

Análisis comparativo de eventos hidrometeorológicos en la provincia de Córdoba monitoreados mediante Estaciones Meteorológicas Automáticas y Sensores Remotos (Radar Meteorológico y Satélite)

Alejo J. S. Testa Tacchino^{1,2}, Ricardo Ingaramo², Andrés Lighezzolo², Ignacio Montamat², Jorge Saffe², Agustín Martina², Denis Poffo², M. Eugenia Capone² y Andrés Rodríguez^{1,2}

¹ Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Córdoba, Argentina

² Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 31/05/2019

Fecha de aceptación del manuscrito: 15/11/2019

Fecha de publicación: 30/04/2020

Resumen— En este trabajo se describe el monitoreo de cuatro eventos hidrometeorológicos relevantes ocurridos entre 2015 y 2018 en la Provincia de Córdoba, Argentina, que han sido monitoreados por estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) de superficie administradas por diferentes organismos, simultáneamente por el radar RMA1 instalado a fines del año 2014 en la ciudad de Córdoba, perteneciente al Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (Sinarama), e imágenes satelitales de GOES 16. A través del análisis de estos eventos se puede apreciar la evolución de las capacidades disponibles en el Observatorio Hidro-Meteorológico de Córdoba (OHMC), tanto en lo que hace a los sensores propiamente dicho como a la calidad de sus productos, cuya finalidad precisamente es integrar la información hidrometeorológica relevada en la Provincia por diferentes organismos del área de recursos hídricos. La Provincia de Córdoba se caracteriza por la ocurrencia de eventos extremos, como las tormentas de tipo convectivas que se desarrollan principalmente en época estival y que se caracterizan por una gran variabilidad espacial y temporal, con picos de lluvia de gran intensidad. La reconstrucción de este tipo de eventos, particularmente la estimación de la tasa de precipitación a partir de mediciones de un radar meteorológico, es un tema de interés para una amplia gama de aplicaciones hidrológicas.

Palabras clave— Meteorología de Radar; Estaciones Meteorológicas Automáticas; Meteorología Satelital; Integración de Datos

Abstract— This paper describes the monitoring of four relevant hydrometeorological events that occurred between 2015 and 2018 in the Province of Córdoba, Argentina, which have been monitored by automatic weather stations (EMAs) administered by different agencies, simultaneously by the RMA1 radar installed at end of 2014 in the city of Córdoba, belonging to the National System of Meteorological Radar (Sinarama), and satellite images of GOES 16. Through the analysis of these events you can see the evolution of the capabilities available at the Hydro-Meteorological Observatory of Córdoba (OHMC), both in what it does to the sensors themselves and to the quality of their products, whose purpose is precisely to integrate the hydrometeorological information collected in the Province by different organisms in the area of water resources. The Province of Córdoba is characterized by the occurrence of extreme events, such as convective type storms that develop mainly during the summer and that are characterized by great spatial and temporal variability, with high intensity rain peaks. The reconstruction of this type of events, particularly the estimation of the precipitation rate from meteorological radar measurements, is a topic of interest for a wide range of hydrological applications.

Keywords— Meteorological Radar data; Automatical Weather Stations; Satellite Meteorology; Data Integration.

INTRODUCCIÓN

La distribución espacial de la precipitación es un dato muy importante para diversas aplicaciones hidrológicas. El éxito de las simulaciones basadas en los modelos hidrológicos depende en gran medida de una adecuada cuantificación de la precipitación, tanto en lo que hace a su magnitud como a su distribución espacial (Seo et al., 2015).

Los radares meteorológicos se han transformado en una herramienta ideal para el monitoreo de lluvia, debido a la cobertura espacial de gran escala que permiten (Hong and Gourley, 2015), pero la mejora de las estimaciones cuantitativas de la precipitación constituye aún un desafío para este tipo de sensores remotos (Gerstner, M. et al., 2016).

Los radares meteorológicos permiten generar pronósticos con una elevada resolución espacial y temporal, pero producen estimaciones poco precisas de la intensidad de lluvia caída en un punto dado (Collier, 1996). Por esta razón, es necesario integrar los datos del radar con registros pluviométricos de superficie y con información proveniente de otros sensores remotos como los satélites, a fin de ajustar los algoritmos que realizan la transformación de los ecos

electromagnéticos medidos por el radar en precipitación (Comes et al., 2016). Esto permite materializar lo que se conoce como proceso de calibración hidrológica del Radar Meteorológico, mediante la utilización de diversas herramientas y procedimientos (Méndez et al., 2006).

La instalación del Radar Meteorológico Argentino (RMA1) en la Ciudad de Córdoba, primero de su tipo de origen nacional fabricado por INVAP, se enmarca dentro del Proyecto SINARAME (Sistema Nacional de Radares Meteorológicos), cuyo objetivo es el desarrollo de radares de última generación producidos en el país, su integración al resto de los radares ya existentes, y su vinculación con un Centro de Operaciones dependiente del Servicio Meteorológico Nacional que administre toda la red, para optimizar así las prestaciones del Sistema (Rodríguez et al. 2017).

El radar meteorológico tiene capacidad para generar información a corto y muy corto plazo para la previsión de eventos meteorológicos como lluvia, granizo, viento, así como blancos no meteorológicos (nubes de polvo, cenizas de volcanes, animales en vuelo, entre otros) (Hannesen et al., 2003, Huang et al., 2003, Mass et al., 2006, Marzano et al., 2013). Para la generación de datos confiables es necesario implementar un proceso de calibración "electrónica" que garantice la medición de datos precisos del factor de reflectividad (una de las variables más importantes que registra el radar), y otro de calibración "hidrológica", que permita una adecuada transformación de los datos de reflectividad en precipitación (Hong and Gourley, 2015).

En este artículo se presenta el análisis de una serie de eventos pluviométricos significativos ocurridos en los últimos años, tanto en lo que hace a la magnitud de la lluvia registrada como a la extensión areal del fenómeno, medidos simultáneamente por diferentes tipos de sensores, tratando de reflejar la evolución de las capacidades de monitoreo del OHMC.

OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo es describir las tareas de monitoreo en el marco del OHMC, para lo cual se consideran los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar eventos meteorológicos de interés en la zona de cobertura del radar meteorológico RMA1, para los que se hayan registrado simultáneamente mediciones con diferentes tipos de sensores.
2. Describir el procedimiento de relevamiento de datos en estaciones meteorológicas de superficie, de datos del radar meteorológico y de imágenes satelitales.
3. Presentar diferentes casos de estudio que reflejen la evolución de las herramientas utilizadas, de los análisis realizados y de los productos obtenidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Provincia de Córdoba cuenta con una extensa red de estaciones meteorológicas, tanto automáticas como convencionales, que operan con distinta tecnología y miden diversas variables meteorológicas de interés. Estas estaciones son administradas y operadas por diversos organismos provinciales y nacionales, públicos y privados: Secretaría de Recursos Hídricos (SRH) y Administración

Provincial de Recursos Hídricos (APRHI) de la Provincia de Córdoba, Instituto Nacional del Agua - Centro de la Región Semiárida (INA-CIRSA), Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba, Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC), Sub Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Bolsa de Cereales de la Provincia de Córdoba (BCC), más algunas municipalidades del interior de Córdoba. La mayor parte de estas redes publican actualmente sus datos en la página del OHMC (<https://ohmc.psi.unc.edu.ar/>), organismo creado en el año 2017 que propicia la integración de datos provenientes de distintos sensores, entre los que se cuenta en la actualidad los radares meteorológicos, las estaciones meteorológicas automáticas y dentro de ellas los disdrómetros, los sensores de detección de descargas eléctricas, los sensores de detección de incendios, los sensores de monitoreo de calidad de agua en lagos, el instrumental para la cuantificación experimental del escurrimiento superficial en los ríos de la región, otros sensores como drones y cámaras remotas sobre red de fibra óptica, así como los productos de satélites. En la Fig. 1 se muestran las instituciones que forman parte del Observatorio en la actualidad, mientras que en Fig. 2 se observan los diferentes sistemas de monitoreo que busca integrar el OHMC.



Fig. 1: Instituciones que integran el OHMC.

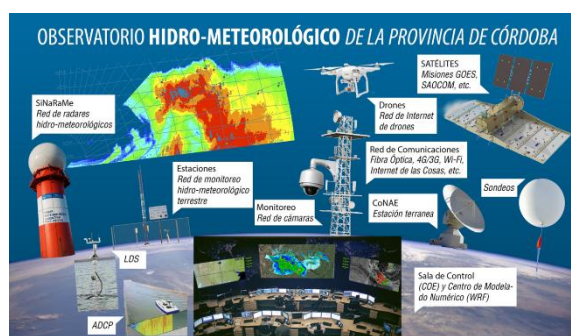


Fig. 2: Esquema conceptual del sistema integrado de Monitoreo Hidrometeorológico del OHMC

La Tabla 1 resume la cantidad y distribución por organismo de las estaciones meteorológicas a inicios del año 2019 en la provincia de Córdoba, cuya ubicación se muestra en la Fig. 3.

TABLA 1: ESTACIONES DE CÓRDOBA POR INSTITUCIÓN

Organismo/Institución	Cantidad
INA-CIRSA	60
Bolsa de Cereales de la Pcia de Córdoba	100
SMN	9
INTA	12
Gob. De Cba/OMIXOM	128
TOTAL DE ESTACIONES	309

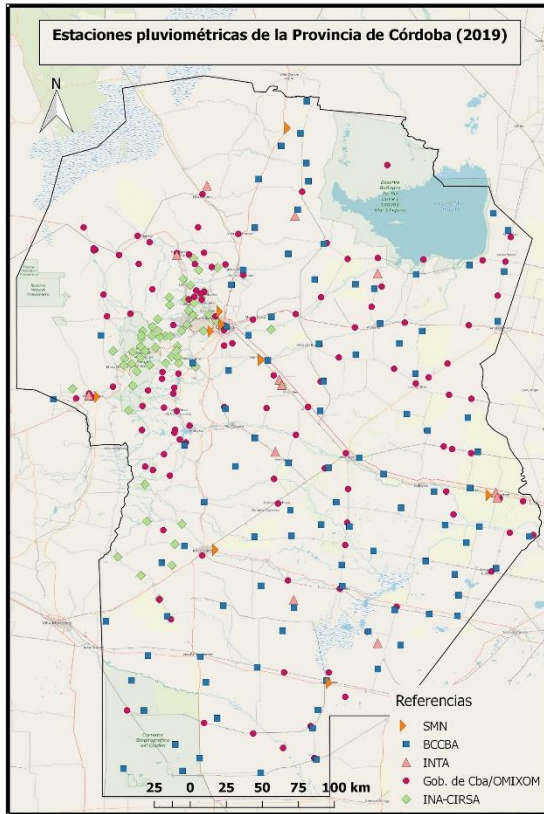


Fig. 3: Red de estaciones hidrometeorológicas de la Provincia de Córdoba

Si bien hay más de 300 estaciones meteorológicas telemétricas disponibles, no todas pueden ser utilizadas para integrar con los datos del radar meteorológico, debido principalmente a dos razones: o no se tiene acceso público a los datos o bien la estación proporciona solamente datos diarios. El RMA1 proporciona valores del factor de reflectividad Z en un intervalo temporal más pequeño, que varía de acuerdo a la estrategia de barrido del radar, pero está en el orden de los 7 minutos.

Por otro lado, el radar trabaja con distintas estrategias de operación de acuerdo a la distancia al fenómeno meteorológico y tipo de variable polarimétrica que se desea medir. En líneas generales el radar puede ser configurado para monitorear en un rango de distancia de 120 km (modo Doppler), 240 km (modo convencional) y 480 km (modo vigilancia). Este último se utiliza para la detección temprana de frentes de tormenta, a gran altura, que se acercan a la zona de cobertura, pero los datos medidos no resultan representativos para su empleo la estimación de lluvia. Por consiguiente, las estaciones que se encuentran fuera de los 240 km de cobertura del radar también fueron descartadas del análisis. Como consecuencia, son unas 90 estaciones las que se consideran apropiadas para su integración con datos de radar (Fig. 4).

