transmisión es el cálculo de la potencia reflejada por un blanco que capta una antena de radar. En el caso de un radar biestático, aquel en que el receptor está situado en una posición distinta al transmisor, se tiene la situación mostrada en la figura 2.6.

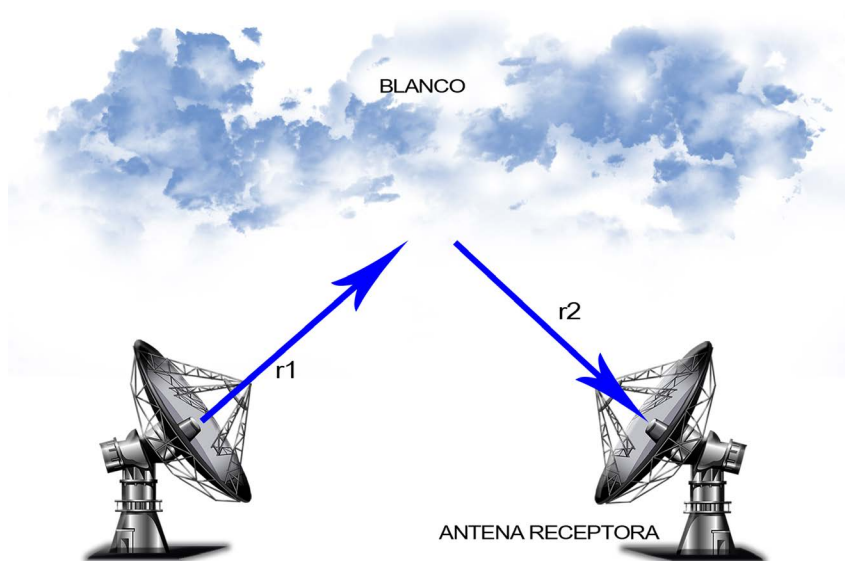


Figura 2.6: Radar biestático

Fuente: Propia

En el caso de un radar monoestático, el receptor está situado en la misma posición que el transmisor, para este caso se tiene la situación mostrada en la figura 2.7.

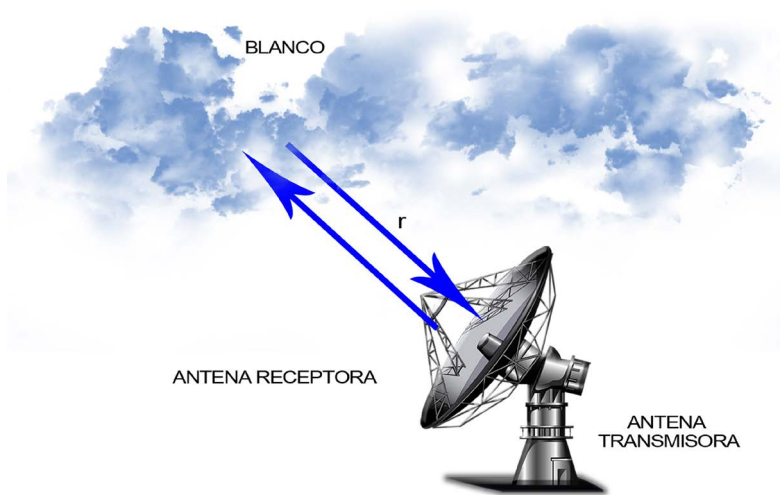


Figura 2.7: Radar monoestático.

Fuente: Propia

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito y considerando que básicamente la información que se requiere es poder determinar en términos espaciales en todas las direcciones cual es el valor de la potencia recibida, es decir la reflejada por el blanco, para ello es necesario considerar las siguientes expresiones las cuales se derivan de la ecuación 2.16.

$$P_{\text{Blanco}} = A_{\text{Blanco}} \cdot \rho \quad (2.17)$$

Donde:

$$\begin{aligned} P_{\text{Blanco}} &= \text{Potencia en el blanco.} \\ A_{\text{Blanco}} &= \text{Área del blanco.} \\ \rho_A &= \text{Densidad de potencia de la antena.} \end{aligned}$$

La ecuación anterior nos muestra que la potencia en el blanco recibida por la antena transmisora depende directamente de la densidad de potencia radiada por la antena en ese punto y el área efectiva de captación del blanco. De la misma manera podemos tener una expresión similar para determinar cuánto es la potencia recibida en la antena receptora (P_L) debido a la radiación del blanco la cual dependerá del área efectiva de la antena receptora (A_{efr}) a densidad de potencia radiada por el blanco (ρ_{Blanco}).

$$P_L = A_{\text{efr}} \rho_{\text{Blanco}} \quad (2.18)$$

Partiendo de la ecuación que define la directividad D_{AT} de una antena se puede despejar la densidad de potencia y obtener la siguiente expresión:

$$\rho_A(\theta, \phi) = \frac{P_{\text{radiada}}}{4\pi r^2} D_{AT}(\theta, \phi) \quad (2.19)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \rho_A(\theta, \phi) &= \text{Densidad de potencia de la antena.} \\ D_{AT} &= \text{Directividad de la Antena.} \\ P_{\text{radiada}} &= \text{Potencia Radiada por la antena.} \end{aligned}$$

Remplazando la expresión 2.19 en la ecuación 2.17 en la ecuación encontramos una expresión para la potencia captada por el blanco:

$$P_{Blanco} = \frac{P_{radiada}}{4\pi r^2} D_{AT} A_{Blanco} \quad (2.20)$$

Teniendo en cuenta la expresión 2.19, de la misma forma se puede considerar una expresión para determinar la densidad de potencia radiada por el blanco, la cual dependerá de la potencia captada por el blanco y de la directividad de este:

$$\rho_{Blanco}(\theta, \phi) = \frac{P_{Blanco}}{4\pi r^2} D_{Blanco}(\theta, \phi) \quad (2.21)$$

Donde:

$\rho_{Blanco}(\theta, \phi)$ = Densidad de potencia de la antena.
 D_{Blanco} = Directividad de la blanco.
 P_{Blanco} = Potencia Radiada por la blanco.

Dicha potencia se vuelve a radiar hacia el receptor, que está separado a la misma distancia r del blanco. La potencia captada en la antena receptora (P_L) será la obtenida remplazando la expresión 2.21 en la ecuación 2.18:

$$P_L = \frac{P_{Blanco}}{4\pi r^2} D_{Blanco}(\theta, \phi) A_{efr} \quad (2.22)$$

Por otro lado se tiene que remplazando la expresión 2.17 en la ecuación 2.22 se tiene una nueva ecuación para la potencia recibida en la antena receptora (P_L), como se muestra a continuación:

$$P_L = \frac{\rho_{A*} A_{Blanco}}{4\pi r^2} D_{Blanco}(\theta, \phi) A_{efr} \quad (2.23)$$

Se define la sección recta radar como el producto de los parámetros en recepción y transmisión del blanco. Es un parámetro que depende de los ángulos de incidencia y transmisión que tiene dimensiones de área:

$$\sigma = A_{\text{Blanco}} * D_{\text{Blanco}} \quad (2.24)$$

Tomando en cuenta lo anterior podemos acomodar la expresión 2.23 de la siguiente manera:

$$P_r = \frac{\rho_A}{4\pi r^2} \sigma A_{\text{efr}} \quad (2.25)$$

Donde:

- P_r = Potencia en la antena receptora debida al blanco.
- ρ_A = Densidad de potencia de la antena transmisora.
- A_{efr} = Área efectiva antena receptora
- σ = Sección recta radar.

Remplazando la expresión 2.19 en la 2.25 se encuentra una nueva forma de encontrar la potencia en el receptor radiada por el blanco, en términos de la directividad y potencia radiada por la antena transmisora y el área efectiva de la antena receptora, como se muestra a continuación:

$$P_r = \frac{P_{\text{radiada}} D_{\text{AT}}}{(4\pi)^2 r^4} \sigma A_{\text{efr}} \quad (2.26)$$

Teniendo en cuenta la expresión 2.17 se puede determinar una expresión del área efectiva de la antena receptora la cual se encuentra con la siguiente ecuación:

$$A_{\text{efr}} = \frac{\lambda^2 * D_{\text{AR}}}{4\pi} \quad (2.27)$$

Donde:

A_{efr} = Área efectiva antena receptora.
 D_{AR} = Directividad antena receptora.
 λ = Longitud de onda.

Remplazando la expresión 2.27 en la 2.26 se tiene:

$$P_r = \frac{P_{radiada} D_{AT}}{(4\pi)^2 r^4} \sigma \frac{\lambda^2 * D_{AR}}{4\pi} \quad (2.28)$$

Considerando un radar monoestático en donde la antena transmisora es la misma receptora ($D_{AT} = D_{AR}$) y que la eficiencia de estas antenas es del 100% ($D = G$), podemos reescribir la expresión anterior de la siguiente manera:

$$P_r = \frac{P_{radiada} * \lambda^2 * G^2}{(4\pi)^3 r^4} \sigma \quad (2.29)$$

Donde:

P_r = Potencia en la antena receptora debida al blanco.
 $P_{radiada}$ = Potencia en la antena receptora debida al blanco.
 λ = Longitud de onda.
 σ = Sección recta radar.
 G = Ganancia de la antena.
 r = Distancia entre el blanco y la antena del radar.

Esta expresión se considera como la ecuación general del radar meteorológico, la cual como se puede observar depende de las características de la antena, el transmisor y por supuesto del blanco. En la ecuación anterior se puede apreciar que para el alcance del radar existe una dependen-

cia con la cuarta potencia de la distancia del blanco. En un radar es necesario emitir con altas potencias, y tener una alta sensibilidad en el receptor.

La sección recta de un blanco depende de su forma y de sus dimensiones, una esfera por ejemplo tiene una sección recta que coincide con el área de un corte diametral, dado que radia por igual en todas las direcciones, en la siguiente expresión se puede apreciar para la esfera la expresión de la sección recta del radar la cual depende del área de la esfera y su directividad.

$$\sigma_{esfera} = A_{esfera} D_{esfera} = \pi a^2 \quad (2.30)$$

Para el caso de una placa se tiene que la sección recta que es máxima en la dirección de la reflexión especular, la potencia captada es proporcional al área, y la rerradiación es directiva.

$$\sigma_{placa} = A_{placa} D_{placa} = A_{placa} \left[A_{palca} \frac{4\pi}{\lambda^2} \right] \quad (2.31)$$

Capítulo 3

El Radar para blancos Meteorológicos

Partiendo de la ecuación General del radar (2.29), es posible encontrar la ecuación específica para blancos meteorológicos, recordando la expresión general se tiene la expresión de potencia recibida en función de la potencia radiada, la longitud de onda y la ganancia de la antena.

$$P_r = \left(\left(\left(\left(\frac{P_t G}{4\pi r^2} \right) \sigma_b \right) \frac{1}{4\pi r^2} \right) \frac{G \lambda^2}{4\pi} \right) = \frac{P_{radiada} G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \sigma_b \quad (3.1)$$

Donde:

P_r	= Potencia en la antena receptora debida al blanco.
$P_{radiada} = P_t$	= Potencia radiada por el transmisor.
λ	= Longitud de onda.
σ	= Sección recta radar.
G	= Ganancia de la antena.
r	= Distancia entre el blanco y la antena del radar.

La ecuación (3.1) da la potencia recibida de un blanco puntual, si pasamos a la detección de los blancos meteorológicos, por ejemplo a una zona de precipitación, el haz de irradiación del radar ilumina una gran cantidad de partículas dispersantes tal como las gotas de agua; pasamos así de una dispersión de carácter superficial a otra de características volumétricas. Se demuestra que la potencia que llega en un instante determinado al radar, proviene de las gotas de agua que se encuentran dentro de un volumen cuyas dimensiones dependen del ancho de haz de antena, la distancia y duración del pulso de energía electromagnética emitida. Debida a esta forma particular de comportamiento, ha sido necesario un tratamiento especial para determinar la sección transversal de reirradiación para blancos meteorológicos.

Dado que en el volumen se encuentran gotas de diversos tamaños, considerando que cada una de ellas se comporta como elementos irradiantes en la misma frecuencia que la onda incidente, al estar distribuidas aleatoriamente y en continuo movimiento. La potencia recibida es promediada sobre un largo número de distribuciones independientes, sobre un mismo volumen, para el caso de precipitación existen múltiples blancos iluminados por el pulso del radar simultáneamente, en consecuencia la Potencia recibida promedio ($\overline{P_r}$) espacial, será la suma de las potencias retrodispersadas por todos estos blancos individuales iluminados y cuyas retrodispersiones llegan al mismo tiempo al receptor, de esta manera la ecuación (3.1) se transforma en:

$$\overline{P_r} = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (3.2)$$

Matemáticamente se puede definir un área total de sección transversal de retrodispersión de un blanco meteorológico (σ_t), como la suma de todas las áreas individuales de secciones transversales t de retrodispersión de las partículas (σ_i), es decir:

$$\sigma_t = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (3.3)$$

De esta manera la expresión (3.2) quedara de la siguiente forma:

$$\overline{P_r} = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \sigma_t \quad (3.4)$$

Teniendo en cuenta que se requiere conocer el área total de la sección transversal de retrodispersión de los blancos dentro del volumen muestreado por el radar (V_m), por consiguiente es necesario determinar el área de la sección transversal de retrodispersión de la unidad de volumen y multiplicar esto por el volumen total muestreado, por lo tanto se tiene:

$$\sigma_t = V_m \sum_{vol} \sigma_i \quad (3.5)$$

Este volumen muestreado es proporcional a los anchos angulares de media potencia (azimut ϕ_{3dB} , y polar θ_{3dB} respecto de la dirección de propagación), del haz emitido por el radar, y a la profundidad del volumen abarcado por el pulso del radar $c/2=h/2$ (h es la longitud del pulso en el espacio). Es importante destacar que el volumen muestreado tiene una profundidad de $(h/2)$, debido a que con esto se asegura que las retrodispersiones de los blancos en este volumen lleguen al mismo tiempo al receptor.

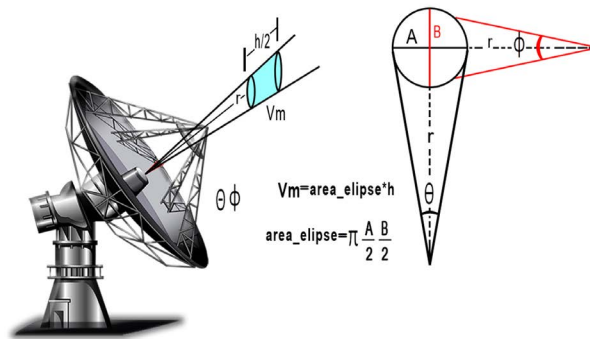


Figura 3.1: Volumen muestreado.
Fuente: Propia

En la Figura 3.1 se puede apreciar que el volumen muestreado se puede aproximar al volumen de un cilindro de base elíptica y altura $h/2$ teniendo en cuenta que $h \ll r$, por lo tanto el volumen de este cilindro será el área de la base por su altura como se muestra a continuación:

$$Area_{ellipse} = \pi \frac{A}{2} \frac{B}{2} \quad (3.6)$$

Donde A es el eje mayor y B es el eje menor de la elipse, por lo tanto teniendo en cuenta que: $r \gg A$ y $r \gg B$, se puede aproximar A y B por la expresión de definición de Arco como:

$$A = \theta r \quad y \quad B = \phi r \quad (3.7)$$

Finalmente combinando las dos expresiones anteriores se tiene que el volumen muestreado es:

$$V_m = \pi \frac{r\theta}{2} \frac{r\phi}{2} \frac{h}{2} = \pi \frac{r^2\theta\phi h}{8} \quad (3.8)$$

Probert-Jones en 1962, fue el primero en encontrar una expresión similar que tiene en cuenta la distribución real de la potencia en el lóbulo principal del haz de antena con reflector parabólico, que es la más empleada en los radares meteorológicos, allí se asumió una forma gaussiana para el patrón de haz, encontrando un volumen muestreado de la siguiente manera:

$$V_m = \pi \frac{r^2\theta\phi h}{16 \ln(2)} \quad (3.9)$$

El factor adicional en la expresión de Probert Jones es de $2 \cdot \ln(2)$ en el denominador, el cual toma en cuenta la forma real, mucho mejor que las consideraciones hechas para (3.8).

Remplazando la expresión del Volumen muestreado en la ecuación (3.5) y posteriormente este resultado remplazado en la expresión (3.4) se tiene lo siguiente:

$$\sigma_t = \pi \frac{r^2 \theta \phi h}{16 \ln(2)} \sum_{vol} \sigma_i \quad (3.10)$$

$$\overline{P_r} = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \pi \frac{r^2 \theta \phi h}{16 \ln(2)} \sum_{vol} \sigma_i$$

$$\overline{P_r} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \theta \phi h}{1024 \ln(2) \pi^2 r^2} \sum_{vol} \sigma_i \quad (3.11)$$

Es importante tener en cuenta un parámetro que está relacionado con el área total de la sección transversal de retrodispersión, este parámetro es conocido como reflectividad radárica (η). La reflectividad radárica está definida como:

$$\eta = \sum_{vol} \sigma_i \quad (3.12)$$

Aquí la sumatoria se hace sobre el volumen unitario del espacio. La reflectividad radárica tiene unidades de cm^{-1} y es un parámetro intensivo más que extensivo y corresponde a todos los blancos individuales en el volumen muestreado pero normalizado a la unidad de volumen.

Un parámetro muy importante es el relacionado con el área de la sección transversal de retrodispersión, si las partículas son pequeñas comparadas con la longitud de onda, se aplica la aproximación de Rayleigh. Si las partículas son grandes comparadas con la longitud de onda, los blancos estarán en la región óptica, y si son intermedios serán dispersores de Mie. Para la mayoría de radares meteorológicos, las gotas de lluvia a pesar de

ser consideradas pequeñas comparadas con la longitud de onda, y por lo tanto se aplica la aproximación de Rayleigh que se muestra a continuación:

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4} \quad (3.13)$$

Donde σ_i es el área de la sección transversal de retrodispersión e la i-esima esfera, λ es la longitud de onda, D es el diámetro de la gota y K es un parámetro relacionado con el índice complejo de refracción y está definido como:

$$K = \frac{m - 1}{m^2 - 2} \quad (3.14)$$

El valor de $|K|^2$ depende del material de la esfera, de la temperatura y de la longitud de onda del radar, para el agua toma un valor de 0,97 y para el hielo 0,197. En la figura 3.2 se puede observar la comparación de la aproximación de Rayleigh con la teoría de dispersión de Mie para dos tipos de objetos (Esferas de agua y esferas de hielo).

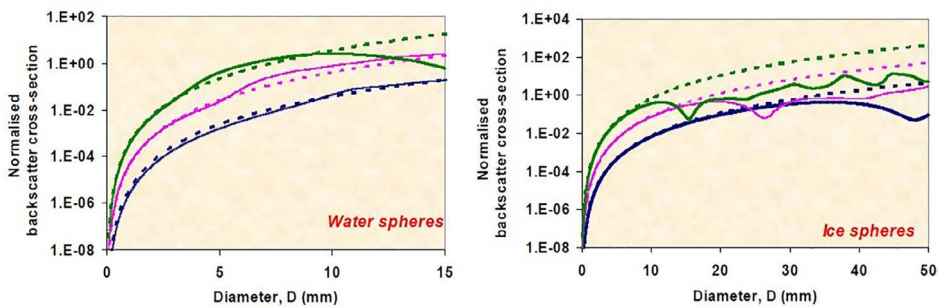


Figura 3.2: Sección transversal de retrodispersión.

Izquierda Esferas de Agua, Derecha Esferas de hielo. Línea Continua Solución Dispersores de Mie, Línea discontinua Aproximación de Rayleigh. Azul Banda S, Magenta Banda C y Verde Banda X.

Fuente: (Bringi et al., 2007)

Teniendo en cuenta la aproximación de Rayleigh y la expresión 3.12 para la sección transversal de retrodispersión podemos encontrar una nueva ecuación del radar como se muestra a continuación:

$$\overline{P_r} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \theta \phi h}{1024 \ln(2) \pi^2 r^2} \sum_{vol} \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4}$$
$$\overline{P_r} = \frac{\pi^3 P_t G^2 \theta \phi h |K|^2}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2} \sum_{vol} D_i^6 \quad (3.15)$$

Esta ecuación resulta muy importante si se conoce el diámetro de todas las gotas en la unidad de volumen, pero generalmente no se dispone de esta información por lo tanto se define un parámetro final llamado Factor de reflectividad Radárica el cual está dado por:

$$Z = \sum_{vol} D_i^6 \quad (3.16)$$

En este caso la sumatoria se realiza sobre el volumen unitario y no sobre el volumen total muestreado por el radar. Haciendo esta sustitución finalmente se encuentra lo siguiente:

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t G^2 \theta \phi h |K|^2 Z}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2} \quad (3.17)$$

Donde:

P_r	= Potencia en la antena receptora debida al blanco.
P_t	= Potencia radiada por el transmisor.
λ	= Longitud de onda.
Z	= Factor de reflectividad Radárica.
K	= Índice complejo de refracción.
h	= Longitud del pulso en el espacio (cτ)
G	= Ganancia de la antena.
r	= Distancia entre el blanco y la antena del radar.
Θ, ϕ	= Ángulos de -3 dB del Haz del Radar.

La ecuación anterior es conocida como la ecuación general del radar meteorológico y es utilizada siempre y cuando las partículas cumplan con la condición de Rayleigh (si las partículas son pequeñas comparadas con la longitud de onda).

Comúnmente es utilizado el valor de reflectividad radárica η el cual se relaciona con el factor de reflectividad radárica Z a través de la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\pi^5 |K|^2 Z}{\lambda^4} \quad (3.18)$$

La potencia que llega al radar puede ser disminuida por una serie de factores (nubes, granizo, nieve, guías de onda, etc..) esta pérdida de potencia al viajar por un medio se llama atenuación y siempre reduce la potencia recibida en el receptor del radar. Para completar la expresión del radar se incluye un nuevo término “I” el cual hace referencia a las pérdidas por atenuaciones. Este valor está entre 0 y 1 y generalmente esta mucho más cerca a 1, por lo tanto la ecuación final se puede escribir de esta forma:

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t G^2 \theta \phi h |K|^2 Z I}{1024 \ln(2) \lambda^2 r^2} \quad (3.19)$$

Este término I muchas veces debido a que es un factor desconocido, es omitido de las expresiones de cálculo de potencia recibida.

Para un radar que este normalmente operando, es posible simplificar la ecuación del radar debido a que muchos términos son constantes, de esta manera podemos tener la siguiente expresión:

$$P_r = \frac{C_1 |K|^2 Z}{r^2} \quad (3.20)$$

Donde C_1 es la constante del radar y está definida por:

$$C_1 = \frac{\pi^3 P_t G^2 \theta \phi h}{1024 \ln(2) \lambda^2} \quad (3.21)$$

Si se está interesado en hidrometeoros líquidos más que en hielo se puede sustituir $|K|^2$ por su valor específico y entonces se tiene:

$$P_r = \frac{C_2 Z}{r^2} \quad (3.22)$$

Donde C_2 es la nueva constante del radar incluyendo $|K|^2$ y está definida por:

$$C_2 = \frac{\pi^3 P_t G^2 \theta \phi h |K|^2}{1024 \ln(2) \lambda^2} \quad (3.23)$$

Teniendo en cuenta que el interés principal del radar es medir el factor de reflectividad radárica Z , se puede reorganizar la ecuación (3.22) de la siguiente manera:

$$Z = C_3 P_r r^2 \quad (3.24)$$

Donde C_3 es el inverso de la constante del radar y está dada por:

$$C_3 = \frac{1024 \ln(2) \lambda^2}{\pi^3 P_t G^2 \theta \phi h |K|^2} \quad (3.25)$$

Debido a que el factor de reflectividad radárica se usa comúnmente en unidades logarítmicas, podemos convertir la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$Z_{dB} = C_{3dB} + P_{rdB} + 20 \log_{10}(r) \quad (3.26)$$

Par el radar WSR-88 D, la constante del radar es de 64,9dB , la potencia mínima discernible es de - 113dB.

3.1 Imágenes Generadas Por Un Radar Meteorológico

A partir de la información registrada por el radar en las diversas elevaciones se suelen generar dos tipos de imágenes:

3.1.1 PPI (Plan Position Indicator)

Correspondiente con la reflectividad registrada en cada una de las elevaciones y que se proyecta sobre el plano horizontal como se observa en la figura 3.3, que solo produce una imagen bidimensional del retorno el radar. Debe recordarse que los datos (retornos) vienen de diferentes distancias al radar, a diferentes alturas arriba del terreno.

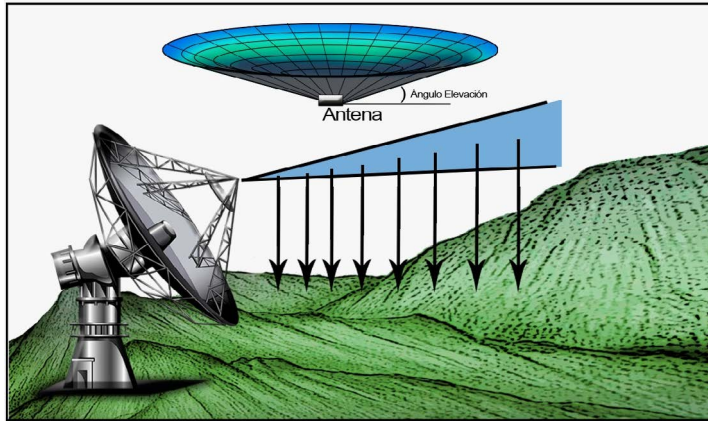


Figura 3.3: Proyección del PPI sobre la horizontal
Fuente: (Radar Meteorology, 1997)

3.1.2 CAPPI (Constant altitude plan position indicator)

Este segundo tipo de imagen trata de representar la reflectividad registrada sobre un plano a una altura constante. Para generar este segundo tipo de imagen se utilizan aquellos fragmentos de información de las diversas elevaciones que se encuentran más cerca de la altura para la que se quiere generar el CAPPI como se observa en la figura 3.4.

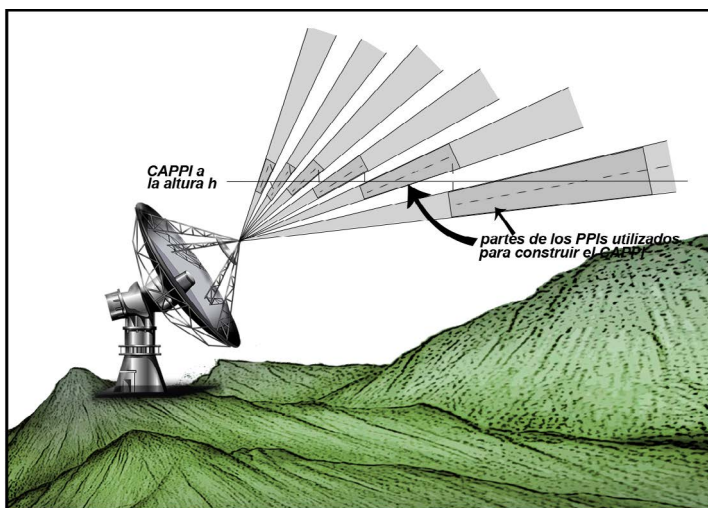


Figura 3.4: Fragmentos de elevación utilizados para generar una imagen CAPPI
FUENTE: (Radar Meteorology, 1997)

3.2 Variables polarimétricas

Como la principal dificultad en las mediciones con radares está relacionada básicamente con el diámetro de las gotas, se llega al uso de los Radares polarimétricos. Estos, tienen la capacidad de emitir microondas con doble polarización, lo que incorpora nuevas variables de medición, además de Z (reflectividad), denominadas variables polarimétricas, la diferencia específica de fase (K_{DP}) y la reflectividad diferencial (Z_{DR}). La primera de estas variables, K_{DP} , da una estimación de la diferencia de fase específica entre las señales recibidas.

Esto se logra, cuando las gotas son grandes y se encuentran deformadas generando una diferencia de caminos ópticos entre la radiación con polarización horizontal y vertical. Por otro lado, Z_{DR} se define como el cociente entre la reflectividad horizontal Z_h y la vertical Z_v que recibe el radar brindando una estimación de la forma de los Hidrometeoros. Esta medición muestra que mientras mayor sea el valor de Z_{DR} más grandes y más deformadas serán las gotas y cuando más cercanos a uno estén estos valores, más pequeñas y más esféricas serán (Zrnic et al. 2001).

3.2.1 Diferencial de reflectividad Z_{DR}

El diferencial de reflectividad Z_{DR} está definido como:

$$Z_{DR} = 10 \log_{10} \left(\frac{Z_{hh}}{Z_{vv}} \right) \quad (3.27)$$

Dónde:

Z_{hv} es la reflectividad horizontal y Z_{vv} es la reflectividad vertical. El parámetro anterior mide la proporción de señal recibida en la vertical respecto a la horizontal.

3.2.2 Diferencial específico de fase K_{DP}

El diferencial específico de fase se define como la variación con respecto al rango del radar (r) de la fase (ϕ) entre la reflectividad horizontal y la vertical como se aprecia en la Figura 3.5:

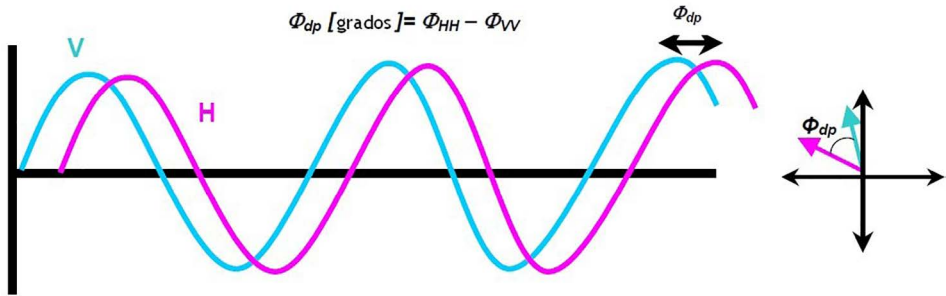


Figura 3.5: Diferencial de fase
Fuente: (Bringi et al., 2007)

El diferencial de fase específico se define con la siguiente expresión matemática en términos de la diferencia de fase ϕ_{DP} y el rango del radar r :

$$K_{dp} = \frac{1}{2} \frac{d}{dr} \phi_{dp} \quad (3.28)$$

3.2.3 La razón de despolarización lineal LDR

La razón de despolarización lineal es otro esquema que ha sido estudiando durante un par de décadas, En este caso el radar transmite polarización horizontal y recibe las señales de ambas polarizaciones vertical y horizontal. La LDR se define como:

$$LDR = 10 \log_{10} \left(\frac{Z_{HV}}{Z_{HH}} \right) \quad (3.29)$$

Dónde: Z_{HV} es la reflectividad horizontal debida a la onda vertical y Z_{HH} es la reflectividad horizontal debida a la onda horizontal.

