

IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO AUTOMÁTICO DE REMOCIÓN DE ECOS NO METEOROLÓGICOS PARA EL RADAR INTA-PARANÁ

Diego Andrés Giménez¹, José Luis Macor^{1,2}
dagimenez@unl.edu.ar

¹ Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM). FICH-UNL

² Centro de Información Meteorológica (CIM). FICH-UNL

RESUMEN

Ecoss de radar meteorológico pueden ser contaminados por ecoss no meteorológicos que requieren ser identificados y removidos para la estimación adecuada de la precipitación. Esto es particularmente necesario para aplicaciones operacionales tales como pronóstico inmediato de precipitaciones y alertas de inundación repentina. En este trabajo se presenta un módulo de procesamiento automático desarrollado para la corrección de observaciones de reflectividad de radares polarimétricos. Para ello se emplea una técnica basada en las características polarimétricas, la velocidad radial y la estructura tridimensional de la reflectividad; además, se realizó un mapa de contaminación estática por ecoss de tierra e interferencias electromagnéticas con el objeto de reducir errores en la estimación de las precipitaciones. El desempeño del módulo se evaluó aplicándolo sobre dos casos de estudio, contrastando con el análisis previo de la totalidad de productos provistos por el Radar INTA-Paraná. Cualitativamente, el módulo de procesamiento automático propuesto, tiene un rendimiento aceptable con respecto a otras técnicas actuales, además, tiene como ventaja su sencilla implementación, bajo costo computacional y simple adaptación a otros radares polarimétricos operativos.

ABSTRACT

Weather radar echoes may be contaminated by non-meteorological clutter that need to be identified and removed before successfully rainfall estimation. This is particularly suitable for operational applications such as rainfall nowcasting and flash flood warning. This paper presents an automatic processing module developed for corrections of polarimetric radar reflectivity. For this purpose a technique based on the polarimetrics characteristics, the radial velocity, and the three-dimensional reflectivity structure is employed, also, contamination static map is performed by ground clutter and electromagnetic interference for the purpose of reducing errors in estimating precipitation. The performance of the module was assessed by applying it on two case studies, contrasting with the previous analysis of all products supplied by INTA-Parana Radar. Qualitatively, the proposed automatic processing module has an acceptable performance regarding other existing techniques, also, this module has the advantage of easy implementation, low computational cost and easy adaptation to other operational polarimetric radars.

Palabras clave: radar meteorológico polarimétrico, ecoss no meteorológicos, remoción de ecoss.

1) INTRODUCCIÓN

Los ecoss de radar meteorológicos pueden ser contaminados por ecoss no meteorológicos que requieren ser identificados y removidos para la estimación de precipitación (Villarini y Krajewski, 2010). Esto es particularmente necesario para aplicaciones operacionales tales como pronóstico inmediato (nowcasting) de precipitación y alertas de inundación repentina (*flash flood warning*) (Macor, 2007). Una persona adecuadamente entrenada puede ser capaz de reconocer contaminación no meteorológica en ecoss de radar, tales como ecoss de tierra (llamados “GC”, *ground clutter*), retornos de tierra

propagados anómalamente (llamados “AP”, *anomalous propagations*), e interferencias electromagnéticas de fuentes activas (llamadas “Jm”, *jamming*), de ahora en más denominados clutter (terminología empleada para ecos recibidos por un radar que son, por definición, no deseados). Sin embargo, para aplicaciones operacionales son necesarios procedimientos automatizados.

Los radares polarimétricos, a diferencia de los no polarimétricos, proveen información acerca de las propiedades de blanco/objetivo del medio. Debido a que los clutter tienen diferentes características polarimétricas respecto a los ecos meteorológicos, las mediciones de doble polarización se pueden utilizar para distinguir unas de otras. Además del campo de reflectividad $Z[\text{dBZ}]$, dentro de estas mediciones nos encontramos con la velocidad radial $V[\text{m/s}]$, la reflectividad diferencial $ZDR[\text{dBZ}]$, el coeficiente de correlación copolar ρ_{HV} , el diferencial de fase en propagación $\Phi_{DP}[\text{deg}]$, y el diferencial de fase específico $KDP[\text{deg/km}]$ (Bringi et al., 2007). Para que las técnicas de identificación y remoción de clutter sean adecuadas, las variables polarimétricas deben ser correctamente estimadas (Villarini y Krajewski, 2010).

Steiner y Smith (2002) presentan una completa revisión de las diversas técnicas de remoción de GC/AP y la problemática asociada, mientras que Li y otros (2014) realizan una excelente descripción de las técnicas operativas de remoción de clutter empleadas en la actualidad por diversos organismos, tanto para radares polarimétricos como para no polarimétricos. Pese a la diversidad de técnicas empleadas, es necesario aclarar que ningún enfoque es libre de errores. Es probable que los clutter no sean clasificados como tal, o que ecos meteorológicos sean removidos por estar erróneamente clasificados (Bringi et al., 2007; Villarini y Krajewski, 2010).

En este estudio se pretende emplear una técnica basada en árbol de decisión haciendo uso de características polarimétricas, velocidad radial, e intensidad del medio. Esta técnica tiene como propósito clasificar los ecos en meteorológicos o clutter, pero dada las habilidades de la misma existirían volúmenes que requerirían de técnicas adicionales para su tratamiento. Dentro de estas técnicas adicionales se realiza el análisis de la estructura tridimensional que contiene el volumen a corregir como elemento central, por otra parte, se emplea la región de incidencia de contaminación estática previamente identificada (de ahora en más denominado “Mapa de clutter estáticos”) como información necesaria para una adecuada clasificación. Esto reduce el error, principalmente, cuando el clutter está inmerso en la precipitación.

