



Detección y corrección de propagaciones anómalas en radares meteorológicos

Detection and Correction of Anomal Propagations in Weather Radars

Julián R. Camargo López¹ Ernesto Gómez Vargas² Laura Angélica Cadena Contreras³

Para citar este artículo: J. R. Camargo, E. Gómez y L. A. Cadena, "Detección y corrección de propagaciones anómalas en radares meteorológicos". *Revista Vínculos*, vol 15, no 1, enero-junio 2018, 34-48. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939.13019>.

Recibido: 23-02-2018 / **Aprobado:** 05-03-2018

Resumen

En este artículo se presentan los resultados del diseño de un modelo para la detección y corrección de propagaciones anómalas de los datos de un radar meteorológico en zonas ecuatoriales, específicamente en la geografía colombiana. Inicialmente se realizó la decodificación de los datos medidos por el radar, luego se realizó un análisis estadístico de los mismos, esta información permitió definir las variables que se utilizaron y la ponderación de cada una de ellas en el modelo desarrollado. Luego se diseñó el algoritmo de detección y corrección de dicho modelo; finalmente se desarrolló una serie de pruebas que permitieron validar el adecuado funcionamiento del modelo obteniendo márgenes de error de hasta 4,67%.

Palabras clave: propagaciones anómalas, radar meteorológico, reflectividad, variables polarimétricas.

Abstract

This paper presents the results of the design of a model for the detection and correction of anomalous propagation of a meteorological radar data in equatorial zones, specifically in the Colombian geography. Initially, the decoding of the data measure by the radar was made, then this data got a statistical analysis, this information allowed to define the variables that were used and the weighting of each of them in the developed model. Then the detection and correction algorithm of the model was designed. Finally, a series of tests was developed that allowed validating the proper functioning of the model obtaining margins of error up to 4.67%.

Keywords: anomalous propagation, weather radar, reflectivity, polarimetric variables.

1. Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; estudiante de Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; docente de planta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: jcamargo@udistrital.edu.co
2. Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia; doctor en Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana; docente de planta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: egomez@udistrital.edu.co
3. Ingeniera Catastral y Geodesta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; estudiante de Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: lacadenacontreras@gmail.com

1. Introducción

El uso de radares meteorológicos diseñados para vigilar de manera continua (en tiempo y espacio) la formación de precipitaciones permite una medición meteorológica completa, así como la gestión de los datos generados por estos; lo anterior es esencial para que la industria de la aviación opere de manera adecuada y segura, también es importante para prever o evitar catástrofes generadas por eventos climáticos relacionados con precipitaciones. De igual forma, los usos de estos equipos no se limitan a fines aeronáuticos y de predicción del clima, son utilizados también como un complemento con estaciones meteorológicas que permiten la gestión de embalses, canales de riego y fuentes hídricas. Cuando se observa una imagen de radar se busca una imagen de la distribución de la precipitación (llamado "eco") y su intensidad. Los ecos de radar están representados gráficamente por una serie de píxeles de colores, cada color tiene asociada una escala de intensidad que representa lo que se llama la reflectividad (dBZ) y otra escala que representa la tasa correspondiente de caída, que es una interpretación de la forma de la precipitación, la reflectividad está vinculada a la intensidad de lluvia en milímetros por hora (mm/h) [1].

El radar meteorológico genera un pulso de microondas cuyo camino depende del índice de refracción del medio (en este caso la atmósfera) a través del cual se propaga; el índice de refracción de la atmósfera está relacionado con la temperatura, la presión y el contenido de vapor de agua. En ocasiones los gradientes verticales de estas variables pueden ser tan grandes que pueden doblar el haz del radar de la trayectoria ideal en una atmósfera estándar, un fenómeno conocido como propagación anómala; además, si los gradientes de temperatura o humedad son lo suficientemente grandes como el haz del radar, este puede llegar a ser atrapado en las capas superficiales de la atmósfera produciendo retornos de tierra de la señal [2].

La detección automática de las propagaciones anómalas es de fundamental importancia en

aplicaciones de estimación cuantitativa de precipitación, ya que estas podrían llevar a grandes sobreestimaciones de los totales de precipitación e iniciar una convección espuria. Por otra parte, con pequeños errores en la estimación de la precipitación cuantitativa (ECP) se ha demostrado que al no propagarse de manera lineal el índice máximo y el volumen de escorrentía en los cálculos hidrológicos se puede tener potencialmente un impacto dramático negativo en la eficacia de los pronósticos de inundaciones [2].

Se han desarrollado métodos a fin de mitigar el efecto de las propagaciones anómalas y cada uno tiene sus ventajas y deficiencias. El primero es la ubicación del radar a una altura considerable sobre el nivel del mar, ya que una condición propicia para las propagaciones anómalas suele darse cerca del nivel de mar; cuando la ubicación adecuada del radar no es posible se presentan otros métodos para solucionar el problema, que se pueden clasificar en dos categorías: aquellos que realizan el procesamiento de la señal en el haz del radar de retorno (en el sitio de radar) y aquellos que analizan la post-adquisición de datos [2].

El post-tratamiento de los datos se basa en el análisis de cantidades derivadas de la información espacial y temporal del campo de reflectividad; la información espacial se maneja en forma de gradientes en el campo de reflectividad entre las diversas elevaciones adyacentes, ya sea de forma horizontal o vertical [3], [4], [5]. Hay diferentes descripciones matemáticas del gradiente del campo de reflectividad, las comunes son la textura, giro [5] y las características estadísticas (media, mediana, moda y desviación estándar), calculados dentro de un barrido local de la elevación en cuestión. Estos campos suelen presentar muy diferentes funciones de distribución de probabilidad (pdf) para ecos de precipitación o propagaciones anómalas [2]. Parámetros derivados del campo de gradiente de reflectividad se han utilizado en diferentes algoritmos de clasificación probabilísticos incluyendo la lógica difusa [6], [7], [8], redes neuronales [9], [10], [11] y bayesiano [12], [13].

