

RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS PRIMARIOS DE CARACTERIZACIÓN CRISTALOGRÁFICA DE GRANIZOS Y DE LAS TORMENTAS QUE LOS ORIGINAN

Lucía E. Arena

Laboratorio de Física de la Atmósfera Laura Levi-Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FAMAF)-Universidad
Nacional de Córdoba (UNC), Córdoba, Argentina.

Dirección de Divulgación y Enseñanza de la Ciencia. Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba (MENCYT)

lucia.arena@unc.edu.ar



Recopilación de Estudios Primarios de Caracterización Cristalográfica de Granizos y de las Tormentas que los originan por Arena L., Crespo A. se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS PRIMARIOS DE CARACTERIZACIÓN CRISTALOGRÁFICA DE GRANIZOS Y DE LAS TORMENTAS QUE LOS ORIGINAN

Lucía E. Arena

Laboratorio de Física de la Atmósfera Laura Levi-Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FAMAF)-Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Córdoba, Argentina.

Dirección de Divulgación y Enseñanza de la Ciencia. Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba (MINCYT)

lucia.arena@unc.edu.ar

Resumen

La zona montañosa al oeste de la ciudad de Córdoba- Argentina se caracteriza por el desarrollo de tormentas severas, con una precipitación significativa de granizo gigante de 7 a 10 cm y con un registro récord de 17.5 cm en la ciudad de Carlos Paz en 2018. En este trabajo, se presenta una recopilación de los primeros estudios realizados para identificar y describir las celdas convectivas en las que se generan los granizos gigantes, caracterizar los granizos recolectados y correlacionar la geolocalización temporal de las granizadas con datos de sensores remotos. En una primer parte, se estudian las características de las tormentas que dan origen a los granizos recogidos e informados en Alta Gracia (1988) y en Villa Carlos Paz, y pueblos cercanos (Febrero de 2018) y Villa del Dique (Diciembre de 2018). En el caso de 1988, se utiliza información meteorológica tradicional y para las tormentas de 2018 datos del radar RMA1 y el satélite GOES 16. Según los análisis realizados para todas estas tormentas, hay pruebas sólidas de que las Sierras de Córdoba desempeñan un papel importante en la formación del sistema convectivo. En la segunda parte se describen preliminarmente los granizos recolectados. Para ello, se hacen cortes de las piedras en cámara fría y se estudian secciones delgadas con microscopía visible de transmisión. Los granizos gigantes de las tormentas estudiadas guardan grandes similitudes en el tipo de embrión (cónico y esférico), la estructura esponjosa, así como la distribución de los anillos de burbujas. Estas similitudes entre granizos recolectados en la zona con un lapso temporal de 30 años son un posible indicador de que los factores orográficos priman sobre los climáticos para la formación de estas tormentas graniceras. Finalmente, para la tormenta de febrero de 2018 se correlacionan los resultados del seguimiento del núcleo de temperatura de brillo para 250K, a través del procesamiento de imágenes de satélite del GOES 16, con las granizadas registradas. Con este método se reconstruye la trayectoria de la precipitación de granizos recolectados. Además, es posible predecir e identificar las localidades y el horario en que debería haber granizado. En función de los datos de las redes sociales, se encontraron resultados positivos para cuatro localidades en la tormenta de Febrero 2018. Por último es necesario destacar que estos estudios científicos pueden realizarse gracias a la colaboración de la ciudadanía, por lo que se describen las acciones de ciencia ciudadana implementadas en el marco del programa “Cosecheros de granizos Córdoba” con el fin de recopilar información sobre las granizadas y recolectar granizos en la Provincia de Córdoba

Palabras claves: granizo, tormenta severa, burbujas, ondas de montaña, temperatura de brillo, ciencia ciudadana

Abstract

The mountainous area to the west of the city of Córdoba- Argentina is characterized by the development of severe storms, with a significant rainfall of giant hail from 7 to 10 cm and with a record of 17.5 cm in the city of Carlos Paz in 2018. In the present work, the characteristics of hailstorms collected and reported from Alta Gracia in 1988 and Villa Carlos Paz and nearby towns in 2018 are studied. In this work, we present a compilation of the first studies carried out to identify and describe the convective cells in which giant hailstones are generated, characterize the collected hail and correlate the temporal geolocation of the fallen hail with remote sensor data. In the first part, the characteristics of the storms that give rise to the hail collected and reported in Alta Gracia (1988) and in Villa Carlos Paz, and nearby towns (February 2018) and Villa del Dique (December 2018) are studied. In the case of 1988, traditional meteorological information is used and for the 2018 storms data from the RMA1 radar and the GOES 16 satellite. According to the analyzes performed for all these storms, there is solid evidence that the Sierras de Córdoba play an important role in convective system formation. In the second part the collected hail are described preliminary. For this, cuts of the stones are made in cold chamber and thin sections are studied with visible transmission microscopy. The giant hailstones of the storms studied bear great similarities in the type of embryo (conical and spherical), the spongy structure, as well as the distribution of the bubble rings. These similarities between hails collected in the area with a time span of 30 years are a possible indicator that orographic factors prevail over climatic conditions for the formation of these hail storms. Last, for the storm of February 2018, the results of the monitoring of the brightness temperature core for 250K, obtained through the processing of satellite images of GOES 16, are correlated with the recorded fallen hails. With this method the surface trajectory of collected hail is reconstructed. In addition, it is possible to predict and identify the localities and the time when hail should have fallen. Based on social network data, we found positive results for four locations in the February 2018 storm. Finally, it is necessary to highlight that these scientific studies can be carried out thanks to the collaboration of the citizens, so the actions of citizen science implemented in the framework of the “Cordoba Hail Harvesters” program are described in order to gather information about the hailstorms and to collect hail in the Province of Córdoba.