3.2.4 Coeficiente de correlación ρ_{HV}

El coeficiente de correlación $\rho_{HV}(0)$, se define como la correlación entre las señales polarizadas horizontal y verticalmente en un punto dado en el espacio al mismo tiempo, la expresión matemática que define ese parámetro es la siguiente:

$$\rho_{HV} = \frac{\langle S_{vv} S_{HH}^* \rangle}{\langle |S_{HH}|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_{VV}|^2 \rangle^{1/2}} \quad (3.30)$$

PARÁMETRO VENTAJAS	Z_H	Z_{DR}	$\frac{K_{dp}}{\phi_{dp}}$	ρ_{CO}	L_{DR}	δ	$p^{HX},$ p^{HV}
Mejorar los estimadores de rangos de precipitación	X	X	X				
Clasificación de hidrometeoros	X	X	X	X	X		
Determinar las alturas del nivel de fusión		X		X	X	X	
Corregir la atenuación y/o fenómenos aleatorios			X				
Verificación de auto consistencia de la calibración Z	X	X	X				
Identificar dispersión en tierra y/o propagaciones anómalas		X	X	X			
Discriminar efectos de la dispersión en mar y propagaciones anómalas sobre el mar			X	X	X		
Identificar ecos biológicos como pájaros e insectos		X	X			X	
Superar problemas del bloqueo del haz			X				
Identificar regiones de cristales de varias orientaciones en nubes			X				X
Independiente de la calibración absoluta del radar		X	X	X		X	
Inmune a los efectos de la propagación			X	X			
Inmune al sesgo que produce el ruido			X			X	
Independiente de la concentración		X		X		X	

Tabla 3.1: Aplicaciones y ventajas de los observables polarimétricos.
Fuente: (Bringí, Thurai, and Hannezen 2007)

3.3. Meteoro e hidrometeoro

Según un informe de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1993), un meteoro “es un fenómeno observado en la atmósfera o sobre la superficie de la tierra, que consiste en una suspensión, una precipitación, o un depósito de partículas líquidas, acuosas o no, o de partículas sólidas, o un fenómeno de la naturaleza de manifestación óptica o eléctrica.”

Mientras que un hidrometeoro “es un meteoro que consiste en un conjunto de partículas de agua líquida o sólida, suspendidas en la atmósfera o cayendo a través de ella, o que son empujadas por el viento desde la superficie de la tierra, o depositadas sobre objetos que se encuentran sobre el suelo o en el aire libre. Los hidrometeoros que consisten en una suspensión de partículas en la atmósfera son: nubes, niebla (“nieblaz” “neblina”) y niebla helada. Los hidrometeoros que consisten en la caída de un conjunto de partículas (precipitación) son: Lluvia, llovizna, nieve, cinarra, nieve granulada, polvo de diamante, hielo granulado y granizo... Los hidrometeoros que consisten en partículas precipitantes se producen, ya sea en forma de precipitación más o menos uniforme (intermitente o continua), o como chaparrones. Los chaparrones se caracterizan por sus comienzos y finalizaciones bruscas, y por su variación en la intensidad de la precipitación, generalmente rápida y a veces violenta. Las gotas y las partículas sólidas que se precipitan en un chaparrón son habitualmente mayores que aquellas que caen en una precipitación de otro tipo. Los chaparrones caen de nubes convectivas, la precipitación que no cae en forma de chaparrón habitualmente lo hace desde nubes estratiformes”.

Capítulo 4

Análisis de datos

4.1. Descripción del radar y características de los datos utilizados

4.1.1. Características generales del radar Corozal

Radar banda C con polarización doble (radar de tipo polarimétrico), con una frecuencia de operación de 5.6246241GHz, con una frecuencia de repetición PRF (Pulse repetition frequency) de 500Hz, ubicado en el departamento de Sucre (Colombia), municipio de Corozal, específicamente en la cabecera del aeropuerto Las Brujas.



Figura 4.1: Imagen del radar Corozal
Fuente: (Google Maps)

Las coordenadas de ubicación del radar son: Latitud: 9,33099998161197, longitud: 75,2829999290407, altitud 143 m sobre el nivel del mar, 10 PPIs , cada uno con 664 celdas de tamaño 450m, con lo que se tiene un alcance de 298,8Km. Cubriendo las ciudades de Santa Marta, Barranquilla, Cartagena, Valledupar, Sincelejo, Montería, entre otras.

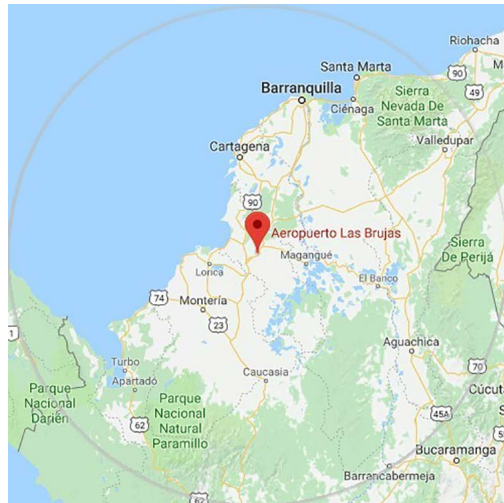


Figura 4.2: Ubicación geográfica del radar Corozal
Fuente: Google Maps

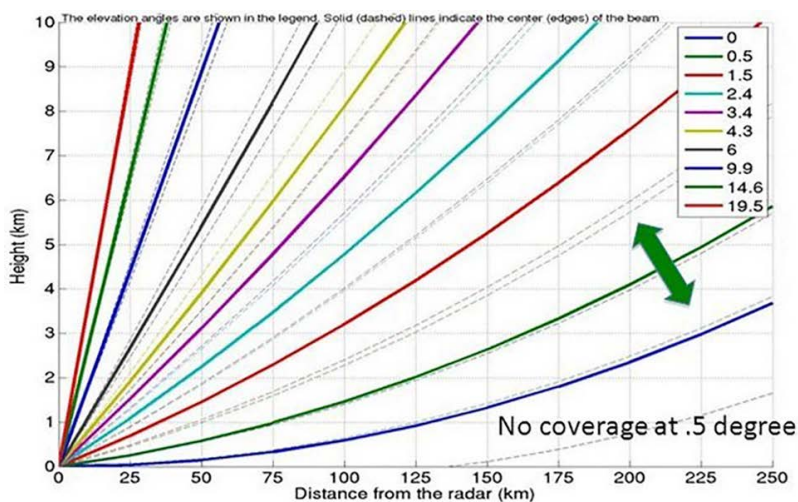


Figura 4.3: Elevación de los 10 PPIs del radar
Fuente: Washington coastal radar

4.1.2. Características de los datos generados por el radar

Los datos generados por el software del radar son almacenados en formato propietario de la marca fabricante del equipo en un archivo con extensión .NC cuyo nombre incluye la fecha y hora de la toma de los datos, el archivo crea 101 variables de las cuales solo 7 tienen información potencialmente útil para el desarrollo del algoritmo mostrado en el presente trabajo se incluyen los datos de las 664 celdas manejados por el radar, teniendo estas variables el formato mostrado en la Tabla 4.1

ID	Variable	Units	Sampling ratio	FillValue	Scale factor	Add offset
94	DBZ	dBZ	1	-128	0.5000	32
95	VEL	m/s	1	-128	0.0525	0
96	Z _{DR}	dB	1	-128	0.0625	0
97	KDP	deg/km	1	-128	1	128
98	PHIDP	Deg	1	-128	0.7087	90
99	RHOHV	*	1	-128	0.0040	0.5059
100	UNKNOWN_ID_55	*	1	-128	1	128

Tabla 4.1: Formato de los datos generados por el radar de Corozal

Dado que por las características del haz del radar existe la posibilidad de no tener la reflexión de dicho haz se debe representar este evento en el archivo generado, para esto se utiliza un valor de relleno (FillValue) en este caso en número -128.

4.1.3. Modelo de conversión de los datos generados por el radar

El archivo .NC del radar debe ser convertido a un formato adecuado inicialmente netCDF y luego a formato de texto plano para que los datos puedan ser analizados y utilizados por el algoritmo, para cada una de las variables mostradas en la Tabla 4.1 se deben utilizar el factor de escala y el offset, dado que el valor almacenado se representa por facilidad y ahorro de espacio como un número entero de 8 bits con signo.

En la Ecuación 4.1 se muestra el formato utilizado para convertir cada una de las variables numeradas con el ID del 94 al 100 de la tabla.

$$VarConvertida = (VarOriginal * ScaleFactor) + Offset \quad (4.1)$$

Cuando aparece un valor de relleno este no se convierte permaneciendo en -128. Además, la variable 100 que no tiene nombre asignado en la tabla es utilizada para la clasificación de hidrometeoros. Lo anterior puede verse gráficamente en el diagrama de flujo de la Figura 4.4.

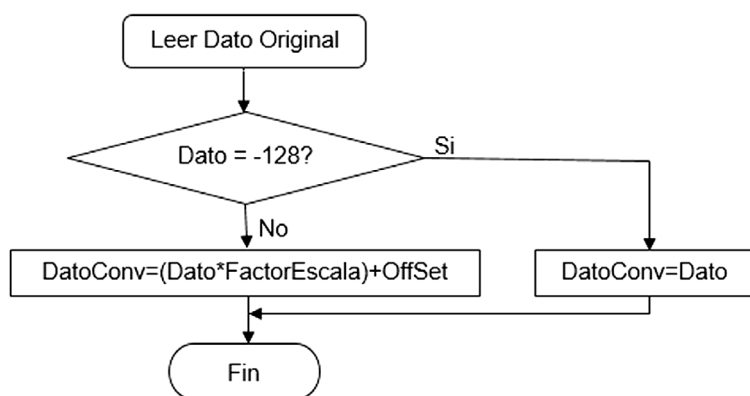


Figura 4.4: Diagrama de flujo para la conversión de datos generados por el radar

Fuente: Propia

4.1.4. Eventos analizados en el radar de Corozal

En la Tabla 4.2 se resumen las características generales de los 5 eventos de precipitaciones de diversas índoles utilizados para el desarrollo del

algoritmo de detección y corrección de propagaciones anómalas, en esta se muestran la cantidad de datos obtenidos por el radar para cada evento.

Evento No.	Fecha	Evento					
		Eco de Tierra /AP	Dispersión Biológica	Precipitación Suave	Precipitación Moderada	No Usada	Total
1	25/06/2013	8793	7608	65265	9829	1584	93079
2	28/06/2013	12131	7563	83875	11255	1596	116420
3	11/07/2013	7832	9340	105464	8101	464	131210
4	29/07/2013	9537	9409	48533	8747	2406	78632
5	30/07/2013	8397	7935	68622	5763	1195	91912

Tabla 4.2: Descripción de eventos utilizados para el desarrollo del algoritmo de detección y corrección

4.2. Conversión de datos a formato *netCDF* y texto

Dado que la información generada por el radar está en un formato propietario del fabricante del equipo se hace necesaria la conversión de dicha información a formato *netCDF* (formulario de datos comunes en red), que es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como Z , K_{DR} , K_{DP} , velocidad doppler entre otras, para luego convertirla en texto plano para ser analizada en una hoja de cálculo de Excel.

La herramienta de software MATLAB R2017b fue utilizada para esta labor, cabe aclarar que la Universidad Distrital posee la respectiva licencia para su uso tanto académico como investigativo, ya que permite de manera directa realizar la conversión al formato *netCDF* y también la creación de las hojas de cálculo.

La función de MatLab utilizada inicialmente es `netcdf.open()` que abre el archivo con extensión `.NC` como un archivo de solo lectura y almacena la

información leída en una única variable (en este caso la variable x). Luego con estos datos se obtiene la información del número de variables del archivo, atributos globales y el ID de cada una de ellas con la función `netcdf.inq()` (Figura 4.5).

```
x = netcdf.open('E:\Datos_Radar\Tab\tab20120925_052004.nc','nc_nowrite');

[numdims, numvars, numglobalatts, unlimdimID] = netcdf.inq(x); %informacion general del archivo, dimensiones, variables

%Correccion Reflectividad
[varname, xtype, varDimIDs, varAtts] = netcdf.inqVar(x,94); %informacion variables 94
varid = netcdf.inqVarID(x,varname); %Se obtiene el numero de la variable
data = netcdf.getVar(x,varid);
Z=data; %para extraer el PP1
data_raw(:,1)=Z;
[F C]=size(Z);
% total = [];

for ff=1:F;
if (Z(ff,1)==-128)
    Z(ff,1)= Z(ff,1);
else
    Z(ff,1)=(Z(ff,1)*0.5)+32;
end
end
```

Figura 4.5: Código del proceso de conversión del archivo a formato netCDF

Fuente: Propia

El siguiente paso es separar cada una de las variables de interés para así poderlas analizar de manera individual. Para esta tarea se utiliza inicialmente la función `netcdf.inqVar()`, que requiere como parámetros de entrada la información almacenada en la variable x y el número de la variable a separar, en la Figura 4.6 se muestra el proceso para la variable 98 denominada Z.

La información de la variable leída es transferida a una matriz por medio de la función `netcdf.getVar()`, para finalizar el proceso se realiza el ajuste de los datos haciendo uso de la Ecuación 4.1 y en general aplicando los parámetros de ajuste mostrados en el diagrama de flujo de la Figura 4.4.

Para las demás variables (K_{DP} , Z_{DR} , ϕ_{DP} , P_{HV} , velocidad y clasificador de hidrometeoros) se sigue exactamente el mismo procedimiento antes descrito, cambiando para cada caso los parámetros de ajuste final con los valores mostrados en la Tabla 4.1 . Esto puede verse detalladamente en la Figura 4.6 , Figura 4.7 y Figura 4.8

```

%Correccion KDP
[varname, xtype, varDimIDs, varAtts] = netcdf.inqVar(x,98);%informaci n variables
data2 = netcdf.getVar(x,varid);
KDP=data2;

for ff=1:F;
if (KDP(ff,1)==-128)
    KDP(ff,1)= KDP(ff,1);
else
KDP(ff,1)=(KDP(ff,1))+128;
end
end

% Correccion ZDR
[varname, xtype, varDimIDs, varAtts] = netcdf.inqVar(x,96);%informaci n variables
data3 = netcdf.getVar(x,varid);
ZDR=data3;

for ff=1:F;
if (ZDR(ff,1)==-128)
    ZDR(ff,1)=ZDR(ff,1);
else
    ZDR(ff,1)=(ZDR(ff,1))*0.0625;
end
end
end

```

Figura 4.6: Código para la obtención de datos de los parámetros K_{DP} y Z_{DR}
Fuente: Propia

```

%Correccion Fase
[varname, xtype, varDimIDs, varAtts] = netcdf.inqVar(x,99);%informaci n variables
data4 = netcdf.getVar(x,varid);
PHV=data4;

for ff=1:F;
if (PHV(ff,1)==-128)
    PHV(ff,1)= PHV(ff,1);
else
    PHV(ff,1)=((PHV(ff,1))+0.708661)+90;
end
end

% Correccion rohv
[varname, xtype, varDimIDs, varAtts] = netcdf.inqVar(x,100);%informaci n variables
data5 = netcdf.getVar(x,varid);
ROHV=data5;
for ff=1:F;
if (ROHV(ff,1)==-128)
    ROHV(ff,1)=ROHV(ff,1);
else
    ROHV(ff,1)=((ROHV(ff,1))+0.00395257)+0.505929;
end
end
end

```

Figura 4.7: Código para la obtención de datos de los parámetros ϕ_{DP} y P_{HV}
Fuente: Propia

```
%Correccion velocidad
[varname, xtype, varDimIDs, varAtts] = netcdf.inqVar(x,95);%informacion variables
data7 = netcdf.getVar(x,varid);
vel=data7;
for ff=1:F;
if (vel(ff,1)==-128)
    vel(ff,1)=vel(ff,1);
else
    vel(ff,1)=((vel(ff,1))+0.0525);
end
end

%Correccion clasificador

[varname, xtype, varDimIDs, varAtts] = netcdf.inqVar(x,101);%informacion variables
data6 = netcdf.getVar(x,varid);
HC=data6;

for ff=1:F;
    if (HC(ff,1)==-128)
        HC(ff,1)=HC(ff,1);
    else
        HC(ff,1)=(HC(ff,1))+128 ;
    end
end

end
```

Figura 4.8: Código para la obtención de datos de los parámetros velocidad y clasificador
FUENTE: Propia

Luego de tener todas las variables separadas el último paso del proceso es crear un archivo en una hoja de cálculo de Excel (Figura 4.9), cada variable es almacenada en formato de matriz de tamaño 360x664 (360x664 celdas).

```
total=[Z,KDP,ZDR,PHV,ROHV,vel,HC];
totalPPI1 = [];

for col=1:7;
for fila=1:239040;
totalPPI1(fila,col)=[total(fila,col)];
end
end
rr=xlswrite('E:\Datos_Radar\Tab\tab20120925_052004.xlsx',totalPPI1,'H1','A2');
zppi=xlsread('E:\Datos_Radar\Tab\tab20120925_052004.xlsx','H1','A2:A239041');

mat = [];

for ccc=1:360
for fff=1:664
mat(fff,ccc)=zppi((ccc-1)*664+fff);
end
end

rrr=xlswrite('E:\Datos_Radar\Tab\tab20120925_052004.xlsx',mat,'PPI1_Z','A1');
```

Figura 4.9: Código para la creación de hoja de cálculo con datos del PPI analizador
Fuente: Propia

4.3. Análisis estadístico de los datos

A continuación, se presenta el análisis estadístico para cada uno de los cinco eventos seleccionados para el desarrollo del algoritmo.

4.3.1. Evento 1 de precipitación del 25/06/2013

Para el evento 1 del 25/06/2013 con 93079 datos se obtienen los resultados estadísticos mostrados en la Tabla 4.3, la variable (ϕ_{DP}) es la que presenta una mayor variabilidad con distribución leptocúrtica con un grado de concentración bajo, aunque para el desarrollo del algoritmo se utiliza la desviación estándar o textura como también se conoce de dicha variable $SD(\phi_{DP})$, que también tiene una gran variación, la textura es parte del clasificador versión 1 utilizado en (Schuur, T., A. Ryzhkov and P. Heinselman, 2003), que se aplicó en el desarrollo del proyecto, la selección de variables será explicado más adelante.

Para las variables Z_{DR} , $SD(Z)$ y p_{HV} la distribución también es leptocúrtica teniendo un alto grado de concentración de los valores centrales de cada variable. Para Z , Z_{DR} y p_{HV} se tiene una distribución asimétrica negativa (Moda > Mediana > Media). ϕ_{DP} , K_{DP} , $SD(Z)$ y $SD(\phi_{DP})$ tienen una distribución asimétrica positiva (Media > Mediana > Moda).

Tabla 4.3: Resultados análisis estadístico datos evento 1 de precipitación del 25/06/2013

	Z	Z_{DR}	p_{HV}	ϕ_{DP}	K_{DP}	$SD(Z)$	$SD(\phi_{DP})$
Media	24,5284	2,8526	0,8801	56,7108	0,086	2,412	7,1125
Mediana	25,5	3,1875	0,9939	52,4389	0	1,5275	2,1651
Moda	28	4	1,0099	-0,7136	0	0,7638	0
Desviación Estandar	10,8503	2,3167	0,2864	33,9008	22,7865	5,4313	16,8587
Varianza	117,7284	5,3671	0,082	1149,262	519,2242	29,4987	284,2158
Curtosis	0,581	6,6265	5,1905	1,5439	40,5585	170,4093	21,9331
Coefficiente Asimetría	-0,4691	-1,8089	-2,6119	0,7819	1,1187	12,0475	4,4222

Lo anterior puede verse en las gráficas de tendencia (histogramas) generadas para cada una de las variables y que son mostradas las Figura 4.10 a Figura 4.15.

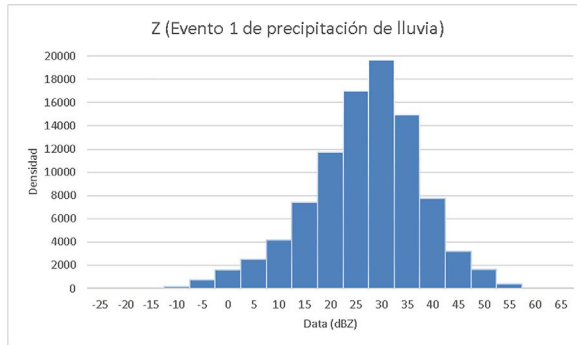


Figura 4.10: Histograma variable Z evento 1 de precipitación del 25/06/2013
Fuente: Propia

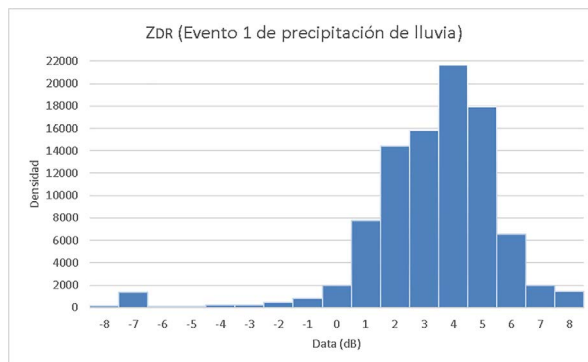


Figura 4.11: Histograma variable Z_{DR} evento 1 de precipitación del 25/06/2013
Fuente: Propia



Figura 4.12: Histograma variable p_{HV} evento 1 de precipitación del 25/06/2013
Fuente: Propia

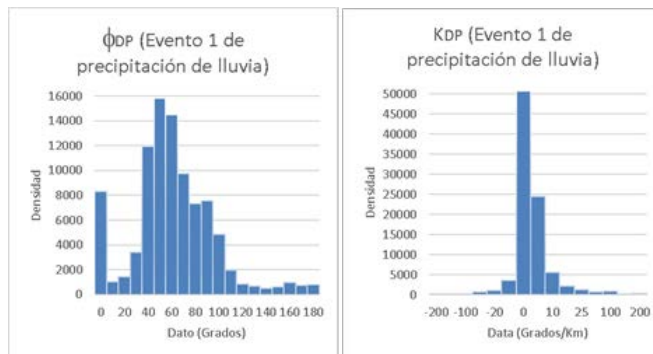


Figura 4.13: Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 1 de precipitación del 25/06/2013
Fuente: Propia

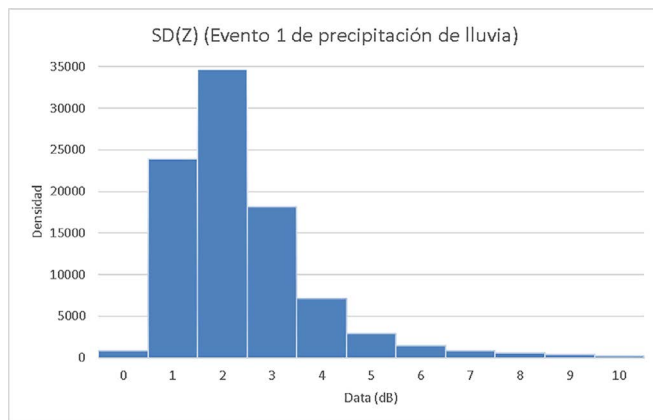


Figura 4.14: Histograma variable $SD(Z)$ evento 1 de precipitación del 25/06/2013
Fuente: Propia

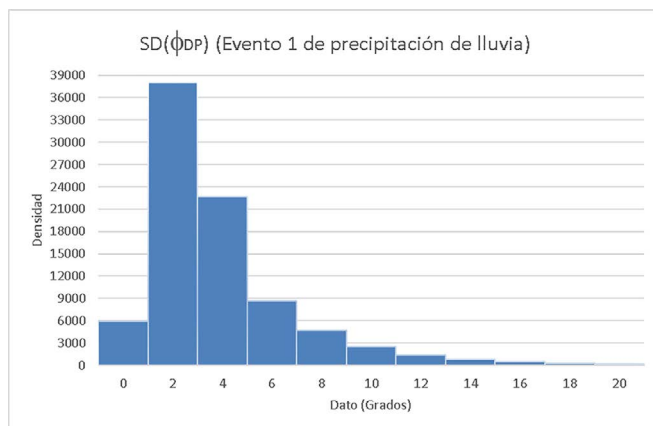


Figura 4.15: Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 1 de precipitación del 25/06/2013
Fuente: Propia

4.3.2. Evento 2 de precipitación del 28/06/2013

Para el evento 2 del 28/06/2013 con 116420 datos se obtienen los resultados estadísticos mostrados en la Tabla 4.4. Resaltándose que la distribución de la variable Z muestra información concentrada en una zona que se considera con presencia de lluvia de diversos tipos.

Para las variables Z_{DR} , $SD(Z)$ y p_{HV} la distribución igual que en el evento 1 también es leptocúrtica teniendo un alto grado de concentración de los valores centrales de cada variable. Para Z , Z_{DR} y p_{HV} se tiene una distribución asimétrica negativa y para ϕ_{DP} , K_{DP} , $SD(Z)$ y $SD(\phi_{DP})$ tienen una distribución asimétrica positiva.

	Z	Z_{DR}	p_{HV}	ϕ_{DP}	K_{DP}	$SD(Z)$	$SD(\phi_{DP})$
Media	25,1259	2,291	0,8727	45,2824	0,1219	2,0721	5,6301
Mediana	24,5	2	0,9939	41,0997	0	1,4434	1,4753
Moda	23	1,3125	1,0019	-0,7136	0	0,7638	0
Desviación Estándar	9,7648	2,0929	0,305	29,11	20,1055	4,7508	14,2023
Varianza	95,3509	4,3801	0,093	847,3948	404,231	22,5702	201,7061
Curtosis	0,7056	7,7997	4,16	5,3095	50,527	237,1824	26,8917
Coefficiente Asimetría	-0,1035	-1,5314	-2,4365	1,6103	1,383	14,1925	4,8118

Tabla 4.4: Resultados análisis estadístico datos evento 2 de precipitación del 28/06/2013

Lo anterior puede verse en las gráficas de tendencia (histogramas) generadas para cada una de las variables y que son mostradas en las Figuras 4.16 a Figura 4.21.