La descripción del radar y los datos a emplear se presentan en la sección 2. En la sección 3 se discute la técnica empleada para estimar correctamente las variables polarimétricas Φ_{DP} y K_{DP} , corregir atenuación por precipitación en Z y Z_{DR} , mientras que en la sección 4 se describe la metodología de remoción de clutter. En la sección 5 se aplica la técnica de remoción de clutter sobre ciertos eventos tipos. En la última sección se concluye el trabajo.

2) CARACTERISTICAS DEL RADAR Y DATOS EMPLEADOS

El Radar INTA-Paraná es un radar meteorológico doppler banda-C de doble polarización, ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria Paraná (EEA-Paraná) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). En la Figura 1 se aprecia una imagen típica del Radar INTA-Paraná, donde se aprecia claramente ecos de GC, AP y Jm.

Este radar mide reflectividad, velocidad radial y parámetros polarimétricos. Los productos con los que se trabajará son de rango máximo de 120 [km], escaneados a una velocidad de antena de 18 [deg/seg], con estrategia de escaneo optimizada en 10 elevaciones definidas entre 0.5 y 19.2 [deg], y una resolución espacial de 1 [deg] x 250 [m]. El modo de procesamiento de polarización doble que emplea se basa en la transmisión y recepción simultánea de componentes horizontales (H) y verticales (V).

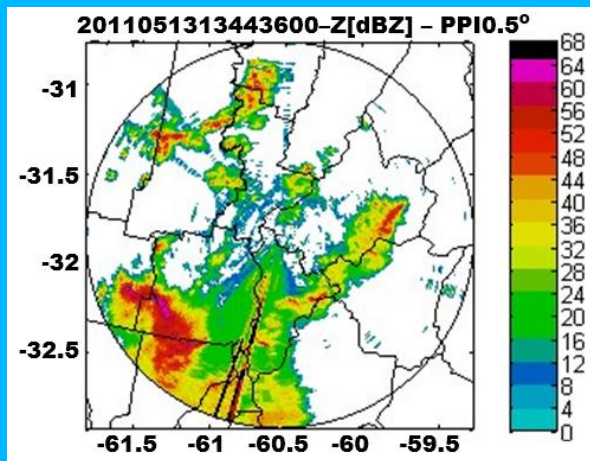


Figura 1: Imagen PPI (Plan Position Indicator) de Z a elevación de 0.5° del evento meteorológico del 05-04-12 a las 01:13hs, Radar INTA-Paraná.

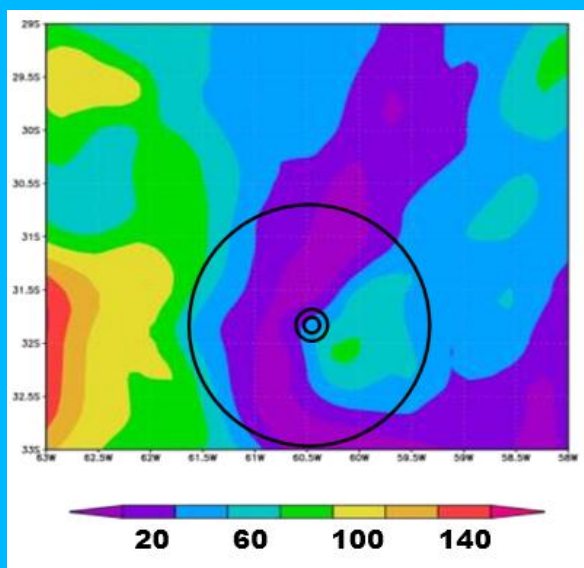


Figura 2: Mapa de altitud del terreno dentro del rango del Radar INTA-Paraná.

meteorológico, y con gran diversidad de fenómenos meteorológicos (convección, estratiformes, etc.).

3) ACONDICIONAMIENTO DE LOS DATOS

De las variables a utilizar en esta metodología, solo ρ_{HV} está estimada correctamente. Los productos Z y Z_{DR} se ven atenuadas por precipitación y humedad de radomo, para corregir la atenuación por precipitación es necesario una correcta estimación de Φ_{DP} . Ello promueve que K_{DP} sea nuevamente estimada a partir de la variable corregida Φ_{DP} (Bringi et al., 2007).

Corrección de la estimación de Φ_{DP} . Φ_{DP} depende de la anisotropía de la densidad óptica del medio de propagación. Incrementa a medida que se atraviesa una parcela, aquí la componente H se retrasa respecto a la componente V, aumentando esto progresivamente. Esta variable no se ve afectada por la

Cada producto es actualizado en la Terminal Radar-FICH cada 10 minutos.

Se aprecia del análisis de la Figura 2 que el Radar INTA-Paraná se encuentra en una región cuya altitud varía predominantemente entre 40 y 100 [m], sin considerar el borde costero del Río Paraná (inferior a 20 m). El radar se encuentra a aproximada 45 [m], estando a una altura el radomo de 100 [m], lo cual explica la no presencia de bloqueo de haz en las imágenes de reflectividad.