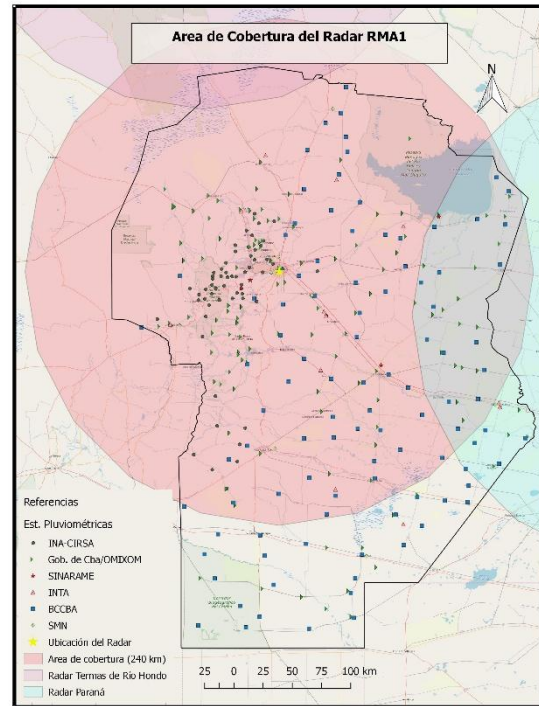


Fig. 4: Red de estaciones meteorológicas de la Provincia de Córdoba empleadas para la calibración hidrológica del RMA1

El procedimiento empleado para la identificación de estaciones a ser consideradas en cada estudio junto con los datos de radar, consiste en superponer las estaciones meteorológicas en superficie con imágenes geocalizadas de variables polarimétricas (típicamente es utilizado el Factor de Reflectividad (Z)) generadas por el radar en los sucesivos barridos durante el transcurso del evento (formando aproximadamente la "mancha" de la tormenta), tal como se muestra en la Fig. 5 (Petroli et al. 2017a). Esta intersección determina las estaciones a considerar, lo que permite seleccionar los datos pluviométricos que van a ser comparados con las mediciones realizadas por el RMA1 en un punto geográfico específico (Petroli et al. 2017b).



Fig. 5: Mosaico de la tormenta y estaciones involucradas

El radar meteorológico RMA-1 es un radar doppler dual-polarimétrico. Es decir, es capaz de estimar tanto la componente de velocidad radial de los hidrometeoros en suspensión (o las tormentas) como también su densidad, tamaño, forma y composición de las gotas. Esto es posible gracias a las capacidades de este radar en particular de

transmitir y recibir energía de radiofrecuencia en dos orientaciones o planos ortogonales.

El factor de reflectividad Z mide la capacidad dieléctrica (K) de las partículas de agua líquida presentes en la atmósfera y, en consecuencia, su poder retrordispersivo. Es decir, mientras más agua líquida sea iluminada por el pulso de radiofrecuencia del radar, más energía de retorno se observa. Esta magnitud, para precipitación de agua líquida, depende de la distribución de tamaños por unidad de volumen de las partículas de agua (o gotas). Es decir, cuántas gotas existen por metro cúbico y de qué diámetro (D). La medida de la distribución de las gotas ($N[D]$) es una función gamma (Λ) truncada y su ecuación toma la siguiente forma:

$$Z = \int |K|^2 N_0 e^{-\Lambda D/D_0} D^6 dD \quad (1)$$

donde se puede observar que Z depende de la potencia sexta del diámetro de las gotas.

Debido a la gran variabilidad de los valores que esta variable puede adoptar se la expresa normalmente en decibeles:

$$Z_{dB} = 10 \log Z \quad (2)$$

En esta escala se tiene aproximadamente lo siguiente:

$-10 < Z_{dB} < 10 \Rightarrow$ Partículas de nubes no precipitantes

$10 < Z_{dB} < 25 \Rightarrow$ Llovizna o lluvia leve

$25 < Z_{dB} < 40 \Rightarrow$ Lluvia moderada

$40 < Z_{dB} < 55 \Rightarrow$ Lluvia intensa

$55 < Z_{dB} \Rightarrow$ Lluvia muy intensa, granizo o una mezcla de ambas

Z_{dB} , denominado Factor de Reflectividad, es la magnitud que se utiliza en este trabajo para comparar las mediciones de radar con las pluviométricas.

Por otra parte, las imágenes satelitales utilizadas provienen del GOES-16, que es un satélite geoestacionario de última generación perteneciente a la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) lanzado el 19 de noviembre de 2016, que reemplaza operacionalmente al GOES-13 y extiende la disponibilidad operativa del sistema hasta el año 2036. Esta última generación de satélites mejora significativamente la observación y detección de fenómenos ambientales con respecto a sus antecesores.

A bordo del GOES-16 se encuentran una serie de instrumentos dentro de los cuales el Advanced Baseline Imager (ABI) es uno de los principales. El ABI es un radiómetro pasivo multicanal (con 16 canales o bandas) diseñado para proveer de información del estado de la atmósfera, la cobertura nubosa y de la superficie terrestre. Este instrumento mejora significativamente las cualidades de sus antecesores. Dentro de los 16 canales, el canal 13, ubicado en el espectro infrarrojo con una longitud de onda de $10.3 \mu\text{m}$, es comúnmente utilizado para describir posibles estados de tiempo severo. Los datos de este canal están dados en temperatura de brillo del tope de la nube y cuanto más fría es la temperatura, más alto se encuentra ese tope y por lo tanto es mayor la probabilidad de tiempo severo. Los datos de este canal están disponibles cada 15 minutos con una resolución horizontal de 2km en nadir, características que lo hacen de gran utilidad en el seguimiento de eventos severos y la estimación de lluvia (Ovando *et al.*, 2018).

EVENTOS ANALIZADOS

Los eventos considerados, ocurridos entre los años 2015 y 2018, se resumen en la Tabla 2.

TABLA 2.- LISTADO DE EVENTOS ANALIZADOS

Evento	Fecha	Ubicación	Información radar	Información Estaciones Meteorológicas	Información Satelital GOES 16
01	7Nov15	Anisacate	Si	Si	No
02	8Mar16	Ascochinga	Si	Si	No
03	28Mar17	Santa Ana	Si	Si(*)	No
04	7-10 May18	Cca Lago San Roque	Si	Si	Si

(*) Estación totalizadora

EVENTO 01 - Anisacate / Noviembre de 2015

Una de las primeras acciones orientadas a la calibración hidrológica del RMA1 consistió en el análisis de un evento de lluvia y granizo que azotó a la localidad de Anisacate (y sitios aledaños) el día 7 de noviembre de 2015. Esta localidad está ubicada aproximadamente 40 km al Sur del lugar de emplazamiento del radar. La tormenta se caracterizó por ser un fenómeno de tipo convectivo, muy localizado espacialmente, con caída de granizo durante los primeros minutos de la tormenta (información obtenida por observación directa). Fue registrado por el radar RMA1 entre las 19:50 y las 20:35 hs (UTC). Los datos recibidos permitieron realizar el seguimiento de la tormenta y detectar así el momento preciso de la caída de lluvia y de granizo, obteniéndose la duración e intensidad de la precipitación (Comes *et al.*, 2016).