Keywords: hailstone, severe storm, bubbles, Wave Mountain, bright temperature, citizen science

1- Introducción

La provincia de Córdoba- Argentina está en una región en la que se producen tormentas severas de relevancia a nivel planetario. Estas tormentas se caracterizan por un gran desarrollo vertical (los cúmulos pueden traspasar la tropopausa, pueden alcanzar 18 km de altura), importante cantidad de agua caída, lluvias torrenciales que generan inundaciones repentinas, fuertes vientos destructivos acompañados de tornados, descargas eléctricas intensas y granizos de gran tamaño. Estos son algunos de los fenómenos meteorológicos de la zona del sudeste sudamericano (SESA), en la que está enclavada la provincia de Córdoba, y que está identificada como una de las regiones con las tormentas más severas del planeta. Se han desarrollado históricamente estudios de investigación en razón de las tormentas de esta zona que son llevados a cabo por UNC¹ en conjunto con otras instituciones y que requieren el desarrollo de campañas especiales de recolección de datos como la de investigación trinacional RELAMPAGO-CACTI² y las campañas de ciencia ciudadana de la provincia de Córdoba^{3,4}, entre las que se destaca “Cosecheros de granizo Córdoba” impulsada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. Estas campañas de ciencia ciudadana tienen la finalidad de involucrar a los habitantes del país en las actividades científicas con el fin de contribuir o colaborar en la tarea de investigación, por ejemplo con datos en lugares y horarios en los que los científicos no pueden estar.

De los fenómenos meteorológicos que son característicos de las tormentas severas, en este artículo se estudian los granizos que, en el caso de los eventos seleccionados, resultan gigantes. Alcanzan tamaños de más de 7 cm de diámetro mayor y hasta 17 cm. Este último, caído en la ciudad de Villa Carlos Paz el 8 de febrero de 2018, resulta un récord en tamaño de Sudamérica.

Se presentan tres tormentas graniceras producidas en localidades de las Sierras de Córdoba en los años 1988 y 2018. Sobre las granizadas, se cuenta con información verbal, en el primer caso de 1988 (Levi et al. 1989 y Levi et al. 1991), y verbal e infográfica (por redes sociales y entrevistas³) en 2018. Para la caracterización de las tormentas que dan origen a los granizos recolectados, se cuenta con datos meteorológicos de 1988 y de radar y satélite en 2018. Se han recolectado granizos, correspondientes a cada tormenta, que han sido provistos por los vecinos. Los granizos son estudiados en las cámaras de baja temperatura del laboratorio de Física de la Atmósfera Laura Levi de la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FAMAF) de la Universidad Nacional de Córdoba.

El presente trabajo, es una recopilación de los primeros estudios realizados para identificar y describir las celdas convectivas en las que se generan los granizos gigantes, caracterizar los granizos recolectados y correlacionar la geolocalización temporal de las granizadas con datos de sensores remotos. En una primer parte, se estudian las características de las tormentas que dan origen a los granizos recogidos e informados en Alta Gracia (1988) y en Villa Carlos Paz, y pueblos cercanos (Febrero de 2018) y Villa del Dique (Diciembre de 2018). En el caso de 1988,

¹ Grupo de Física de la Atmósfera Laura Levi de la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación y la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, el Instituto Hidrológico.

² RELAMPAGO- CACTI <https://sites.google.com/illinois.edu/relampago/home>

³ Cosecheros de granizo Córdoba <https://mincyt.cba.gov.ar/portfolio-items/cosecheros-de-granizo/>
<https://www.cientopolis.org/wp-content/uploads/2019/07/TALLER-PCC-EN-ACCI%C3%93N.pdf>

⁴ MATTEO y Cazadores de crecidas <https://www.cientopolis.org/wp-content/uploads/2019/07/Garcia-Charla-Ciencia-Ciudadana-Cordoba-2019.pdf>

se utiliza información meteorológica tradicional y para las tormentas de 2018 datos del radar RMA1 y el satélite GOES 16. Según los análisis realizados para todas estas tormentas, hay pruebas sólidas de que las Sierras de Córdoba desempeñan un papel importante en la formación del sistema convectivo. En la segunda parte se describen preliminarmente los granizos recolectados. Para ello, se hacen cortes de las piedras en cámara fría y se estudian secciones delgadas con microscopía visible de transmisión. Los granizos gigantes de las tormentas estudiadas guardan grandes similitudes en el tipo de embrión (cónico y esférico), la estructura esponjosa, así como la distribución de los anillos de burbujas. Estas similitudes entre granizos recolectados en la zona con un lapso temporal de 30 años son un posible indicador de que los factores orográficos priman sobre los climáticos para la formación de estas tormentas graniceras. Por último, para la tormenta de febrero de 2018 se correlacionan los resultados del seguimiento del núcleo de temperatura de brillo para 250K, a través del procesamiento de imágenes de satélite del GOES 16, con las granizadas registradas. Con este método se reconstruye la trayectoria de la precipitación de granizos recolectados. Además, es posible predecir e identificar las localidades y el horario en que debería haber granizado. En función de los datos de las redes sociales, se encontraron resultados positivos para cuatro localidades en la tormenta de Febrero 2018. Finalmente, es necesario destacar que estos estudios científicos pueden realizarse gracias a la colaboración de la ciudadanía, por lo que se describen las acciones de ciencia ciudadana implementadas en el marco del programa “Cosecheros de granizos Córdoba” con el fin de recopilar información sobre las granizadas y recolectar granizos en la Provincia de Córdoba

La región de estudio

La zona serrana al oeste de la ciudad de Córdoba se caracteriza por el desarrollo de tormentas severas, con precipitación importante de granizos gigantes de 7 a 10 cm y con un récord de 17,5 cm recolectado en la ciudad de Carlos Paz en 2018. En particular, la región de Córdoba que rodea la latitud de los 31,6°S y está al este de las sierras de Pocho (ver figura 1) es una zona de tormentas severas altamente graniceras (Rasmussen y Houze, 2016, Rasmussen et al. 2014, Altinger y Rosso 1982).

Si bien es posible determinar las posibles zonas de caída de granizo a partir de los datos remotos, sólo la constatación en tierra de una granizada es válida para cotejar los datos de horario y geolocalización con los de radar y satélite. Para el presente trabajo se cuenta con datos de una tormenta de Alta Gracia, productora de granizos gigantes, estudiada por el equipo de Laura Levi en los años 90 (Levi et al 1989 y 1991) En 2018 se recolectaron granizos y se geolocalizaron temporalmente las granizadas en el marco del programa Cosecheros de Granizo Córdoba³ y se cuenta con información del radar RMA1 y del satélite GOES 16, además de datos de las granizadas obtenidos a partir de las redes sociales.