Ecoss de GC se extienden sobre un radio de 50 km, apreciables en la elevación inferior. Es frecuente ver ecos de Jm en los azimut 1-5 [deg], 18-23 [deg], 34-36 [deg] y 249-250 [deg] (0 [deg]: dirección N, giro horario) apreciables a diversas elevaciones (Figura 6), siendo más intenso el fenómeno en la elevación inferior.

El procesamiento se lleva a cabo sobre los volúmenes en coordenadas cilíndricas, para evitar sesgo debido a la transformación a coordenadas cartesianas. Ello implica que la información de cada variable, para cada elevación, es provista por haz, donde cada haz presenta una cantidad de datos dada por el paso de rango y el rango en sí (para Radar INTA-Paraná tenemos 360 haces de 480 volúmenes). El intervalo de reflectividades es (-31.5 95.5) [dBZ] con resolución de 0.5 [dBZ], y no data para aquellos volúmenes sin información de reflectividad (Selex Sistemi Integrati, 2008). Aquellos ecos que no superen los 5[dBZ] simplemente serán eliminados, adoptando como valor *no data*, para el procesamiento futuro.

Los eventos a tratar serán la tormenta de 20-02-2010 de 00hs a 16hs, la tormenta de 13-05-2011 de 13hs a 00hs. Se buscó que las tormentas tengan la particularidad de ser extensas en tiempo, de gran cobertura de radar, alta relación clutter/eco

calibración del radar, atenuación, o bloqueo parcial del haz (Bringi et al., 2007).

En la Figura 3a, pese a que Φ_{DP} presenta un comportamiento monótonicamente creciente en dirección radial, se aprecia un salto intermitente (regiones próximas al radar), discontinuidad de rango (cerca de los límites del radar), y pérdida de información (regiones sin dato). En la Figura 3b se observa Φ_{DP} corregido con excelentes resultados.

Estimación de K_{DP} . K_{DP} proviene de la derivada a lo largo de haz de Φ_{DP} . Para ello se ajusta Φ_{DP} con polinomios de segundo orden por tramos de 10 puntos y se procede a aplicar la definición de la derivada según Bringi y otros (2007). Comparando Figura 3c y Figura 3d se aprecia el correcto funcionamiento del algoritmo propuesto, obteniendo diferencias significativas frente a la variable polarimétrica K_{DP} provista por el procesamiento del Rainbow[®]5.

Corrección de atenuación por precipitación en Z y Z_{DR} . La atenuación (pérdida de energía por absorción y/o scattering) y cambio de fase de la onda depende de la polarización de propagación de onda. La atenuación por lluvia decrementa con el incremento de la temperatura (Bringi et al., 2007).

Para la corrección de atenuación nos basamos en el “Método Φ_{DP} Lineal” según Selex Sistemi Integrati (2008) el cual es solamente posible si la señal no es totalmente atenuada. La relación empleada depende del tipo de lluvia y de la región donde ocurre el evento. Los resultados de la aplicación de este algoritmo sobre las variables Z y Z_{DR} se muestran en la Figura 4.