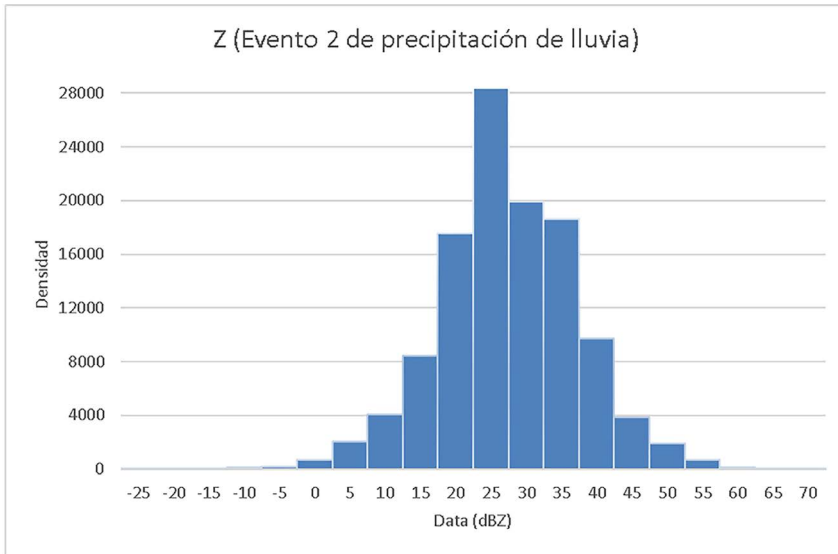


Figura 4.16: Histograma variable Z evento 2 de precipitación del 28/06/2013
Fuente: Propia

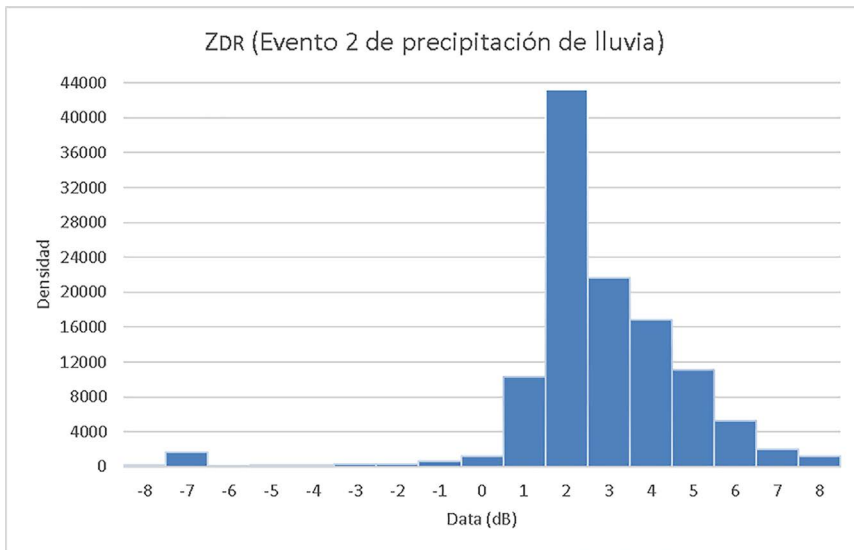


Figura 4.17: Histograma variable Z_{DR} evento 2 de precipitación del 28/06/2013
Fuente: Propia

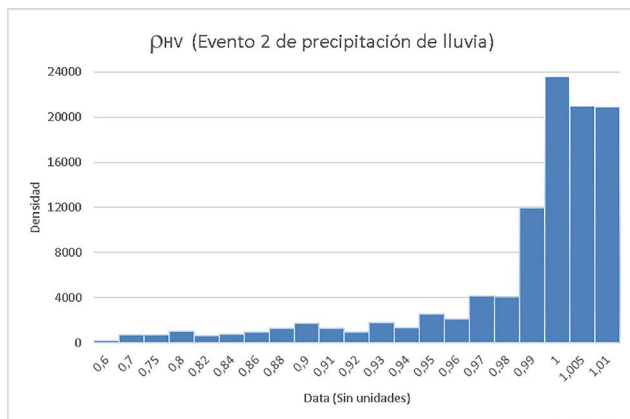


Figura 4.18: Histograma variable ρ_{HV} evento 2 de precipitación del 28/06/2013
Fuente: Propia

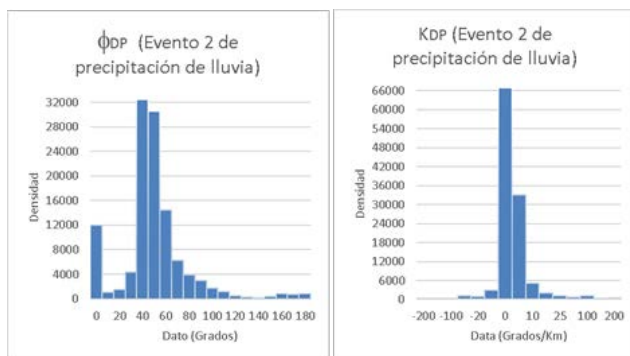


Figura 4.19: Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 2 de precipitación del 28/06/2013
Fuente: Propia

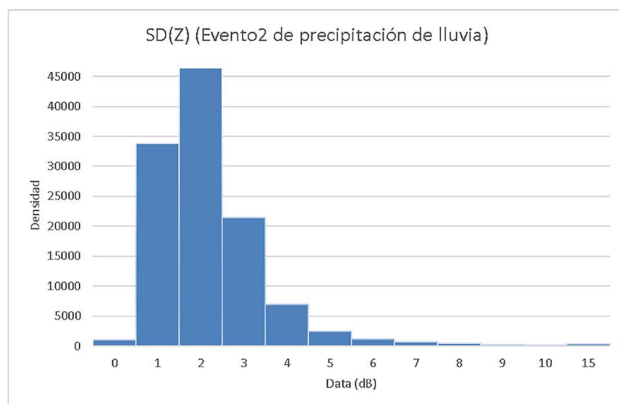


Figura 4.20: Histograma variable $SD(Z)$ evento 2 de precipitación del 28/06/2013
Fuente: Propia

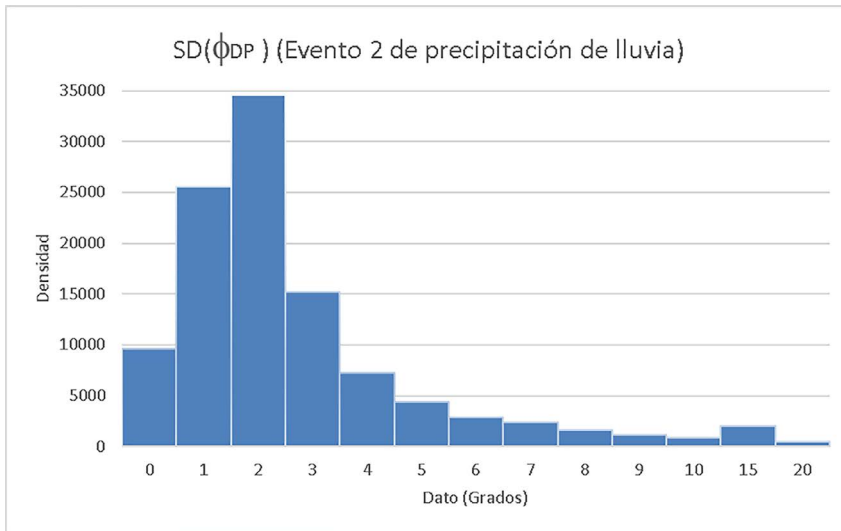


Figura 4.21: Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 2 de precipitación del 28/06/2013
Fuente: Propia

4.3.3 Evento 3 de precipitación del 11/07/2013

Para el evento 3 del 11/07/2013 con 131210 datos se obtienen los resultados estadísticos mostrados en la Tabla 4.5.

	Z	Z_{DR}	p_{HV}	ϕ_{DP}	K_{DP}	$SD(Z)$	$SD(\phi_{DP})$
Media	25,663	3,0447	0,8854	51,5903	0,1105	2,0463	6,3234
Mediana	26,5	3,0625	0,9939	48,1867	0	1,5	1,875
Moda	28	2,25	1,0019	-0,7136	0	0,7638	1,0826
Desviación Estándar	7,5893	2,1522	0,2793	31,2986	21,9198	4,8072	15,1702
Varianza	57,5981	4,6321	0,078	979,6016	480,4774	23,1092	230,1338
Curtosis	1,2616	8,9818	5,7441	4,1663	45,3377	246,6555	24,3211
Coficiente Asimetría	-0,5427	-1,9304	-2,7072	1,5071	0,9983	14,6786	4,6656

Tabla 4.5: Resultados análisis estadístico datos evento 3 de precipitación del 11/07/2013

Resultados análisis estadístico datos evento 3 de precipitación del 11/07/2013

Lo anterior puede verse en las gráficas de tendencia (histogramas) generadas para cada una de las variables y que son mostradas las Figuras 4.22 a Figura 4.27.

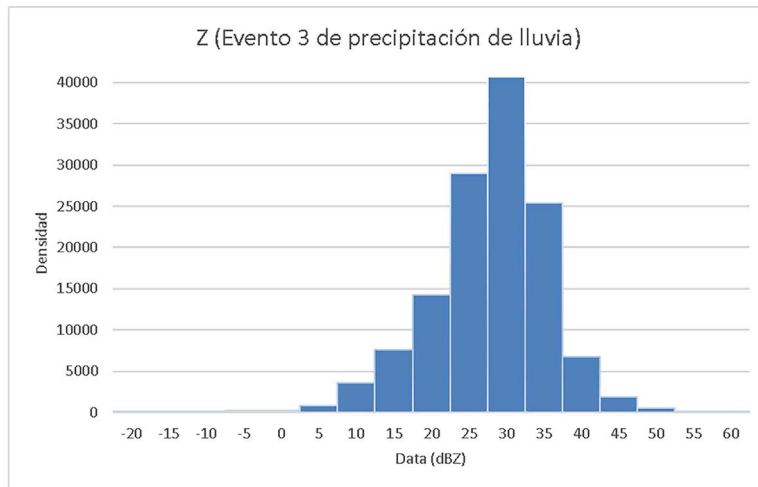


Figura 4.22: Histograma variable Z evento 3 de precipitación del 11/07/2013
Fuente: Propia

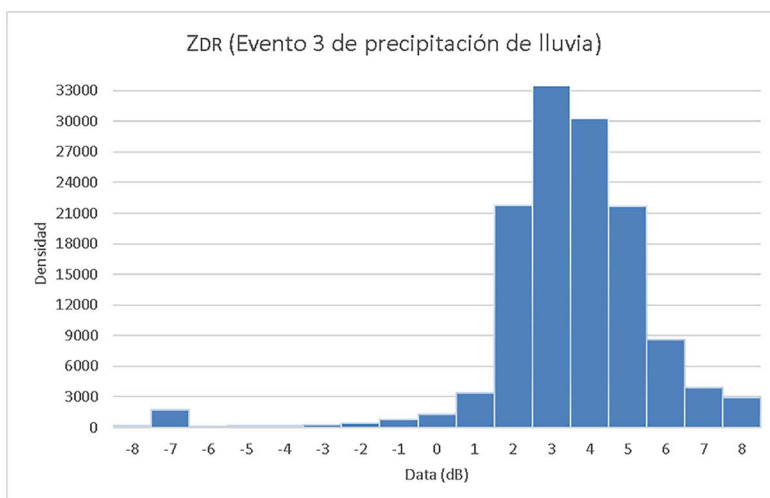


Figura 4.23: Histograma variable Z_{DR} evento 3 de precipitación del 11/07/2013
Fuente: Propia

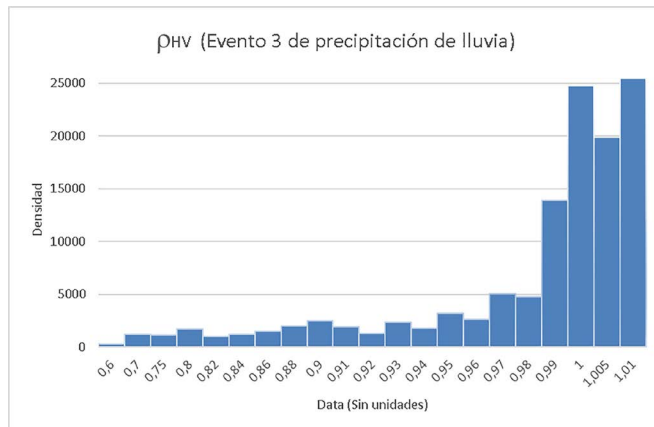


Figura 4.24: Histograma variable ρ_{HV} evento 3 de precipitación del 11/07/2013
Fuente: Propia

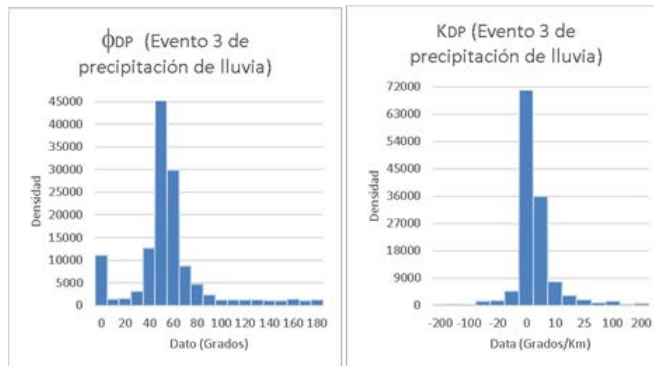


Figura 4.25: Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 3 de precipitación del 11/07/2013
Fuente: Propia

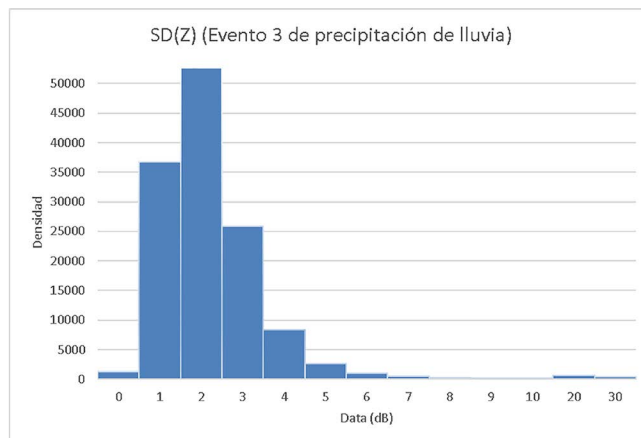


Figura 4.26: Histograma variable $SD(Z)$ evento 3 de precipitación del 11/07/2013
Fuente: Propia

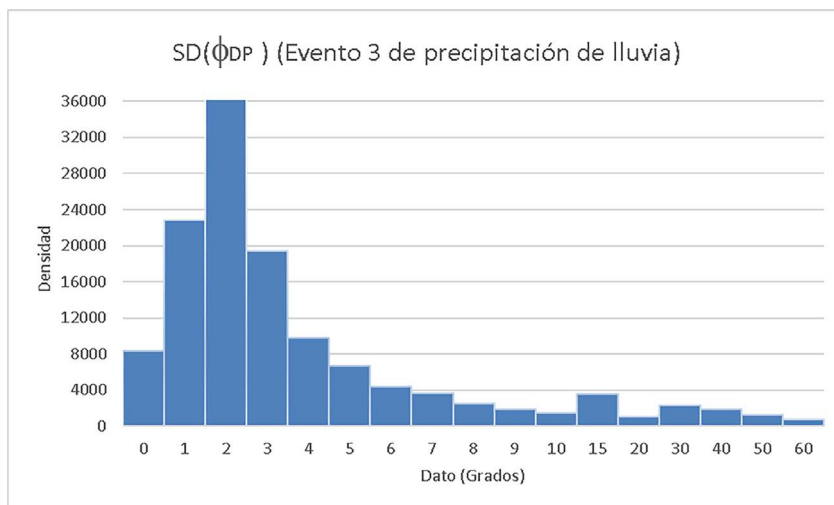


Figura 4.27: Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 3 de precipitación del 11/07/2013
Fuente: Propia

4.3.4 Evento 4 de precipitación del 29/07/2013

Para el evento 4 del 29/07/2013 con 78.632 datos se obtienen los resultados estadísticos mostrados en la Tabla 4.6. Para este evento la distribución de Z es platicúrtica mostrando una baja concentración alrededor de los valores centrales de dicha variable, asimétrica negativa.

	Z	Z_{DR}	P_{HV}	ϕ_{DP}	K_{DP}	$SD(Z)$	$SD(\phi_{DP})$
Media	22,5246	2,1034	0,7968	47,896	0,1957	2,3502	7,4716
Mediana	23,5	1,875	0,9779	43,2258	0	1,5	2,1261
Moda	27	1,3125	-0,0061	-0,7136	0	0,7638	0
Desviación Estándar	13,0999	2,461	0,3602	35,6689	23,6094	5,9504	17,279
Varianza	171,608	6,0564	0,1297	1272,2702	557,4016	35,407	298,5627
Curtosis	-0,2003	5,496	0,9544	2,1802	38,4054	142,1431	20,8557
Coefficiente Asimetría	-0,1711	-1,3762	-1,6571	1,1388	1,2172	11,3451	4,2648

Tabla 4.6: Resultados análisis estadístico datos evento 4 de precipitación del 29/07/2013

Lo anterior puede verse en las gráficas de tendencia (histogramas) generadas para cada una de las variables y que son mostradas las figuras 4.28 a 4.33.

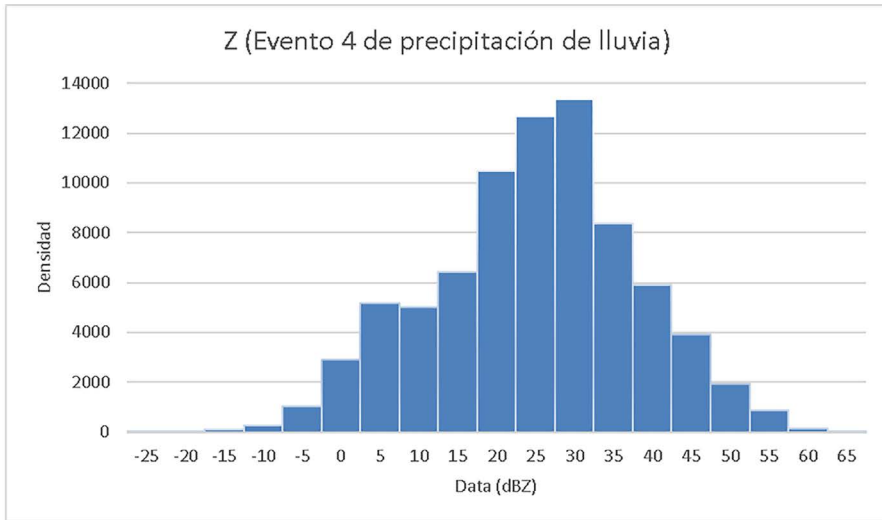


Figura 4.28: Histograma variable Z evento 4 de precipitación del 29/07/2013
Fuente: Propia

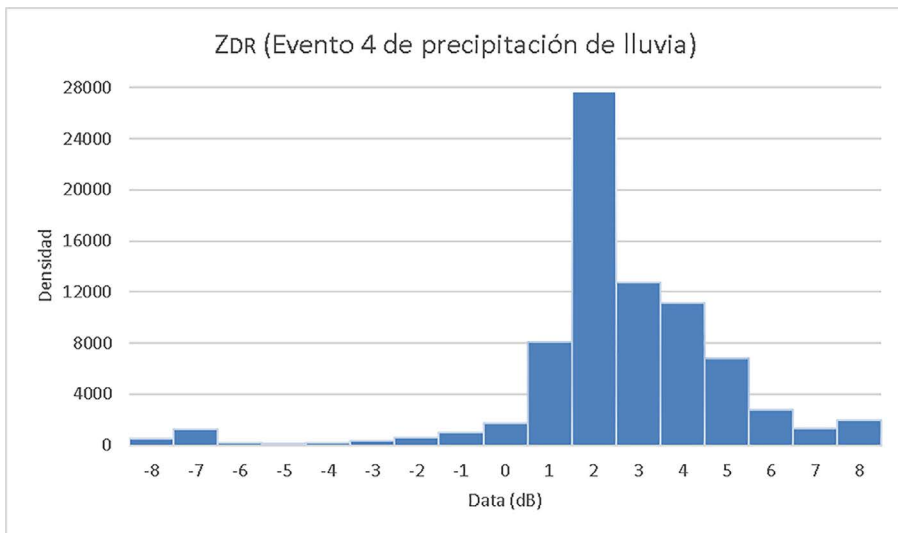


Figura 4.29: Histograma variable Z_{DR} evento 4 de precipitación del 29/07/2013
Fuente: Propia

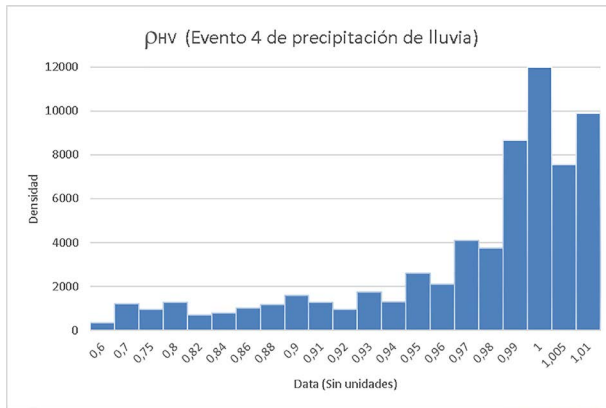


Figura 4.30: Histograma variable ρ_{HV} evento 4 de precipitación del 29/07/2013
Fuente: Propia

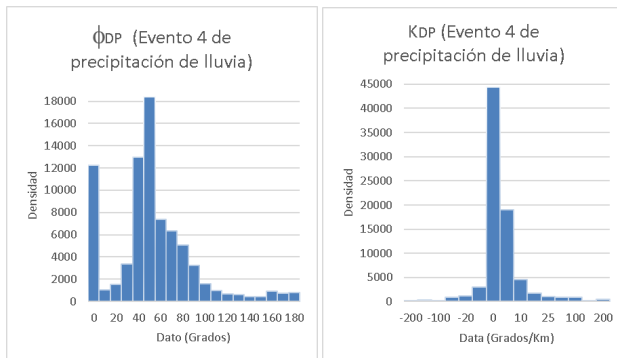


Figura 4.31: Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 4 de precipitación del 29/07/2013
Fuente: Propia

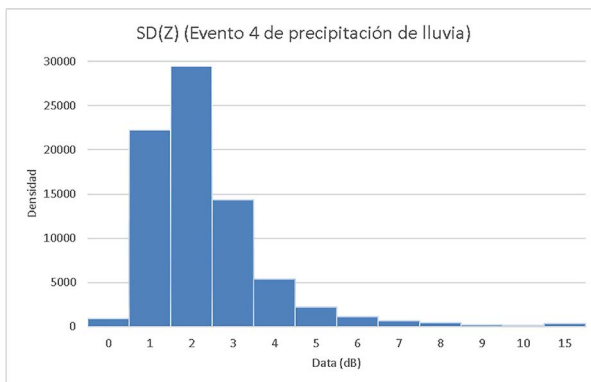


Figura 4.32: Histograma variable $SD(Z)$ evento 4 de precipitación del 29/07/2013
Fuente: Propia

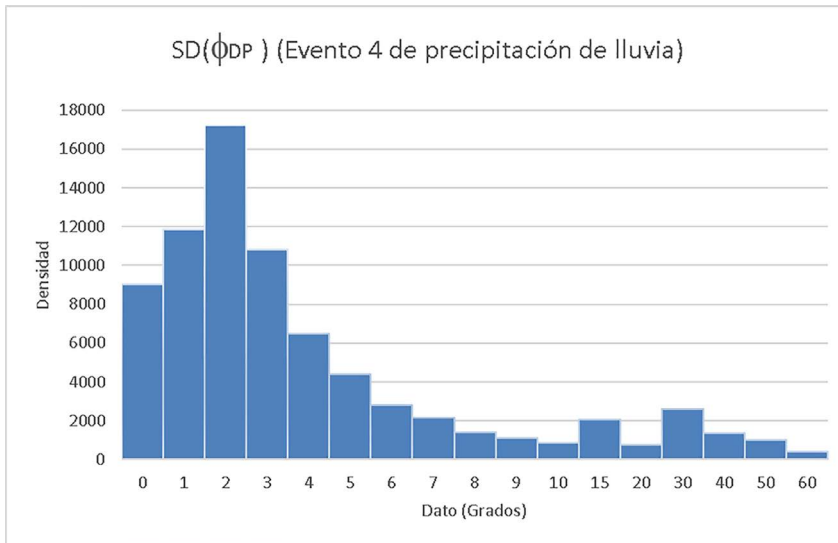


Figura 4.33: Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 4 de precipitación del 29/07/2013
Fuente: Propia

4.3.5 Evento 5 de precipitación del 30/07/2013

Para el evento 5 del 30/07/2013 con 91912 datos se obtienen los resultados estadísticos mostrados en la Tabla 4.7.

	Z	Z_{DR}	p_{HV}	ϕ_{DP}	K_{DP}	$SD(Z)$	$SD(\phi_{DP})$
Media	22,2944	2,2735	0,8618	45,5842	0,2152	2,3903	6,7157
Mediana	23,5	2,3125	0,9899	41,8084	0	1,6073	1,875
Moda	25	1,25	1,0019	-0,7136	0	0,7638	0
Desviación Estándar	10,8616	2,2891	0,3078	32,4435	22,0556	5,5896	16,2927
Varianza	117,9745	5,24	0,0947	1052,5786	486,4486	31,2437	265,4515
Curtosis	0,3645	6,6752	3,6848	4,6762	45,6116	169,1538	23,1914
Coficiente Asimetría	-0,275	-1,6153	-2,3226	1,8233	1,4821	12,1533	4,5627

Tabla 4.7: Resultados análisis estadístico datos evento 5 de precipitación del 30/07/2013

Lo anterior puede verse en las gráficas de tendencia (histogramas) generadas para cada una de las variables y que son mostradas en las figuras 4.34 a 4.39.

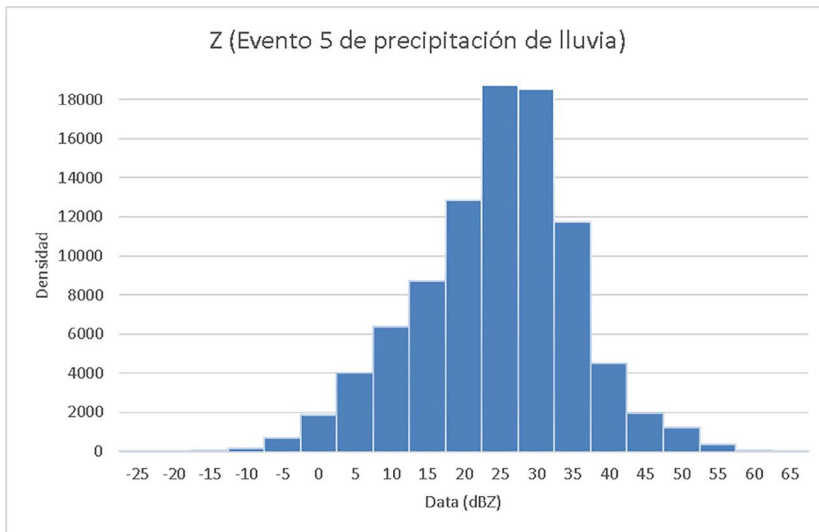


Figura 4.34: Histograma variable Z evento 5 de precipitación del 30/07/2013
Fuente: Propia

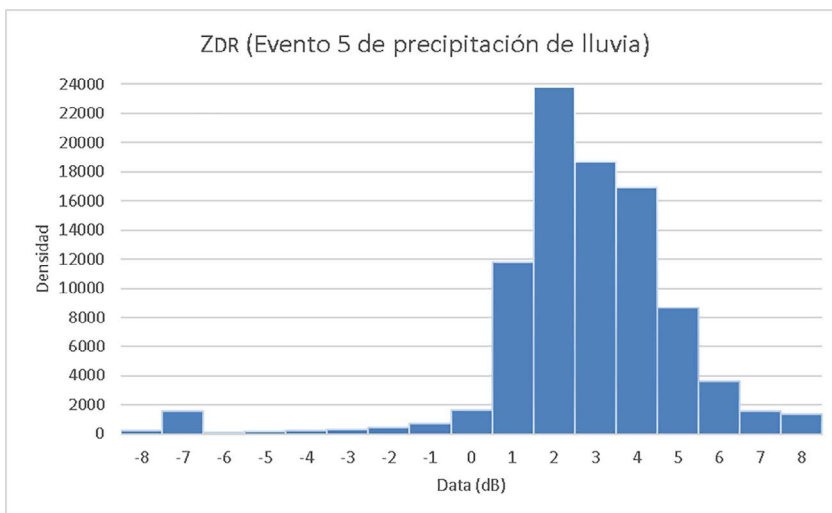


Figura 4.35: Histograma variable Z_{DR} evento 5 de precipitación del 30/07/2013
Fuente: Propia

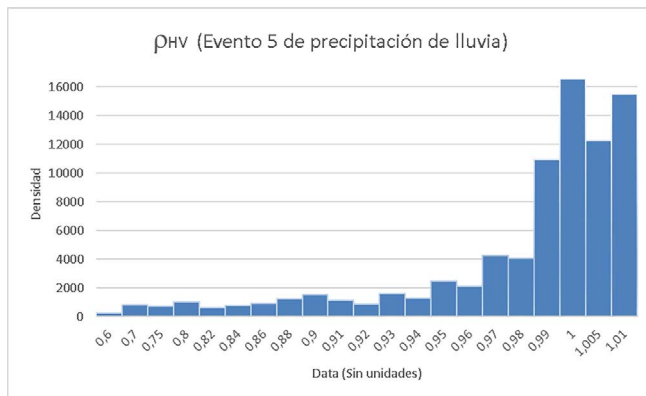


Figura 4.36: Histograma variable ρ_{HV} evento 5 de precipitación del 30/07/2013
Fuente: Propia

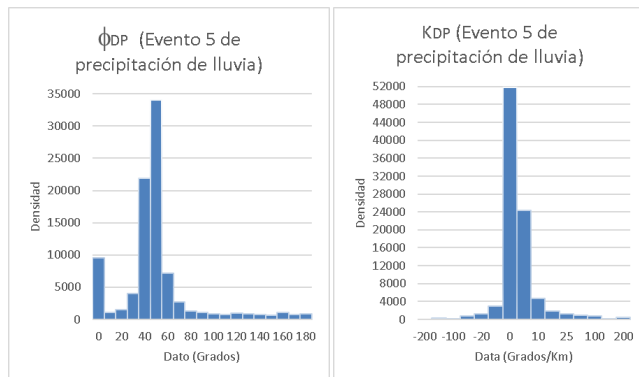


Figura 4.37: Histogramas variables ϕ_{DP} y K_{DP} evento 5 de precipitación del 30/07/2013
Fuente: Propia

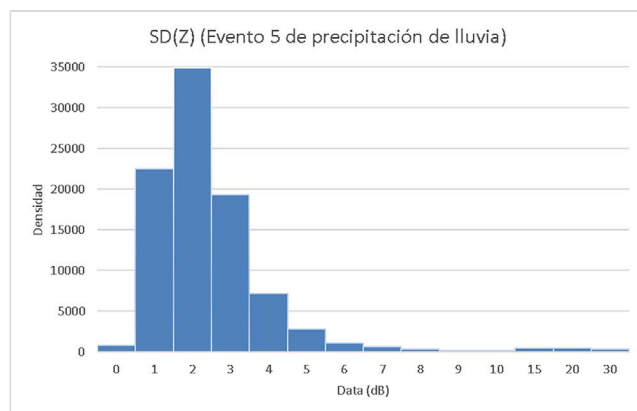


Figura 4.38: Histograma variable $SD(Z)$ evento 5 de precipitación del 30/07/2013
Fuente: Propia

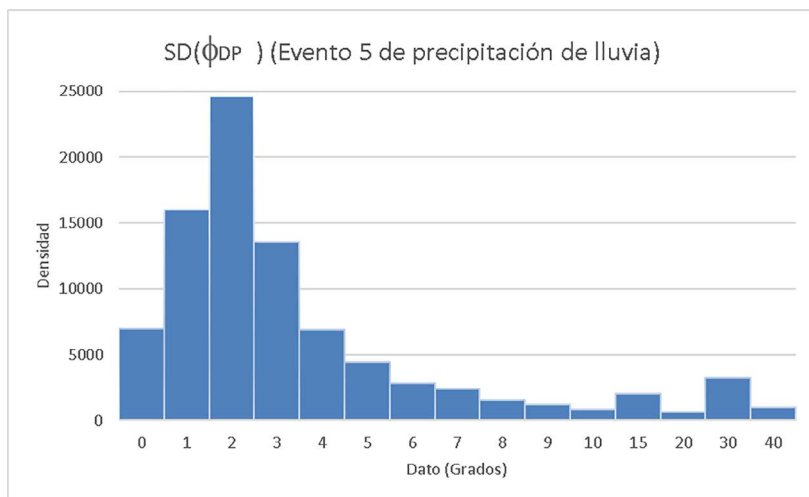


Figura 4.39: Histograma variable $SD(\phi_{DP})$ evento 5 de precipitación del 30/07/2013
Fuente: Propia

Capítulo 5

Modelo conceptual y diseño del algoritmo

5.1. Modelo conceptual

Debido a que se requiere realizar la detección de ecos no meteorológicos específicamente Propagaciones Anómalas (AP), se decidió utilizar de entre toda la literatura uno de los algoritmos más reconocidos y utilizados desarrollado por Park, Ryzhkov y Zrnic en 2008, realizando los respectivos ajustes para que pueda ser utilizado en zonas ecuatoriales por ejemplo, la presencia de nieve en estas zonas no es posible, por lo que algunos rangos de las variables utilizadas deben ser modificados.