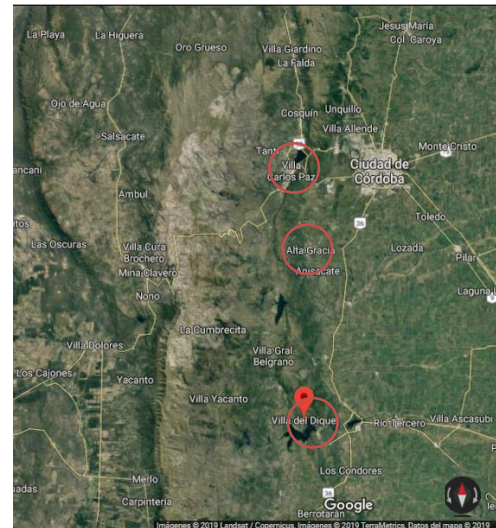
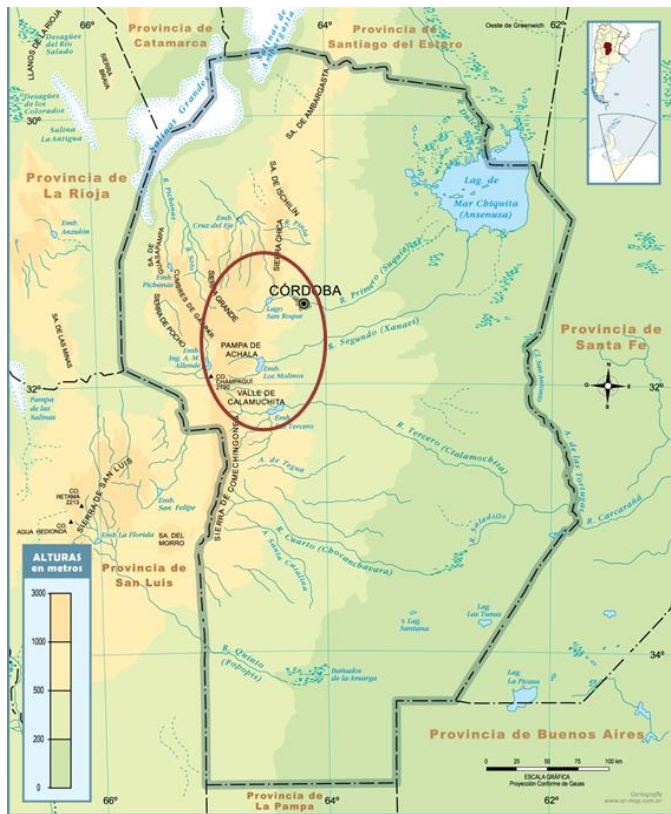


Figura 1. Izquierda: Zona de tormentas severas graniceras estudiadas de la provincia de Córdoba. Derecha: Localidades donde se recogieron granizos en Alta Gracia (1988) y Villa Carlos Paz (febrero 2018) y Villa del Dique (diciembre 2018)

EL POSIBLE ROL DE LA OROGRAFÍA

La provincia de Córdoba está enclavada en la zona de corriente de chorro de capas bajas de Sudamérica, región SESA, donde se producen tormentas severas (Vidal, 2014). Es un área de vientos localmente muy intensos que se desarrollan hasta aproximadamente los 2000m de altura y que son los responsables de transportar aire cálido rico en humedad. La orografía de la región (Repinaldo et al. 2017, Teitelbaum y D'Andrea, 2015) es otro factor importante que favorece la formación de estas tormentas. De acuerdo con Bueno Repinaldo et al. 2017 y Teitelbaum y D'Andrea, 2015 hay fuertes evidencias de que la orografía de la región cumple un rol importante en la formación de los granizos de gran tamaño. En 1989, el equipo de Levi considera que la tormenta granicera de Alta Gracia es un sistema convectivo lineal, se desplaza desde el sudoeste de la provincia hacia el norte, y que “el movimiento ascendente atmosférico probablemente fue mejorado por la convergencia forzada en las laderas de la montaña, situación favorable para generar nubes convectivas profundas”

¿QUÉ ESTUDIAMOS?

En este trabajo

- a- se caracterizan dos tormentas severas de la provincia de Córdoba que producen granizos gigantes en 2018, con los aportes de imágenes de radar y satélite, y se comparan con una tormenta granizos gigantes de 1988
- b- se realiza una primer descripción los granizos recolectados en las tres tormentas utilizando microscopía óptica por transmisión y métodos de replicado plástico y de láminas delgadas
- c- se presenta una correlación entre la granizada y los datos de temperatura de brillo obtenidos mediante el tratamiento de imágenes del GOES 16
- d- se describen los programas de ciencia ciudadana

Parte 1: Caracterización de las tormentas y la importancia de registrar temporoespacialmente las granizadas

L. Arena y A. Crespo

Introducción

Como se dijo más arriba, la provincia de Córdoba- Argentina está enclavada en la zona de corriente de chorro de capas bajas de Sudamérica, región SESA, donde se producen tormentas severas (Vidal, 2014). Es un área de vientos localmente muy intensos que se desarrollan hasta aproximadamente los 2000m de altura y que son los responsables de transportar aire cálido rico en humedad. La orografía de la región, según Levi et al 1989, Repinaldo et al. 2017 y Teitelbaum y D'Andrea, 2015, es otro factor importante que favorece la formación de estas tormentas. Los últimos autores en particular, consideran que las ondas de montaña o de gravedad pueden explicar la formación de este tipo celdas convectivas.

Dos tormentas severas de 2018 de la Provincia de Córdoba, de granizos gigantes, son caracterizadas mediante datos de radar y satélite con el fin de correlacionar la información de estos grandes instrumentos con los registros de granizadas e identificar la génesis del proceso convectivo. Finalmente, los resultados de estos estudios son comparados con los obtenidos por el equipo de Laura Levi en 1989 sobre la tormenta granicera del x de xx de 1988 de la ciudad de Alta Gracia, Córdoba.

La tormenta granicera del 8 de febrero de 2018, afectó una zona importante del territorio suroeste-centro de la provincia de Córdoba. Durante la misma se recolectaron y registraron granizos gigantes en la zona cercana a Villa Carlos Paz (VCP) y localidades cercanas. En el evento del 13 de Diciembre del mismo año se registraron granizos en Villa del Dique, en Embalse de Río Tercero, y granicitos (graupels) en la ciudad de Córdoba.