Por otro lado, en zonas ecuatoriales (donde no se presenta el fenómeno de las estaciones) y, específicamente en Colombia, no se han realizado estudios relacionados con este tipo de anomalías, a excepción de algunos casos aislados, por lo que podría mejorarse el uso de los radares existentes en el país, ubicados en Corozal (Sucre), El Tablazo (Cundinamarca) y la isla de San Andrés, todos adquiridos recientemente con tecnología nueva en el país, por lo que aún no se tiene claridad sobre cómo dar uso adecuado a sus datos.

Dada la gran variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones los modelos y estudios realizados en otras zonas del mundo no son aplicables para zonas tropicales y específicamente para Colombia como lo explican Hurtado, *et al.*:

La complejidad de la hidrología colombiana se debe en gran parte a la cantidad de factores que intervienen en la distribución espacial y temporal de la precipitación. La distribución espacial de la lluvia en el territorio colombiano la determina principalmente su dinámica tropical, el desplazamiento de la ZCIT a lo largo del año, las fuentes de humedad propias de la cuenca amazónica y las provenientes del Océano Pacífico y Atlántico y su fisiografía que tiene como principal componente la cordillera de los Andes, con valles oceánicos e interandinos.

La variabilidad temporal de la precipitación en Colombia está determinada por diversos factores que operan a diferentes escalas como el cambio climático, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación Cuasi-Bienal, el ENSO, la ZCIT, el chorro del Chocó, la dinámica de los Sistemas Convectivos de Mesoescala, la oscilación de Madden-Julian, la dinámica tropical y las características fisiográficas del país. El alejamiento de las fuentes de aire húmedo y la orientación de los valles y vertientes también son causas de gran variabilidad de la lluvia.”[14]

Ahora bien, el presente artículo se estructura de la siguiente forma: en la sección dos se muestran algunas definiciones importantes; en la tercera sección

se realiza una descripción del radar utilizado y el análisis de datos medidos por este; a continuación, en la sección cuatro se explica el modelo conceptual del diseño que determina las variables a utilizar en el desarrollo del algoritmo; en la sección cinco se presenta el desarrollo formal del algoritmo; y, finalmente, en la seis se muestran los resultados obtenidos para mostrar las conclusiones de la investigación.

2. Conceptualización

2.1. El radar

El radar es un sistema electrónico que permite detectar objetos fuera del alcance de la vista y determinar la distancia a que se encuentran proyectando sobre ellos ondas de radio. La palabra radar corresponde a las iniciales de *radio detection and ranging*.

La capacidad de los radares meteorológicos para detectar la lluvia ya era conocida en los años 40, su desarrollo inicial se produjo durante la segunda guerra mundial tras la invención del magnetrón de resonancia, con el que fue posible emitir una cantidad considerable de potencia a unas longitudes de onda de varios centímetros. Una de las consecuencias no buscadas fue que la lluvia y la nieve se hicieron claramente visibles [15].

2.2. Funcionamiento básico

El radar meteorológico emite a través de una antena un pulso de energía electromagnética de duración t (del orden de los μs) y de longitud de onda λ (del orden de los centímetros). Dicha 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 se distribuye en forma de lóbulo: es mucho mayor en el centro y decrece al alejarse de este; ya que es imposible confinar toda la energía en dicho cono, parte de esta escapa fuera de él. Así, la energía emitida se distribuye en forma de un lóbulo central y unos lóbulos secundarios de menor energía [16].

Cuando esa energía es interceptada por un ‘blanco’ se dispersa en todas direcciones, de forma que una fracción es devuelta en dirección al radar y captada por el receptor. La distancia al ‘blanco’ se determina registrando el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de la energía y sabiendo que dicha energía se trasmite a la velocidad de la luz.

2.3. Tipos de radares meteorológicos

En la Tabla 1 puede verse un resumen de los diversos tipos de radares meteorológicos según la banda de frecuencia.

2.4. Variables polarimétricas

La principal dificultad en las mediciones con radar está relacionada con el diámetro de las gotas, así se llega al uso de los radares polarimétricos, que tienen la capacidad de emitir microondas con doble polarización, incorporando las 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. 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 1 estén estos valores, más pequeñas y más esféricas serán [18].

2.5. Propagaciones Anómalas (PA)

En condiciones normales el índice de refracción, que depende de la temperatura, la presión y la humedad, decrecen con la altura de forma que el haz tiende a incurvarse hacia abajo pero más lentamente que la curvatura de la tierra. Por el contrario, cuando la atmósfera presenta gradientes importantes de temperatura presión o humedad, la trayectoria del haz puede incurvarse tanto por encima como por debajo de su trayectoria habitual, produciéndose lo que se denomina propagación anómala (PA) [16].

3. Descripción del radar y análisis de datos

3.1. Características generales del radar Corozal

Radar Banda C con polarización doble, frecuencia de operación de 5,6246241GHz, frecuencia de repetición PRF (Pulse Repetition Frequency) de 500Hz, ubicado en el departamento de Sucre (Colombia), municipio de Corozal, en el Aeropuerto Las Brujas. Las coordenadas de ubicación del radar son: latitud: 9,33099998161197 longitud: -75,2829999290407 (Figura 1), altitud 143m sobre el nivel del mar, 10

Tabla 1. Tipos de radares meteorológicos [17].

| Banda | Frecuencia | Longitud de onda | Rango de operación | Ventajas | Desventajas |
|-------|------------|------------------|--------------------|---|---|
| S | 2-4 GHz | 8-15 cm | < 240km | No se ven afectados por la atenuación | Disco de grandes dimensiones. Precio elevado. |
| C | 4-8 GHz | 4-8 cm | < 120 km | Pequeño tamaño del disco, portabilidad, precio | Afectados por la atenuación. |
| X | 8-12 GHz | 2,5-4 cm | < 60 km | Muy sensibles a las partículas de pequeño tamaño. Útiles para el estudio del desarrollo de nubes. Portabilidad, precio. | Muy afectados por la atenuación |

PPIs (barridos a diferentes ángulos horizontales), cada uno con 664 celdas de tamaño 450m, con un alcance de 298,8 Km.