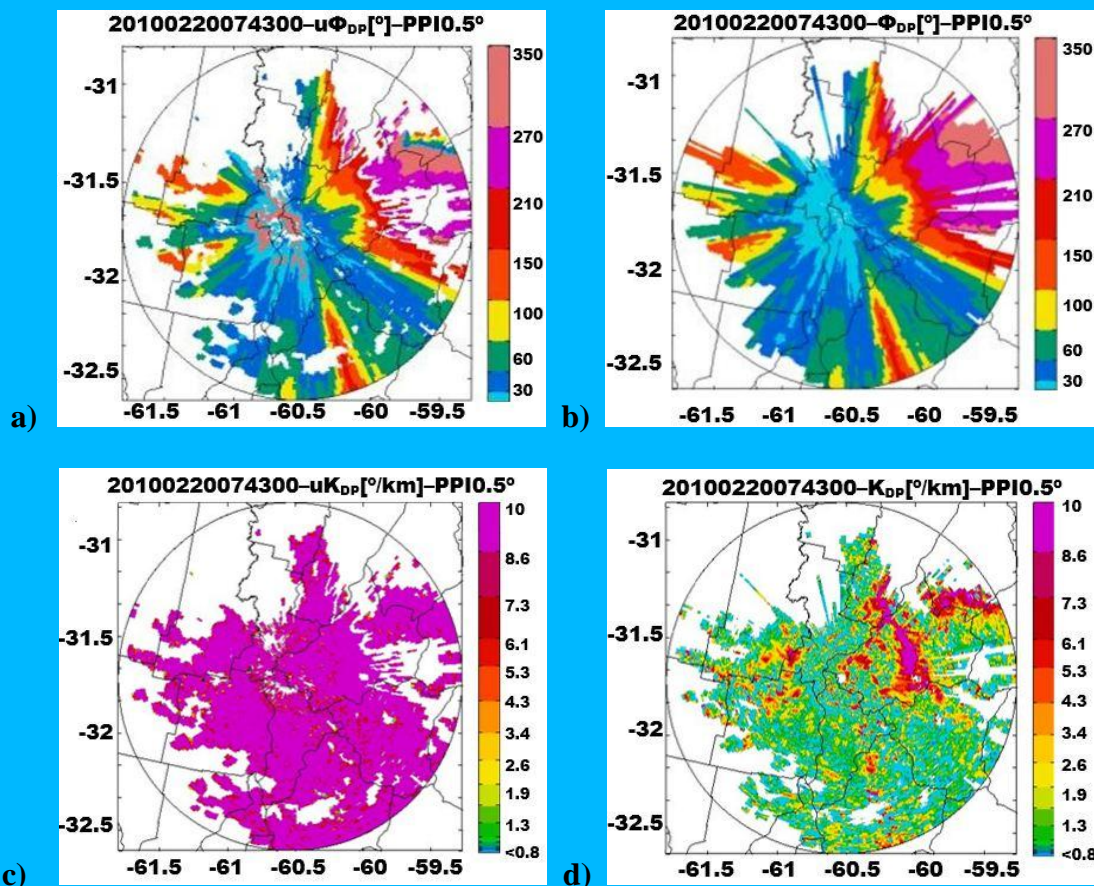


Figura 3: Imágenes PPI a elevación de 0.5° del evento meteorológico del 20-02-2010 a las 07:43hs. a) Φ_{DP} original (izquierda), b) Φ_{DP} corregido, c) K_{DP} original, d) K_{DP} estimada.

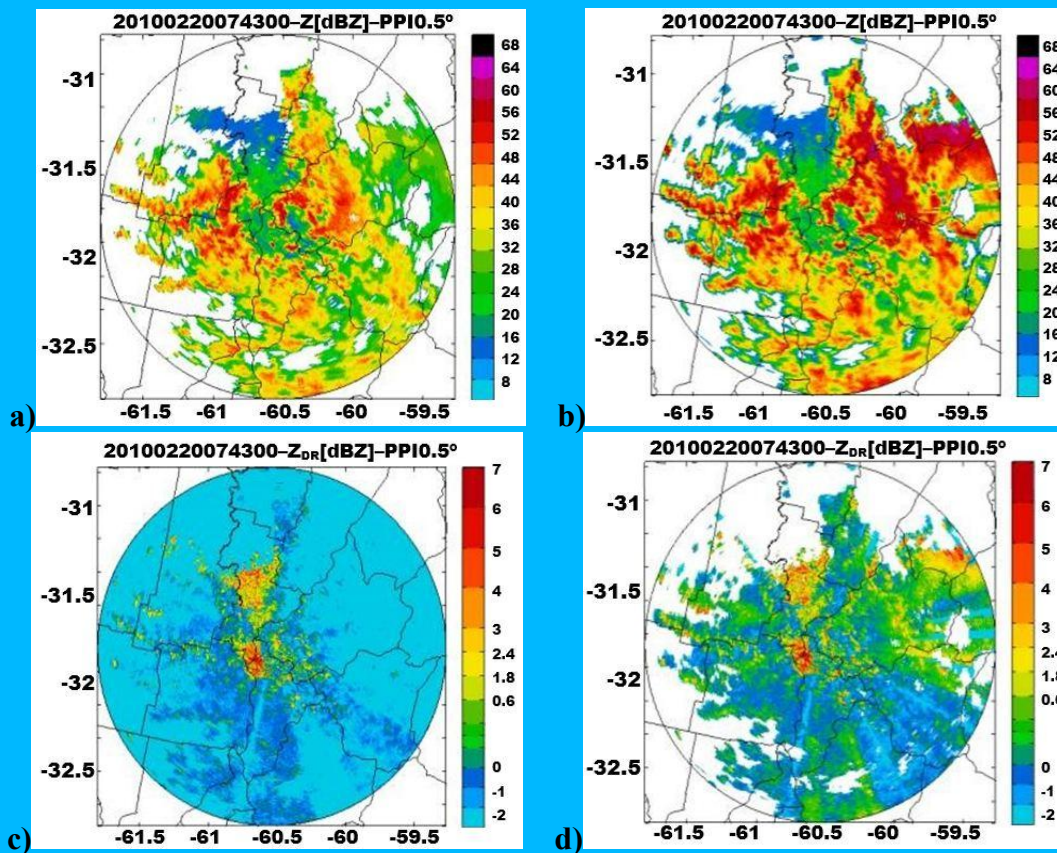


Figura 4: Imágenes PPI a elevación de 0.5° del evento meteorológico del 20-02-2010 a las 07:43hs. a) Z original (izquierda), b) Z corregido, c) ZDR original, d) ZDR corregido.

4) METODOLOGÍA: ELIMINACIÓN DE GC/AP/Jm

La metodología de eliminación de clutter consta de tres etapas, la principal es la encargada de clasificar los ecos empleando una técnica basada en “árbol de decisión”, las dos restantes etapas (análisis de la estructura 3D, “Mapa de Clutter Estático”) son las encargadas de evaluar los ecos previamente clasificados con el objeto de reducir errores en la eliminación de clutter por inconsistencias en la clasificación. A continuación se describen las etapas de la metodología de eliminación de clutter.

Clasificación de ecos de radar. En este apartado se pretende explicar la técnica empleada para clasificar los ecos de radar. La misma se basa en “árbol de decisión”, siendo las variables intervinientes: ρ_{HV} , Z_{DR} y su desvío estándar $SD(Z_{DR})$, V y su desvío estándar $SD(V)$, Z y su desvío estándar $SD(Z)$.