Identificación de las celdas graniceras

Las imágenes de satélite se procesan a partir de los datos de nivel 2 del Satélite GOES 16 que se elaboran en PYTHON 3.7.3 y se re-proyectan geográficamente con BASEMAP 3.1. Las imágenes de radar corresponden al RMA1 de la ciudad de Córdoba, obtenidas a partir de la página WEB del Grupo Radar Córdoba.

A continuación se describen los resultados obtenidos para cada tormenta de 2018.

Tormenta de Febrero de 2018

A partir de las imágenes de satélite es posible visualizar la evolución temporal general de las tormentas que se desarrollan ese día en el territorio de la provincia de Córdoba, tal como lo muestra la figura 1. Las imágenes corresponden a un momento anterior y a otro durante la granizada según los registros de la tabla 1, en la que se indican las localidades cercanas a la Ciudad Villa Carlos Paz.

De acuerdo con el trabajo de Crespo y Arena de 2019, en la figura 2 (canal Infrarrojo lejano 11) se observa una celda importante que se desplaza desde el sur de Córdoba hacia el este y el norte tal como ocurre las típicas tormentas severas de la región descritas por Mulholland et al., 2018. Así mismo, a las 17 UTC se evidencia el comienzo de la formación de una nueva celda norte que avanza hacia el este a través de las Sierras de Córdoba. Esta celda evoluciona, independientemente de la anterior, sobre la región en la que se recolectaron y registraron granizos de gran tamaño (ver el desplazamiento del punto de mínima temperatura, 210K). No se tiene información de que la celda sur haya granizado. El punto azul en la figura representa la ciudad de Villa Carlos

Paz y puede observarse rodeada por la celda norte que se originó, independientemente de la sur, en la zona de las Altas Cumbres, en el horario de registro de granizos.

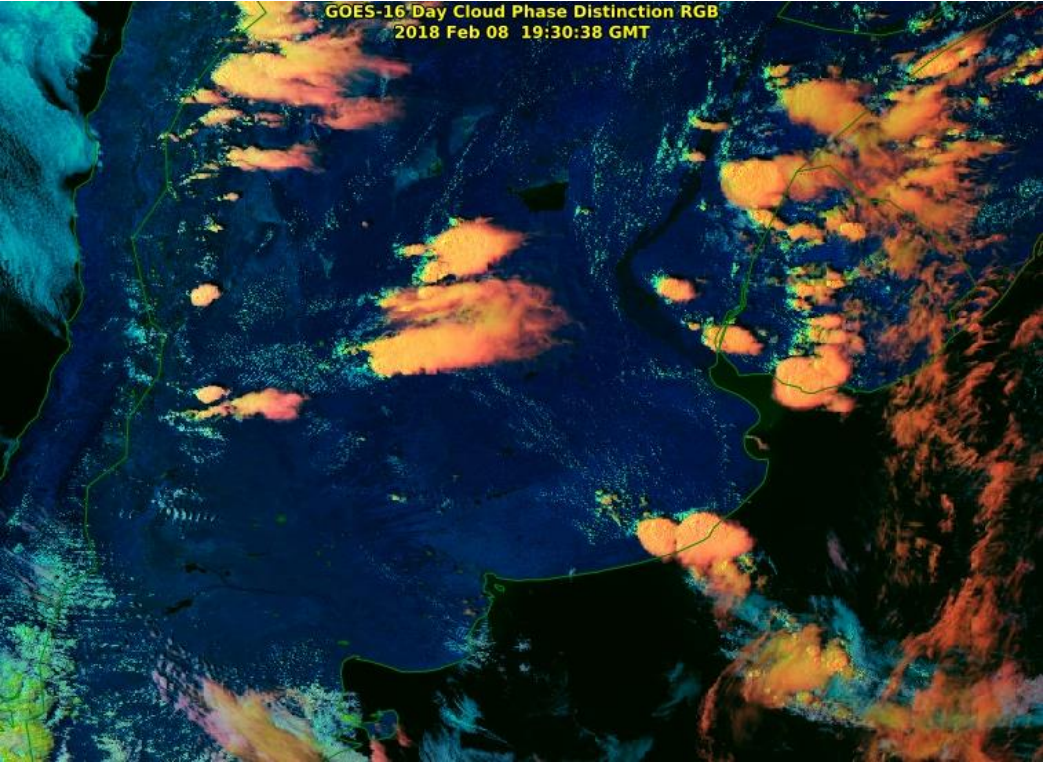
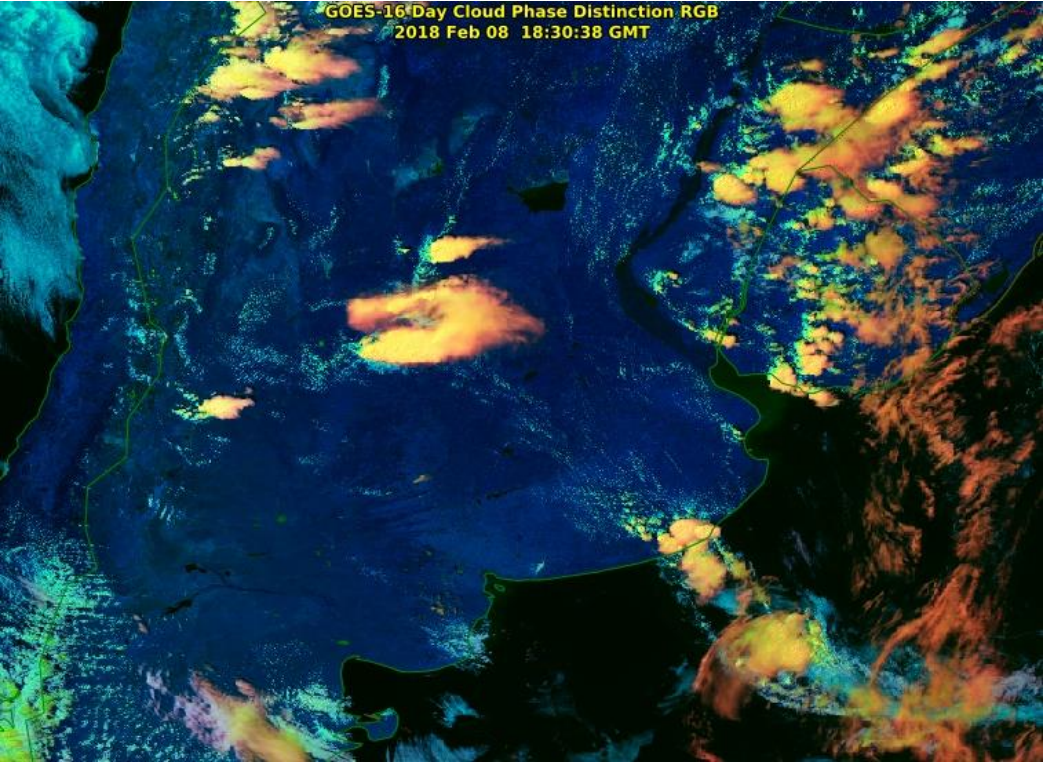