3.2. Análisis de los datos

3.2.1. 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 siete tienen información potencialmente útil para el desarrollo del algoritmo mostrado en el presente artículo, teniendo estas variables el formato mostrado en la Tabla 2.

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.

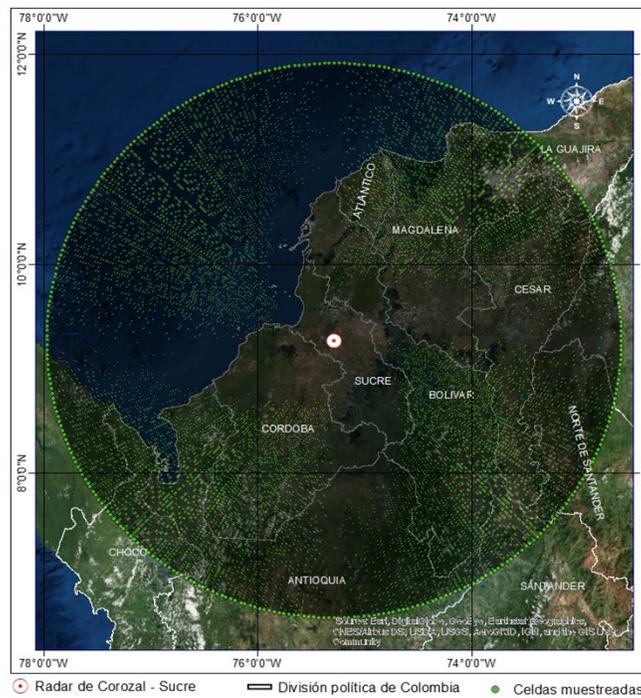


Figura 1. Ubicación geográfica del radar Corozal.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Formato de los datos generados por el radar de Corozal.

| ID | Variable | Units | Sampling ratio | Fill Value | Scale factor | Add offset |
|-----|---------------|--------|----------------|------------|--------------|------------|
| 94 | DBZ | dBZ | 1 | -128 | 0,5000 | 32 |
| 95 | VEL | m/s | 1 | -128 | 0,0525 | 0 |
| 96 | ZDR | 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 |

Fuente: elaboración propia.

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

El archivo .NC del radar debe ser convertido a formato 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 se deben utilizar el factor de escala y el *offset*, dado que el valor almacenado se representa como un número entero de 8 bits con signo. En la Figura 2 se muestra el algoritmo utilizado para convertir cada una de las variables numeradas del 94 al 100.

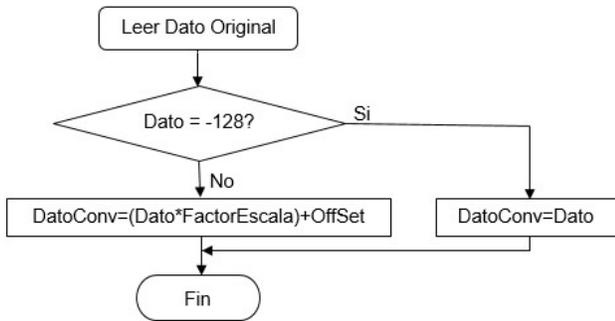


Figura 2. Diagrama de flujo para la conversión de datos generados por el radar.

Fuente: elaboración propia.

Cuando aparece un valor de relleno este no se convierte permaneciendo en -128; además, la variable #100 es utilizada para la clasificación de hidrometeoros.

3.2.3. Eventos analizados en el radar de Corozal

En la Tabla 3 se resumen las características generales de los cinco eventos de precipitaciones utilizados para el desarrollo del algoritmo.

3.2.4. 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, que es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales, para luego convertirla en texto plano para ser analizada en una hoja 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()*.

Luego se separa cada una de las variables de interés para así poderlas analizar de manera individual. Para esto se utiliza 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.

La información de la variable leída es transferida a una matriz por medio de la función *netcdf.getVar()*, para finalizar se realiza el ajuste de los datos haciendo uso del algoritmo mostrado en la Figura 2. Para las demás variables (K_{DP} , Z , φ_{DP} , ρ_{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 2. Luego de tener todas las variables separadas se crea un archivo en

Tabla 3. Descripción de eventos utilizados para el desarrollo del algoritmo de detección y corrección.

| Evento No. | Fecha | Evento | | | | | Total |
|------------|------------|------------------|----------------------|---------------------|------------------------|----------|--------|
| | | Eco de Tierra/AP | Dispersión Biológica | Precipitación Suave | Precipitación Moderada | No Usada | |
| 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 |

Fuente: elaboración propia.

una hoja de cálculo de Excel, cada variable es almacenada en formato de matriz de tamaño 360x664.

3.3. Análisis estadístico de los datos

3.3.1. Evento 1 de precipitación de lluvia 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, 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 ($SD(\varphi_{DP})$), que también tiene una gran variación, la textura es parte del clasificador utilizado en el desarrollo del proyecto [19].