Para relacionar los datos proporcionados por el RMA1 y el pluviógrafo ubicado en la localidad de Anisacate (operado por el INA-CIRSA), se consideraron los valores de factor de reflectividad medidos por el radar en nueve celdas ubicadas alrededor de la proyección en vertical del sensor de superficie, para una elevación del radar a $0,5^\circ$. Estas celdas conforman un arreglo matricial de 3×3 elementos, tal como se observa en la Fig. 6. Con los datos disponibles de distancia y de las coordenadas geográficas tanto del RMA1 como de la estación meteorológica, se pudo determinar que la celda central se encontraba a unos 420 m de altura sobre el pluviógrafo.

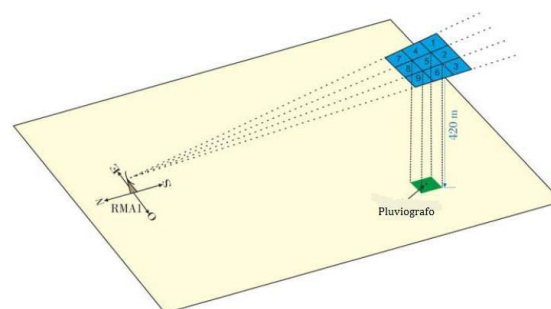


Fig. 6: Esquema de emplazamiento relativo a los instrumentos de observación de la precipitación en la zona de Anisacate

Se realizó un seguimiento completo del evento observado a través del RMA1. La Fig. 7 muestra una secuencia de seis registros de factor de reflectividad medidos consecutivamente. En las imágenes se identifica la posición del radar con una cruz negra en el punto (0,0) y la posición de la estación meteorológica con otra cruz negra

que se encuentra en la zona donde se registra la mayor actividad del evento (sector rojo intenso).

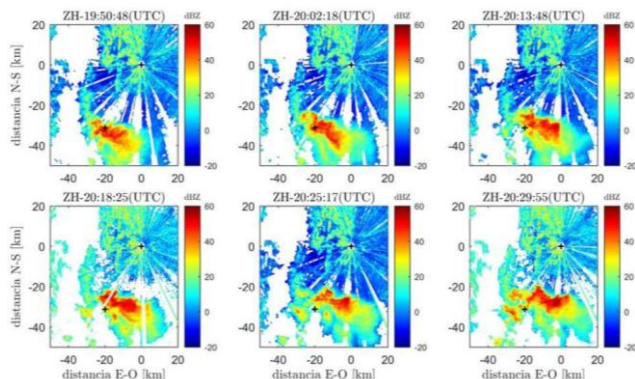


Fig. 7: Registros de factor de reflectividad medidos como una secuencia temporal, con la ubicación del RMA1 en la posición (0,0) y la posición de la estación meteorológica con cruces negras

Se analizaron los registros de precipitaciones en la fecha de ocurrencia del evento en la estación de Anisacate y en el resto de las estaciones dentro de la misma cuenca, pero solamente el sensor de la estación mencionada presentó registros no nulos, dando idea de la alta concentración espacial de la tormenta. Se elaboraron los hietogramas en intervalos de 1 a 15 minutos y posteriormente se analizó la información cada 5 minutos, por considerarse un intervalo pertinente para observar las características de interés de esta tormenta en particular, además de ser coherente con la duración del evento.

El evento tuvo una duración total de 45 minutos con una precipitación acumulada de 53 mm. La máxima lámina registrada fue de 12 mm en 5 min, lo que implica una intensidad media máxima en dicho intervalo de 144 mm/h, como se observa en el hietograma de la Fig. 8, constituyendo un evento que puede ser considerado como intenso.

Se observa una importante variabilidad temporal de las intensidades a pesar de su corta duración. En relación a su distribución espacial, como ya se explicó, la tormenta estuvo altamente concentrada sobre la localidad de Anisacate.

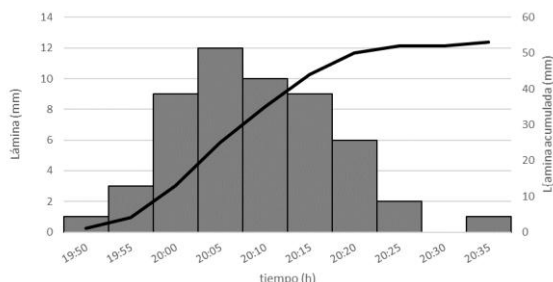


Fig. 8: Hietograma y precipitación acumulada del evento del 7/11/2015. Estación Anisacate

En la Fig. 9 se muestran los datos del factor de reflectividad obtenidos a partir de las observaciones del RMA1 en las nueve celdas consideradas, que fueron procesados y ordenados para producir las representaciones gráficas correspondientes, en las que se superponen dichos datos con la tasa de precipitación registrada por el sensor de Anisacate a lo largo del periodo de desarrollo del evento.

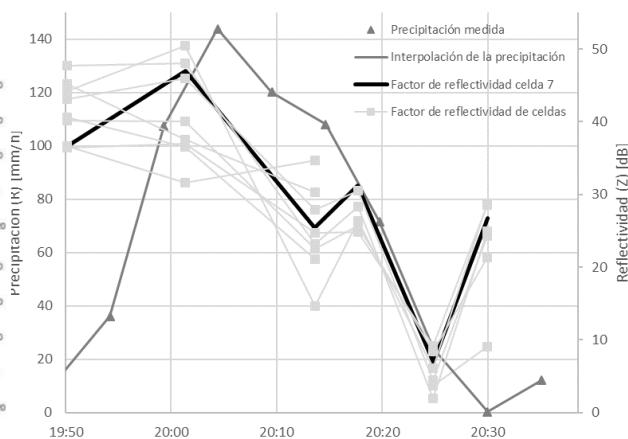


Fig. 9: Intensidad de la precipitación R (mm/h) y factor de reflectividad Z_{dB} vs tiempo para el evento del 7/11/2015. Estación Anisacate

La observación de las gráficas revela un retraso inicial entre las variables observadas (precipitación y reflectividad). Este comportamiento es indicativo de una relación causa-efecto implícita, debido a que la tasa de precipitación registrada por el pluviógrafo resulta de la caída de los hidrometeoros que previamente fueron registrados por el radar cuando se encontraban por encima del sensor.