El desvío estándar juega un rol importante en el procedimiento de clasificación, el cual puede deberse a la variación natural de los campos de precipitación, el ruido y la fluctuación de la amplitud y fase de la señal de radar en presencia de clutter, y por lo tanto, es representativa de las estadísticas de la precipitación y ecos no meteorológicos. En términos generales, se podría asociar elevadas desviaciones estándares de las variables polarimétricas con clutter, mientras que las desviaciones estándar más bajas caracterizan los ecos meteorológicos. A su vez, se ha observado que la intensidad de reflectividad en AP/GC presenta cambios severos en su interior y a lo largo de sus límites, mientras que el de la precipitación cambia paso a paso. (Kumjian, 2013; Wang et al., 2012; Ramirez y Cluckie, 2008; Steiner y Smith, 2002). La textura de un volumen en particular se calculará mediante el uso de la desviación estándar de una ventana centrada en el volumen a ser clasificado, según proponen Ramirez y Cluckie (2008), empleando ventanas en coordenadas polares de $1.25m \times 5^\circ$. Pese a todo estas apreciaciones ecos

de AP pueden parecer muy similar a la precipitación, exhibiendo crecimiento, decaimiento y movimiento similar a las tormentas, siendo este caso es el más complejo (Steiner y Smith, 2002; Villarini y Krajewski, 2010).

Del análisis de la variable ρ_{HV} se definieron dos umbrales, uno para ρ_{HV} con baja variabilidad espacial y otro para alta variabilidad. En el primer caso se dispuso la condición $\rho_{HV} > 0.95$ para identificar posibles ecos de precipitación, en el segundo caso la media de $\rho_{HV} > 0.9$.

Respecto a ZDR, se ha fijado como condiciones $Z_{DR} < 3$ para precipitación, $Z_{DR} > 3$ para regiones con granizo pequeño y mezcla de precipitación/granizo; $|Z_{DR}| < 1$ cuando el granizo es grande y lo suficientemente numeroso como para dominar la reflectividad. Estas dos últimas condiciones son acertadas para volúmenes que superan los 45 [dBZ] y presentan $\rho_{HV} < 0.9$.

Tras analizar $SD(Z_{DR})$, se definieron dos umbrales de la misma manera que para ρ_{HV} , pero con las condiciones $SD(Z_{DR}) > 1$ y media de $SD(Z_{DR}) > 1.25$ para identificar posibles ecos de clutter en el caso de condiciones de baja y alta variabilidad, respectivamente. $SD(Z_{DR})$ es potencialmente una buena variable para llevar a cabo la clasificación.

Otra variable a tener en cuenta es la velocidad radial, donde GC/AP en el barrido de elevación más baja claramente pueden ser reconocidos por su velocidad nula. Sin embargo, la contaminación por GC/AP en el segundo barrido más bajo de elevación puede presentar velocidades similares a los ecos de precipitación. En relación a V y $SD(V)$, se determinó una única condición basada en la hipótesis de que $|V| < 1$ o $SD(V) > 2$ estaría relacionado con un clutter (Anderson et al., 2011; Steiner y Smith, 2002).

Basándose en lo ante expuesto, este algoritmo tiene la capacidad de clasificar los ecos en meteorológicos (PRE: precipitación, PRE(I): precipitación asociada con la alta variabilidad de la reflectividad que presentan ecos de Jm y AP incrustados en la región de precipitación, PRE/GR: mezcla de precipitación/granizo) y no meteorológicos (CL). Dentro de las clasificaciones se distingue situaciones especiales (PRE \odot , CL \odot , NC: no clasifica) que requieren ser evaluadas por la técnica basada en la estructura espacial y pertenencia al mapa de clutter estático; y CL(I) que corresponde a clutter con alto ρ_{HV} , generalmente inmerso en la precipitación. A continuación se presenta el diagrama del árbol de decisión.

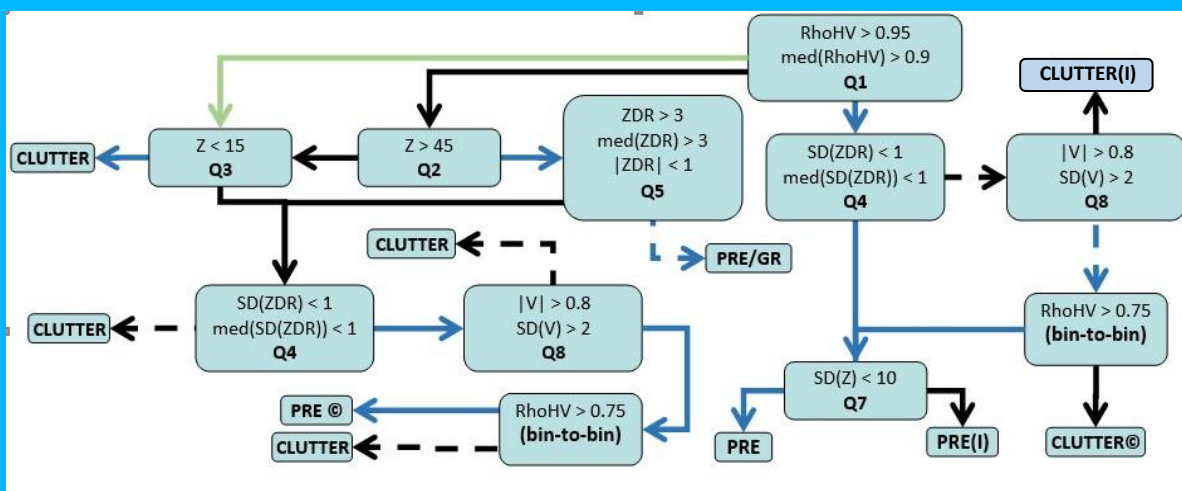


Figura 5 - Diagrama de Árbol de Decisión. Flechas azules y negras enteras corresponden a cumplimiento o no de la condición, mientras que las punteadas aceptan o no dicha condición ante la falta de información (no data)

Los ecos clasificados como meteorológicos conservarán su intensidad de reflectividad, a diferencia de aquellos clasificados como PRE(I) que serán sometidos a un proceso de interpolación bilineal según Lakshmanan y otros (2012). Los CL son definidos como *no data*, mientras que aquellos clasificados como CL (I) se interpolan de manera similar que con PRE(I) y se redefinen como CL©.