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

Lo anterior puede verse en las gráficas de tendencia (histogramas) generadas para las variables Z y Z_{DR} que son mostradas la Figura 3. Para los eventos de precipitación 2, 3, 4 y 5 se realizaron los mismos análisis estadísticos llegando a resultados muy similares.

4. Modelo conceptual para la detección

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 [20], 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. Además, el algoritmo tiene la capacidad de detectar ecos biológicos que incluye insectos, aves, murciélagos y en general cualquier otra cosa que esté viva y vuele lo suficientemente alto como para ser muestreada por el haz del radar. Las formas de todos los ecos biológicos son muy complejas, además, a menudo son de tipos mixtos complicando su identificación; por ejemplo, aves e insectos pueden volar al mismo tiempo frente al radar generando un eco biológico difícil de detectar por el radar [21]. El algoritmo de lógica difusa incluye una etapa de preprocesamiento 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 [20]. Debido a las características del radar y a la revisión de la literatura sobre el tema se realizaron cambios a lo desarrollado por [20], estos cambios se pueden ver reflejados en la Tabla 5; para este caso se eliminó el uso de la variable K_{DP} ya que no aporta ningún tipo de información para la detección de propagaciones anómalas.

Tabla 4. Resultados análisis estadístico datos evento 1 de precipitación de lluvia del 25/06/2013.

| | Z | Z _{DR} | ρ_{HV} | φ_{DP} | K _{DP} | SD(Z) | SD(φ_{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 Estándar | 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 |

Fuente: elaboración propia.

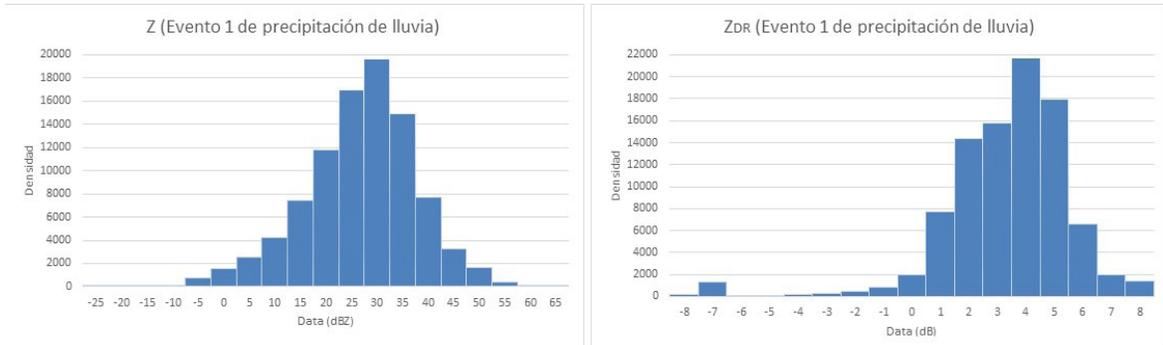


Figura 3. Histograma variable Z (izquierda) y variable Z_{DR} (derecha) evento 1 de precipitación de lluvia del 25/06/2013.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Versión final de las variables del clasificador de objetivos meteorológicos y no meteorológicos.

| 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} | Coefficiente 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): <ul style="list-style-type: none"> • Se promedia Z a lo largo del radio utilizando una ventana de corrimiento de 1,35 km (es decir 3 puntos de datos espaciados 0,45 Km). • Se resta el suavizado estimado de Z desde los valores originales. • Se calcula el valor RMS de los residuos. |
| SD(φ_{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(φ_{DP}): <ul style="list-style-type: none"> • Similar al de SD(Z) pero utiliza una ventana de corrimiento de 2,25 Km (es decir 5 puntos de datos espaciados 0,45 Km). |

Fuente: elaboración propia.

Para que el algoritmo difuso opere adecuadamente es necesario asignarle pesos a cada una de las variables, esto se resume en la Tabla 6, para la selección de estos valores se utilizó el método de Jerarquización Analítica.

Tabla 6. Matriz de pesos para el clasificador difuso de eventos meteorológicos.

| | Z | ZDR | ρ_{HV} | SD(Z) | SD(φ_{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 |

Fuente: elaboración propia.

El método de Jerarquización Analítica, referido por [22] 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” [22]. El método se presenta en tres 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 solo 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 [23].

En la Figura 4 se muestra una imagen del clasificador difuso propuesto.

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, ya que se trabajó sobre los pixeles 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.

En el filtro de media el proceso de filtrado consiste en la aplicación, a cada uno de los pixeles de la imagen, de una matriz de filtrado de tamaño NxN compuesta por números que genera un nuevo valor mediante una función del valor original y los de los pixeles circundantes [24]. El resultado final se divide entre un escalar, generalmente la suma de los coeficientes de ponderación, este filtro se puede expresar mediante (1).

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

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 de que alrededor del punto existan propagaciones anómalas que harían que dicho punto en lugar de disminuir su error aumente. En la Figura 5 se muestra gráficamente el modelo propuesto para la detección corrección de propagaciones anómalas en un radar meteorológico.

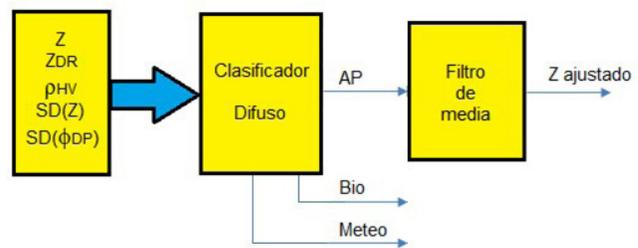


Figura 5. Modelo propuesto para el sistema de detección y corrección de propagaciones anómalas.

Fuente: elaboración propia.