Lo segundo que se puede observar es una clara correlación entre las partes descendentes de las curvas, tanto de las celdas registradas por el RMA1 como de los datos registrados por el sensor de precipitación. Este paralelismo en el comportamiento de las curvas no se observa tan claramente en los tramos iniciales, destacando que cuando el factor de reflectividad crece ligeramente o decrece, la tasa de precipitación comienza un rápido ascenso con un retraso del mismo orden observado en el tramo decreciente. La interpretación del repentino aumento en la tasa de precipitación se atribuye al derretimiento de granizo acumulado sobre el embudo de la boca del pluviógrafo, que había caído anteriormente cuando el radar registraba el valor más elevado de factor de reflectividad.

También es notoria la mayor coincidencia del comportamiento de las curvas del factor de reflectividad en función del tiempo para las nueve celdas que componen el área barrida por RMA1 sobre la estación meteorológica de Anisacate en los estadios finales de la tormenta. Esta coincidencia se explica por la mayor uniformidad en la distribución de tamaños de las partículas de precipitación que aún subsisten en las celdas observadas.

En este análisis el radar se encontraba en etapa de puesta a punto, pero ya se observa un buen desempeño en el seguimiento del evento y una buena correlación entre la reflectividad y la precipitación medida en tierra.

EVENTO 02 - Ascochinga / Marzo de 2016

Otro de los trabajos orientados a la calibración hidrológica del RMA1 consistió en el análisis de un evento de lluvia ocurrido en la localidad de Ascochinga (y sitios aledaños) el día 08 de marzo de 2016. Esta localidad está ubicada aproximadamente 55 km al Norte del lugar de emplazamiento del radar. Este evento se caracterizó por ser un fenómeno de tipo convectivo, muy localizado espacialmente (determinado por observación directa) con una duración de 80 min y 82 mm de lámina acumulada.

Para este análisis se utilizaron las estimaciones de precipitación diaria acumulada en milímetros, correspondientes a la integral de varias imágenes generadas automáticamente (una cada 12 minutos) de la ventana temporal de estudio de la tormenta, con una resolución de 0,25 km². Se busca la relación exponencial que mejor ajuste para convertir el factor de reflectividad (Z_{dB}) en intensidad de precipitación (R) para el evento considerado.

El período de evaluación comprende desde la 1:30 UTC hasta las 4:20 UTC del 08 de marzo de 2016. Se identificaron los pluviógrafos distribuidos bajo el área de cobertura del radar, incorporando sus coordenadas geográficas al sistema, obteniendo los datos correspondientes al radar centrados en la misma ubicación y hora absoluta del rayo que pasa por los pluviógrafos, como así también las ocho celdas aledañas a la central (Fig. 10), completando así los pares de datos (radar-pluviómetro) en todo el período analizado. Se revisaron las imágenes del RMA1 y los valores de precipitación acumulada en los pluviómetros de la zona, descartando aquellos que presentaban mucha discrepancia entre ambas fuentes.

Al tratar de establecer una relación de dependencia entre las variables Reflectividad (Z_i) e Intensidad de Precipitación (R_i), para determinar si los cambios en una de las variables influye en los cambios de otra, teniendo en cuenta el desfase temporal, se encontró que las variables están correlacionadas de la siguiente manera: $\rho[Z_i(t), R(t+\tau)]$.

Se analizaron los coeficientes de determinación obtenidos para diferentes desfases temporales (Tabla 3), consiguiendo el mejor ajuste para el grupo evaluado con un lag de 10 minutos y sobre una celda aledaña a la ubicada sobre el pluviómetro.

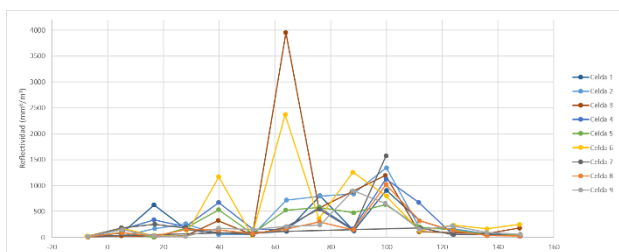


Fig. 10: Valores de reflectividades de RMA1 de 9 celdas asociadas a la Estación meteorológica Ascochinga, para 160 minutos

TABLA 3.- AJUSTES OBTENIDOS (R2) CON DESFAJAJE DE TIEMPO Y LAS NUEVE CELDAS

Desfasaje [t, min]	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Celda 5
0	0,0614	0,1611	0,012	0,0305	0,2201
10	0,0458	0,0891	0,3536	0,0966	0,3936
20	0,000002	0,0008	0,0576	0,0044	0,0018

Desfasaje [t, min]	Celda 6	Celda 7	Celda 8	Celda 9
0	0,0194	0,0145	0,0255	0,1787
10	0,4178	0,0002	0,0032	0,0007
20	0,059	0,0046	0,0004	0,0265

En la Tabla 3 las celdas muestran los coeficientes de determinación obtenidos para diferentes desfases temporales (columna 1) y para diferentes celdas alrededor de la posición del pluviómetro (fila 1). Como se observa, el

coeficiente más alto corresponde a la celda N° 6 y a un lag de 10 minutos. Este resultado se puede justificar por la dirección del viento predominante durante el evento y por el tiempo en que la gota llega a la superficie.

Se estableció la relación Z-R, donde los coeficientes a y b fueron estimados mediante una regresión lineal entre el factor de reflectividad medido por el radar y la intensidad de precipitación medida en superficie:

$$Z_{dB} = 1284,8 R^{1,0115} \quad (3)$$

En este análisis, además de la integración de datos de radar y de mediciones en superficie, se avanzó en la estimación de precipitación mediante el ajuste de un algoritmo similar al clásico de Marshall y Palmer (Marshall et al., 1947) para un tipo particular de hidrometeoro.