Análisis de Estructura 3D. Este algoritmo emplea información de la estructura 3D de la reflectividad en la proximidad de cada volumen clasificado como PRE©, CL© o NC permitiéndonos definir con mayor seguridad si estamos en presencia o no de un eco meteorológico.

Se asume *no data* todo volumen de reflectividad Z como centro de un área de 3x3, cuya media no supera $(Z+5)*GE/9$. Si el grado de erosión $GE=1$, entonces este es mínimo, anulando sólo volúmenes aislados en una región; mientras que para $GE>1$ el grado de erosión incrementa y puede llegar a erosionar bordes, siendo aún más significativo para celdas de tormenta en etapa de iniciación o decaimiento. Finalmente se procede a definir como *no data* a volúmenes aislados a lo largo del haz y a aquellas estructuras cuya variación absoluta de reflectividad, volumen a volumen, supera $15[dBZ]/GE$.

A continuación se procede a remover clutter en una elevación cualesquiera teniendo en cuenta las dos elevaciones inmediatas superiores. Se realiza un pre-procesamiento que define *no data* a aquellos valores de reflectividad en la elevación media $Z_{elev-med}$ (entre estas tres) si dicho valor y el correspondiente a la elevación superior $Z_{elev-sup}$ no superan un umbral de $10[dBZ]*GE$, también ocurrirá si la reflectividad en la elevación superior es *no data*. Seguido se eliminarán los clutter en la elevación inferior $Z_{elev-inf}$ teniendo en cuenta las siguientes condiciones: para rango 0 a 30 km, si $Z_{elev-med}^1=no data$ entonces $Z_{elev-inf}=no data$; para rango 30 a 60 km, si $Z_{elev-med}^3=no data$ entonces $Z_{elev-inf}=no data$; para rango 60 a 90 km, si $Z_{elev-med}^5=no data$ entonces $Z_{elev-inf}=no data$; finalmente, para rango 90 a 120 km, si $Z_{elev-med}^7=no data$ entonces $Z_{elev-inf}=no data$. Siendo $Z_{elev-med}^n$ el promedio de la reflectividad en la elevación media dentro de una región de $n \times n$ volúmenes cuyo centro se corresponde con la reflectividad de la elevación inferior en evaluación.

Mapa de contaminación no-meteorológica estática. Productos contaminados por GC/Jm pueden ser identificados utilizando un mapa de clutter estáticos, que se determina a partir de datos recogidos en condiciones de cielo despejado, tormenta convectiva o estratiforme, nocturno y diurno; sin embargo, no identifican ubicaciones de ecos de tierra en condiciones de propagación anómala (Meischner, 2002). Se construyó promediando 1059 campos de reflectividad seleccionados adecuadamente desde el 2009 a la actualidad, y luego se identificaron las regiones de GC/Jm, como se puede apreciar en la Figura 6.

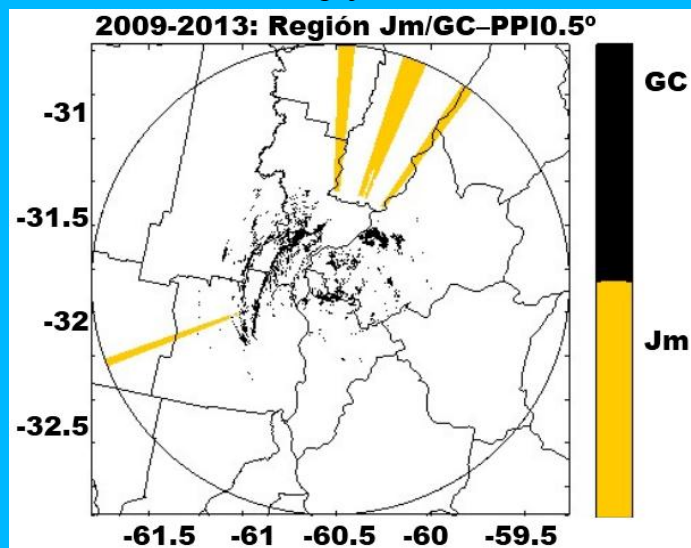


Figura 6: Mapa de contaminación no-meteorológica estática

Se procede a definir *no data* todo eco clasificado como PRE©, CL© o NC en la elevación inferior que coincida con la región de GC/Jm. Aquellos ecos clasificados como meteorológicos que pertenezcan a la región de Jm serán interpolados sólo en dirección azimutal, mientras que aquellos coincidentes con la región de GC serán interpolados bilinealmente.

5) RESULTADOS

En la Figura 7 se muestran los resultados de la aplicación de la metodología de eliminación de clutter propuesto sobre diferentes estadios de los eventos a analizar. La selección se llevó a cabo de manera tal de remarcar toda ventaja y desventaja de la técnica. La evaluación del método se realiza en base a un análisis de todos los productos provistos por el sistema, añadiendo cortes verticales de las estructuras en la ubicación y extensión deseada, para una secuencia del evento que incluye la imagen a analizar.