El algoritmo de lógica difusa incluye una etapa de pre-procesamiento de las variables polarimétricas y a su vez considera un vector de confianza que caracterizan los posibles impactos de algunas fuentes de error en las mediciones del radar (Park, 2008), en la Tabla 5.1 se muestran las características generales del mencionado algoritmo.

Variable	Nombre	Uso de la variable
Z	Reflectividad	Es suavizado utilizando una ventana de corrimiento de 1 Km.
Z_{DR}	Diferencial de reflectividad	Es suavizado utilizando una ventana de corrimiento de 2 Km.
ρ_{HV}	Coficiente de correlación	Es suavizado utilizando una ventana de corrimiento de 2 Km.
K_{DP}	Diferencial de fase específica	Debido al rango de este parámetro se trabaja en escala logarítmica LK_{DP}
$SD(Z)$	Textura de la reflectividad Z	Caracterizan la fluctuación de pequeña escala de Z a lo largo del radio del radar. Procedimiento para estimar $SD(Z)$: Se promedia Z a lo largo del radio utilizando una ventana de corrimiento de 1 km (es decir 4 puntos de datos espaciados 0.25km). Se resta el suavizado estimado de Z desde los valores originales. Se calcula el valor RMS de los residuos.
$SD(\phi_{DP})$	Textura del diferencial de fase	Caracterizan la fluctuación de pequeña escala de $SD(\phi_{DP})$ a lo largo del radio del radar. Procedimiento para estimar $SD(\phi_{DP})$: Similar al de $SD(Z)$ pero utiliza una ventana de corrimiento de 2 km.

Tabla 5.1: Descripción de entradas difusas para clasificación de eventos meteorológicos (Park, 2008)

Debido a las características del radar y a la revisión de la literatura sobre el tema se realizaron algunos cambios a lo mostrado en la Tabla 5.1, estos cambios se pueden ver reflejados en la Tabla 5.2 que corresponde a la versión final del algoritmo, para este caso se eliminó el uso de la variable K_{DP} , dato que no aporta ningún tipo de información para la detección de propagación esa nómallas, dado que es una variable ruidosa para el rango de trabajo realizado.

Variable	Nombre	Uso de la variable
Z	Reflectividad	Es suavizado utilizando una ventana de corrimiento de 1.35 Km.
Z_{DR}	Diferencial de reflectividad	Es suavizado utilizando una ventana de corrimiento de 2.25 Km.
ρ_{HV}	Coeficiente de correlación	Es suavizado utilizando una ventana de corrimiento de 2.25 Km.
$SD(Z)$	Textura de la reflectividad Z	Caracterizan la fluctuación de pequeña escala de Z a lo largo del radio del radar. Procedimiento para estimar $SD(Z)$: Se promedia Z a lo largo del radio utilizando una ventana de corrimiento de 1.35 km (es decir 3 puntos de datos espaciados 0.45km). Se resta el suavizado estimado de Z desde los valores originales. Se calcula el valor RMS de los residuos.
$SD(\phi_{DP})$	Textura del diferencial de fase	Caracterizan la fluctuación de pequeña escala de ϕ_{DP} a lo largo del radio del radar. Procedimiento para estimar $SD(\phi_{DP})$: Similar al de $SD(Z)$ pero utiliza una ventana de corrimiento de 2.25 km (es decir 5 puntos de datos espaciados 0.45km).

Tabla 5.2: Versión final del clasificador de objetivos meteorológicos y no meteorológicos

Así que, resumiendo, con el procedimiento anterior se extrae la información de las variables polarimétricas que representaran el vector de entrada dado por la Ecuación 5.1.

$$X = \{Z, Z_{DR}, \rho_{HV}, SD(Z), SD(\phi_{DP})\} \quad (5.1)$$

De éste universo se extraen las clases de la clasificación, es decir, para el caso de estudio: objetivos meteorológicos y no meteorológicos (propagaciones anómalas y objetivos biológicos).

Para que el algoritmo difuso opere adecuadamente es necesario asignarle pesos a cada una de las variables, esto se resume en la Tabla 5.3, para la selección de estos valores se utilizó el método de jerarquización analítica.

	Z	Z_{DR}	ρ_{HV}	$SD(Z)$	$SD(\phi_{DP})$
Objetivo meteorológico	0.1	0.05	0.4	0.2	0.25
Objetivo biológico	0.05	0.4	0.3	0.05	0.2
Propagaciones anómalas (AP)	0.05	0.25	0.3	0.35	0.05

Tabla 5.3: Matriz de pesos para el clasificador difuso de eventos meteorológicos

El método de jerarquización analítica, referido por (Sánchez, 2003) en su texto llamado “Técnicas participativas para la planeación”, fue desarrollado por Thomas L. Saaty, quien buscó la elaboración de “un instrumento formal para la evaluación y selección de alternativas, que tuviera las características de ser sólido en sus fundamentos matemáticos, útil en la toma de decisiones y sencillo en su aplicación” (p. 167).

El método se presenta en tres (3) etapas: representación o formulación del problema, evaluación de criterios y alternativas, por último, la jerarquización y selección de la mejor alternativa que conlleve al cumplimiento del objetivo de toma de decisión.

El diseño de cualquier jerarquía depende no sólo de la naturaleza del problema en cuestión, sino también del conocimiento, juicios, valores, opiniones, necesidades, deseos, etc., de los participantes en el proceso. A medida que el proceso de jerarquización analítica avanza a través de sus otros pasos, las jerarquías pueden ser cambiadas para incluir pensamientos recientes de criterios o criterios que no fueron considerados originalmente como importantes; las alternativas también se pueden agregar, eliminar o cambiar. (Saaty, 1999).

Como insumo para desarrollar este método se deben utilizar una serie de ecuaciones y fórmulas matriciales para llenar los cuadros de matrices correspondientes a los criterios y a las alternativas, todos propuesto por Thomas Saaty. De acuerdo a lo descrito por (Sánchez, 2003), Saaty propuso para el método de jerarquización analítica una escala de importancia relativa, con ella se designan las calificaciones para cada comparación en las matrices; al establecer la comparación de los criterios (o alternativas) se debe tener en cuenta cual es la importancia de un criterio contra otro, con base en estas calificaciones se forma la denominada matriz A normalizada.

Para el caso de la selección de pesos de las variables OM (objetivo meteorológico), OB (objetivo biológico) y AP (propagación Anómala) las matrices normalizadas se muestran en las Tabla 5.4 a Tabla 5.6, los valores utilizados corresponden a criterios tomados de múltiples autores, que de un modo u otro indican la importancia que tiene una variable sobre las otras (importancia relativa). Un valor menor que uno implica que la primera variable compara con la según es menos importante, mientras que un valor mayor que uno implica lo contrario.

OM	Z	Z_{DR}	ρ_{HV}	SD(Z)	SD(ϕ_{DP})
Z	1	2	0.25	0.5	0.5
Z_{DR}	0.5	1	0.125	0.25	0.2
ρ_{HV}	4	8	1	2	2
SD(Z)	2	4	0.5	1	0.5
SD(ϕ_{DP})	2	5	0.5	2	1
SUMA	9.5	20	2.375	5.75	4.2

Tabla 5.4: Matriz A normalizada para objetivos meteorológicos

OB	Z	Z_{DR}	ρ_{HV}	SD(Z)	SD(ϕ_{DP})
Z	1	0,2	0,125	1	0.25
Z_{DR}	5	1	2	8	2
ρ_{HV}	8	0.5	1	4	2
SD(Z)	1	0.125	0.25	1	0.25
SD(ϕ_{DP})	4	0.5	0.5	4	1
SUMA	19	2.325	3.875	18	5.5

Tabla 5.5: Matriz A normalizada para objetivos biológicos

AP	Z	Z _{DR}	ρ_{HV}	SD(Z)	SD(ϕ_{DP})
Z	1	0,25	0,2	0,125	1
Z _{DR}	4	1	1	1	4
ρ_{HV}	5	1	1	1	6
SD(Z)	8	1	1	1	8
SD(ϕ_{DP})	1	0,25	0,16667	0,125	1
SUMA	19	3,5	3,36667	3,25	20

Tabla 5.6: Matriz A normalizada para propagaciones anómalas

El siguiente paso es calcular la matriz normalizada denominada A' , los valores de esta nueva matriz se calculan así: se divide cada celda de la matriz A por la suma de todos los valores de la columna que la contiene.

Para el caso de las matrices obtenidas en las tres tablas mostradas anteriormente, el procedimiento indicado puede resumirse como se muestra en la siguiente matriz (Ecuación 5.2):

$$A' = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{13}}{\sum a_{i3}} & \frac{a_{14}}{\sum a_{i4}} & \frac{a_{15}}{\sum a_{i5}} \\ \frac{a_{21}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{23}}{\sum a_{i3}} & \frac{a_{24}}{\sum a_{i4}} & \frac{a_{25}}{\sum a_{i5}} \\ \frac{a_{31}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{32}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{33}}{\sum a_{i3}} & \frac{a_{34}}{\sum a_{i4}} & \frac{a_{35}}{\sum a_{i5}} \\ \frac{a_{41}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{42}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{43}}{\sum a_{i3}} & \frac{a_{44}}{\sum a_{i4}} & \frac{a_{45}}{\sum a_{i5}} \\ \frac{a_{51}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{52}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{53}}{\sum a_{i3}} & \frac{a_{54}}{\sum a_{i4}} & \frac{a_{55}}{\sum a_{i5}} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Aplicando la ecuación anterior a la matriz A se obtienen las matrices A' mostradas en las Tabla 5.7 a Tabla 5.9.

OM	Z	Z_{DR}	ρ_{HV}	SD(Z)	SD(ϕ_{DP})
Z	0,10526	0,1	0,10526	0,08696	0,11905
Z_{DR}	0,05263	0,05	0,05263	0,04348	0,04762
ρ_{HV}	0,42105	0,4	0,42105	0,34783	0,47619
SD(Z)	0,21053	0,2	0,21053	0,17391	0,11905
SD(ϕ_{DP})	0,21053	0,25	0,21053	0,34783	0,2381

Tabla 5.7: Matriz A' normalizada para objetivos meteorológicos

OB	Z	Z_{DR}	ρ_{HV}	SD(Z)	SD(ϕ_{DP})
Z	0,05263	0,08602	0,03226	0,05556	0,04545
Z	0,26316	0,43011	0,51613	0,44444	0,36364
ρ_{HV}	0,42105	0,21505	0,25806	0,22222	0,36364
SD(Z)	0,05263	0,05376	0,06452	0,05556	0,04545
SD(ϕ_{DP})	0,21053	0,21505	0,12903	0,22222	0,18182

Tabla 5.8: Matriz A' normalizada para objetivos biológicos

AP	Z	Z_{DR}	ρ_{HV}	SD(Z)	SD(ϕ_{DP})
Z	0,05263	0,07143	0,05941	0,03846	0,05
Z	0,21053	0,28571	0,29703	0,30769	0,2
ρ_{HV}	0,26316	0,28571	0,29703	0,30769	0,3
SD(Z)	0,42105	0,28571	0,29703	0,30769	0,4
SD(ϕ_{DP})	0,05263	0,07143	0,0495	0,03846	0,05

Tabla 5.9: Matriz A' normalizada para propagaciones anómalas

El último paso en el proceso es calcular los pesos relativos para cada uno de los criterios a determinar, esos valores se resumen en una matriz denominada W (vector columna de tamaño nx1), que corresponde al promedio de los valores de todas las columnas de una misma fila de la matriz A'. Continuando con el proceso de ponderación de pesos de las variables para el algoritmo de clasificación la matriz W se genera de acuerdo a lo mostrado en la Ecuación 5.3.

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} + \frac{a_{13}}{\sum a_{i3}} + \frac{a_{14}}{\sum a_{i4}} + \frac{a_{15}}{\sum a_{i5}}}{n} \\ \frac{\frac{a_{21}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{22}}{\sum a_{i2}} + \frac{a_{23}}{\sum a_{i3}} + \frac{a_{24}}{\sum a_{i4}} + \frac{a_{25}}{\sum a_{i5}}}{n} \\ \frac{\frac{a_{31}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{32}}{\sum a_{i2}} + \frac{a_{33}}{\sum a_{i3}} + \frac{a_{34}}{\sum a_{i4}} + \frac{a_{35}}{\sum a_{i5}}}{n} \\ \frac{\frac{a_{41}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{42}}{\sum a_{i2}} + \frac{a_{43}}{\sum a_{i3}} + \frac{a_{44}}{\sum a_{i4}} + \frac{a_{45}}{\sum a_{i5}}}{n} \\ \frac{\frac{a_{51}}{\sum a_{i1}} + \frac{a_{52}}{\sum a_{i2}} + \frac{a_{53}}{\sum a_{i3}} + \frac{a_{54}}{\sum a_{i4}} + \frac{a_{55}}{\sum a_{i5}}}{n} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

La matriz W finalmente contiene los valores de los pesos asignados para cada variable del clasificador, esto puede verse en la Tabla 5.10 cuyos resultados luego de realizar una aproximación a dos decimales coinciden con los mostrados anteriormente en la Tabla 5.10.

	Z	Z _{DR}	ρ_{HV}	SD(Z)	SD(ϕ_{DP})
OM	0.10331	0.04927	0.41322	0.1828	0.25139
OB	0.05438	0.4035	0.29601	0.05438	0.19173
AP	0.05439	0.26019	0.29072	0.3423	0.05241

Tabla 5.10: Matriz W con pesos relativos asignados a cada variable del clasificador

Thomas Saaty estableció además una tabla mediante la cual se propone obtener el valor de la consistencia aleatoria (CA), de acuerdo al número de criterios o alternativas a ser analizadas se puede obtener la estimación de la matriz generada. En la Tabla 5.11 se pueden visualizar los valores para la consistencia aleatoria (CA) planteados por Saaty (Sánchez, 2003).

Tamaño de la Matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consistencia Aleatoria (CA)	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tabla 5.11: Valores de consistencia aleatoria establecidos por T. Saaty (Sánchez, 2003)

Ahora se deben validar los resultados anteriores calculando la razón de inconsistencia (RI) (Sánchez, 2003) describe la RI como “una estimación del grado de inconsistencia en el que se incurre al momento de asignar calificaciones es la razón de inconsistencia RI, la cual indica el grado de incoherencia que se comete al calificar la importancia relativa” (pp. 174). Es decir, para que los valores de la matriz normalizada A sean aceptados como válidos, el valor de RI debe ser menor al 10% . La expresión de la razón de inconsistencia (RI) puede verse en la Ecuación 5.4.

$$RI = \frac{IC}{CA} \quad (5.4)$$

Donde IC es el Índice de Consistencia, que se calcula tal como se presenta en la Ecuación 5.5.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5.5)$$

Siendo $\lambda_{\max}$ es el valor característico, y n el tamaño de la matriz. El valor de $\lambda_{\max}$ se calcula realizando el producto entre la matriz A y el vector W , obteniéndose la estimación $\lambda_{\max} * w$ (que es un vector de longitud $n \times 1$), así que para obtener el valor $\lambda_{\max}$ se divide cada elemento del vector entre la componente w_n correspondiente.

En las Tabla 5.12 a Tabla 5.14 se presentan los resultados de Razón de Inconsistencia (RI) para los tres eventos analizados (datos de la Tabla 5.13 matriz de pesos), obteniéndose en todos los casos porcentajes de error menores al 10%, lo que indica que los criterios seleccionados son válidos y pueden ser utilizados. (OM=1,45%, OB=3,24% y AP=1,52%).

A(OM)					W	L=[AxW]	L/W	IC	RI
1	2	0.25	0.5	0.5	0.1	0.525	5.250000	0.016250	1.45089%
0.5	1	0.125	0.25	0.2	0.05	0.25	5.000000		
4	8	1	2	2	0.4	2.1	5.250000		
2	4	0.5	1	0.5	0.2	0.925	4.625000		
2	5	0.5	2	1	0.25	1.3	5.200000		
					Promedio		5.065000		

Tabla 5.12: Cálculo de la razón de inconsistencia para objetivos meteorológicos

A(OB)					W	L=[AxW]	L/W	IC	RI
1	0.2	0.125	1	0.25	0.05	0.2675	5.350000	0.036250	3.23661%
5	1	2	8	2	0.4	2.05	5.125000		
8	0.5	1	4	2	0.3	1.5	5.000000		
1	0.125	0.25	1	0.25	0.05	0.275	5.500000		
4	0.5	0.5	4	1	0.2	0.95	4.750000		
					Promedio		5.145000		

Tabla 5.13: Cálculo de la razón de inconsistencia para objetivos biológicos

A(AP)					W	L=[AxW]	L/W	IC	RI
1	0.25	0.2	0.125	1	0.05	0.26625	5.325000	0.017024	1.51998%
4	1	1	1	4	0.25	1.3	5.200000		
5	1	1	1	6	0.3	1.45	4.833333		
8	1	1	1	8	0.35	1.7	4.857143		
1	0.25	0.16667	0.125	1	0.05	0.25625	5.125000		
					Promedio		5.068095		

Tabla 5.14: Cálculo de la razón de inconsistencia para propagaciones anómalas

En la Figura 5.1 se presenta gráficamente el clasificador difuso para eventos meteorológicos propuesto, teniendo como variables de entrada Z , Z_{DR} , ρ_{HV} , $SD(Z)$ y $SD(\phi_{DP})$, el fuzzificador funciones de pertenencia trapezoidales cuyo detalle será mostrado en el siguiente capítulo, las reglas de inferencia utilizan para cada variable los pesos determinados en la Tabla 5.3, obteniéndose luego del proceso de defuzzificación la clasificación de los eventos en meteorológicos, biológicos y propagaciones anómalas.

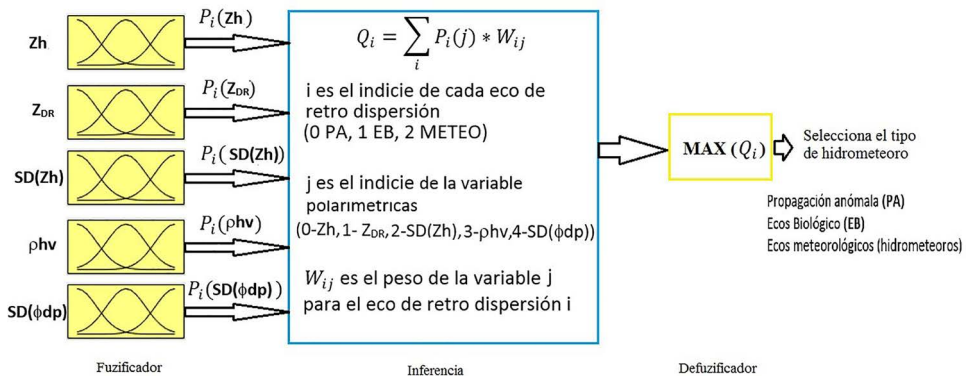


Figura 5.1: Clasificador difuso propuesto
Fuente: Propia

Luego de realizar la clasificación de los datos entre objetivos meteorológicos y no meteorológicos se decidió utilizar un filtro lineal en el dominio del espacio, dado que se trabajó directamente sobre los píxeles de la imagen, tipo media modificado para realizar la corrección de los datos.

Con el filtro se suprimieron, de forma selectiva, información contenida en la imagen a diferentes escalas espaciales, para ocultar o eliminar valores anómalos. Las operaciones espaciales o de vecindad se definen en un entorno EN (vecindad) del punto a transformar (m_0, n_0) , tal como se muestra en la Figura 5.2.

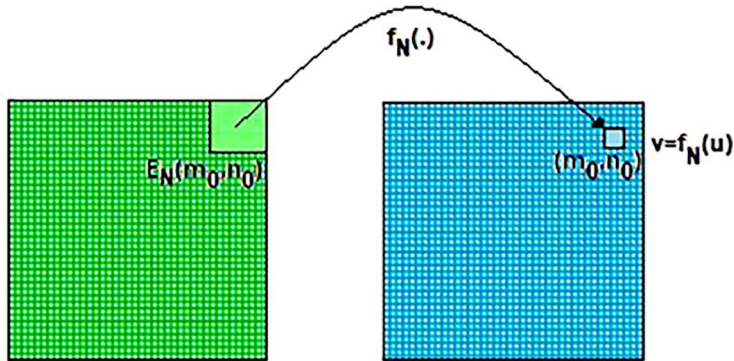


Figura 5.2: Filtro espacial
Fuente: Propia

El entorno del punto (x,y) que se considera en la imagen para obtener $g(x,y)$ está determinado por el tamaño y forma de la máscara (Figura 5.3).

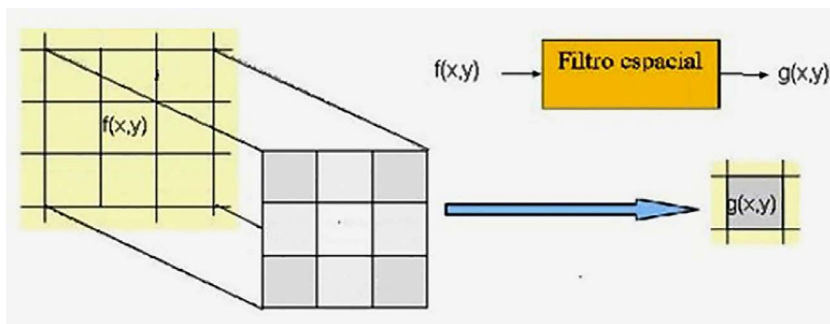


Figura 5.3: Operación del filtro
Fuente: Alaens, 2010

En el filtro de media el proceso de filtrado consiste en la aplicación a cada uno de los píxeles de la imagen de una matriz de filtrado de tamaño $N \times N$ compuesta por números que genera un nuevo valor mediante una

función del valor original y los de los pixels circundantes. El resultado final se divide entre un escalar, generalmente la suma de los coeficientes de ponderación, este filtro se puede expresar mediante una ecuación (Ecuación 5.6).

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b \frac{1}{m * n} f(x + s, y + t) \quad (5.6)$$

En la figura 5.4 pueden verse los coeficientes utilizados para la implementación de un filtro con ventana de 3x3, con ese filtro el cociente del promedio es igual a 9.

1	1	1
1	1	1
1	1	1

Figura 5.4: Coeficientes filtro de media 3x3
Fuente: Propia

El uso del filtro de media en la construcción del algoritmo de corrección de propagaciones anómalas (AP) debe ser modificado ya que existe la posibilidad que alrededor del punto existan APs que harían que dicho punto en lugar de disminuir su error aumente. Los detalles del desarrollo del algoritmo para la implementación del filtro de media modificado serán presentados a continuación.

En la Figura 5.5 se muestra gráficamente el modelo propuesto para la detección corrección de propagaciones anómalas en un radar meteorológico.

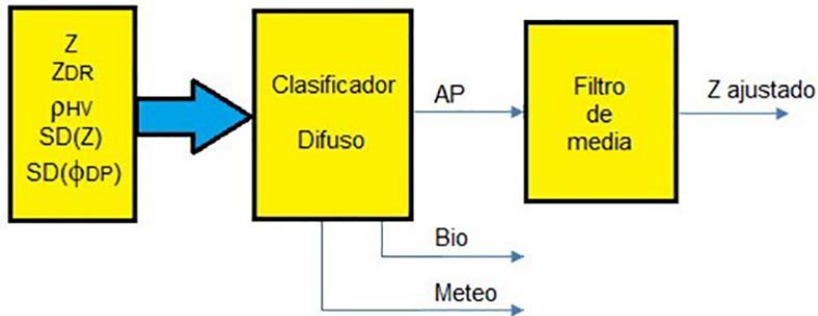


Figura 5.5 Modelo propuesto para el sistema de detección y corrección de propagaciones anómalas
Fuente: Propia

5.2. Diseño del algoritmo de clasificación de eventos

Como se indicó en el apartado anterior se hará uso de un clasificador difuso para determinar los objetivos meteorológicos y los no meteorológicos, el clasificador propuesto se basa en el desarrollado por Park, Ryzhkov y Zrnic en 2008, con algunas modificaciones. El proceso utilizado para realizar esta primera tarea se puede resumir en los siguientes pasos:

- Suavizar Z utilizando una ventana de corrimiento de 1.35Km, calculando el promedio de los datos de 3 celdas consecutivas.
- Suavizar Z_{DR} utilizando una ventana de corrimiento de 2.25Km, calculando el promedio de los datos de 5 celdas consecutivas.
- Suavizar ρ_{HV} utilizando una ventana de corrimiento de 2.25Km, calculando el promedio de los datos de 5 celdas consecutivas.
- Calcular la textura de Z denotada como $SD(Z)$ promediando 3 datos de celdas consecutivas (ventana de corrimiento de

1.35Km), luego se resta el suavizado estimado de Z desde los valores originales, para luego calcular el valor RMS de los residuos.

- Calcular la textura del diferencial de fase ϕ_{DP} denotada como $SD(\phi_{DP})$ promediando 5 datos de celdas consecutivas (ventana de corrimiento de 2.25Km), luego se resta el suavizado estimado de ϕ_{DP} desde los valores originales, para luego calcular el valor RMS de los residuos.

Con esto se tiene el set de datos completo y listo para ser utilizado por el clasificador difuso, este clasificador requiere de funciones de pertenencia del tipo trapezoidal como la mostrada en la figura 5.6, con cuatro puntos, de estos dos a lo largo del eje horizontal (x) denotados como $X1$ y $X4$, son obtenidos por el análisis de los datos generados por el radar. Los puntos $X2$ y $X3$ se obtienen subjetivamente por la experiencia, consideraciones estadísticas y estimaciones de error entre otras. El esquema de lógica difusa debe ser tolerante a tales diferencias sin la necesidad de demasiada puesta a punto.

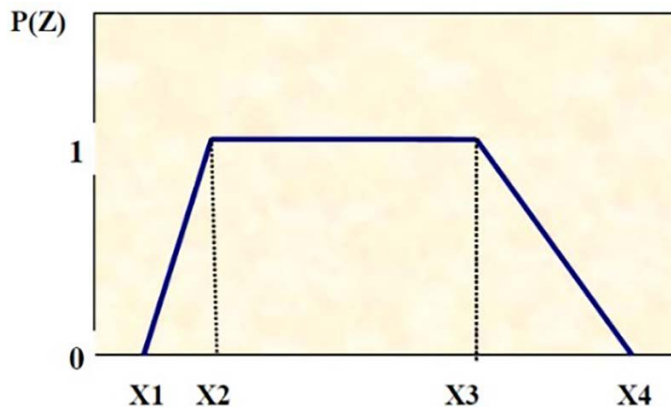


Figura 5.6: Función trapezoidal típica para un clasificador difuso típico
Fuente: Schuur et al, 2003

Se utilizaron los criterios descritos en (Schuur et al, 2003), que asigna valores a X1, X2, X3 y X4 para cada variable, realizando los ajustes necesarios para adecuarlo a las zonas ecuatoriales. En la figura 5.7 se muestran estos valores para los tres tipos de objetivos que serán clasificados, en color Rojo se tienen las propagaciones anómalas, en Azul los objetivos meteorológicos y en Verde los objetivos biológicos.

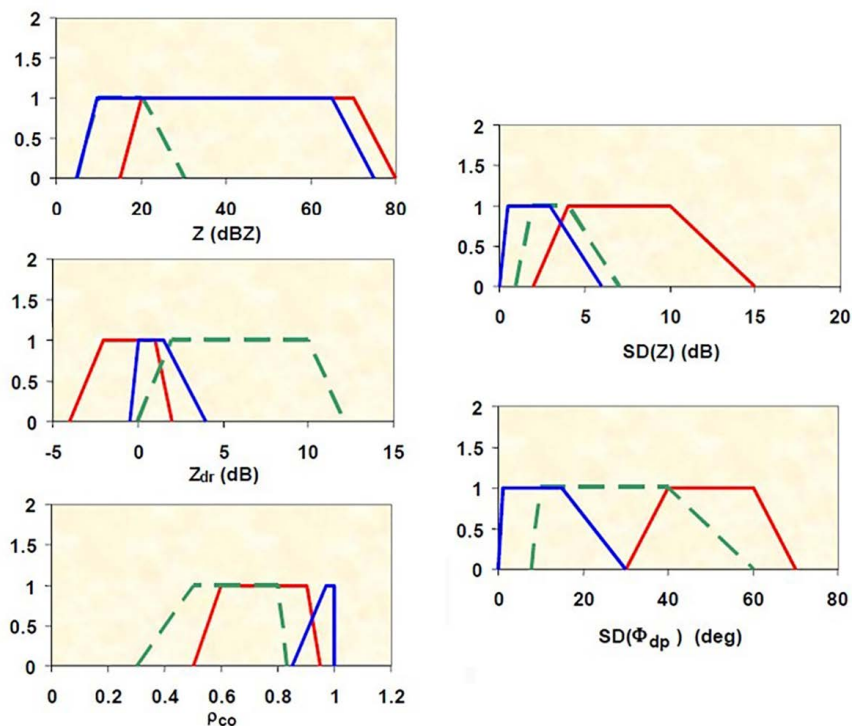


Figura 5.7: Funciones de pertenencia para el clasificador difuso de eventos meteorológicos
Fuente: Schuur et al, 2003

Como puede verse en la Figura 5.7 $SD(\phi_{DP})$ es adecuada para separar los objetivos meteorológicos de las propagaciones anómalas (AP), Z_{DR} es muy eficiente separando los objetivos biológicos de las propagaciones anómalas (aunque las dos variables tienen un pequeño traslapamiento), de igual manera ρ_{HV} es eficiente separando los objetivos meteorológicos

de los biológicos. Para la detección de propagaciones anómalas se utiliza $SD(Z)$ que da información más confiable que la variable Z . Lo anterior corrobora la selección adecuada de pesos para el clasificador difuso presentados en la Tabla 5.3 del apartado anterior.