5. Diseño del algoritmo

Como se indicó en el numeral anterior se hizo uso de un clasificador difuso para determinar los objetivos meteorológicos y los no meteorológicos, el clasificador propuesto se basa en el desarrollado por

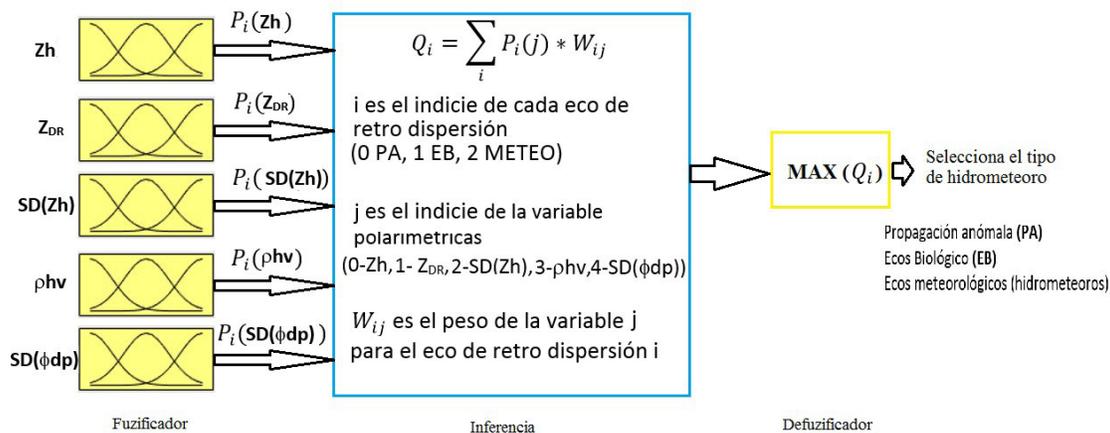


Figura 4. Clasificador difuso propuesto.

Fuente: elaboración propia.

[20] con algunas modificaciones. Este clasificador requiere de funciones de pertenencia del tipo trapezoidal como la mostrada en la Figura 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. Se utilizaron los criterios descritos en [19], que asigna valores a X1, X2, X3 y X4 para cada variable, realizando los ajustes necesarios a fin de adecuarlo a las zonas ecuatoriales, por ejemplo, en la literatura se utiliza ρ_{HV} en el rango de 0,85 a 0,97 para los valores de X1 y X2, se modificó el rango de 0,9 a 0,97, ya que en zonas ecuatoriales la nieve no es un hidrometeoro válido y se encuentra en el rango eliminado.

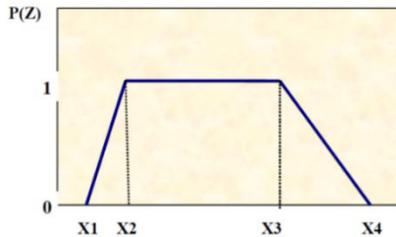


Figura 6. Función trapezoidal típica para un clasificador difuso típico.

Fuente: [19].

En la Figura 7 puede verse un ejemplo de asignaciones de valores para $Z=17,5$, $Z_{DR}=-0,125$, $\rho_{HV}=0,9779$, $SD(Z)=1,607$ y $SD(\phi DP)=2,278$, obteniéndose los siguientes valores:

$$AP: Z(17,5) = 0,5 \quad Z_{DR}(-0,125) = 1 \quad \rho_{HV}(0,9779) = SD(Z)(1,607) = 0 \quad SD(\phi DP)(2,278) = 0$$

$$Bio: Z(17,5) = 1 \quad Z_{DR}(-0,125) = 0 \quad \rho_{HV}(0,9779) = 0 \quad SD(Z)(1,607) = 0,6072 \quad SD(\phi DP)(2,278) = 0$$

$$Meteo: Z(17,5) = 1 \quad Z_{DR}(-0,125) = 0,75 \quad \rho_{HV}(0,9779) = SD(Z)(1,607) = 1 \quad SD(\phi DP)(2,278) = 1$$

$$p(x, y)_{AP} = Z(x, y) * 0,05 + Z_{DR}(x, y) * 0,25 + \rho_{HV}(x, y) * 0,3 + SD(Z)(x, y) * 0,35 + SD(\phi DP)(x, y) * 0,05 \quad (2)$$

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

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

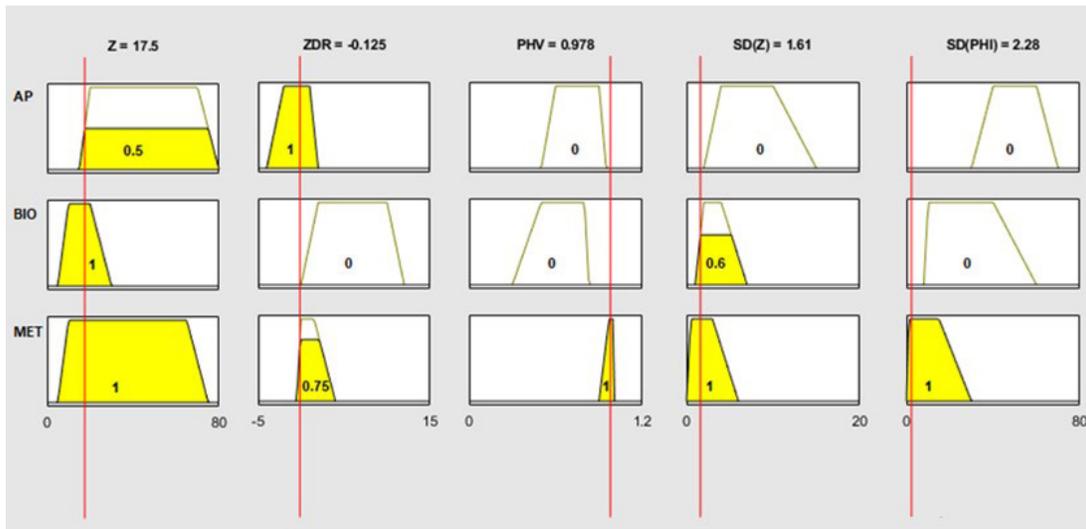


Figura 7. Ejemplo de asignación de valores generados por el clasificador difuso.