En la imagen de reflectividad 2010022000334600 se puede apreciar una extensa región de AP con una dinámica similar a un campo de precipitación, dando la impresión de ser este de gran cobertura. CL en cielo limpio son correctamente clasificados y eliminados. La región de CL(I) es resuelta adecuadamente con en análisis de la estructura 3D. Se aprecia en la imagen filtrada atenuación de ecos meteorológicos (alejado del radar) y clutter sin eliminar (próximo al radar).

El campo de reflectividad 2010022015254500 se caracteriza por presencia de GC, Jm de baja intensidad clasificado como PRE, y una importante región NC. La defectuosa clasificación es resuelta adecuadamente gracias a las técnicas adicionales, siendo eficaz la remoción de clutter.

Se consideró la imagen de reflectividad 2011051313443600 representativa del evento completo dado que en esta se puede apreciar el efecto de Jm de gran intensidad, clasificado como PRE(I), y resuelto exitosamente por la clasificación. Lamentablemente se observa en torno a esta región inconsistencias en la clasificación, pero nuevamente el análisis de estructura 3D de la reflectividad corrigió en gran parte esta discrepancia. Por otra parte se ha clasificado AP inmerso en precipitación.

6) CONCLUSIÓN

La presencia de clutter son graves obstáculos para el logro de estimación de precipitación exacta de los radares. Como primer aproximación se ha explorado las características de los ecos de precipitación y clutter y se han utilizado en la eliminación de estos últimos. El uso de técnicas adicionales logró reducir el error de estimación de precipitación. La evaluación muestra que la técnica propuesta tiene un rendimiento comparable con otras técnicas actuales:

- Se conservan las etapas de iniciación de celdas de precipitación (PRE©), siendo útil para aplicaciones orientadas hacia la previsión a corto plazo (nowcasting) de células de tormenta.
- Ecos de Jm de gran intensidad son resueltos correctamente, pero generan inconvenientes en la clasificación de ecos en regiones vecinas.
- Clutter fuera del campo de precipitación es resuelto eficientemente y se reduce el efecto al estar incrustado en precipitación, aunque esto último puede requerir enfoques más complejos respecto al tratamiento a realizar sobre ellos.
- El mapa de clutter estáticos corrige adecuadamente ecos de GC/Jm no clasificados.
- La técnica propuesta es sencilla y se puede aplicar a cualquier radar polarimétrico operativo después de obtener la región crítica de GC/Jm para el entorno local.

Respecto al acondicionamiento de los datos, falta mucho por realizar: corrección de atenuación por radomo, calibración de Z_{DR} y Z , y ajustar la relación Z - R . Estas mejoras se lograrían conociendo la distribución del tamaño de las gotas para el Radar INTA-Paraná y/o con una mayor densidad de pluviómetros en la región para validar cuantitativamente las técnicas a desarrollar en un futuro cercano. El objetivo final es desarrollar una herramienta de nowcasting sobre el campo de precipitación estimado.