El proceso de asignación de valores para cada dato del radar se muestra a continuación, donde (x,y) representa el punto analizado, con $x = 1 \dots 664$ y $y = 1 \dots 360$, $v(x,y)$ el valor resultado del análisis.

- Asignación para propagaciones anómalas:

$$Z(x,y) = \begin{cases} (x,y) \leq 15, & v(x,y) = 0 \\ 15 > (x,y) < 20, & v(x,y) = 0,2 * (x,y) - 3 \\ 20 \geq (x,y) \leq 70, & v(x,y) = 1 \\ 70 > (x,y) < 80, & v(x,y) = -0,1 * (x,y) + 8 \\ (x,y) \geq 80, & v(x,y) = 0 \end{cases}$$

$$Z_{DR}(x,y) = \begin{cases} (x,y) \leq -4, & v(x,y) = 0 \\ -4 > (x,y) < -2, & v(x,y) = 0,5 * (x,y) + 2 \\ -2 \geq (x,y) \leq 1, & v(x,y) = 1 \\ 1 > (x,y) < 2, & v(x,y) = -1 * (x,y) + 2 \\ (x,y) \geq 2, & v(x,y) = 0 \end{cases}$$

$$\rho_{HV}(x,y) = \begin{cases} (x,y) \leq 0,5, & v(x,y) = 0 \\ 0,5 > (x,y) < 0,6, & v(x,y) = 10 * (x,y) - 5 \\ 0,6 \geq (x,y) \leq 0,9, & v(x,y) = 1 \\ 0,9 > (x,y) < 0,95, & v(x,y) = -20 * (x,y) + 19 \\ (x,y) \geq 0,95, & v(x,y) = 0 \end{cases}$$

$$SD(Z)(x,y) = \begin{cases} (x,y) \leq 2, & v(x,y) = 0 \\ 2 > (x,y) < 4, & v(x,y) = 0,5 * (x,y) - 1 \\ 4 \geq (x,y) \leq 10, & v(x,y) = 1 \\ 10 > (x,y) < 15, & v(x,y) = -0,2 * (x,y) + 3 \\ (x,y) \geq 15, & v(x,y) = 0 \end{cases}$$

$$SD(\emptyset_{DP})(x,y) = \begin{cases} (x,y) \leq 30, & v(x,y) = 0 \\ 30 > (x,y) < 40, & v(x,y) = 0,1 * (x,y) - 3 \\ 40 \geq (x,y) \leq 60, & v(x,y) = 1 \\ 60 > (x,y) < 70, & v(x,y) = -0,1 * (x,y) + 7 \\ (x,y) \geq 70, & v(x,y) = 0 \end{cases}$$

Asignación para objetivos biológicos:

$$\begin{aligned}
 Z(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq 5, & v(x, y) = 0 \\ 5 > (x, y) < 10, & v(x, y) = 0,2 * (x, y) - 1 \\ 10 \geq (x, y) \leq 20, & v(x, y) = 1 \\ 20 > (x, y) < 30, & v(x, y) = -0,1 * (x, y) + 3 \\ (x, y) \geq 30, & v(x, y) = 0 \end{cases} \\
 Z_{DR}(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq 0, & v(x, y) = 0 \\ 0 > (x, y) < 2, & v(x, y) = 0,5 * (x, y) \\ 2 \geq (x, y) \leq 10, & v(x, y) = 1 \\ 10 > (x, y) < 12, & v(x, y) = -0,5 * (x, y) + 6 \\ (x, y) \geq 12, & v(x, y) = 0 \end{cases} \\
 \rho_{HV}(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq 0,3, & v(x, y) = 0 \\ 0,3 > (x, y) < 0,5, & v(x, y) = 5 * (x, y) - 1,5 \\ 0,5 \geq (x, y) \leq 0,8, & v(x, y) = 1 \\ 0,8 > (x, y) < 0,83, & v(x, y) = -3,33 * (x, y) + 2,76 \\ (x, y) \geq 0,83, & v(x, y) = 0 \end{cases} \\
 SD(Z)(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq 1, & v(x, y) = 0 \\ 1 > (x, y) < 2, & v(x, y) = (x, y) - 1 \\ 2 \geq (x, y) \leq 4, & v(x, y) = 1 \\ 4 > (x, y) < 7, & v(x, y) = -0,33 * (x, y) + 2,33 \\ (x, y) \geq 7, & v(x, y) = 0 \end{cases} \\
 SD(\phi_{DP})(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq 8, & v(x, y) = 0 \\ 8 > (x, y) < 10, & v(x, y) = 0,5 * (x, y) - 4 \\ 10 > (x, y) \leq 40, & v(x, y) = 1 \\ 40 > (x, y) < 60, & v(x, y) = -0,05 * (x, y) + 3 \\ (x, y) \geq 60, & v(x, y) = 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Asignación para objetivos meteorológicos:

$$\begin{aligned}
 Z(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq 5, & v(x, y) = 0 \\ 5 > (x, y) < 10, & v(x, y) = 0,2 * (x, y) - 1 \\ 10 \geq (x, y) \leq 65, & v(x, y) = 1 \\ 65 > (x, y) < 75, & v(x, y) = -0,1 * (x, y) + 7 \\ (x, y) \geq 75, & v(x, y) = 0 \end{cases} \\
 Z_{DR}(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq -0,5, & v(x, y) = 0 \\ -0,5 > (x, y) < 0, & v(x, y) = 2 * (x, y) + 1 \\ 0 \geq (x, y) \leq 1,5, & v(x, y) = 1 \\ 1,5 > (x, y) < 4, & v(x, y) = -0,4 * (x, y) + 1,6 \\ (x, y) \geq 4, & v(x, y) = 0 \end{cases} \\
 \rho_{HV}(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq 0,9, & v(x, y) = 0 \\ 0,9 > (x, y) < 0,97, & v(x, y) = 14,28 * (x, y) - 12,85 \\ 0,97 \geq (x, y) \leq 1, & v(x, y) = 1 \end{cases} \\
 SD(Z)(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq 0, & v(x, y) = 0 \\ 0 > (x, y) < 0,5, & v(x, y) = 2 * (x, y) \\ 0,5 \geq (x, y) \leq 3, & v(x, y) = 1 \\ 3 > (x, y) < 6, & v(x, y) = -0,33 * (x, y) + 2 \\ (x, y) \geq 6, & v(x, y) = 0 \end{cases} \\
 SD(\phi_{DP})(x, y) &= \begin{cases} (x, y) \leq 0, & v(x, y) = 0 \\ 0 > (x, y) < 1, & v(x, y) = (x, y) \\ 1 \geq (x, y) \leq 15, & v(x, y) = 1 \\ 15 > (x, y) < 30, & v(x, y) = -0,066 * (x, y) + 2 \\ (x, y) \geq 30, & v(x, y) = 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

En la figura 5.8 puede verse un ejemplo de asignaciones de valores para $Z = 17,5$, $Z_{DR} = -0,125$, $p_{HV} = 0,9779$, $SDZ = 1,607$ y $SD(\phi_{DP}) = 2,278$ obteniéndose los siguientes valores:

AP:

$$\begin{aligned} Z(17,5) &= 0,5 & Z_{DR}(-0,125) &= 1 & \rho_{HV}(0,9779) &= 0 \\ SD(Z)(1,607) &= 0 & SD(\phi_{DP})(2,278) &= 0 \end{aligned}$$

Bio:

$$\begin{aligned} Z(17,5) &= 1 & Z_{DR}(-0,125) &= 0 & \rho_{HV}(0,9779) &= 0 \\ SD(Z)(1,607) &= 0,6072 & SD(\phi_{DP})(2,278) &= 0 \end{aligned}$$

Meteo:

$$\begin{aligned} Z(17,5) &= 1 & Z_{DR}(-0,125) &= 0,75 & \rho_{HV}(0,9779) &= 1 \\ SD(Z)(1,607) &= 1 & SD(\phi_{DP})(2,278) &= 1 \end{aligned}$$

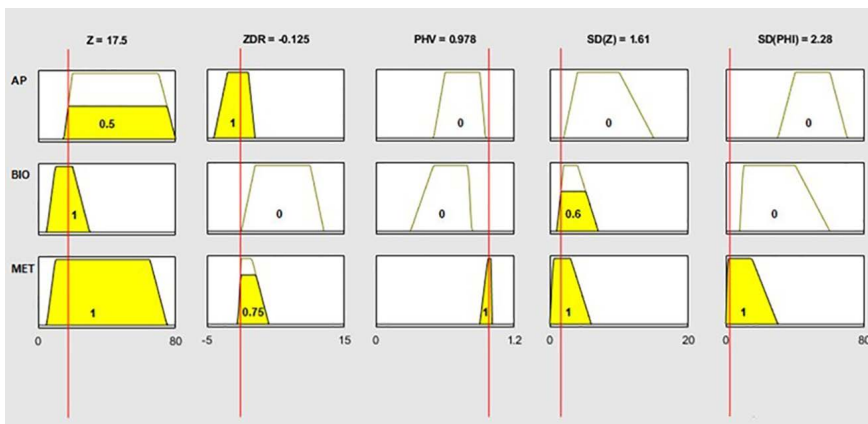


Figura 5.8: Ejemplo de asignación de valores generados por el clasificador difuso
Fuente: Propia

Con la asignación de valores antes mostrada se procede a sumar cada valor con su respectivo peso, tal como se ve en las Ecuaciones 5.7, 5.8 y 5.9.

$$p(x, y)AP = Z(x, y) * 0,05 + Z_{DR}(x, y) * 0,25 + \rho_{HV}(x, y) * 0,3 \\ + SD(Z)(x, y) * 0,35 + SD(\phi_{DP})(x, y) * 0,05 \quad (5.7)$$

$$p(x, y)Bio = Z(x, y) * 0,05 + Z_{DR}(x, y) * 0,4 + \rho_{HV}(x, y) * 0,3 \\ + SD(Z)(x, y) * 0,05 + SD(\phi_{DP})(x, y) * 0,2 \quad (5.8)$$

$$p(x, y)Met = Z(x, y) * 0,1 + Z_{DR}(x, y) * 0,05 + \rho_{HV}(x, y) * 0,4 \\ + SD(Z)(x, y) * 0,2 + SD(\phi_{DP})(x, y) * 0,25 \quad (5.9)$$

Continuando con el ejemplo al reemplazar en las Ecuaciones 5.10, 5.11 y 5.12 los valores obtenidos en el proceso de asignación anterior se obtienen los siguientes resultados:

$$p(x, y)AP = 0,5 * 0,05 + 1 * 0,25 + 0 * 0,3 + 0 * 0,35 + 0 * 0,05 = 0,275 \quad (5.10)$$

$$p(x, y)Bio = 1 * 0,05 + 0 * 0,4 + 0 * 0,3 + 0,6072 * 0,05 + 0 * 0,2 = 0,80364 \quad (5.11)$$

$$p(x, y)Met = 1 * 0,1 + 0,75 * 0,05 + 1 * 0,4 + 1 * 0,2 + 1 * 0,25 = 0,9875 \quad (5.12)$$

Ahora para finalizar el proceso de clasificación se utiliza una última regla que determina el tipo de objetivo clasificado, la cual se muestra en el diagrama de flujo a continuación en la figura 5.9.

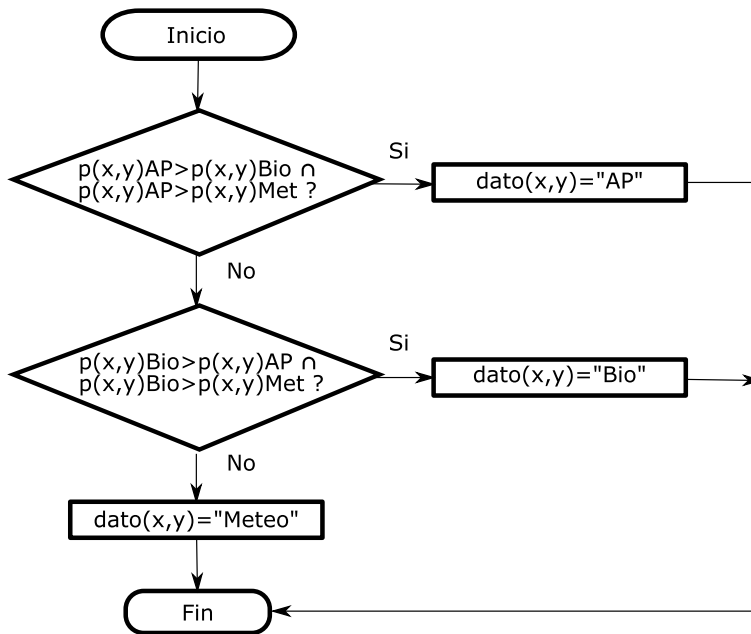


Figura 5.9: Diagrama de flujo para obtención de datos generados por el clasificador difuso

Fuente: Propia

Como resultado final para el ejemplo que se ha desarrollado la clasificación obtenida para el punto x,y seleccionado es evento meteorológico (“Meteo” en el algoritmo) dato que $p(x,y)Met > p(x,y)AP \vee p(x,y)Met > p(x,y)Bio$. En la figura 5.10 se muestra el resultado de uno de los análisis realizados a datos del radar meteorológico de Corozal (Evento 1 del 25/06/2013).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
22	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	METEO	METEO	METEO	AP	
23	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	METEO	AP	
24	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	METEO	AP	
25	METEO	METEO	AP	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	METEO	METEO	
26	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	METEO	AP	
27	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
28	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
29	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
30	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
31	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
32	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
33	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
34	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
35	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
36	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
37	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
38	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
39	AP	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
40	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
41	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
42	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
43	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
44	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
45	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
46	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
47	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
48	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
49	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
50	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
51	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
52	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
53	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
54	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
55	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP	AP	
56	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	
57	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	
58	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	
59	METEO	AP	AP	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	
60	METEO	-128	-128	AP	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	BIO	BIO	METEO	
	Z				ZDR	ROHV	SD(Z)	SD(PHV)	PHV	CLASIFIC			Z_CORREG

corregir por lo que el barrido de la matriz se realiza desde la posición (2,2) hasta la posición (663,359). Al dividir en cuatro cuadrantes la matriz, cada cuadrante maneja un rango de análisis particular de esta manera es más eficiente el proceso de corrección de propagaciones anómalas dado que minimiza los errores generados en el borde de la matriz.

En el primer cuadrante el barrido se realiza en las filas desde la posición 2 a 333 y en las columnas desde la posición 2 a 181, en el barrido se verifica si el dato es uno de relleno es decir el valor -128, si no lo es se verifica si en la clasificación el dato se determinó como AP si lo es se asignan los pesos 0 o 1 a cada una de las celdas de la ventana de 3x3, el valor 0 se asigna si la celda es otra AP. Las variables asignadas a las celdas están nombradas con los valores D1 a D9 (figura 5.15).

D1	D4	D6
D2	AP	D7
D3	D5	D8

Tabla 5.15: Matriz de asignación de pesos para la ventana 3x3 del filtro
Fuente: Propia

También se verifica si las celdas tienen el valor -128 con lo que se asigna a esta celda el valor 0, si la celda no es otra AP o el valor -128 se le asigna el valor 1 en el caso que el valor asignado sea 0 una variable de conteo que fue inicializada con el valor 9 es decrementada en una unidad, esta variable es utilizada como divisor en el cálculo del promedio por lo que en resumen lo que se hace es eliminar aquellas celdas que no son útiles en el cálculo del promedio, a la celda central donde está el AP a corregir se le asignó el peso 0.5 para disminuir más rápidamente el error.

Con la matriz generada en el paso anterior se calcula el valor del Z corregido haciendo uso de la ecuación mostrada en el diagrama de flujo de la figura 5.13, como se indicó antes el barrido de la matriz se realiza sobre un cuadrante de la matriz original, por lo que las variables i y j que la barren son incrementadas hasta los valores 333 y 181 respectivamente, finalizando así el análisis del primer cuadrante.

En las figuras 5.11 a 5.19 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo diseñado para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3.

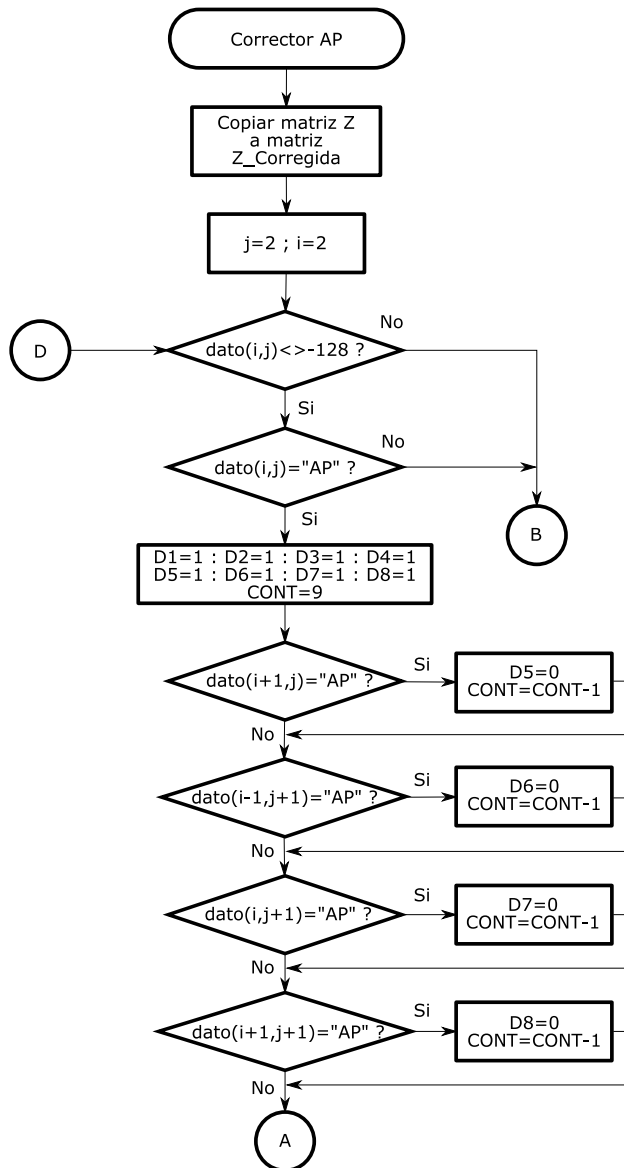


Figura 5.11: Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 1

Fuente: Propia

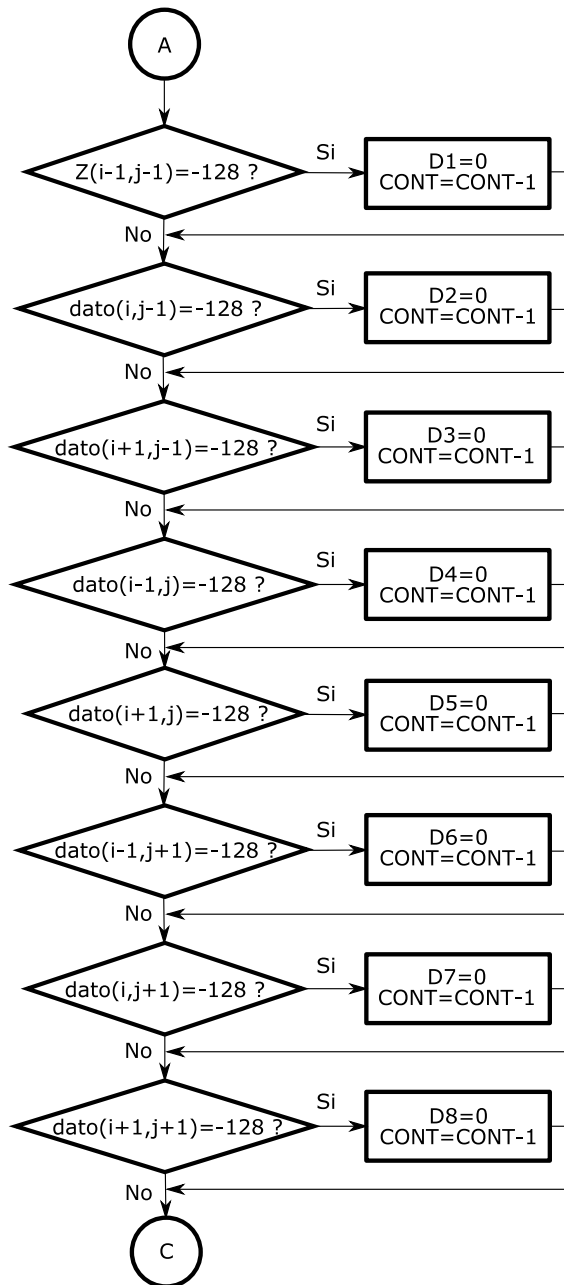


Figura 5.12: Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 2
Fuente: Propia

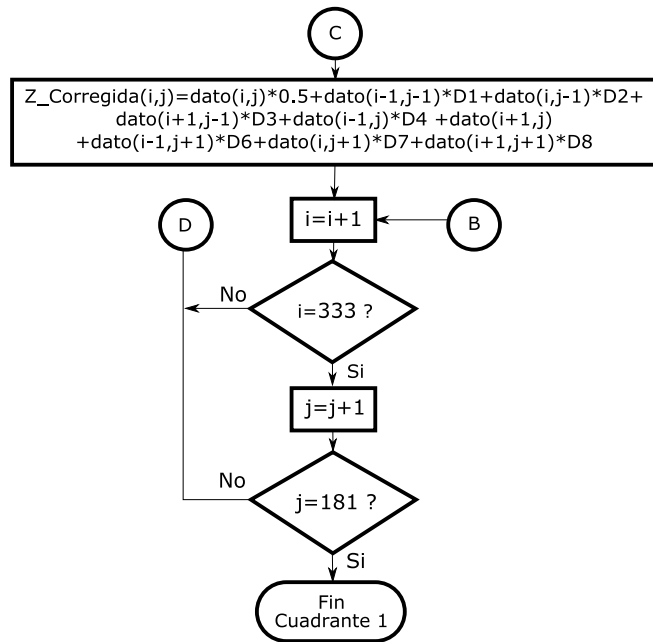


Figura 5.13: Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 3
Fuente: Propia

Para los demás cuadrantes el procedimiento es exactamente el mismo, la diferencia está en el rango del barrido realizado en el respectivo cuadrante y la asignación de valores a la matriz de la ventana 3x3. Para el cuadrante dos $i = 663...332$ y $j = 2...181$, para el tres $i = 2...333$ y $j = 359...180$, finalmente para el cuadrante cuatro $i = 663...332$ y $j = 359...180$, la ecuación es todos los cuadrantes en la misma la diferencia está dada en la matriz de la ventana.

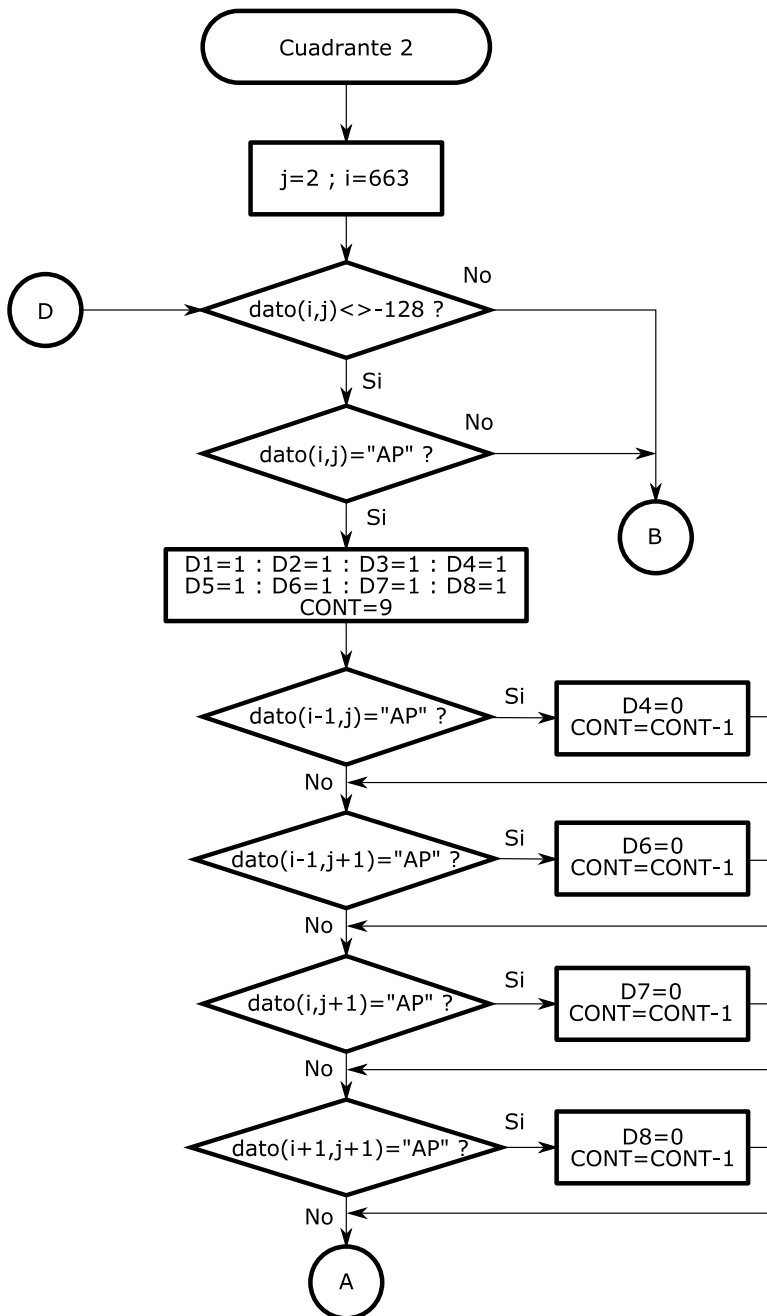


Figura 5.14: Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 4
Fuente: Propia

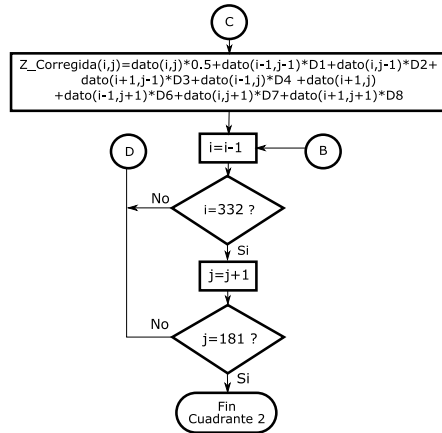


Figura 5.15: Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 5

Fuente: Propia

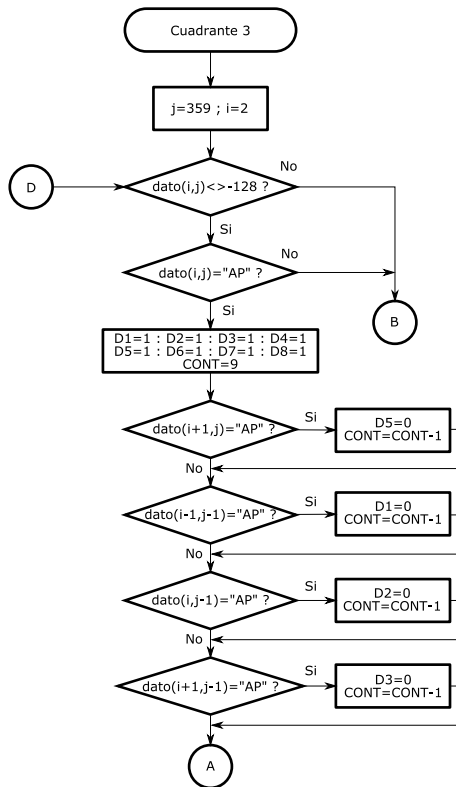


Figura 5.16: Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 6

Fuente: Propia

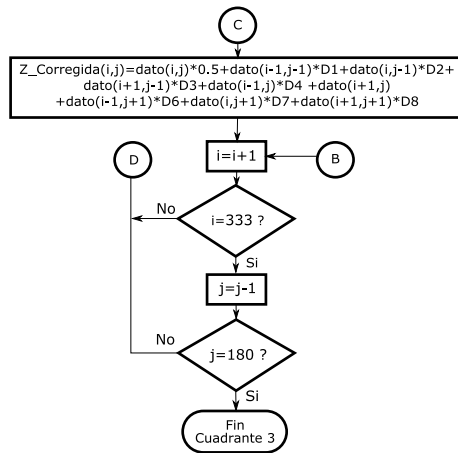


Figura 5.17: Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 7
Fuente: Propia

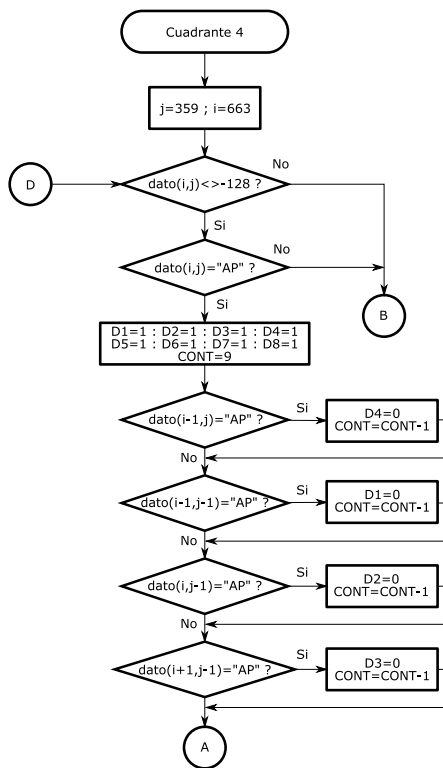


Figura 5.18: Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 8
Fuente: Propia

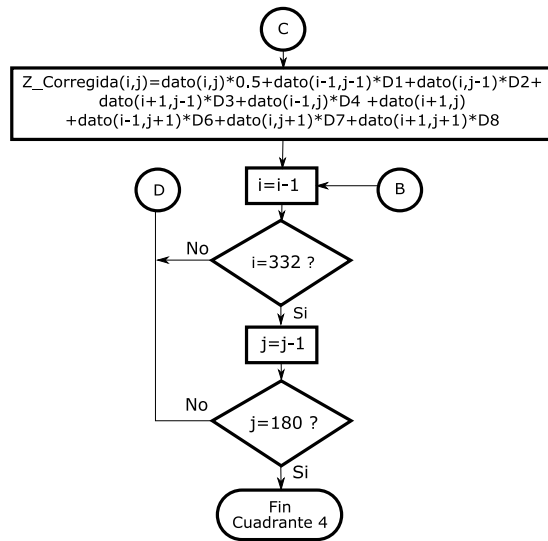


Figura 5.19: Diagrama de flujo para la corrección de las AP utilizando el filtro de media modificado con ventana de 3x3 Parte 9
Fuente: Propia

A continuación, se presenta un ejemplo del funcionamiento del algoritmo para un punto en particular de la matriz, para este caso el punto (59,2), en la figura 5.20 este punto corresponde a la fila 59 columna B.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
47	24,5	23	21,5	19,5	71,5	73	77,5	76	71,5
48	26,5	26	28	26,5	75,5	78,5	82,5	81	75,5
49	20,5	20,5	23,5	25	74,5	82	82	83	77,5
50	19	24	25	21,5	77,5	78,5	77,5	79,5	75
51	17,5	24,5	27	25,5	75	79	82	80	79
52	18,5	22	27	25	74,5	80	84,5	83	80,5
53	10,5	24	26	23	75,5	82,5	84	85	77
54	10	19,5	24	22	20	81	84,5	81,5	76
55	12,5	16,5	21	20	25,5	31,5	90	87	78,5
56	14,5	22,5	21	23	27	31,5	30	40	28
57	10	15,5	23	24	26	30,5	28,5	29,5	21
58	0,5	9	11	15	25,5	28,5	30	21	21
59	3	4,5	5,5	9	19,5	22,5	18	15,5	15
60	0	-128	-128	8,5	13	9,5	11	13,5	11
61	-1	-128	-128	-128	4	11	17,5	15,5	12,5
62	-4,5	-128	-128	-128	-128	10,5	13	15,5	8
63	-6	-128	-128	-128	-128	7,5	12	13	6
64	-128	-128	-128	-128	-128	7	14	11	1
65	-128	-128	-128	-128	-128	1,5	7,5	6	-128
66	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-0,5	0,5	-128
67	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128
68	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128
69	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128

Figura 5.20: Punto seleccionado en matriz Z a corregir ventana 3x3
Fuente: Propia

El punto seleccionado de la matriz Z es clasificado como un AP de acuerdo a lo mostrado en la figura 5.21.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
47	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
48	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
49	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
50	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
51	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
52	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
53	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
54	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP
55	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP
56	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO
57	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO
58	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO
59	METEO	AP	AP	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO
60	METEO	-128	-128	AP	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO
61	BIO	-128	-128	-128	BIO	METEO	METEO	METEO	METEO
62	METEO	-128	-128	-128	-128	METEO	METEO	METEO	METEO
63	METEO	-128	-128	-128	-128	BIO	METEO	METEO	METEO
64	-128	-128	-128	-128	-128	METEO	METEO	METEO	BIO
65	-128	-128	-128	-128	-128	METEO	BIO	AP	-128
66	-128	-128	-128	-128	-128	-128	BIO	BIO	-128
67	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128
68	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128
69	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128

◀ ▶
Z | ZDR | ROHV | SD(Z) | SD(PHV) | PHV
CLASIFIC
Z_CORREG | PPI_Z
⊕

Figura 5.21: Resultado del clasificador
Fuente: Propia

En la tabla 5.16 se presentan los datos en diversas matrices que representan gráficamente el proceso de asignación de pesos para la matriz de la ventana 3x3 del filtro de media, estos valores son posteriormente utilizados en la Ecuación 15 (matriz (b) y matriz (d)), el valor de la variable de conteo CONT en este caso es 6 dado que tres celdas tienen el valor 0.