Fuente: elaboración propia.

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 8.

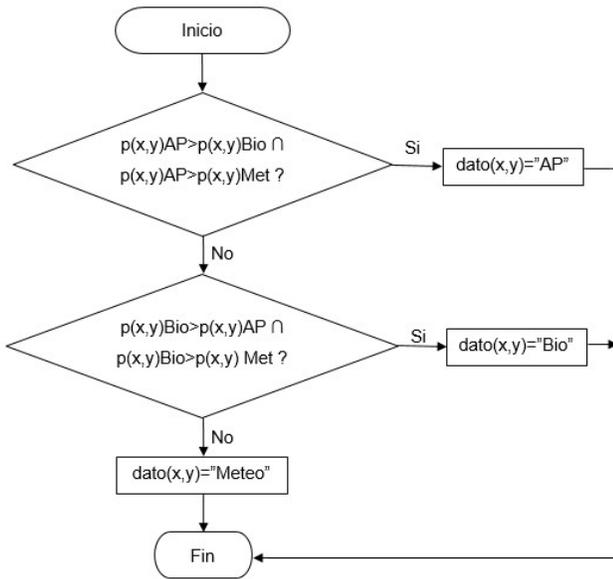


Figura 8. Diagrama de flujo para obtención de datos generados por el clasificador difuso.

Fuente: elaboración propia.

Para realizar la corrección de las propagaciones anómalas se utilizó un filtro de media lineal en el dominio del espacio, con ventanas de 3x3, 5x5 y 7x7, al que se le realizó una modificación para que se adecue a las características de los datos a corregir. Inicialmente se saca una copia de la matriz Z que contiene las propagaciones anómalas que se van a corregir, los datos clasificados y los de relleno, para este proceso de corrección la matriz se dividió en cuatro cuadrantes.

La matriz a analizar tiene una longitud de 664x360, el filtro de media de ventana 3x3 requiere puntos anteriores y puntos siguientes al punto a corregir por lo que el barrido de la matriz se realiza desde la posición (2,2) hasta la posición (663,359). Se genera una matriz de pesos que determina si la celda contigua a la AP tendrá o no peso en la corrección, asignándole en cada caso el valor 1 o el valor 0.

También se verifica si las celdas tienen el valor -128 con lo que se asigna a dicha 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 (1).

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) del evento 1 de precipitación. En la Tabla 7 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 reemplazados en la ecuación (5) (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.

Tabla 7. (a) Ubicación datos, (b) Valor datos, (c) Clasificación, (d) Matriz asignada ventana 3x3

| | | |
|------|-------------|------|
| 58,1 | 58,2 | 58,3 |
| 59,1 | 59,2 | 59,3 |
| 60,1 | 60,2 | 60,3 |

(a)

| | | |
|-----|------------|------|
| 0,5 | 9 | 11 |
| 3 | 4,5 | 5,5 |
| 0 | -128 | -128 |

(b)

| | | |
|-------|-----------|-------|
| METEO | METEO | METEO |
| METEO | AP | AP |
| METEO | -128 | -128 |

(c)

| | | |
|---|------------|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0,5 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |

(d)

Fuente: elaboración propia.

El resultado final es el valor de Z corregido es 4,291 que se aproxima a 4,3 dado que el formato de los datos contiene solo un decimal. Para la aplicación del filtro con ventana 5x5 y 7x7 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.

6. Resultados

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

Se modificó el respectivo evento agregando propagaciones anómalas en una zona del mapa, luego se aplicó el algoritmo de clasificación que permitió identificar ecos meteorológicos de los no meteorológicos, a continuación se realizaron pruebas con algoritmo de corrección ventana 3x3, 5x5 y 7x7, para finalmente comparar matriz de datos originales con matriz corregida y calcular error.

Los resultados mostrados a continuación se presentan para el evento 1 de precipitación de lluvia del 25/06/2013. En la Figura 9 se muestran gráficamente los datos tomados por el radar meteorológico, además, se presenta un detalle de la zona que se analizó.

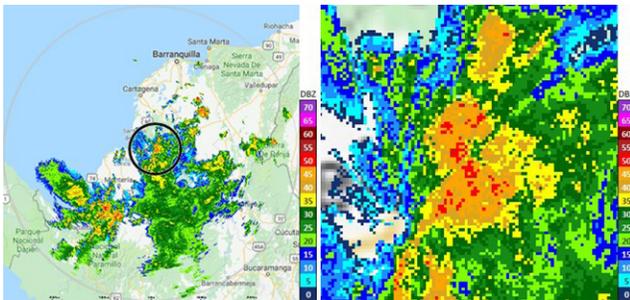


Figura 9. Evento 1 de precipitación de lluvia sin modificaciones.

Fuente: elaboración 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 10, de igual manera se presenta un detalle de dicha zona.

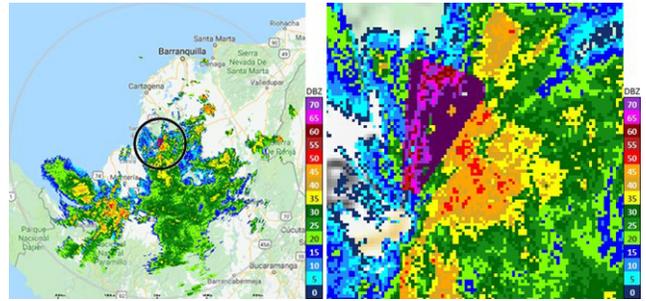


Figura 10. Evento 1 zona modificada con propagaciones anómalas.