EVENTO 03 – SANTA ANA / Marzo 2017

Este caso se trató de un evento intenso y local, de tipo convectivo, en fecha 28 de marzo 2017 en este caso lamentablemente ninguna estación automática de la red de EMAs estuvo bajo la tormenta, por lo que se dispuso de una sola estación totalizadora en la Planta de Taym, la cual midió un total de 50 mm. El evento tuvo lugar a una distancia de aproximadamente 18 Km del RMA-1, sin interferencias orográficas significativas de por medio (sólo unas celdas al oeste fueron compensadas por obstrucción parcial del haz). Los datos del RMA-1 se procesaron mediante una serie de relaciones Z-R sugeridas, en su momento, por la literatura consultada.

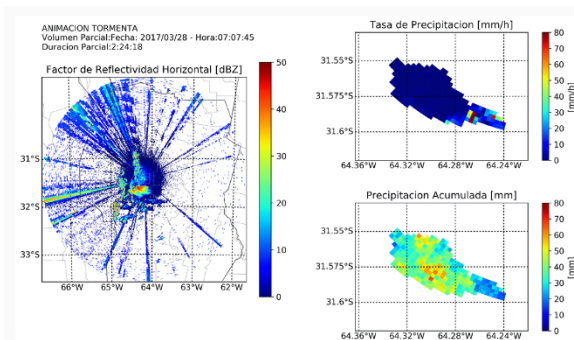


Fig. 11: (izquierda): Valores de reflectividades de RMA1 de 9 celdas asociadas a la estación meteorológica Ascochinga

EVENTO 04 - CUENCA DEL LAGO SAN ROQUE / Mayo de 2018

La siguiente aplicación consistió en el análisis de una serie de eventos pluviométricos que acumularon más de 120 mm a lo largo de 96 horas entre los días 7 y 10 de mayo de 2018 en la Cuenca del Lago San Roque (CLSR).

Se trató de un fenómeno bastante atípico, por la época del año considerada (ya entrada la temporada seca en la región) y por la magnitud del evento, que si bien no fue extraordinario (en cuanto a su recurrencia), ocasionó inconvenientes por inundaciones en zonas serranas, así como el llenado del Dique San Roque en el Valle de Punilla.

Además, este evento fue precedido por una secuencia de días con alta humedad y lloviznas persistentes en toda la región, de más de una semana de duración, por lo que la cuenca se encontraba prácticamente en estado de saturación. Todo esto motivó que el entonces Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de

Córdoba requiriera un análisis del desempeño de las diferentes herramientas de pronóstico y monitoreo hidrometeorológico con que se cuenta actualmente en la Provincia, gestionadas por distintos organismos nucleados en el Observatorio Hidro-Meteorológico de Córdoba.

Se midió la precipitación en 24 EMAs ubicadas en la cuenca del embalse del Lago San Roque y alrededores (Fig. 12), y se extrajeron los datos monitoreados por el Radar Meteorológico RMA1.

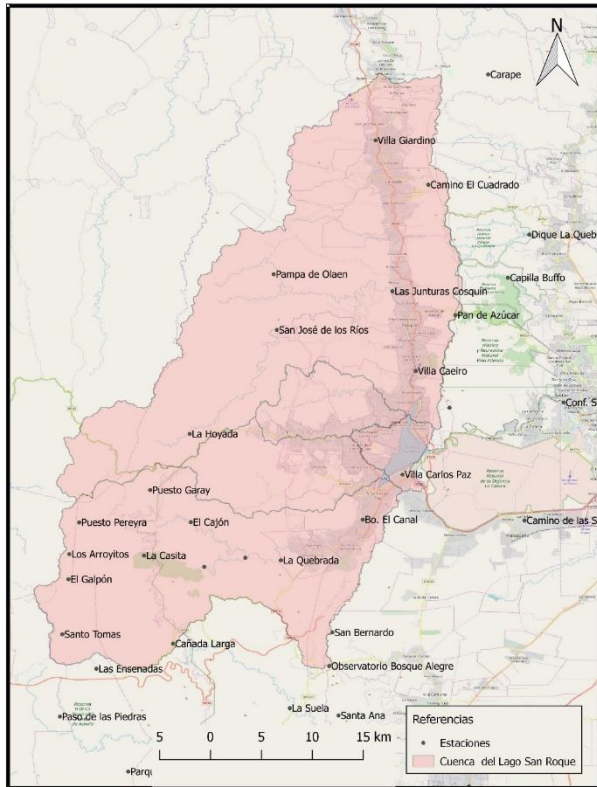


Fig. 12: Cuenca del Lago San Roque y distribución de las EMAs

Se realizaron además aforos líquidos durante la crecida del río Cosquín con un perfilador Doppler S5 River Surveyor. Se sumaron al análisis del evento diferentes productos satelitales como la temperatura de brillo de nube del canal 13 del satélite GOES 16.

La integración de toda esta información y su análisis fue posible gracias a la cooperación interinstitucional en el marco del OHMC, en este caso, entre el Instituto Nacional del Agua (INA), la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), la UNC y la Provincia de Córdoba.

Se puede destacar que la tormenta más severa fue registrada en la Estación Bosque Alegre, comenzó el 9 de mayo de 2018 a las 21:37 hs y finalizó el 10 de mayo a las 1:47 hs, con una duración de 260 minutos. La lámina precipitada fue de 58 mm, lo que equivale a una intensidad media de 13,4 mm/h.

Del total de las 24 EMAs consideradas, se calcularon las láminas registradas para diferentes ventanas de tiempo, a lo largo del período de duración del evento, para identificar los momentos más intensos a considerar en el análisis. Las ventanas de tiempo consideradas fueron: 7 días, 48 horas, 24 horas y 6 horas.