Figura 1, Imágenes del satélite GOES 16 en la que pueden observarse dos formaciones para la tormenta del 8 de febrero de 2018. Tal como se especifica en la tabla 1, las imágenes son a momentos antes y durante las granizadas registradas.

Tabla 1. Granizadas registradas, en la que se indican las horas locales y universales de caída del granizo y si se recolectaron muestras para el estudio en laboratorio. (VCP: Villa Carlos Paz)

Localización	Hora (local)	Hora (UTC)	Granizo recolectado
<i>Icho Cruz</i>	15:50	18:50	No
<i>Calle San Lorenzo, VCP</i>	16:20	19:20	Si
<i>Calle Tupungato, VCP</i>	16:20	19:20	Si
<i>Calle Tokio, VCP</i>	16:30	19:30	Si
<i>San Nicolás</i>	19:45	19:45	No

A partir de las imágenes del canal 5 (figura 3) es posible encontrar un resultado similar al anterior. Las manchas negras en la figura 3 representan la presencia de hielo en la región y el horario en que se registraron y recolectaron granizos con una amplificación de la imagen al máximo de resolución límite (. En estas figuras se presentan los eventos de granizo que se correlacionaron con publicaciones en redes sociales y artículos de periódicos locales y de un canal de TV (doce).. Las imágenes de las 18:45 UTC muestran que la "zona de hielo" representada por puntos negros al sur de Icho Cruz fue el primer evento de granizo reportado a las 18:50 UTC. La segunda imagen es a las 19:00 UTC muestra que la zona de hielo aumentó su distribución especial, que tiene una forma de "boomerang", con una mancha negra de 10 a 15 km al sur de Icho Cruz. La siguiente imagen es de las 19:15 UTC, que es 5 minutos antes de los eventos de granizo reportados en San Lorenzo y Tupungato. La zona de hielo se expandió significativamente en línea recta al sur de San Nicolás, y también surgen nuevos puntos hacia el este. Finalmente, la imagen de las 19:30 UTC muestra cómo la zona de hielo tiene un dominio más circular, moviéndose hacia el noreste, a 20 km de Córdoba.

La figura 4 muestra las imágenes de COLMAX del radar RMA1, para la celda norte del sistema de estudio. En estas imágenes se puede observar el avance en dirección noreste de la celda sobre las poblaciones en las que se registró la caída de granizo, con el máximo de intensidad indicador de posibles granizos (dado por los colores rojo y fucsia) cercano a la zona de granizada. En la tercera parte de este trabajo se estudia la relación entre las granizadas y estas imágenes.

En la figura 5 se comparan los datos del radar RMA1 (COLMAX) con los de las temperatura de brillo del canal 11 del GOES 16 para temperaturas de acuerdo con el método que se explica en la tercer parte de la presente recopilación. A partir de estas imágenes es posible identificar la celda que da origen a los granizos como independiente de la formación del sur. Además, el origen de esta celda que resulta en la zona de la de las Altas Cumbres, tal como se describirá en el próximo apartado

Observaciones

En función de los estudios realizados y considerando los granizos recolectados en tierra es claro que la celda norte resulta ser la productora de los granizos. Esto ocurre antes de ser realimentada por la celda sur, por lo que se considera que ya es posible razonar que la orografía cumple un rol fundamental en la generación del sistema convectivo granicero norte.