Fuente: elaboración propia.

Aplicando el algoritmo de corrección con ventanas de 3x3, 5x5 y 7x7 se obtienen las imágenes mostradas en la Figura 11, visualmente es similar a la imagen original, pero con el detalle mostrado puede verse que tiene algunas diferencias con la original.

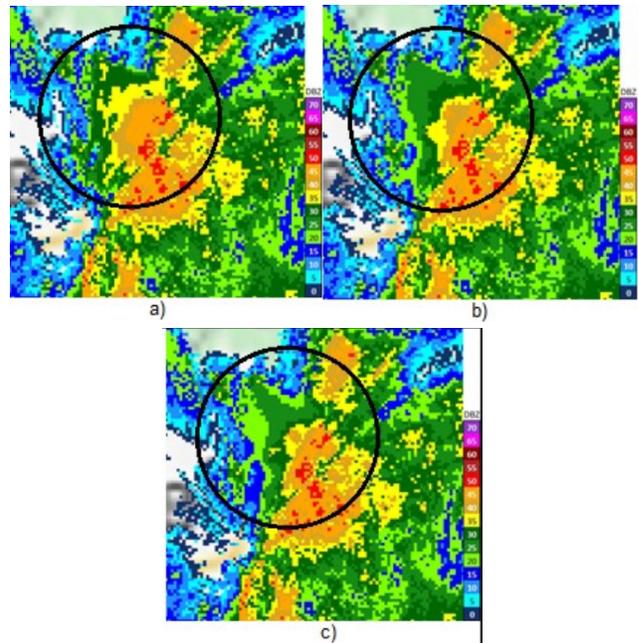


Figura 11. Corrección Evento 1 con a) ventana 3x3 b) ventana 5x5 c) ventana 7x7.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 12 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.

En la Figura 12 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.

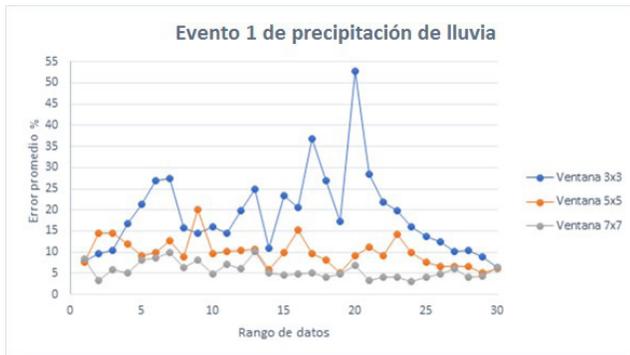


Figura 12. Error en evento 1 de precipitación de lluvia del 25/06/2013.

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 8 y en la Figura 13 se presenta un resumen con los porcentajes de error promedio obtenidos para cada uno de los eventos, diferenciándolos de acuerdo con el tamaño de la ventana utilizada en el filtro.

Tabla 8. Porcentajes de error para cada uno de los eventos.

| 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 |

Fuente: elaboración propia.

Puede verse que el algoritmo implementado con el filtro de media con ventana 7x7 presenta para todos los casos un mejor desempeño, esto debido al aprovechamiento de los datos circundantes al punto de trabajo, ya que potencialmente puede aprovechar hasta 48 datos en los alrededores del punto de corrección llevando el resultado a un valor mucho más cercano al adecuado.

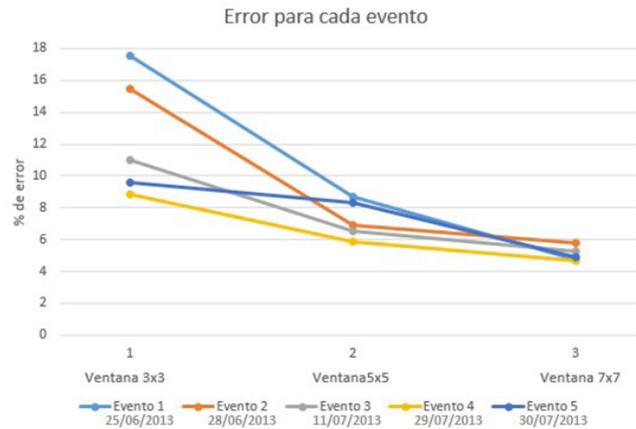


Figura 13. Porcentajes de error para cada uno de los eventos

Fuente: elaboración propia.

7. Conclusiones

Para el clasificador diseñado se determinó que la variable con más peso dentro del proceso es pHV 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 dada la alta variabilidad espacio temporal de los fenómenos meteorológicos. El parámetro que más requirió ajuste para el correcto funcionamiento del clasificador fue la variable pHV, 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 dado los grandes valores de incertidumbre que majean las variables utilizadas y la necesidad de tener en cuenta el conocimiento previo de expertos.

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.

Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada por Aeronáutica Civil de Colombia, a quien los autores dan sus agradecimientos ya que aportaron los datos utilizados para el desarrollo del modelo y permitió la visita a uno de los radares ubicados en Colombia.