Para 7 días de duración, la estación de Bosque Alegre es la que posee la máxima lluvia registrada (238 mm), seguida por la estación Las Minas (179 mm). Las demás estaciones

registraron láminas de entre 32 mm y 145mm. Para la menor ventana de tiempo (6 hs), el mayor valor fue registrado por la estación La Hoyada (66 mm); muy próximas les siguen las estaciones de Bosque Alegre, San José de los Ríos (61 mm) y Villa Carlos Paz (56 mm). Se observa para esta duración que los valores registrados tienen un menor desvío que en las demás duraciones, lo cual indica que las columnas de precipitación intensa fueron relativamente generalizadas dentro de la cuenca. Finalmente, la precipitación media para toda la cuenca puede estimarse en 102,16 mm para el evento extendido (3 al 10 de mayo), siendo que la mayor parte de este monto corresponde al período entre el 7 y 10 de mayo.

Adicionalmente, para el día 8 de mayo (fecha donde se registró la mayor intensidad), se realizó un contraste de lluvia en 24 hs vs Precipitación Máxima Probable (PMP) para la región, en las estaciones que registraron más de 70 mm. De ese análisis surge que el sub-evento más relevante resultó estar en el orden del 20 al 35 % de la PMP para la región, lo que corrobora que no se trató de lluvias instantáneas extremas, sino más bien de precipitaciones de intensidades relativamente normales, pero de larga duración.

Para el análisis de la precipitación medida por radar se utilizó la integración de la información de todos los segundos barridos de cada ciclo de escaneo, es decir, a 0,7 grados de elevación. Esto se debe a que el dominio en cuestión se encuentra sobre las Sierras de Córdoba y, por lo tanto, a mayor altura sobre el nivel del mar que el RMA1, un barrido de menor elevación presentaría demasiada oclusión del haz de iluminación debida al terreno. La configuración de pulso del RMA1, para el fenómeno en cuestión, permite una celda de resolución aproximada de 0,2 Km², lo cual brinda un censo de la CLSR con gran nivel de precisión y un bajo nivel de atenuación por columna de agua.

La Fig. 13 muestra la precipitación acumulada estimada en base a los datos del radar para uno de los períodos analizados. En función del procedimiento empleado se concluye que la precipitación total acumulada en la CLSR, estimada con datos de radar en el período comprendido entre las 0hs del día 7/5/2018 y las 23:59hs del día 10/5/2018, fue de 89,2 mm.

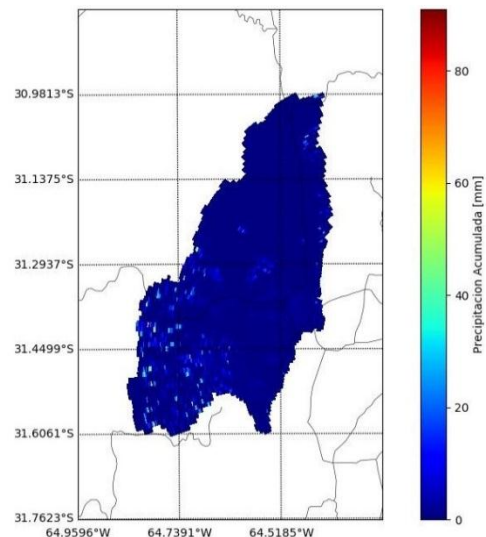


Fig. 13: Precipitación estimada con datos del RMA1

Con respecto a la información satelital, este evento fue monitoreado en su totalidad mediante las imágenes producidas y cedidas por la CONAE a partir del satélite GOES 16 (Fig. 14). Como se dijo anteriormente, se cuenta con una imagen cada 15 minutos y teniendo en cuenta que el evento duró cuatro días, las imágenes suman 384. Claramente no es posible mostrar en este artículo semejante volumen de información, por lo que se muestra una imagen diaria para los días 7, 8, 9 y 10 de mayo de 2018. Si bien es difícil describir con una sola imagen por día lo ocurrido durante todo el evento, es posible afirmar desde el análisis completo, que los días 8 y 10 tuvieron una importante actividad atmosférica, y que durante todo el evento la formación de las celdas convectivas surge desde el Oeste y Noroeste de la Provincia, desplazándose hacia el Este y Sureste.

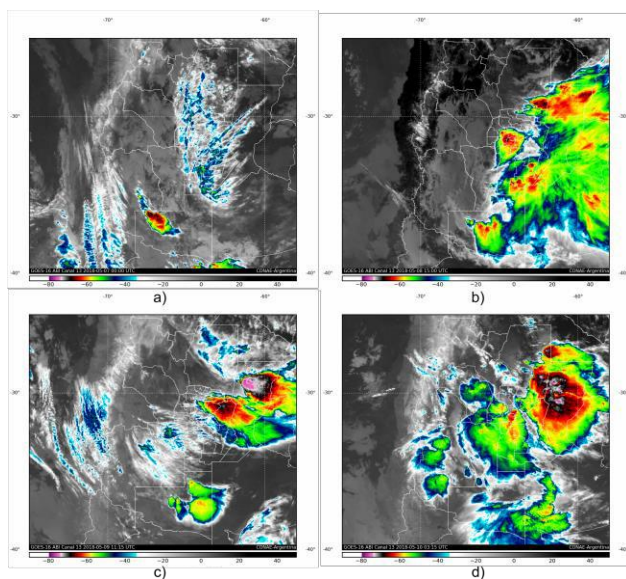


Fig. 14: Imágenes del satélite geoestacionario GOES 16

Gracias a las herramientas de relevamiento de datos y generación de información que dispone el OHMC en la actualidad, se ha logrado una adecuada caracterización del evento ocurrido entre 7 y 10 de mayo de 2018 en la zona de la CLSR. Se ha observado una relativa consistencia en el dimensionamiento del evento por parte de cada subsistema. En todos los casos (EMAs, Radar y Satélite) se ha estimado un evento prolongado a lo largo de los 4 días de análisis, con precipitación promedio moderada-alta, entre los 84 mm y los 102 mm aproximadamente a lo largo de toda la CLSR. La razón clave para explicar las inundaciones ocurridas y el crecimiento atípico de la cota del lago San Roque en un relativo corto período de tiempo, radica en el monto de lluvia caída, la extensión areal del evento y, sobre todo, el nivel de saturación de suelo observado para la CLSR previo al evento.

CONCLUSIONES

La integración de sensores convencionales y remotos para el monitoreo hidrometeorológico en la Provincia de Córdoba, en el marco del OHMC, permite un seguimiento cada vez más detallado de eventos de este tipo, particularmente para el análisis de fenómenos extremos que tienen un alto impacto en la sociedad (Rodríguez et al. 2018, Dölling et al. 2018).