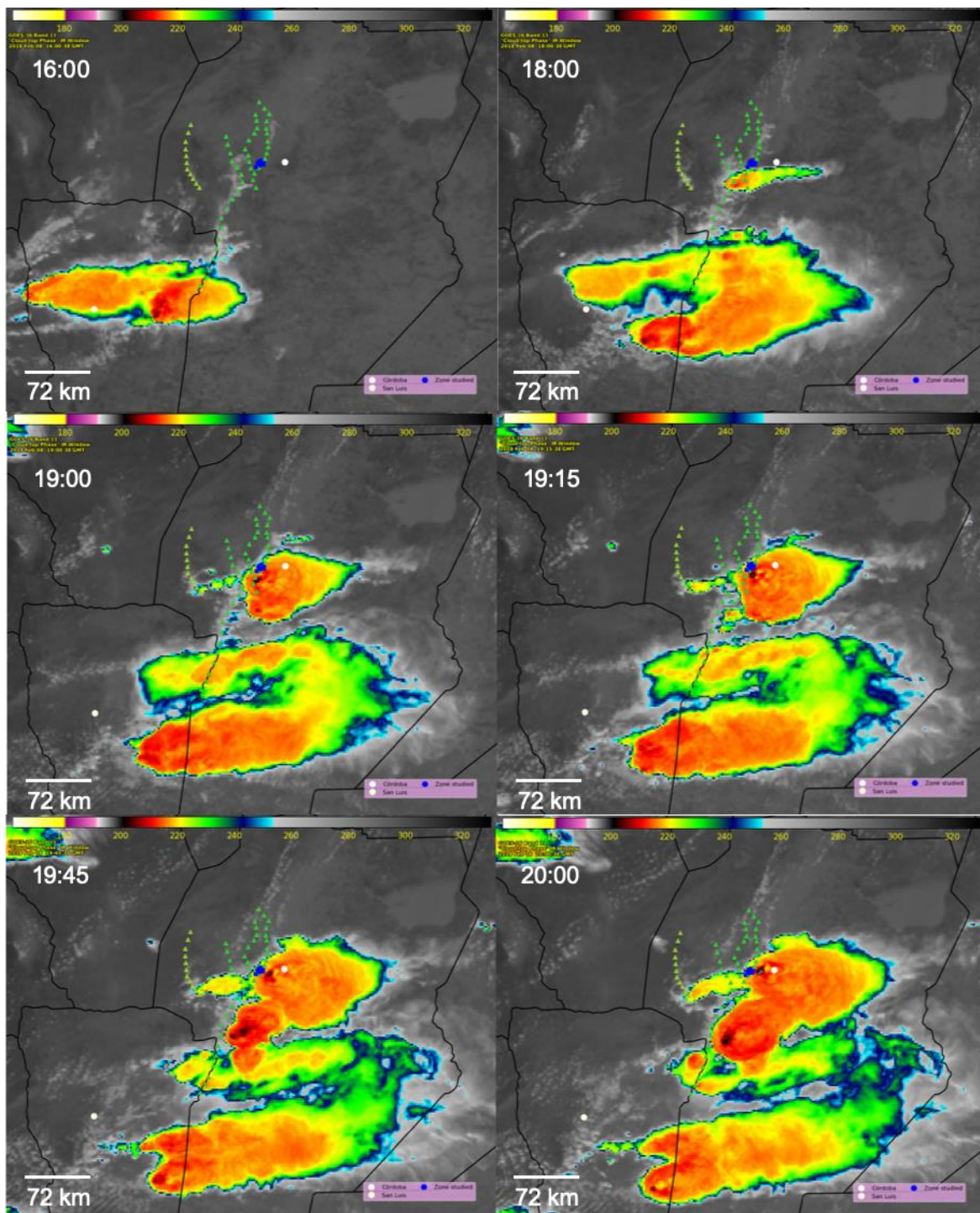


Figura 2: Evolución del sistema de celdas de la tormenta de 8 de Febrero de 2018. Los puntos blancos corresponden a las ciudades de Córdoba y San Luis y el azul a la ciudad de Villa Carlos Paz

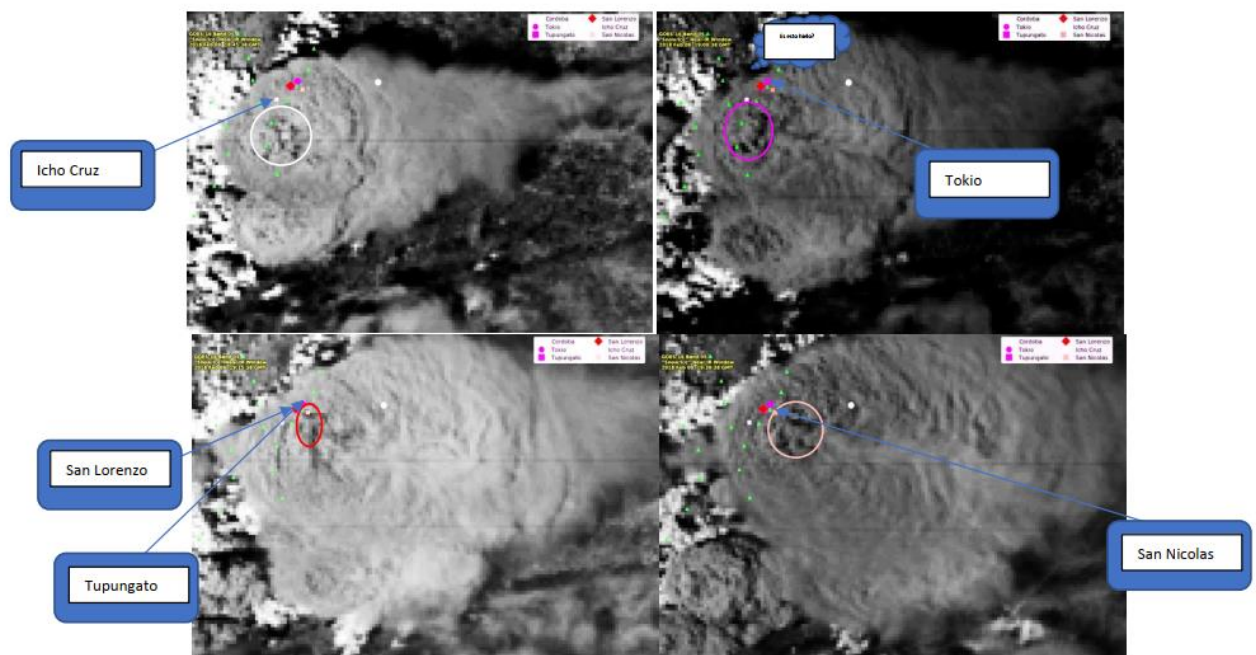


Figura 3 Imágenes del canal 5, IR cercano, que corresponden a los horarios en que se registra caída de granizo.