58.1	58.2	58.3	0.5	9	11	1	1	1
59.1	59.2	59.3	3	4.5	5.5	1	0.5	0
60.1	60.2	60.3	0	-128	-128	1	0	0

(a)
(b)
(b)

METEO	METEO	METEO
METEO	AP	AP
METEO	-128	-128

(d)

Tabla 5.16: (a)Ubicación datos, (b)Valor datos, (c)Matriz asignada ventana 3x3, (d) Clasificación

$$Z_{Corregida}(59,2) = \frac{\text{dato}(59,2) * 0,5 + \text{dato}(58,1) * D1 + \text{dato}(59,1) * D2}{CONT} + \frac{\text{dato}(60,1) * D3 + \text{dato}(58,2) * D4 + \text{dato}(60,2) * D5}{CONT} + \frac{\text{dato}(58,3) * D6 + \text{dato}(59,3) * D7 + \text{dato}(60,3) * D8}{CONT} \quad (5.13)$$

Reemplazando los datos de las matrices (b) y (d) se tiene el siguiente resultado:

$$Z_{Corregida}(59,2) = \frac{4,5 * 0,5 + 0,5 * 1 + 3 * 1 + 0 * 1 + 9 * 1}{6} + \frac{-128 * 0 + 11 * 1 + 5,5 * 0 + -128 * 0}{6}$$

$$Z_{Corregida}(59,2) = \frac{2,25 + 0,5 + 3 + 0 + 9 + 0 + 11 + 0 + 0}{6} = 25,75/6$$

$$Z_{Corregida}(59,2) = 4,291 \approx 4,3 \quad (5.14)$$

Este último valor puede verse en la figura 5.22

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
47	24,5	23	21,5	19,5	24,5	28,2	31,5	33,6	34,4
48	26,5	26	28	26,5	26,7	29,2	32,1	34,1	34,9
49	20,5	20,5	23,5	25	27,4	30,4	32,6	34,6	35,4
50	19	24	25	21,5	27,6	30,4	32,5	34,5	35,3
51	17,5	24,5	27	25,5	27,4	30,5	32,9	34,6	35,8
52	18,5	22	27	25	27,6	30,3	33	34,9	36,2
53	10,5	24	26	23	25,9	29	32,6	35,2	36
54	10	19,5	24	22	20	28,7	32,8	35,1	35,8
55	12,5	16,5	21	20	25,5	31,5	34,2	34,8	33,3
56	14,5	22,5	21	23	27	31,5	30	40	28
57	10	15,5	23	24	26	30,5	28,5	29,5	21
58	0,5	9	11	15	25,5	28,5	30	21	21
59	3	4,3	8,5	9	19,5	22,5	18	15,5	15
60	0	-128	-128	9,7	13	9,5	11	13,5	11
61	-1	-128	-128	-128	4	11	17,5	15,5	12,5
62	-4,5	-128	-128	-128	-128	10,5	13	15,5	8
63	-6	-128	-128	-128	-128	7,5	12	13	6
64	-128	-128	-128	-128	-128	7	14	11	1
65	-128	-128	-128	-128	-128	1,5	7,5	5,2	-128
66	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-0,5	0,5	-128
67	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128
68	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128
69	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128

Figura 5.22: Matriz Z corregida ventana 3x3

Fuente: Propia

Para la aplicación del filtro con ventana 5x5 el procedimiento es similar, la diferencia radica en el tamaño de la matriz y por consiguiente en

la cantidad de datos analizados, presentado en este caso un mayor gasto computacional.

Para mostrar en detalle del desarrollo del algoritmo con ventana 5x5 a continuación se presenta un ejemplo del funcionamiento del mismo para un punto en particular de la matriz Z que incluye las propagaciones anómalas, para este caso el punto (14,5), en la figura 5.23 este punto corresponde a la fila 14 columna E, clasificado como un AP de acuerdo a lo mostrado en la figura 5.24.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128
3	16,5	-128	-128	14	13	-128	-128	-128	-1
4	-11	-8,5	-10	-7	-3	-1,5	-3	-5,5	-13
5	-2,5	1	-2,5	1,5	3,5	5	1	-1	-4,5
6	5	3	8,5	4,5	6	9,5	10	8,5	4,5
7	7	8	10,5	9,5	11	11,5	13,5	12,5	4,5
8	5	7,5	9	10	10,5	13,5	12,5	10,5	4
9	4	9	13	10,5	15	10	13	10	6
10	8,5	14	16	11,5	10,5	18,5	18	14	6,5
11	14	12,5	16,5	11	17	15	16	18	7,5
12	12,5	15,5	20	14,5	19,5	19,5	69,5	66,5	60
13	17	17,5	18,5	15	23	74	74,5	67,5	61,5
14	16	21	18,5	18,5	71,5	73	75	75	66
15	17,5	19	20	21	71,5	78	75,5	75	66,5
16	20,5	24	23,5	22,5	79	77	75	75	64
17	20	17	25,5	19	77	76	77	73	68,5
18	19,5	23	23	22,5	73,5	76,5	74	72	64
19	22	22,5	24	20	73,5	73,5	78	74	67,5
20	23,5	23,5	29	21,5	77,5	76,5	76,5	74,5	17,5
21	23	25,5	24,5	24,5	82,5	79,5	79	74,5	17
22	25,5	26	29,5	25,5	76,5	81	79	75	22
23	23,5	29,5	33,5	26,5	75,5	77,5	77	73	69,5
24	25	24,5	31	23	78	76	75	72,5	65,5

Figura 5.23: Punto en matriz Z a corregir ventana 5x5

Fuente: Propia

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128	-128
3	AP	-128	-128	AP	AP	-128	-128	-128	AP
4	METEO	AP	AP	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP
5	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	METEO
6	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO
7	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO
8	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO
9	AP	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO
10	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	METEO	AP	AP	AP
11	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	METEO	AP
12	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP
13	METEO	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP
14	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
15	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
16	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
17	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
18	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
19	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
20	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	METEO
21	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	METEO
22	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	METEO
23	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP
24	METEO	METEO	METEO	METEO	AP	AP	AP	AP	AP

Figura 5.24: Resultado del clasificador

Fuente: Propia

En la tabla 5.17 se presentan los datos en las diversas matrices que representan gráficamente el proceso de asignación de pesos para la matriz de la ventana 5x5 del filtro de media, estos valores son posteriormente utilizados en la Ecuación 5.16, el valor de la variable de conteo CONT en este caso es 14 dado que 11 celdas tienen el valor 0 ya que son APs.

12.3	12.4	12.5	12.6	12.7
13.3	13.4	13.5	13.6	13.7
14.3	14.4	14.5	14.6	14.7
15.3	15.4	15.5	15.6	15.7
16.3	16.4	16.5	16.6	16.7

(a)

20	14.5	19.5	19.5	69.5
18.5	15	23	74	74.5
18.5	18.5	71.5	73	75
25	21	71.5	78	75.5
23.5	22.5	79	77	75

(b)

METEO	METEO	METEO	METEO	AP
METEO	METEO	METEO	AP	AP
METEO	METEO	AP	AP	AP
METEO	METEO	AP	AP	AP
METEO	METEO	AP	AP	AP

(c)

1	1	1	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	0	0
1	1	0	0	0
1	1	0	0	0

(d)

Tabla 5.17: (a)Ubicación datos, (b)Valor datos, (c)Clasificación, (d)Matriz asignada ventana 5x5

$$\begin{aligned}
 Z_{Corregida}(14,5) = & \frac{dato(14,5) * 0,5 + dato(12,3) * D1 + dato(13,3) * D2}{CONT} \\
 & + \frac{dato(14,3) * D3 + dato(15,3) * D4 + dato(16,3) * D5 + dato(12,4) * D6}{CONT} \\
 & + \frac{dato(13,4) * D7 + dato(14,5) * D8 + dato(15,4) * D9 + dato(16,4) * D10}{CONT} \\
 & + \frac{dato(12,5) * D11 + dato(13,5) * D12 + dato(15,5) * D13 + dato(16,5) * D14}{CONT} \\
 & + \frac{dato(12,6) * D15 + dato(13,6) * D16 + dato(14,6) * D17 + dato(15,6) * D18}{CONT} \\
 & + \frac{dato(16,6) * D19 + dato(12,7) * D20 + dato(13,7) * D21 + dato(14,7) * D22}{CONT} \\
 & + \frac{dato(15,7) * D23 + dato(16,7)}{CONT}
 \end{aligned}$$

Reemplazando los datos de las matrices (b) y (d) se tiene el siguiente resultado:

$$\begin{aligned} Z_{Corregida}(14,5) = & \frac{71,5 * 0,5 + 20 * 1 + 18,5 * 1 + 18,5 * 1 + 20 * 1 + 23,5 * 1 + 14,5 * 1}{14} \\ & + \frac{15 * 1 + 18,5 * 1 + 21 * 1 + 22,5 * 1 + 19,5 * 1 + 23 * 1 + 71,5 * 0 + 79 * 0}{14} \\ & + \frac{19,5 * 1 + 74 * 0 + 73 * 0 + 78 * 0 + 77 * 0 + 69,5 * 0 + 74,5 * 0 + 75 * 0}{14} \\ & + \frac{75,5 * 0 + 75 * 0}{14} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{Corregida}(14,5) = & \frac{35,75 + 20 + 18,5 + 18,5 + 20 + 23,5 + 14,5 + 15 + 18,5 + 21 + 22,5}{14} \\ & + \frac{19,5 + 23 + 0 + 0 + 19,5 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0}{14} \\ = & \frac{25,75}{6} \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$Z_{Corregida}(14,5) = 20,696 \approx 20,7 \quad (5.16)$$

Este último valor puede verse en la figura 5.25.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
4	-11	-8,5	0,6	-7	-3	-1,5	-3	-5,5	-3,1
5	-2,5	1	-2,5	1,5	3,5	5	1	1,3	-4,5
6	5	3	8,5	4,5	6	9,5	10	8,5	4,5
7	7	8	10,5	9,5	11	11,5	13,5	12,5	4,5
8	5	7,5	9	10	10,5	13,5	12,5	10,5	4
9	4	9	13	10,5	15	10	13	10	6
10	8,5	14	16	11,5	13,7	18,5	13,1	10,7	7,1
11	14	12,5	16,5	11	17	15	14,9	18	9,6
12	12,5	15,5	20	14,5	19,5	19,5	19,2	17,9	14,4
13	17	17,5	18,5	15	23	19,4	20,6	19,5	17,5
14	16	21	18,5	18,5	20,7	21,1	22,3	22,2	21,6
15	17,5	19	20	21	21,7	22,1	23,2	23,3	23,1
16	20,5	24	23,5	22,5	22,8	22,9	23,8	24,2	24,1
17	20	17	25,5	19	23,4	23,4	24,5	24,7	24,7
18	19,5	23	23	22,5	24,1	23,9	24,5	23,7	22,3
19	22	22,5	24	20	24,4	24,3	24,7	23	20,8
20	23,5	23,5	29	21,5	25,5	25,3	24,9	22,6	17,5
21	23	25,5	24,5	24,5	26,9	26,2	25,6	22,9	17
22	25,5	26	29,5	25,5	27,6	27	26,2	23,3	22
23	23,5	29,5	33,5	26,5	28,2	27,8	27	24,5	19,6
24	25	24,5	31	23	29,7	28,1	27,7	25,9	20,3
25	27	33	26,9	29	28,3	26,6	27,7	27,1	21,6
26	31,5	33	38	28	26,5	25,4	26,9	26,9	22,4

Figura 5.25: Matriz Z corregida ventana 5x5

Fuente: Propia

El procedimiento es exactamente el mismo para el algoritmo de ventana 7x7, el tamaño de la matriz aumenta a 49 celdas, de las cuales se analizan 48 para asignar los pesos correspondientes para luego ser reemplazado en la ecuación del cálculo del valor corregido.

Capítulo 6

Resultados y análisis

Para todos los eventos el procedimiento de validación fue el mismo:

- Modificar evento agregando propagaciones anómalas en una zona del mapa
- Aplicar el algoritmo de clasificación
- Aplicar el algoritmo de corrección ventana 3x3
- Aplicar el algoritmo de corrección ventana 5x5
- Aplicar el algoritmo de corrección ventana 7x7
- Comparar matriz de datos originales con matriz corregida
- Calcular error

6.1. Resultados evento 1 de precipitación del 25/06/2013

En la Figura 6.1 se muestra gráficamente el evento 1 con los datos tomados directamente por el radar meteorológico, además, se presenta un detalle de la zona que se analizó.

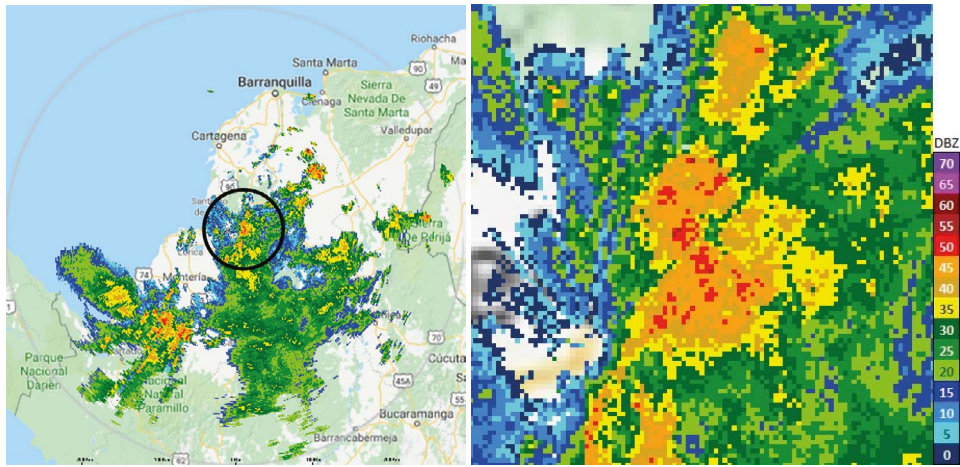


Figura 6.1: Evento 1 de precipitación sin modificaciones
Fuente: Propia

Ahora se agregan propagaciones anómalas al conjunto de datos, esto se logra modificando los datos originales agregando un valor constante a la zona mostrada en la Figura 6.2, de igual manera se presenta un detalle de dicha zona.

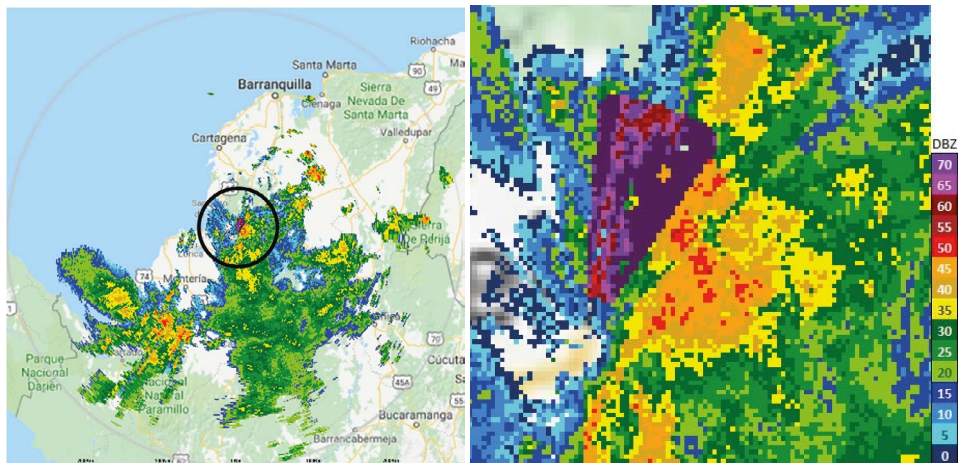


Figura 6.2: Evento 1 zona modificada con propagaciones anómalas
Fuente: Propia

Aplicando el algoritmo de corrección con una ventana de 3x3 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.3, con su respectivo detalle, visualmente es similar a la imagen original, pero con el detalle mostrado puede verse que tiene algunas diferencias con la original.

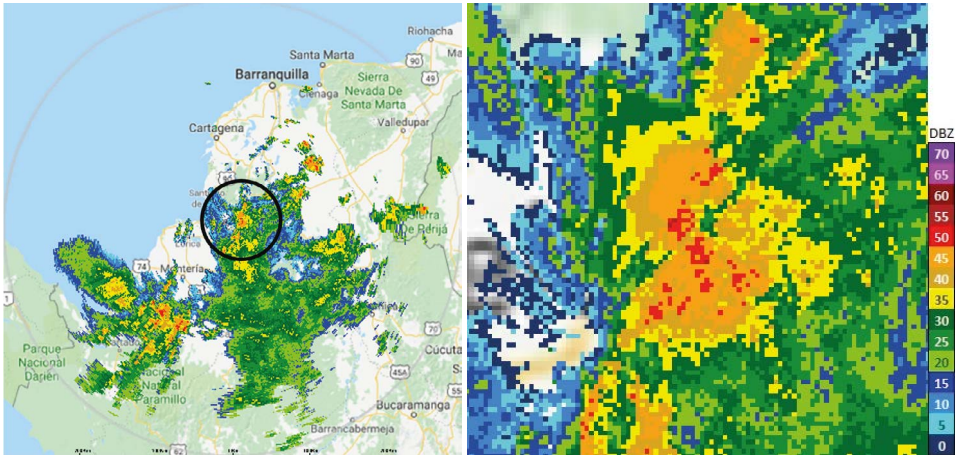


Figura 6.3: Evento 1 de precipitación resultado con ventana 3x3
Fuente: Propia

Con el algoritmo que utiliza ventana de 5x5 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.4, el detalle muestra que la imagen mejora y se parece más a la imagen original.

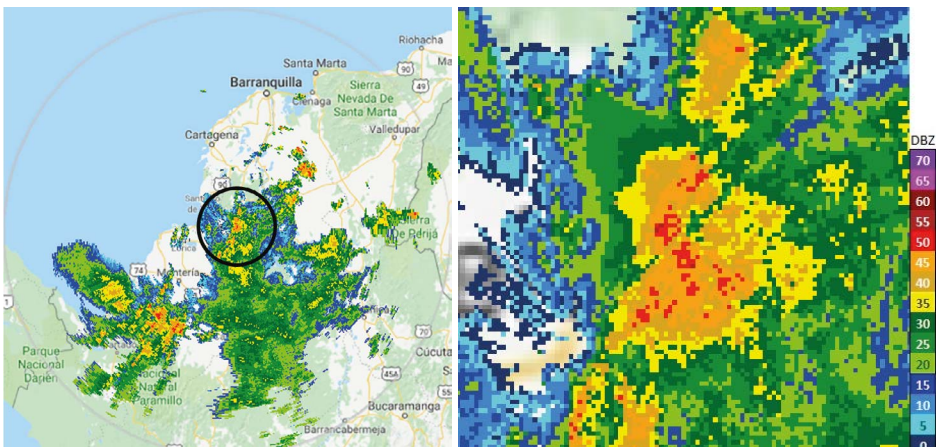


Figura 6.4: Evento 1 de precipitación resultado con ventana 5x5
Fuente: Propia

Finalmente, en la Figura 6.5 se ven los resultados gráficos aplicando el algoritmo con una ventana de 7x7, en este último caso el detalle muestra que se extienden zonas de valores de Z menores al generado por las propagaciones anómalas.

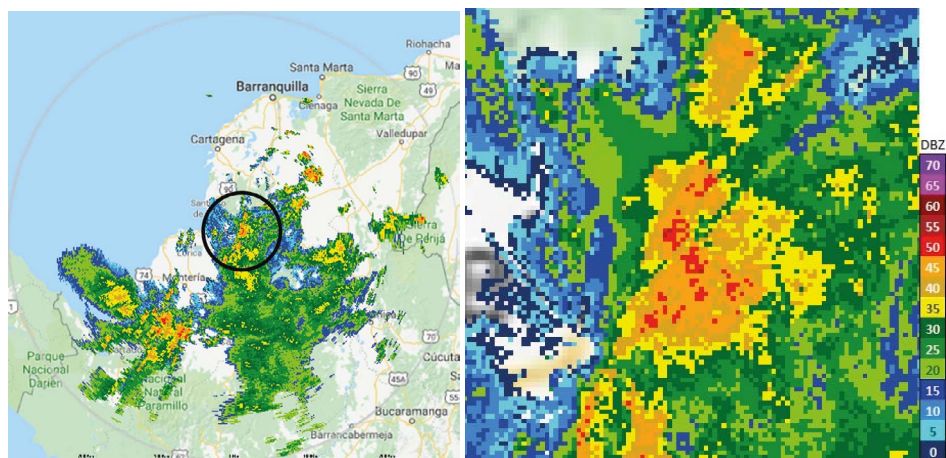


Figura 6.5: Evento 1 de precipitación resultado con ventana 7x7

Fuente: Propia

En la Figura 6.6 se presentan las tendencias de error del evento 1 para cada una de las ventanas utilizadas, cada punto representa el porcentaje de error en cada valor angular del barrido del radar, es decir la gráfica muestra 30 grados del barrido del radar.

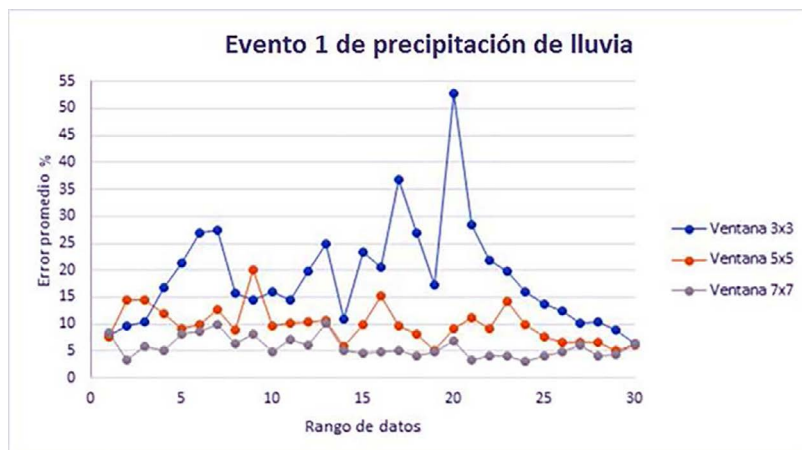


Figura 6.6: Error en evento 1 de precipitación del 25/06/2013

Fuente: Propia

6.2. Resultados evento 2 de precipitación del 28/06/2013

El evento 2 se muestra gráficamente en la Figura 6.7 con todo el set de datos tomados directamente por el radar meteorológico, presentando además un detalle de la zona que se analizó.

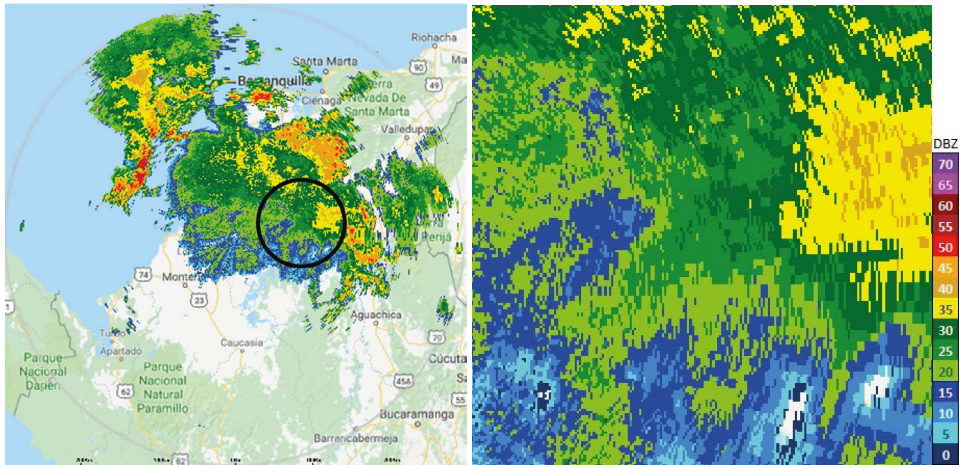


Figura 6.7: Evento 2 de precipitación sin modificaciones
Fuente: Propia

Agregando las propagaciones anómalas al conjunto de datos, esto se logra modificando los datos originales se obtiene la zona mostrada en la Figura 6.8, de igual manera se muestra un detalle de dicha zona.

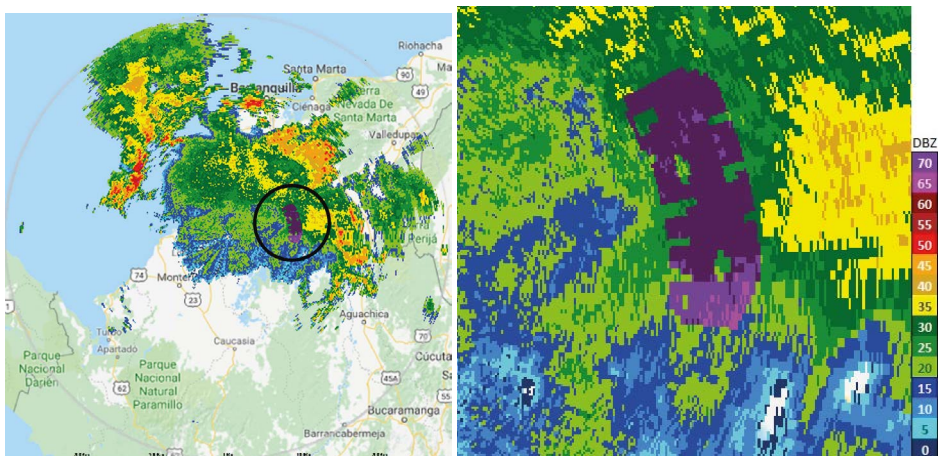


Figura 6.8: Evento 2 de precipitación zona modificada con propagaciones anómalas
Fuente: Propia

Aplicando el algoritmo de corrección con una ventana de 3x3 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.9, con su respectivo detalle, visualmente es similar a la imagen original cuando es presentada de manera global, pero con el detalle mostrado puede verse que tiene diferencias respecto a la original.