Referencias

- [1] "About Radar: Environment Canada", 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=2B931828-1D>.
- [2] J. R. Peter, A. Seed, P. Steinle, S. Rennie y M. Curtis, "A Bayesian Methodology for Detecting Anomalous Propagation in Radar Reflectivity Observations, The Centre for Australian Weather and Climate Research", *Technical report*, n°. 077, December, 2014.
- [3] P. P. Alberoni, T. Andersson, P. Mezzasalma, D. B. Michelson y S. Nanni, "Use of the Vertical Reflectivity Profile for Identification of Anomalous Propagation", *Meteorological Applications*, vol 8, n° 3, pp. 257-266, 2001, <https://doi.org/10.1017/S1350482701003012>
- [4] C. Kessinger, S. Ellis, J. Van Andel, J. Yee y J. Hubbert, "The AP Ground Clutter Mitigation Scheme for the WSR-88D", *21st International Conference on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography and Hydrology*, 2005.
- [5] M. Smith y J. A. Steiner, "Use of Three-Dimensional Reflectivity Structure for Automated Detection and Removal of Nonprecipitating Echoes in Radar Data", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol 19, n° 5, pp. 673-686, 2002.
- [6] J. J. Gourley, P. Tabary y J. P. du Chatelet, "A Fuzzy Logic Algorithm for the Separation of Precipitating from Nonprecipitating Echoes Using Polarimetric Radar Observations", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol 24, n° 8, pp. 1439-1451, Agosto 2007, doi: <https://doi.org/10.1175/JTECH2035.1>
- [7] J. C. Hubbert, M. Dixon, S. M. Ellis y G. Meymaris, "Weather Radar Ground Clutter. Part I: Identification, Modeling, and Simulation", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol 26, n° 7, pp. 1165-1180, July, 2009, doi: <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1159.1>
- [8] C. Kessinger, S. Ellis y J. Van Andel, "The Radar Echo Classifier: A Fuzzy Logic Algorithm for the WSR-88D", *3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environmental Science*, February, 2003.
- [9] M. Grecu y W. F. Krajewski, "An Efficient Methodology for Detection of Anomalous Propagation Echoes in Radar Reflectivity Data Using Neural Networks", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 17, n° 2, pp. 121-129, Febrero 2000. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<0121:AEMFDO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<0121:AEMFDO>2.0.CO;2)
- [10] W. F. Krajewski y B. Vignal, "Evaluation of Anomalous Propagation Echo Detection in WSR-88D Data: A Large Sample Case Study", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol 18, n° 5, pp. 807-814, Mayo 2001, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0807:EOAPED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0807:EOAPED>2.0.CO;2)
- [11] V. Lakshmanan, A. Fritz, T. Smith, K. Hondl y G. Stumpf, "An Automated Technique to Quality Control Radar Reflectivity Data", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol 46, n° 3, pp. 288-305, March, 2007. <https://doi.org/10.1175/JAM2460.1>
- [12] S. Moszkowicz, G. J. Ciach y W. F. Krajewski, "Statistical Detection of Anomalous Propagation in Radar Reflectivity Patterns", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol 11, n° 4, pp. 1026-1034, August, 1994, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<1026:S-DOAPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<1026:S-DOAPI>2.0.CO;2)

- [13] M. A. Rico-Ramírez y I. D. Cluckie, "Classification of Ground Clutter and Anomalous Propagation Using Dual-Polarization Weather Radar", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol 46, n° 7, pp. 1892-1904, July, 2008, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.916979>
- [14] A. F. Hurtado y O. J. Mesa, "Reanalysis of Monthly Precipitation Fields in Colombian territory", *Revista DYNA*, vol 81, n° 186, pp. 251-258, 2014.
- [15] Universidad Politécnica de Cataluña, "Curso de Posgrado de Climatología Aplicada: El radar meteorológico y sus aplicaciones hidrológicas (4), Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorología (CRAHI)", Universidad Politécnica de Cataluña, 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.crahi.upc.edu/index.php?option=com_content&view=article&id=110%3Acurs-radar&catid=39&Itemid=109&lang=es
- [16] R. Sánchez-Diezma, "Optimización de la medida de lluvia por radar meteorológico para su aplicación hidrológica", tesis Ph.D., Departamento de Ingeniería Hidráulica Marítima y Ambiental. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2001.
- [17] Universidad Politécnica de Cataluña, "Curso de Posgrado de Climatología Aplicada: El radar meteorológico y sus aplicaciones hidrológicas (6), Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorología (CRAHI)", 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.crahi.upc.edu/index.php?option=com_content&view=article&id=112%3Acurs-radar&catid=39&Itemid=109&lang=es
- [18] A. V. Ryzhkov, S.E. Giangrande, V. M. Melnikov y T. J. Schuur, "Calibration Issues of Dual-Polarization Radar Measurements", *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, vol 22, n° 8, pp.1138-1155, August, 2005. <https://doi.org/10.1175/JTECH1772.1>
- [19] T. Schuur, A. Ryzhkov y P. Heinselman, "Observations and Classification of Echoes with the Polarimetric WSR-88D Radar NOAA National Severe Storms Laboratory Tech Report", Norman, Oklahoma, USA, October, 2003.
- [20] H. Park, A. V. Ryzhkov, D. S. Zrnich y K.E. Kim, "The Hydrometeor Classification Algorithm for the Polarimetric WSR-88D: Description and Application to an MCS", *Weather and Forecasting* vol 24. pp. 730-748, 2008, <https://doi.org/10.1175/2008WAF2222205.1>
- [21] "Dual-pol Applications Non-Precipitation Echoes, National Weather Service (Warning Decision Training Division)", 2014. [En línea]. Disponible en: <http://training.weather.gov/wdtd/courses/dualpol/Applications/nonPrecip/player.html>
- [22] G. Sánchez, "Técnicas participativas para la planeación México: Fundación ICA, AC", 2003, capítulo 16, Jerarquización Analítica, pp. 167-182.
- [23] T. L. Saaty, "Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World", Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications, 1999.
- [24] "Técnicas de filtrado, Universidad de Murcia", 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema06.pdf>