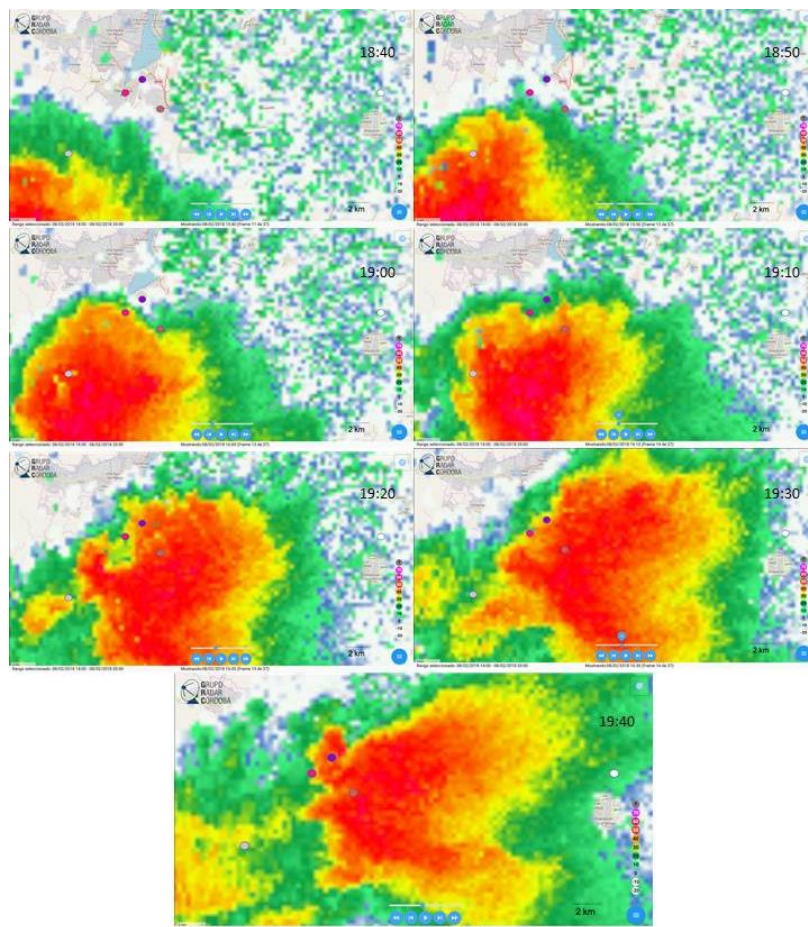


Figura 4 Evolución temporal de las las imágenes de COLMAX del radar RMA1, para la celda norte del sistema de estudio. Las localidades en las que se recolectó granizo están identificadas con puntos de colores.

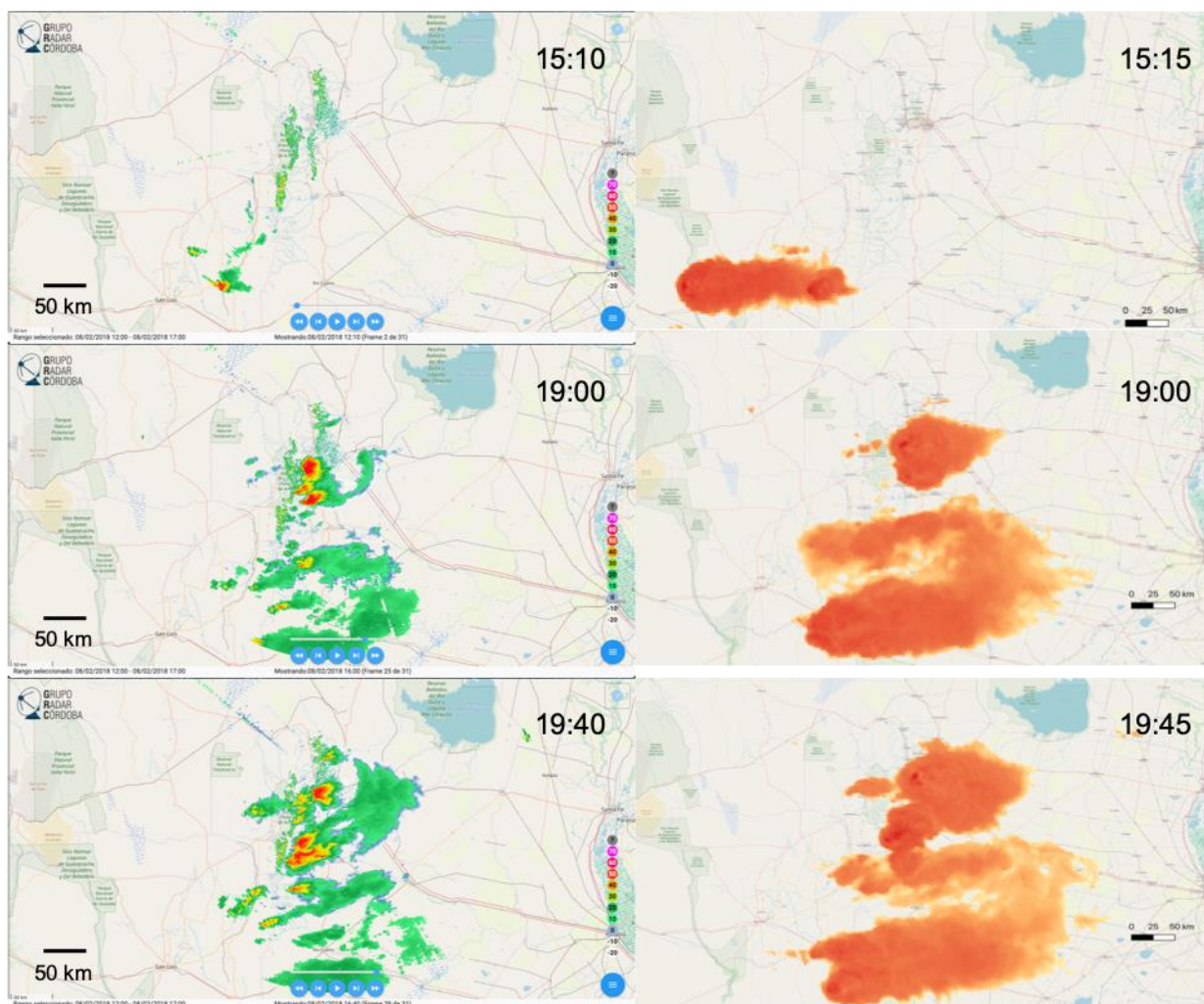


Figura 5 se comparan los datos del radar RMA1 (COLMAX) con los de las temperaturas de brillo del canal 11 del GOES 16 para la tormenta del 8 de febrero de 2018

Tormenta de Diciembre 2018

Para estudiar la tormenta de Diciembre se presenta la evolución temporal de la misma en forma comparativa en imágenes de radar y de satélite en la figura 6. Los granizos recolectados corresponden a las 2315 hora local del día 13 de Diciembre, es decir a 0215 del día 14 en Villa de Dique y Villa Rumipal, de Embalse Río Tercero y graupel en la ciudad de Córdoba aproximadamente a las 01:00 local, 4:00 UTC aproximadas. Notar que la tormenta se desarrolla en la noche, por lo que algunos canales del satélite no son visibles.