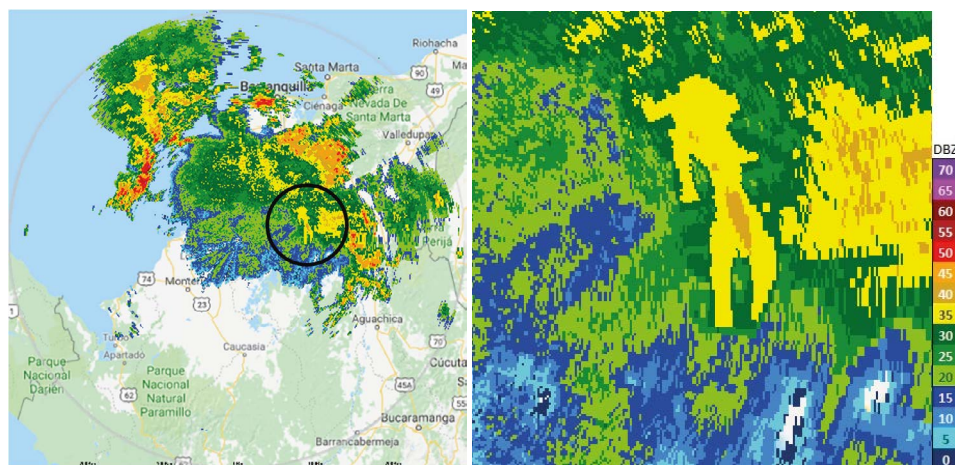


Figura 6.9: Evento 2 de precipitación resultado con ventana 3x3
Fuente: Propia

Con el algoritmo de corrección que utiliza ventana de 5x5 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.10, el detalle muestra que la imagen mejora, pareciéndose más a la imagen original.

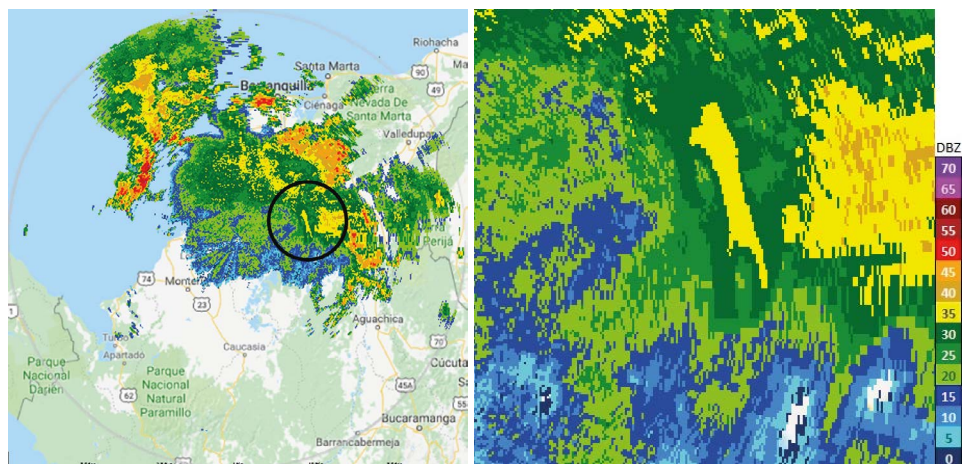


Figura 6.10: Evento 2 de precipitación resultado con ventana 5x5
Fuente: Propia

Para finalizar el análisis del evento 2 en la Figura 6.11 se ven los resultados gráficos aplicando el algoritmo con una ventana de tamaño 7x7, en este último caso el detalle muestra que se extienden zonas de valores de Z menores al generado por las propagaciones anómalas, mejorando aún más la calidad de la imagen.

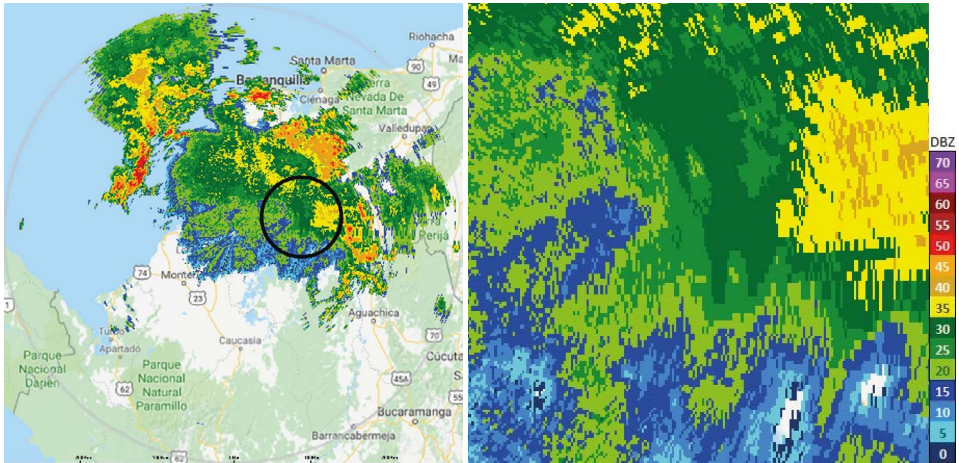


Figura 6.11: Evento 2 de precipitación resultado con ventana 7x7

Fuente: Propia

La Figura 6.12 presenta las tendencias de error del evento 2 para cada una de las ventanas utilizadas, en la gráfica se muestran 32 grados del barrido del radar.

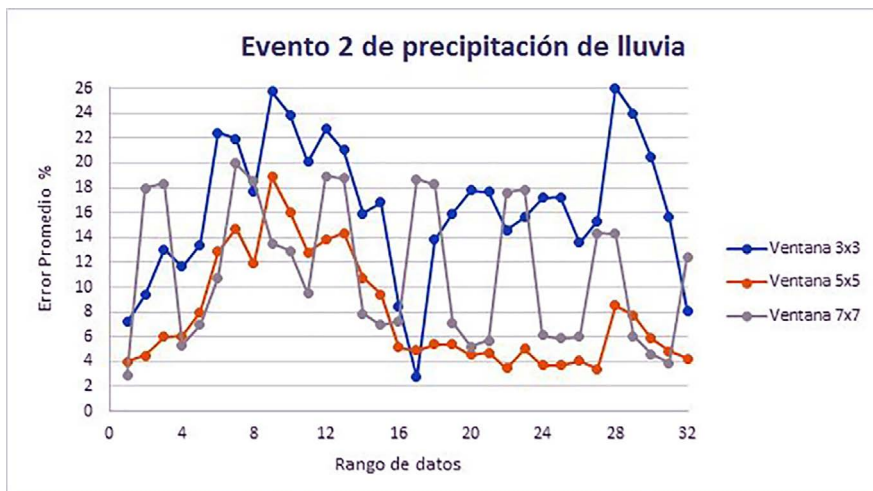


Figura 6.12: Error en evento 2 de precipitación del 28/06/2013

Fuente: Propia

6.3. Resultados evento 3 de precipitación del 11/07/2013

El evento 3 es mostrado en la Figura 6.13 con datos tomados por el radar, presentando además un detalle de la zona que se analizó.

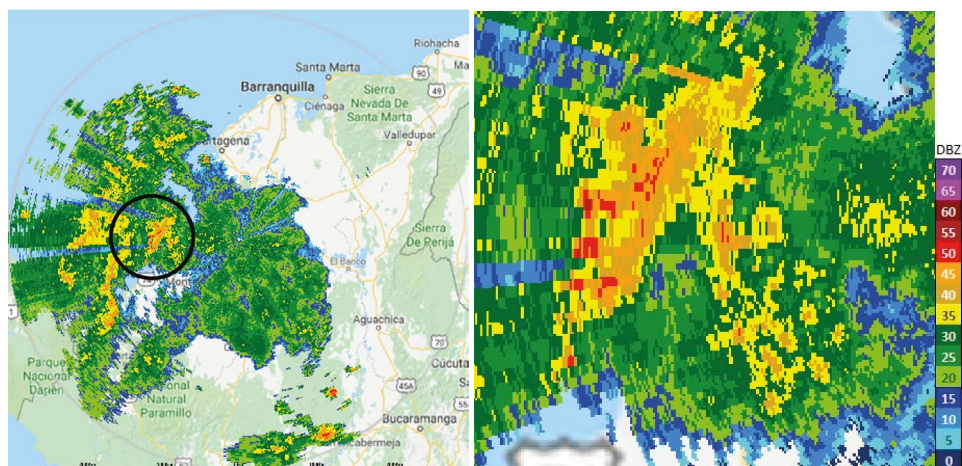


Figura 6.13: Evento 3 de precipitación sin modificaciones
Fuente: Propia

Agregando las propagaciones anómalas al conjunto de datos, esto se logra modificando los datos originales se obtiene la zona mostrada en la Figura 6.14, de igual manera se muestra un detalle de dicha zona.

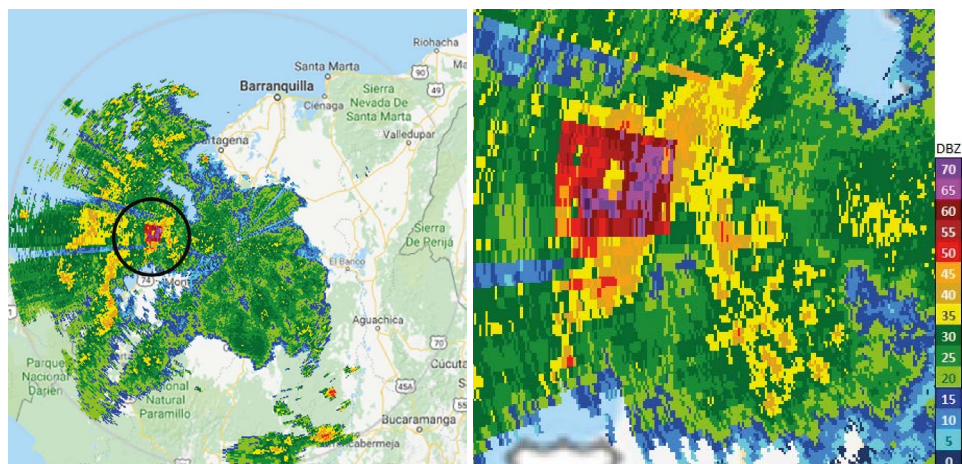


Figura 6.14: Evento 3 zona modificada con propagaciones anómalas
Fuente: Propia

Aplicando el algoritmo de corrección con una ventana de 3x3 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.15 con su respectivo detalle, visualmente es similar a la imagen original cuando es presentada de manera global, pero con el detalle mostrado puede verse que tiene diferencias respecto a la original.

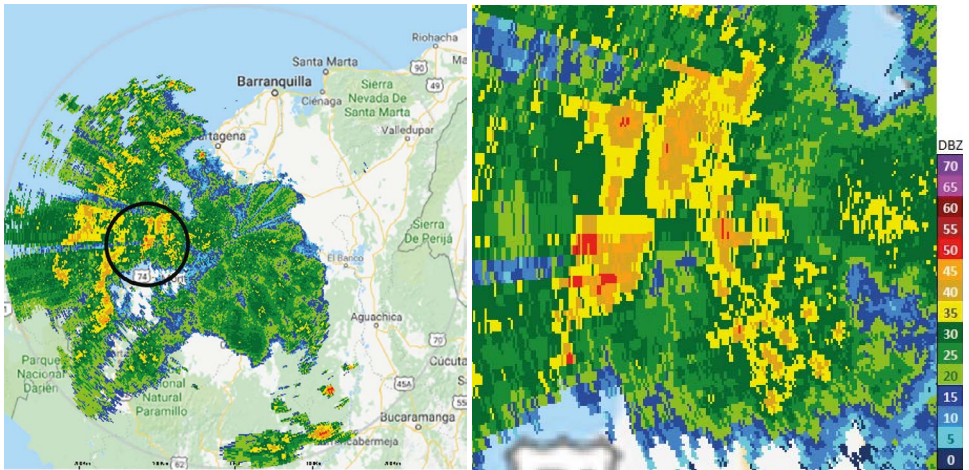


Figura 6.15: Evento 3 de precipitación resultado con ventana 3x3
Fuente: Propia

Con el algoritmo de corrección que utiliza ventana de 5x5 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.16, el detalle muestra que la imagen mejora, pareciéndose más a la imagen original.

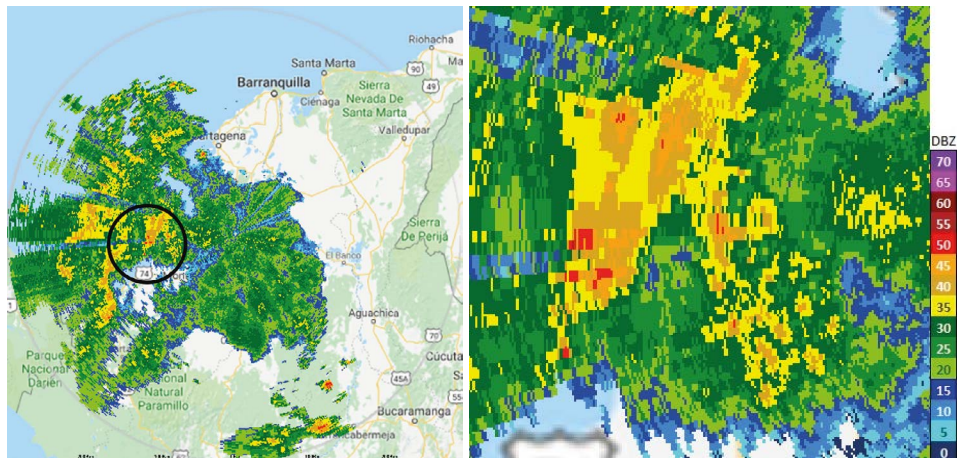


Figura 6.16: Evento 3 de precipitación resultado con ventana 5x5
Fuente: Propia

Finalizando el análisis del evento 3 en la Figura 6.17 se ven los resultados gráficos aplicando el algoritmo con una ventana de tamaño 7x7, en este último caso el detalle muestra que se extienden zonas de valores de Z menores al generado por las propagaciones anómalas, mejorando aún más la calidad de la imagen.

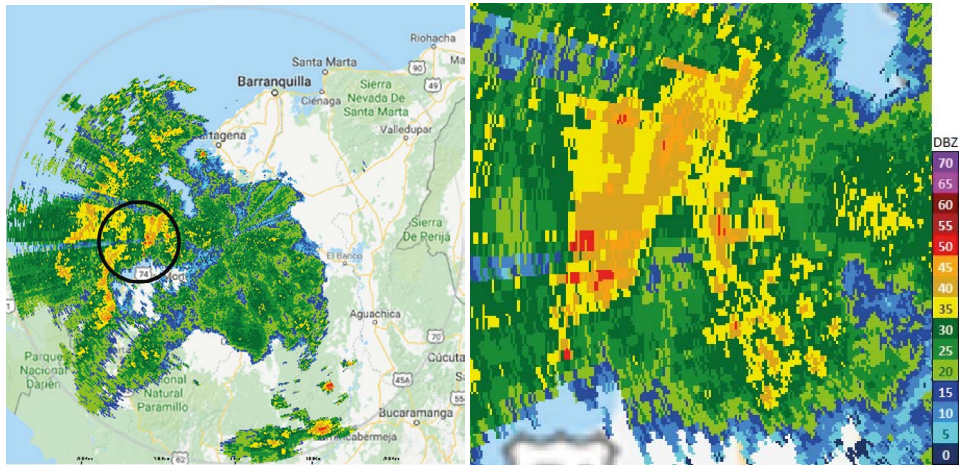


Figura 6.17: Evento 3 de precipitación resultado con ventana 7x7
Fuente: Propia

La Figura 6.18 presenta las tendencias de error para el evento 3 para cada una de las ventanas utilizadas, en la gráfica se muestran 10 grados del barrido del radar.

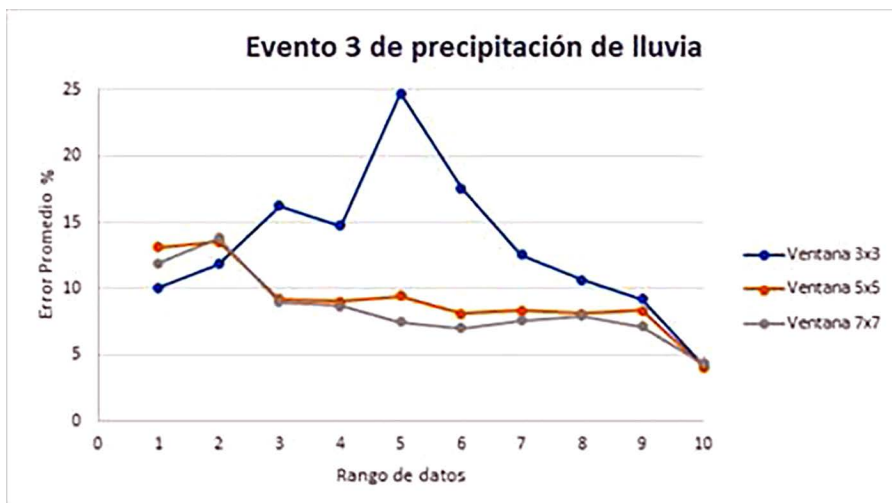


Figura 6.18: Error evento 3 de precipitación del 11/07/2013
Fuente: Propia

6.4. Resultados evento 4 de precipitación del 29/07/2013

En la Figura 6.19 se muestra gráficamente el evento 4 con los datos tomados por el radar, presentando además un detalle de la zona que se analizó.

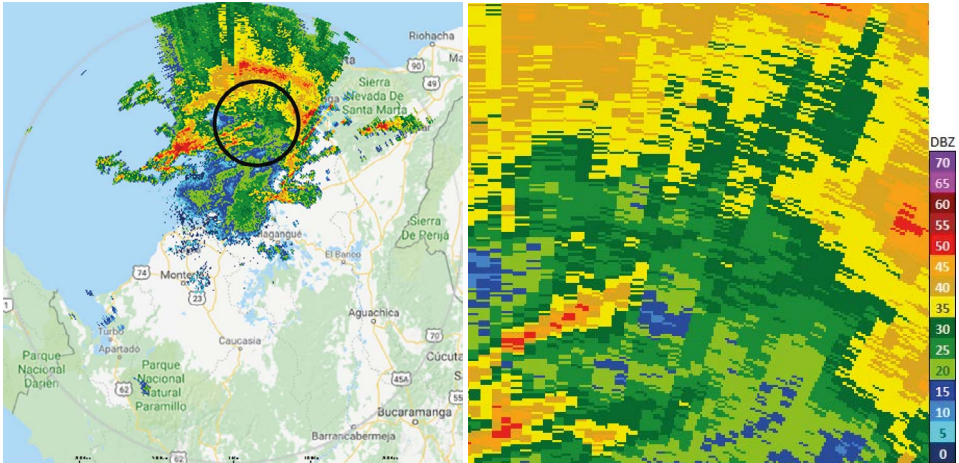


Figura 6.19: Evento 4 de precipitación sin modificaciones
Fuente: Propia

Agregando las propagaciones anómalas al conjunto de datos se obtiene la zona mostrada en la Figura 6.20, de igual manera se muestra un detalle de dicha zona.

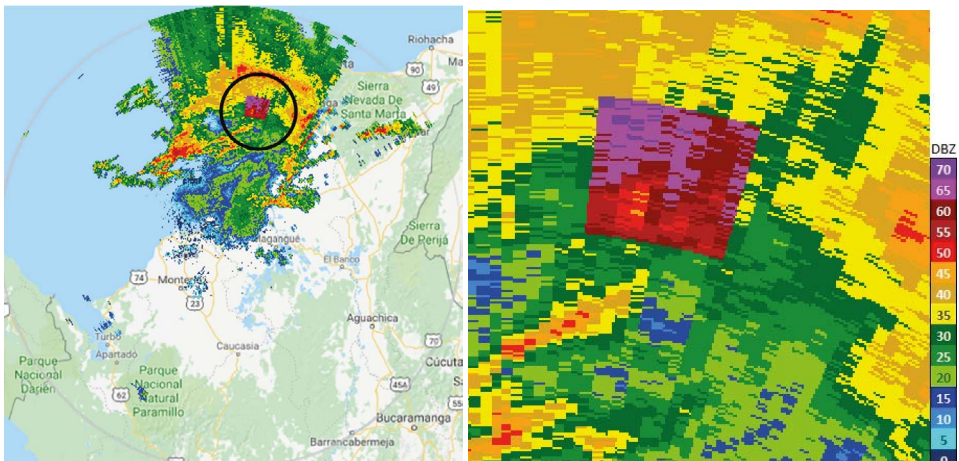


Figura 6.20: Evento 4 zona modificada con propagaciones anómalas
Fuente: Propia

Aplicando el algoritmo de corrección con una ventana de 3x3 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.21, con su respectivo detalle, visualmente es similar a la imagen original cuando es presentada de manera global, pero con el detalle mostrado puede verse que tiene diferencias respecto a la original.

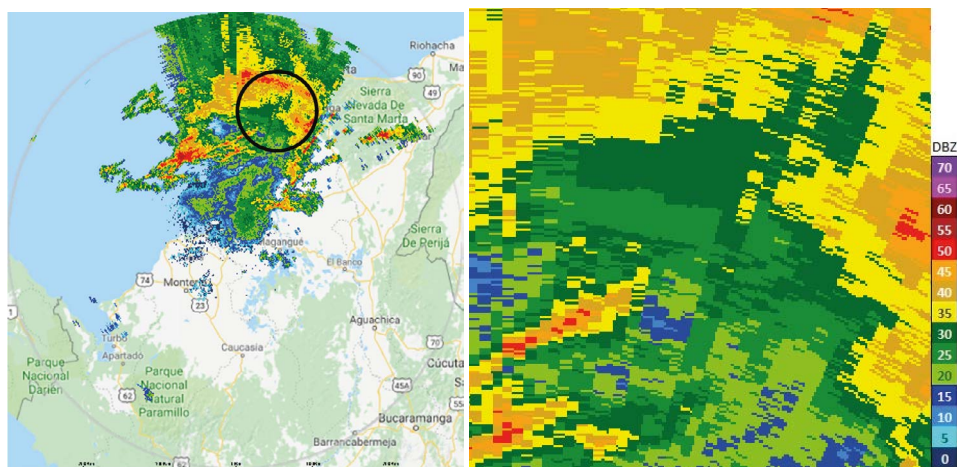


Figura 6.21: Evento 4 de precipitación resultado con ventana 3x3
Fuente: Propia

Con el algoritmo de corrección que utiliza ventana de 5x5 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.22, el detalle muestra que la imagen mejora, pareciéndose más a la imagen original.

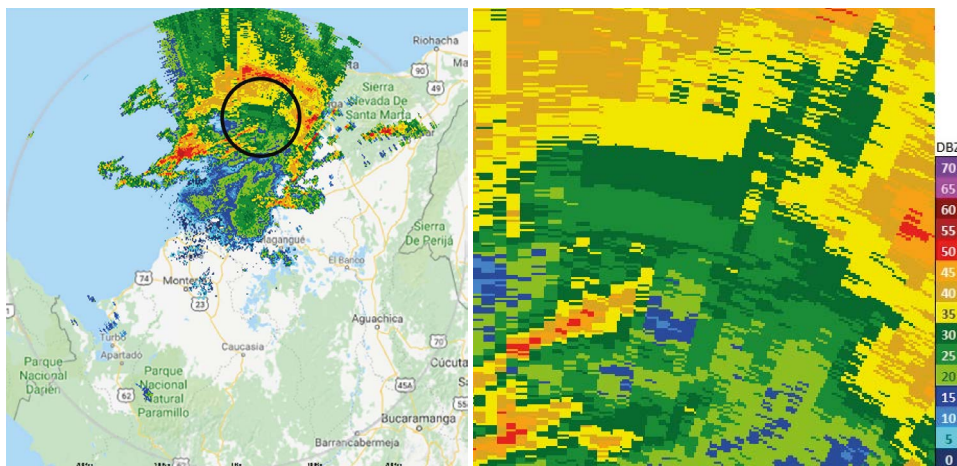


Figura 6.22: Evento 4 de precipitación resultado con ventana 5x5
Fuente: Propia

Para finalizar el análisis del evento 4 en la Figura 6.23 se ven los resultados gráficos aplicando el algoritmo con una ventana de tamaño 7x7, en este último caso el detalle muestra que se extienden zonas de valores de Z menores al generado por las propagaciones anómalas, mejorando aún más la calidad de la imagen.

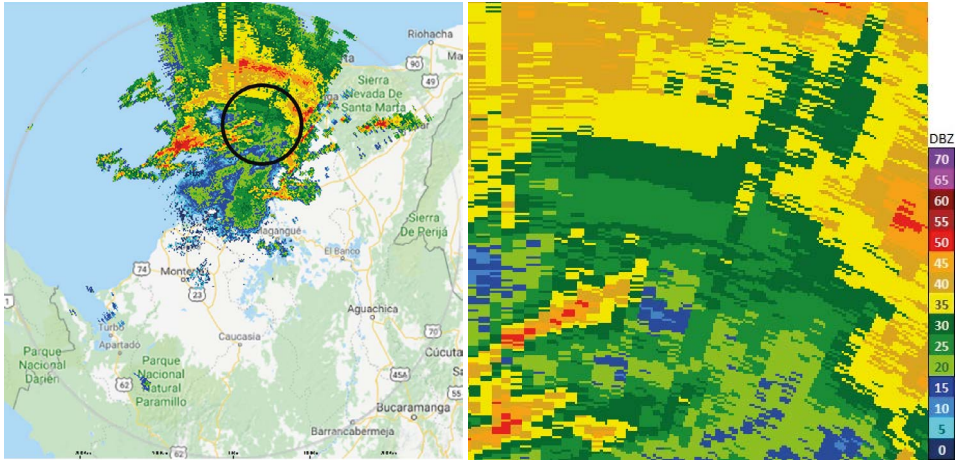


Figura 6.23: Evento 4 de precipitación resultado con ventana 7x7
Fuente: Propia

La Figura 6.24 presenta las tendencias de error para el evento 4 para cada una de las ventanas utilizadas, en la gráfica se muestran 10 grados del barrido del radar.

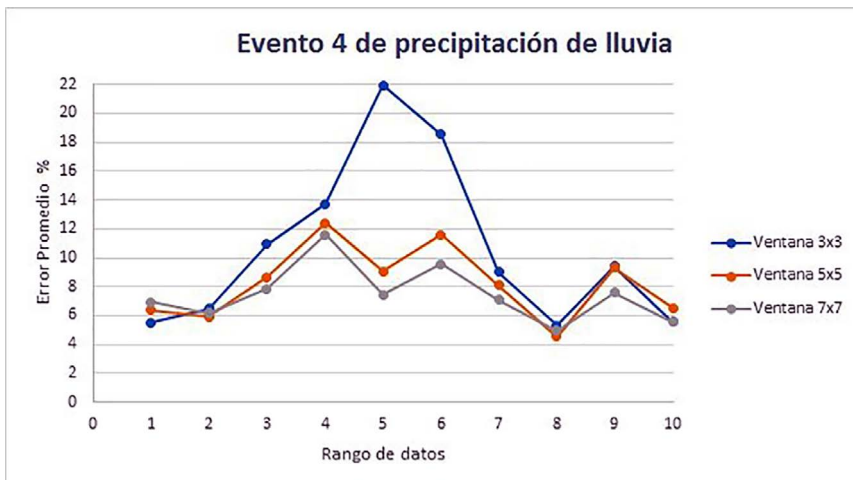


Figura 6.24: Error evento 4 de precipitación del 29/07/2013
Fuente: Propia

6.5. Resultados evento 5 de precipitación del 30/07/2013

El evento 5 es mostrado en la Figura 6.25 con los datos tomados por el radar, presentando además un detalle de la zona que se va a analizar.

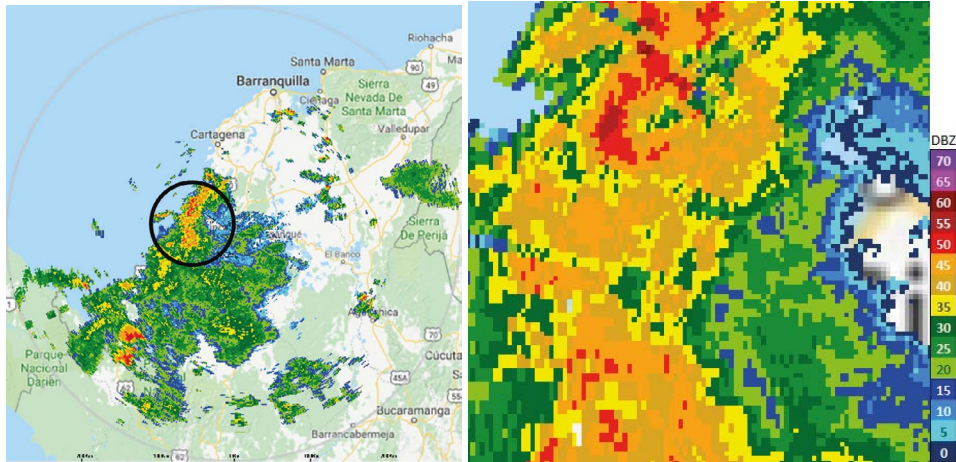


Figura 6.25: Evento 5 de precipitación sin modificaciones

Fuente: Propia

Agregando las propagaciones anómalas al conjunto de datos, esto se logra modificando los datos originales se obtiene la zona mostrada en la Figura 6.26, de igual manera se muestra un detalle de dicha zona.