Las redes de estaciones de superficie se han venido extendiendo y densificando en los últimos años, cubriendo casi toda la geografía provincial, administradas por diferentes organismos públicos y privados, cada vez más accesible a todos los usuarios. La disponibilidad de un moderno radar meteorológico Doppler polarimétrico instalado en la ciudad de Córdoba, permite el monitoreo de una amplia región con un elevado nivel de detalle espacial y temporal, mientras que la información proporcionada por imágenes satelitales como las de GOES 16 facilitan el seguimiento detallado de los fenómenos meteorológicos en la zona.

Al empleo de distintos medios de monitoreo se suma el desarrollo de procedimientos de análisis más potentes y la elaboración de nuevos productos que facilitan el uso e interpretación de la información generada para distintas finalidades.

Las actividades relacionadas con el tema continúan a un ritmo sostenido.

Se están incorporando progresivamente nuevas herramientas de monitoreo, como los disdrómetros (uno ya instalado en la EMA de la CONAE y otro en proceso de calibración en el Laboratorio de Hidráulica de la UNC) que permiten el estudio del tamaño y la distribución de las gotas presentes en un hidrometeoro, información de enorme utilidad para describir el fenómeno y para calibrar los parámetros de los algoritmos de transformación de reflectividad de radar en precipitación.

Por otra parte, se está trabajando en la implementación de modelos numéricos del tiempo de alcance regional, así como el empleo de modelos hidrológicos e hidráulicos para la simulación de caudales y niveles en cuencas rurales y urbanas con fines de alerta hidrometeorológica.

REFERENCIAS

- [1] Collier, C.G. (1996) "Applications of Weather RADAR Systems". John Wiley and Sons. England.
- [2] Comes, R., Ingaramo, R., Poffo, D., Furbatto, C., Saffe, J., Vicario, L., Dasso, C., Rodríguez, A., Bertoni, J.C., Caranti, G., Catalini, C., Martina, A., Menajovsky, S., Montamat, I., Rico, A., Rodríguez González, S., Serra, J., Villa Uría, A. (2016) "Empleo del Radar Meteorológico Argentino RMA1 para la detección de un evento severo". XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú.
- [3] Dölling, O., López, H. y López, G. (2018) "Integrated System of Surveillance, Alert and Forecasting of Precipitations (SIVAPP)". Modern Environmental Science and Engineer, Volume 4 N° 9.
- [4] Gerstner, E. y Heinmann G. (2016) "Real-time areal precipitation determination from radar by means of statistical objective analysis", Journal of Hydrology, Pages 296-308
- [5] Hannesen, R., Weipert, A. (2003) "Detection of dust storms with a C-band Doppler radar". 31st International Conference on Radar Meteorology.
- [6] Hong, Yang and Gourley, Jonathan (2015) Radar Hydrology - Principles, Models and Applications. Editorial CRC Press.
- [7] Huang, K., Zhong, J., Zhu, J., Zhang, X., Zhao, F., Xie, H., Gu, F., Zhou, B., Wu, M. (2003) "The method of forest fires recognition by using doppler weather radar". 31st International Conference on Radar Meteorology.
- [8] Marshall, J.S., Langille, R.C., Palmer, W.M. (1947) "Measurement of Rainfall by Radar". Journal of Meteorology. 4. pp. 186-192
- [9] Marzano, F., Picciotti, E., Montopoli, M., Vulpiani, G. (2013) "Inside Volcanic Clouds - Remote Sensing of Ash Plumes Using Microwave Weather Radars". American Meteorological Society, pp 1567-1586.

- [10] Mass, C., & Mass, C. F. (2011). Nowcasting: The Next Revolution in Weather Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- [11] Méndez B., Ramón A., Dominguez-Mora V., Caetano E., Carrizosa E. (2006). "Calibración Hidrológica en Radares Meteorológicos". *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XXI, núm. 4, pp. 43-64.
- [12] Ovando, G., Sayago, S., Bellini, G., Bocco, M. (2018) Evaluación del desempeño de productos satelitales para estimar precipitación en Córdoba (Argentina). *Congreso Argentino de AgroInformática*.
- [13] Petroli, G., Ingaramo, R., Saffe, J., Martina, A., Montamat, I., Rodríguez, A., Furbatto, C., Poffo, D., Menajovsky, S., Pagot, M. y Villa Uría, A. (2017a) "Reconstrucción de eventos meteorológicos de magnitud para la calibración hidrológica del Radar Meteorológico Argentino RMA1- Córdoba". *XXVI CONAGUA, Córdoba*, pg. 111-124, ISBN 978 987 4029 23 2.
- [14] Petroli, G., Ingaramo, R., Furbatto, C., Rodríguez, A., Villa Uría, A., Bertoni, J.C., Menajovsky, S., Vicario, L., Comes, R., Caranti, G., Montamat, I., Saffe, J., Martina, A., Rodríguez González, S., Poffo, D., Dasso, C. (2017b) *Calibración Hidrológica del Radar Meteorológico Argentino (RMA1)*. *Revista CETA*, Vol. 3, págs. 100-104.
- [15] Rodríguez A, Lacunza C, Serra J, Saulo C, Ciappesoni H, Caranti G, Comes R, Martina A (2017) "SiNaRaMe: El Primer Sistema Integrado de Radares Hidro-Meteorológicos de Latinoamérica". *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. UNC, Argentina*, Vol. 4, Nro.1, Pg. 41-48, ISSN 2362-2539.
- [16] Rodríguez, A., López, F., Castello, E., Vignetta, C., Ingaramo, R., Caranti, G., Comes, R., Bertoni, J.C., Martina, A., Saffe, J., Montamat, I., Poffo, D., Lighezzolo, A., Zigarán, G., Petroli, G., Rodríguez González, S. (2018) "Observatorio OMHM de Córdoba. Integración de sensores hidro-meteorológicos para monitoreo y alerta en la Región centro de Argentina". *Revista CETA, FCEFYN UNC, Cba., Arg., Nro. 3, Vol. I, pg. 9-13, ISSN 2525-0582*
- [17] Seo, D. J., Habib, E., Andrieu, H., & Morin, E. (2015). Hydrologic applications of weather radar. *Journal of Hydrology*, 531, 231-233.