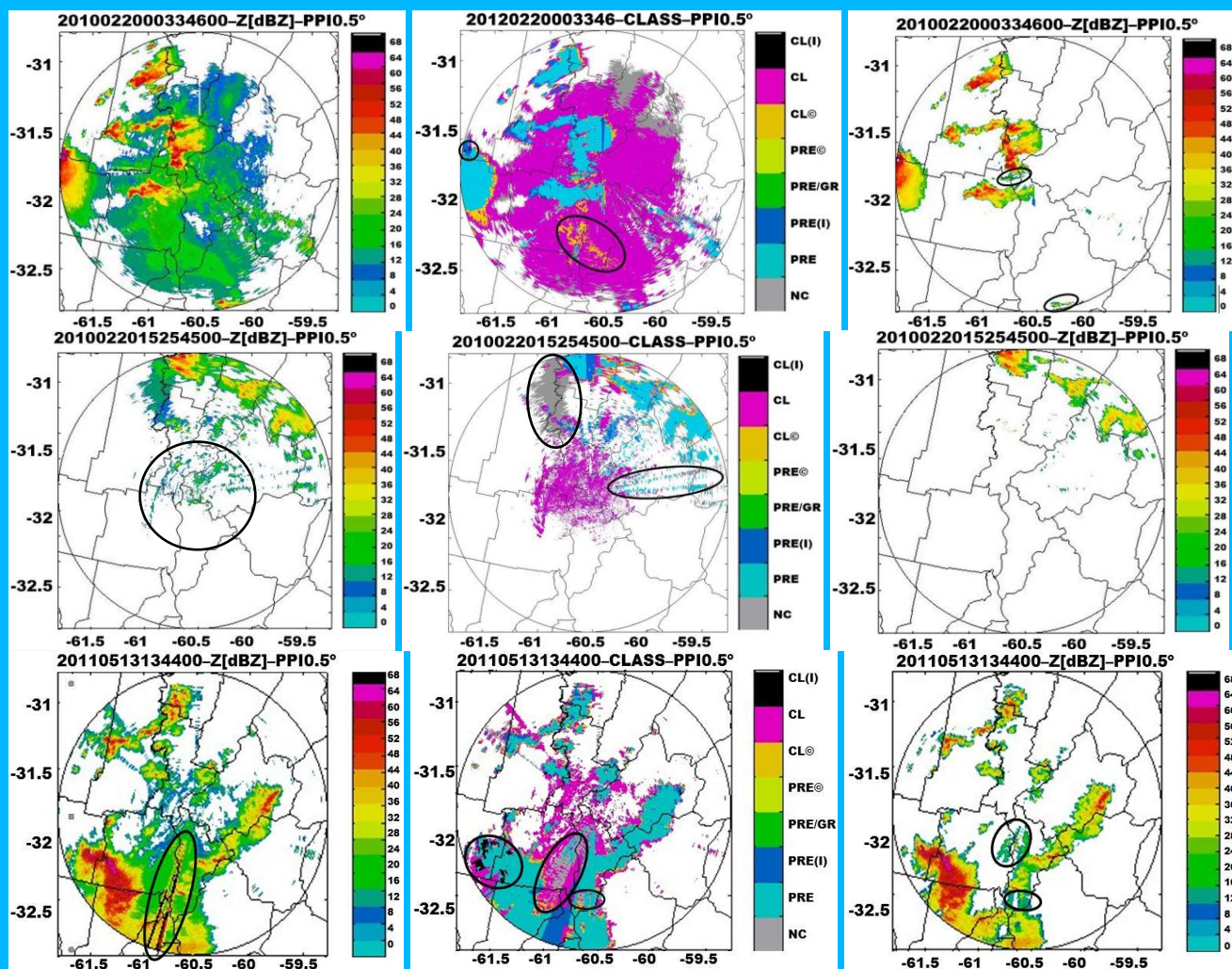


Figura 5: Imágenes PPI a elevación de 0.5°, de las situaciones meteorológicas: 20100220003346 (1er fila), 20100220152545 (2da fila) y 20110513134400 (3er fila). En la primer y última columna se presentan los campos originales y filtrados, respectivamente. En la columna central se aprecian la clasificación de ecos. Los círculos identifican regiones comentadas en el texto.

REFERENCIAS

Anderson, M. E., Carey L. D., Petersen W. A. y Knupp K. R., 2011: C-band Dual-polarimetric Radar Signatures of Hail. National Weather Association, Electronic J. Operational Meteor., 30pp.

Bringi, V.N., Thurai M. y Hanesen R., 2007: Dual-Polarization Weather Radar Handbook. 2nd. Edition, Germany, 171pp.

Cao, Q., Zhang G., Palmer R. D., Knight M., May R. y Stafford R. J., 2012: Spectrum-time estimation and processing (STEP) for improving weather radar data quality. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 50, 11, 4670–4683.

Ice, R. L. y otros, 2009: Automatic clutter mitigation in the WSR-88D, design, evaluation, and implementation. 34th Conf. Radar Meteorol., Williamsburg, VA, USA, Amer. Meteor. Soc., Paper 5.3.

Kumjian M. R., 2013: Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: Warm

and cold season applications. *J. Operational Meteor.*, 1, 20, 243–264.

Lakshmanan, V., Zhang J., Hondl K. y Langston C., 2012: A Statistical Approach to Mitigating Persistent Clutter in Radar Reflectivity Data. *IEEE J. Selected Topics Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 5, 2, 652–662.

Li, Y., Zhang G. y Doviak, R. J., 2014: Ground Clutter Detection Using the Statistical Properties of Signals Received With a Polarimetric Radar. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 62, 3, 597–606.

Li, Y., Zhang G., Doviak R. J., Lei L. y Cao Q., 2013: A new approach to detect ground clutter mixed with weather signals. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51(4), 2373–2387.

Macor J. L., 2007: Développement de techniques de prévision de pluie basées sur les propriétés multi-échelles des données radar et satellites. Tesis doctoral, ENPC, 193pp.

Meischner P., 2002: Weather Radar Principles and Advanced Applications. NY, USA, Springer, 337pp.

Park, H., Ryzhkov A. V. y Zrnić D. S., 2009: The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS. *Weather Forecast.*, 24, 3, 730–748.

Ramirez, M. A. y Cluckie, I. D, 2008: Classification of Ground Clutter and Anomalous Propagation Using Dual-Polarization Weather Radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46,7, 1882–1904.

Schuur, T., Ryzhkov A. V., y Heinselman P., 2008: Observations and Classification of echoes with the polarimetric WSR-88D radar. NSSL, Norman, OK, USA.

Selex Sistemi Integrati, 2008: Products and Algorithms. Manual Rainbow®5, Gematronik Weather Radar System, Germany, 298pp.

Siggia, A. D. y Passarelli, R. E., 2004: Gaussian model adaptive processing for improved ground clutter cancellation and moment calculation. In *Proc. 3rd Eur. Conf. Radar Meteorol. Hydrol.*, 67–73.

Steiner, M. y Smith, J. A., 2002: Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of non-precipitating echoes in radar data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 673–686.

Torres, S. y Warde, D., 2013: The autocorrelation spectral density for Doppler-weather-radar signal analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 52, 1, 508–518.

Torres, S., Warde D., y Zrnić D. S., 2012: Signal design and processing techniques for WSR-88D ambiguity resolution: Part 15, The CLEAN-AP filter. NSSL, Norman, OK, USA.

Villarini, G. y Krajewski, W. F., 2010: Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall. *Surv. Geophys.*, 31, 107–129.

Wang, P., Xu K., Zhang Y., y Jia H., 2012: Doppler Weather Radar Clutter Suppression based on texture feature. *Proceedings of the 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Xian*, 15–17.