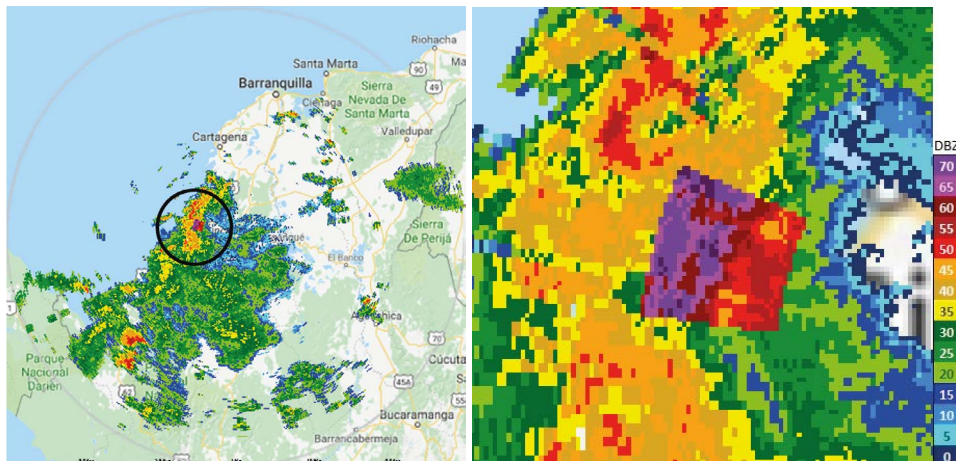


Figura 6.26: Evento 5 zona modificada con propagaciones anómalas

Fuente: Propia

Aplicando el algoritmo de corrección con una ventana de 3x3 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.27, con su respectivo detalle, visualmente es similar a la imagen original cuando es presentada de manera global, pero con el detalle mostrado puede verse que tiene diferencias respecto a la original.

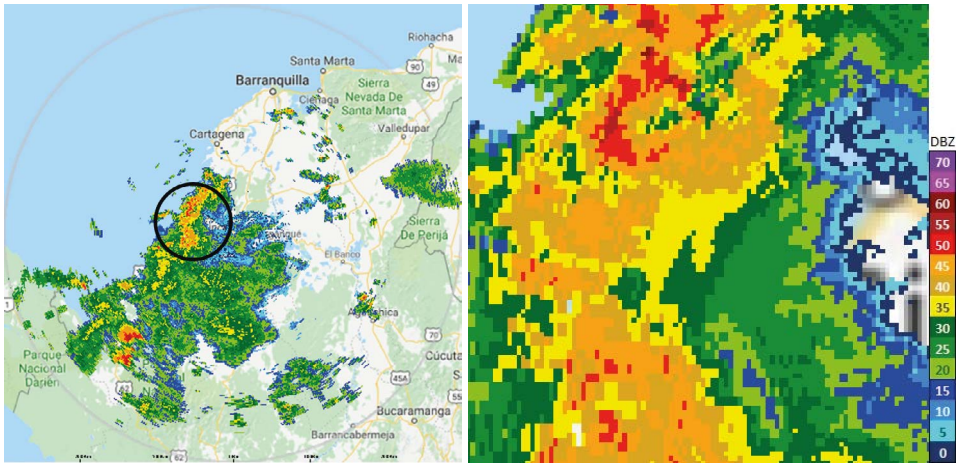


Figura 6.27: Evento 5 de precipitación resultado con ventana 3x3
Fuente: Propia

Con el algoritmo de corrección que utiliza ventana de 5x5 se obtiene la imagen mostrada en la Figura 6.28, el detalle muestra que la imagen mejora, pareciéndose más a la imagen original.

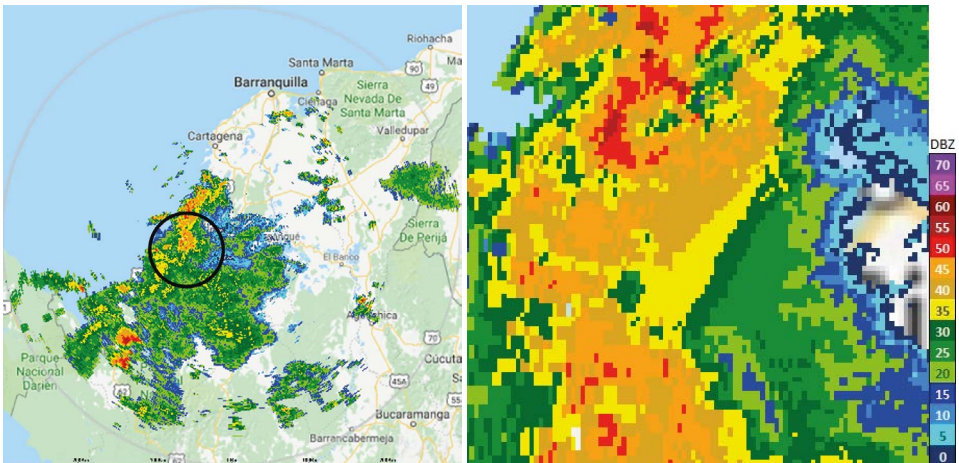


Figura 6.28: Evento 5 de precipitación resultado con ventana 5x5
Fuente: Propia

Para finalizar el análisis del evento 5 en la Figura 6.29 se ven los resultados gráficos aplicando el algoritmo con una ventana de tamaño 7x7, en este último caso el detalle muestra que se extienden zonas de valores de Z menores al generado por las propagaciones anómalas, mejorando aún más la calidad de la imagen.

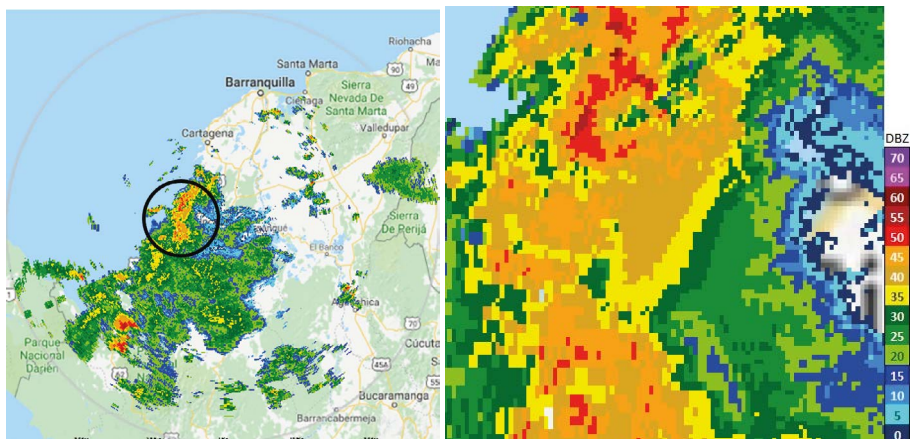


Figura 6.29: Evento 5 de precipitación resultado con ventana 7x7
Fuente: Propia

La Figura 6.30 presenta las tendencias de error para el evento 5 para cada una de las ventanas utilizadas, en la gráfica se muestran 15 grados del barrido del radar.

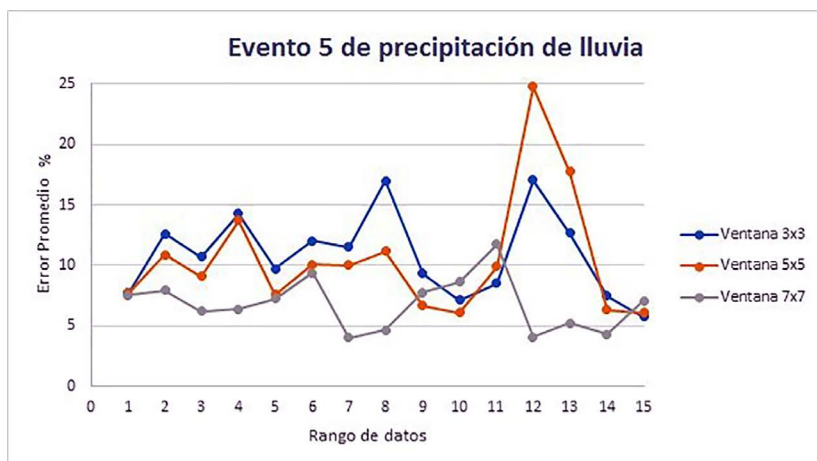


Figura 6.30: Error evento 5 de precipitación del 30/07/2013
Fuente: Propia

6.6. Resultados finales

En la Tabla 6.1 y en la Figura 6.31 se presenta un resumen con los porcentajes de error promedio obtenidos para cada uno de los eventos diferenciándolos de acuerdo al tamaño de la ventana utilizada en el filtro.

Evento No.	Fecha	% Error Ventana 3x3	% Error Ventana 5x5	% Error Ventana 7x7
1	25/06/2013	17.56	8.73	4.78
2	28/06/2013	15.50	6.91	5.81
3	11/07/2013	10.98	6.52	5.30
4	29/07/2013	8.87	5.89	4.67
5	30/07/2013	9.61	8.30	4.86

Tabla 6.1: Porcentajes de error para cada uno de los eventos

Como se puede evidenciar el algoritmo implementado con un filtro de media con ventana 7x7 presenta para todos los casos un mejor desempeño, esto debido al aprovechamiento de los datos circundantes a la ventana de trabajo, dado que potencialmente puede aprovechar hasta 48 datos en los alrededores del punto de corrección acercando el resultado a valores muchos más cercanos al adecuado.

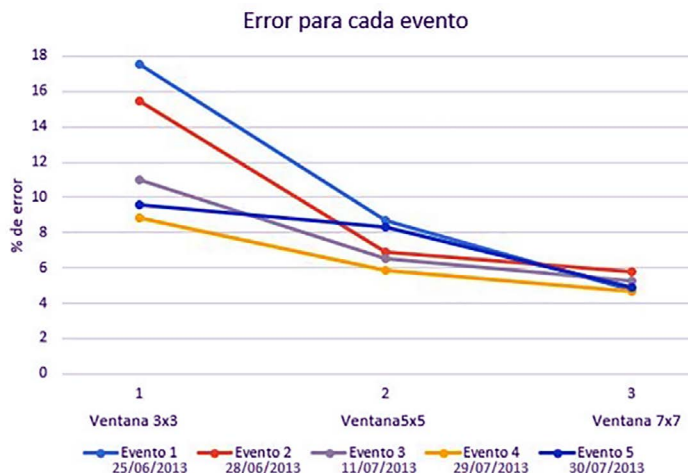


Figura 6.31: Porcentajes de error para cada uno de los eventos

Fuente: Propia

Se realizaron pruebas preliminares ejecutando el algoritmo retroalimentándolo con los datos obtenidos al ejecutarlo, es decir se realizaron pruebas con dos y tres repeticiones mostrando una mejora en el margen de error para todos los casos. En la Tabla 6.2 y en las Figura 6.32 a 6.36 se muestran dichos resultados.

Evento No.	% Error Ventana 3x3			% Error Ventana 5x5			% Error Ventana 7x7		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	17.56	14.92	12.32	8.73	7.99	6.45	4.78	3.78	2.99
2	15.50	11.21	10.58	6.91	6.03	5.12	5.81	4.37	3.18
3	10.98	9.14	8.43	6.52	5.13	4.24	5.30	4.02	2.97
4	8.87	8.19	7.98	5.89	4.78	4.01	4.67	3.29	2.66
5	9.61	8.06	6.84	8.30	7.19	6.11	4.86	3.13	2.07

Tabla 6.2: Resultados múltiples ejecuciones del algoritmo

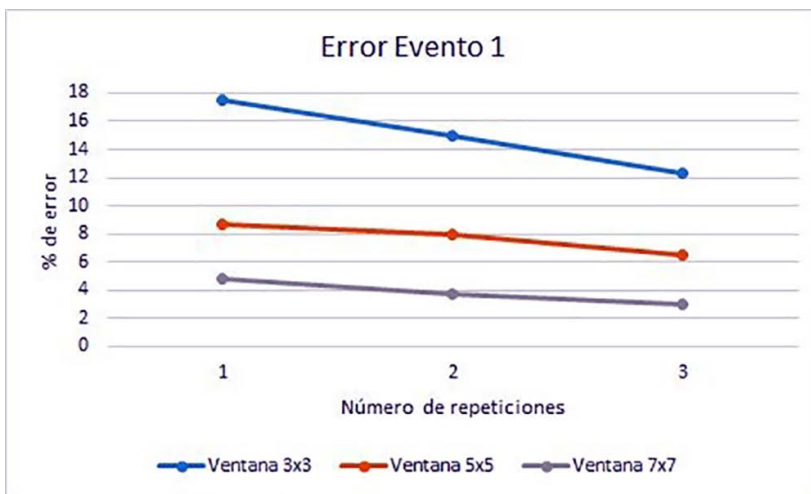


Figura 6.32: Porcentajes de error para evento 1 con múltiples ejecuciones

Fuente: Propia

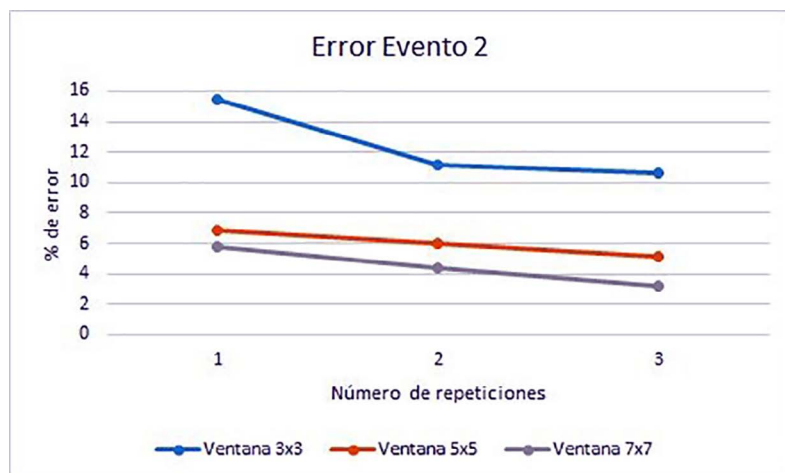


Figura 6.33: Porcentajes de error para evento 2 con múltiples ejecuciones
Fuente: Propia

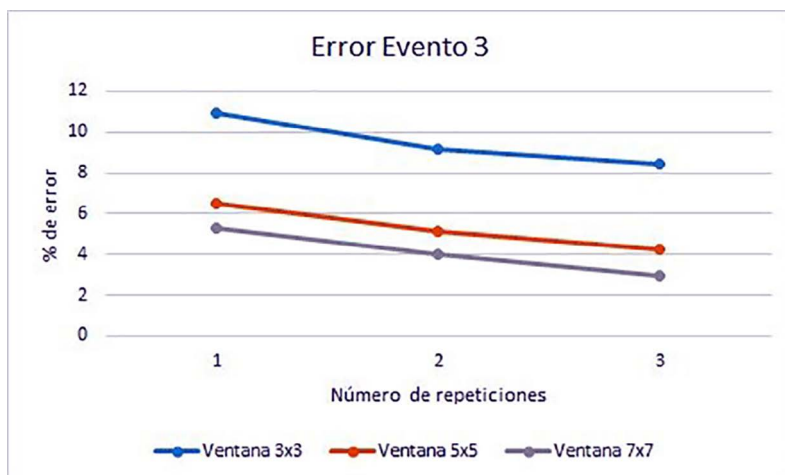


Figura 6.34: Porcentajes de error para evento 3 con múltiples ejecuciones
Fuente: Propia

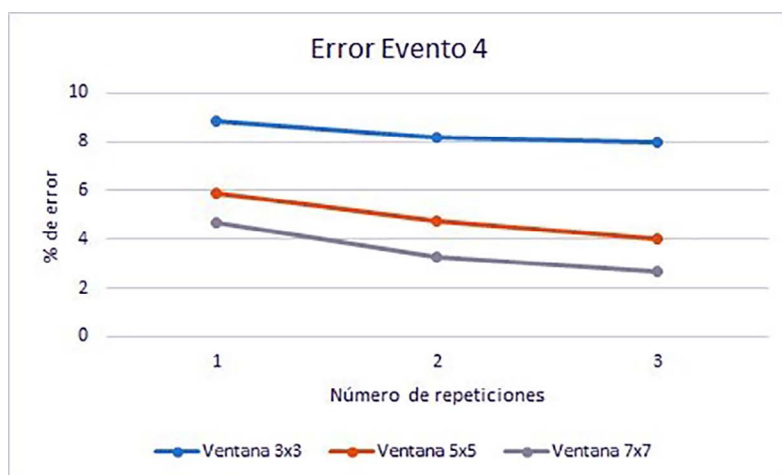


Figura 6.35: Porcentajes de error para evento 4 con múltiples ejecuciones
Fuente: Propia

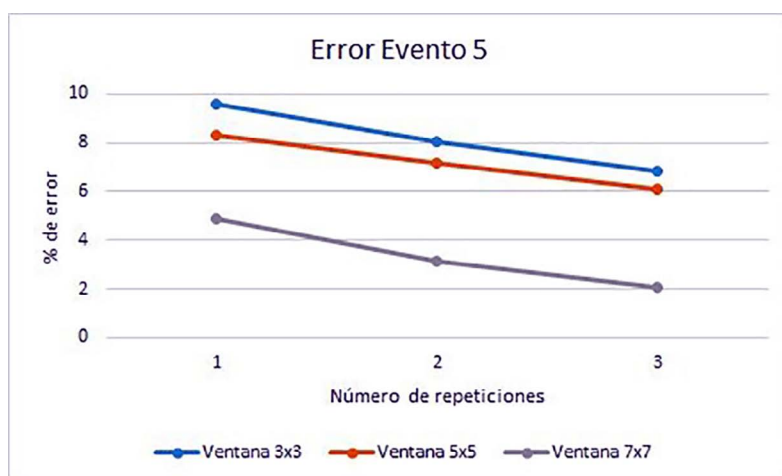


Figura 6.36: Porcentajes de error para evento 5 con múltiples ejecuciones
Fuente: Propia

Conclusiones

- El proceso de clasificación de eventos en radares meteorológicos polarimétricos depende en gran medida del tipo de información que se desee obtener, cuando se requiere simplemente separar eventos meteorológico de eventos no meteorológicos se requiere entonces el uso de 3 variables directas, Z , Z_{DR} y ρ_{HV} , y de 2 variables indirectas $SD(Z)$ y $SD(\phi_{DP})$ cada. El Tablazo, al que se le realizaron pruebas estadísticas y sus resultados generales mostraron variaciones fuera de los rangos establecidos, con este problema no pudieron ser utilizados para esta investigación.

- Para el clasificador diseñado se determinó que la variable con más peso dentro del proceso es ρ_{HV} ya que esta permite diferenciar en gran medida un objetivo meteorológico de uno no meteorológico, por los rangos que esta variable maneja sobre todo es posible diferenciar eficientemente entre un eco meteorológico y un eco biológico, además esta variable en particular es la única que no se ve afectada por las atenuaciones típicas presentes en los radares meteorológicos.

- El clasificador diseñado tuvo que ser ajustado a las características de la zona ecuatorial donde está ubicado el radar, ya que los encontrados en la literatura aplican para zonas con estaciones lo que genera resultados

erróneos. El parámetro que más requirió ajuste para el correcto funcionamiento del clasificador fue la variable ρ_{HV} , puesto que con los valores típicos esta variable detecta eventos relacionados con nieve que no aplican para zonas ecuatoriales.

- La lógica difusa se presenta como la herramienta ideal para el desarrollo del clasificador dados los grandes valores de incertidumbre que manejan las variables utilizadas.

- Para el algoritmo de corrección se hizo uso de un filtro de media (modificado), se seleccionó este tipo de filtro porque la información generada en el radar puede ser vista como una imagen con ruido, al aplicar el filtro se elimina una gran cantidad de ruido que para el caso del proyecto de investigación corresponde a las propagaciones anómalas.

- La diferencia en el tamaño de las ventanas del filtro genera a su vez diferencias en la eficiencia del mismo teniendo errores entre el 4.6% y el 17.5%, en el primer caso para una ventana de 7x7, el segundo caso para una ventana de 3x3.

- Pruebas parciales no mostradas en detalle en esta investigación muestran que ejecutando el algoritmo repetidas veces el error disminuye sustancialmente, sobre todo para el filtro de ventana 3x3, esta disminución puede llegar a 3 o 4 puntos porcentuales.

- Los resultados obtenidos no son completamente concluyentes ya que no se realizaron pruebas con datos en radares de otras zonas del país, por lo que queda una incertidumbre con los resultados que se puedan presentar en esos otros casos.

Bibliografía

Anguera, J. Perez, A. (2008). Teoría de Antenas. (C. C. Deed & LaSalleOnLine, Eds.). Barcelona. Retrieved from http://www.salleurl.edu/semi-presencial/ebooks/ebooks/ebook_teoria_antenas.pdf

Baldini, Luca, Eugenio Gorgucci, and Walter Petersen. 2005. "Implementations of CSU Hydrometeor Classification Scheme for C-Band Polarimetric Radars." 32nd Conference on Radar Meteorology (2000): P11.4.

Bechini, Renzo, and V. Chandrasekar. 2015. "A Semisupervised Robust Hydrometeor Classification Method for Dual-Polarization Radar Applications." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 32(1): 22–47.

Besic, Nikola et al. 2016. "Hydrometeor Classification through Statistical Clustering of Polarimetric Radar Measurements: A Semi-Supervised Approach." : 4425–45.

Le Bouar, E., J. Testud, and T. D. Keenan. 2001. "Validation of the Rain Profiling algorithm 'ZPHI' from the C - Band Polarimetric Weather Radar in Darwin." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18(11): 1819–37.

Bringi, V., M. Thurai, and R. Hannedisen. 2007. "Dual-Polarization Weather Radar Handbook." : 163.

Chandrasekar, V, R Keränen, S Lim, and D Moisseev. 2013. "Recent Advances in Classification of Observations from Dual Polarization Weather Radars." *Atmospheric Research* 119: 97–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.08.014>.

Cogollo, J. (2005). Desarrollo de una base conceptual y aplicación de radares hidro-climatológicos en Colombia. Pontificia Universidad Javeriana.

Dolan, Brenda A., and Steven A. Rutledge. 2007. "An Integrated Display and Analysis Methodology for Multivariable Radar Data." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46(8): 1196–1213.

Evaristo, Raquel, Georges Scialom, Nicolas Viltard, and Yvon Lema[^]. 2010. "Polarimetric Signatures and Hydrometeor Classification of West African Squall Lines." 136(January): 272–88.

Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers*. Harvard Business Review, pp. 37-66.

Garcia Leal. Alberto 2013. "Clasificación Bayesiana de Hidrometeoros Orientados a La Estimación de La Cantidad Precipitada a Partir de Las Medidas de Radar Polarimétrico."

Giangrande, Scott E., John M. Krause, and Alexander V. Ryzhkov. 2008. "Automatic Designation of the Melting Layer with a Polarimetric Prototype of the WSR88D Radar." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47(5): 1354–64.

Gorgucci, Eugenio, and Luca Baldini. 2006. "The Role of C-Band Dual Polarization Radars for GPM Ground Validation." : 32–35.

Gourley, Jonathan J., Anthony J. Illingworth, and Pierre Tabary. 2009. "Absolute Calibration of Radar Reflectivity Using Redundancy of the Polarization Observations and Implied Constraints on Drop Shapes." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 26(4): 689–703.

Gourley, Jonathan J., Pierre Tabary, and Jacques Parent du Chatelet. 2007. "A Fuzzy Logic Algorithm for the Separation of Precipitating from Nonprecipitating Echoes Using Polarimetric Radar Observations." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 24(8): 1439–51.

GRANT, W., Marin, S. E. Pederson. (2001). *Ecología y manejo de recursos naturales: Analisis de sistemas y simulacion*. Ed. Agroamericana, IICTA. San Jose de Costa rica, pp. 35.

Gu, Ji Young et al. 2011. "Polarimetric Attenuation Correction in Heavy Rain at C Band." *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50(1): 39–58.

Houze, Robert A., M. I. Biggerstaff, S. A. Rutledge, and B. F. Smull. 1989. "Interpretation of Doppler Weather Radar Displays of Midlatitude Mesoscale Convective Systems." *Bulletin of the American Meteorological Society* 70(6): 608–19.

Hubbert, J., V. Chandrasekar, V. N. Bringi, and P. Meischner. 1993. "Processing and Interpretation of Coherent Dual-Polarized Radar Measurements." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 10(2): 155–64.

Keenan, T. 2003. "Hydrometeor Classification with a C-Band Polarimetric Radar." 52(December 2002): 23–31.

Keenan, T D. 2003. "Hydrometeor Classification with a C-Band Polarimetric Radar." 29 th International Conference on Radar Meteorology, 12 - 16 July 1999, Montreal, Quebec, Canada 52(July 2002): pp184-187.

Lim, S, V Chandrasekar, and V N Bringi. 2005. "Hydrometeor Classification System Using Dual-Polarization Radar Measurements: Model Improvements and In Situ Verification." 43(4): 792–801.

Lim, Sanghun, and V.N. Bringi Chandrasekar. 2004. "Hydrometeor Classification System Using Dual-Polarization Radar Measurements." 2003 IEEE Workshop on Advances in Techniques for Analysis of Remotely Sensed Data 43(4): 227–36.

Liu, Hongping, and V. Chandrasekar. 2000. "Classification of Hydrometeors Based on Polarimetric Radar Measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Systems, and in Situ Verification." Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 17(2): 140–64.

Marzano, Frank Silvio, Senior Member, Daniele Scaranari, and Mario Montopoli. 2008. "Supervised Classification and Estimation of Hydrometeors From CBand Dual-Polarized Radars: A Bayesian Approach." 46(1): 85–98.

Marzano, Frank Silvio, Senior Member, Daniele Scaranari, and Gianfranco Vulpiani. 2007. "Supervised Fuzzy-Logic Classification of Hydrometeors Using CBand Weather Radars." 45(11): 3784–99.

OMM. 1993. Atlas Internacional De Nubes Manual De Observacion De Nubes Y Otros Meteoros.

Park, Hyang Suk, A. V. Ryzhkov, D. S. Zrnica, and Kyung-Eak Kim. 2009. "The Hydrometeor Classification Algorithm for the Polarimetric WSR-88D: Description and Application to an MCS." Weather and Forecasting 24(3): 730–48.

Park, Hyangsuk, A. V. Ryzhkov, D. S. Zrnica, and Kyung Eak Kim. 2008. "The Hydrometeor Classification Algorithm for the Polarimetric WSR-88D: Description and Application to an MCS." (1999): 730–48.

Paulitsch, H, F Teschl, and W L Randeu. 2009. "Advances in Geosciences DualPolarizationC-BandWeather RadarAlgorithmsfor RainRateEstimationandHydrometeor Classification in an Alpine Region." : 3–8.

Rinehart, Ronald. 2007. El Radar Para Los Meteorólogos. ed. Traducido por: Orlando Rodríguez González.

Ryzhkov, Alexander V., Scott E. Giangrande, and Terry J. Schuur. 2005. "Rainfall Estimation with a Polarimetric Prototype of WSR-88D." *Journal of Applied Meteorology* 44(4): 502–15.

Scarchilli, Gianfranco, Eugenio Goroucci, V Chandrasekar, and Thomas A Seliga. 1993. "Rainfall Estimation Using Polarimetric Techniques at C-Band Frequencies." *Journal of Applied Meteorology* 32(6): 1150–60.

Schuur, T. et al. 2003. "Observations and Classification of Echoes with the Polarimetric WSR-88D Radar." Report of the National Severe Storms Laboratory, Norman, OK 73069(October): 46.

Straka, J. M., D. S. Zrnić, and A. V. Ryzhkov. 2000. "Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations." *Journal of Applied Meteorology* 39(8): 1341–72.

Tamayo, J. (2009). Informacion suministrada por los radares meteorologicos. Madrid.

Thompson, Elizabeth J. et al. 2014. "A Dual-Polarization Radar Hydrometeor Classification Algorithm for Winter Precipitation." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 31(7): 1457–81.

Vidal, Luciano et al. 2017. "C-Band Dual-Polarization Radar Observations of a Massive Volcanic Eruption in South America." 10(3): 960–74.

Vivekanandan, J. et al. 1999. "Cloud Microphysics Retrieval Using S-Band DualPolarization Radar Measurements." *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(3): 381–88.

Vulpiani, Gianfranco, Pierre Tabary, Jacques Parent Du Chatelet, and Frank S. Marzano. 2008. "Comparison of Advanced Radar Polarimetric Techniques for Operational Attenuation Correction at C Band." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25(7): 1118–35.

Zrnic, D. S. et al. 2001. "Testing a Procedure for Automatic Classification of Hydrometeor Types." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18(6): 892–913.

Impreso en papel bond 90 gr.
en familia tipográfica Candara a 11,5 pts.

Amadgraf Impresores Ltda.
Bogotá, D.C., Colombia
Octubre de 2020.

**OTROS TÍTULOS
DE ESTA COLECCIÓN**

**RADIACIÓN-MATERIA:
GEANT₄ HANDS ON!**

**REDES NEURONALES
CONVOLUCIONALES
USANDO KERAS Y
ACELERANDO CON GPU**

**GESTIÓN DE LA ENERGÍA:
EL USUARIO DE ENERGÍA
COMO PARTE ACTIVA
DEL SISTEMA**

**GESTIÓN Y CIBERSEGURIDAD
PARA MICRORREDES
ELÉCTRICAS RESIDENCIALES**

**INTRODUCCION A LA
INVESTIGACIÓN SOBRE
DESASTRES NATURALES Y
CIUDADES INTELIGENTES**

**INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA
FUNDAMENTADA EN LA
GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO**

**LOS RECURSOS DISTRIBUIDOS
DE BIOENERGÍA EN COLOMBIA**

**ARQUITECTURAS DE RED
NEURO-CONVOLUCIONAL
PARA APLICACIONES DE
ROBÓTICA ASISTENCIAL**

Los fenómenos climáticos tienen asociados riesgos que pueden ser mitigados si se reacciona oportunamente a través de un adecuado sistema de alerta temprana que sea capaz de identificar correctamente la cantidad y tipo de precipitación presentado en una zona determinada. De esta manera eventos considerados como posibles amenazas, serán informados en el instante que se presenten, para que se tomen las medidas necesarias que eviten pérdidas humanas y minimicen la cantidad de daños materiales.

En los últimos años el Estado Colombiano ha realizado importantes esfuerzos en la adquisición de cuatro radares meteorológicos Banda C de similares características técnicas ubicados en: Medellín (Santa Elena), Subachoque (El tablazo), Corozal (Aeropuerto de brujas) y San Andrés Islas. No obstante, la inversión realizada, los beneficios recibidos por la misma, no son los mejores ya que en la actualidad no se cuenta con los respectivos estudios ni las investigaciones tendientes a desarrollar algoritmos propios que caractericen las diferentes precipitaciones que se presentan en las regiones colombianas sobre las cuales existe cobertura de radares.

ISBN 978-958-787-239-2



9 789587 872392