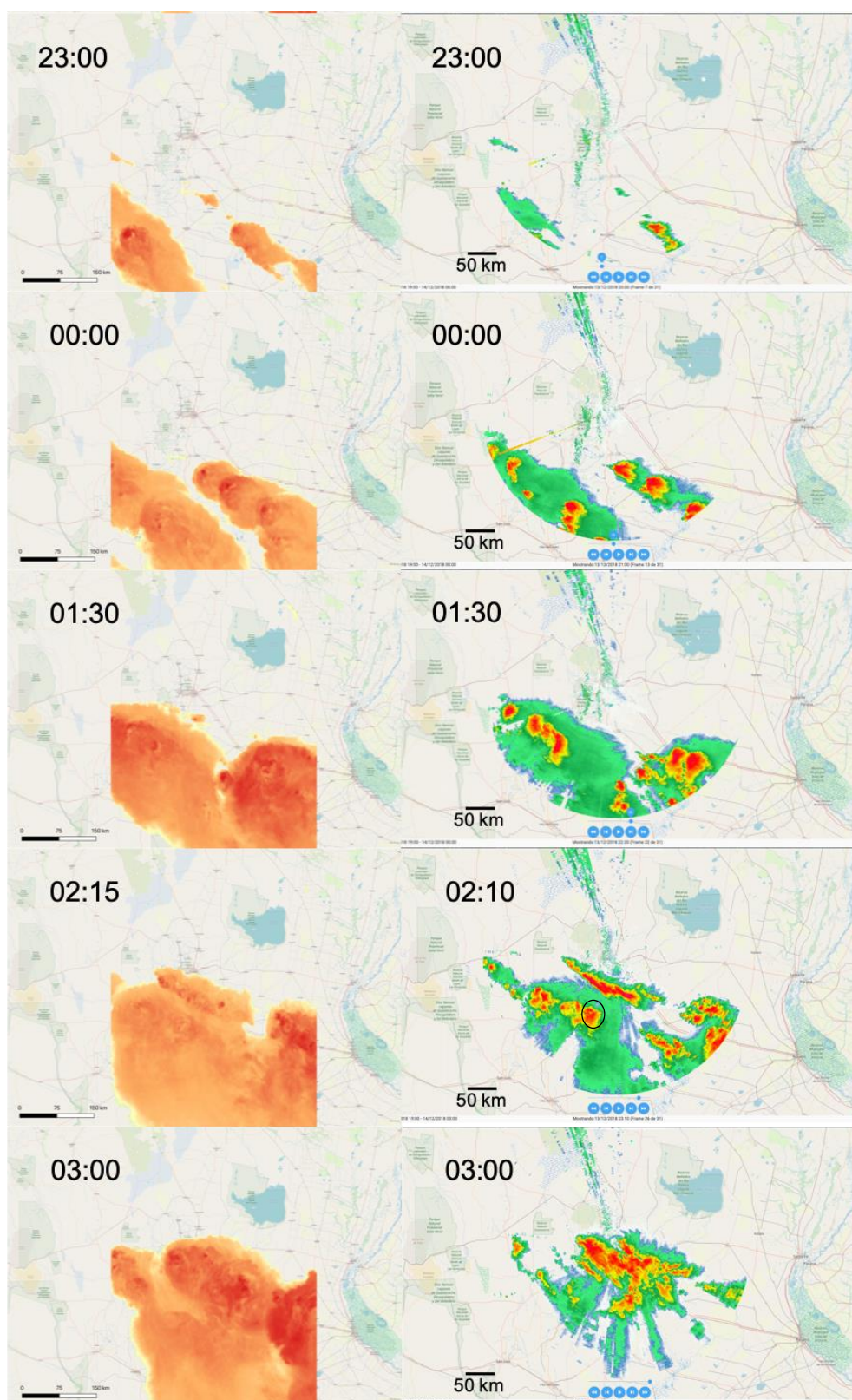


Figura 6. Para la tormenta del 13 de Diciembre se presenta la evolución temporal de las imágenes de radar COLMAX del RMA1 y del canal 11 del satélite GOES 16. El círculo indica la región de las granizadas registradas.

En las primeras etapas, de la figura 6 se observa, en particular a las 01:30 UTC, tal como en el caso de la tormenta de Febrero, también una pequeñísima celda norte que se forma sobre las sierras, además de las dos notables formaciones del sur. La del suroeste es la que graniza (ver círculo) antes de unirse a la este y dirigirse al norte (figura 2 derecha). En las imágenes de la figura 6, es posible visualizar la extensión de cada tormenta y la cantidad de celdas. Por último, en ambos casos, la granizadas destacadas se producen al pie de monte y al este.

Es importante notar cómo las formaciones de múltiples celdas del sudoeste, desde las sierras de Comechingones, avanza rápidamente al noreste mientras las celdas del sudeste permanecen estacionarias. En el momento en que se registran las granizadas, las formaciones se recombinan y se observa un claro frente de avance en la dirección noreste. Las celdas del este se forman sobre la zona llana Pampeana, con mucha humedad, pero requieren de mayor tiempo para formarse, Vidal (2014), que las que se originan en la zona montañosa. Esto puede explicar que estas tormentas se hayan desarrollado en la noche. Por otro lado, si bien se observan múltiples celdas, no se tiene información de otras granizadas que las de la zona de Embalse de Río Tercero que está asociada geográficamente al pie de monte este.

Observaciones

Las celdas del sudoeste de esta tormenta se comportan igual que la formación sur de la de Febrero. La formación del este permanece cuasi-estática gran parte de la evolución hasta el registro de las granizadas.

Como en el caso anterior, se evidencia la importancia orográfica en la formación de los granizos gigantes. Estos caen en la zona de pie de monte al este, ya que las celdas se desplazan de este a oeste.

Lo notable de las formaciones de esta tormenta es la magnitud de la superficie y la intensidad en cuanto a la cantidad de centros de baja temperatura. Sin embargo, no se registra información de granizos gigantes caídos salvo en la región indicada. Debe contemplarse que la tormenta se desarrolló durante la noche, por lo que quizás no haya demasiado registro.

Evidencias de ondas de montaña

A través de la variable COLMAX TH (máxima reflectividad por columna) del RMA1 es posible visualizar, en la zona comprendida entre las sierras de Pocho y la ciudad de Córdoba de la figura 9, dos franjas permanentes de llovizna. En ambas tormentas de 2018, estas franjas se mantienen estables, y paralelas a las sierras. Notar que estas pulsaciones se forman sobre la reserva de la Pampa de Achala que está a 2000 m de altura (ver figuras 10 y 11). Además, tal como demuestra Crespo et al (2019) aparecen celdas pulsadas desde el oeste que son directamente identificables como ondas de montaña, tal como lo muestra la estimación de la frecuencia de Brunt Vaisala calculada en dicho trabajo.

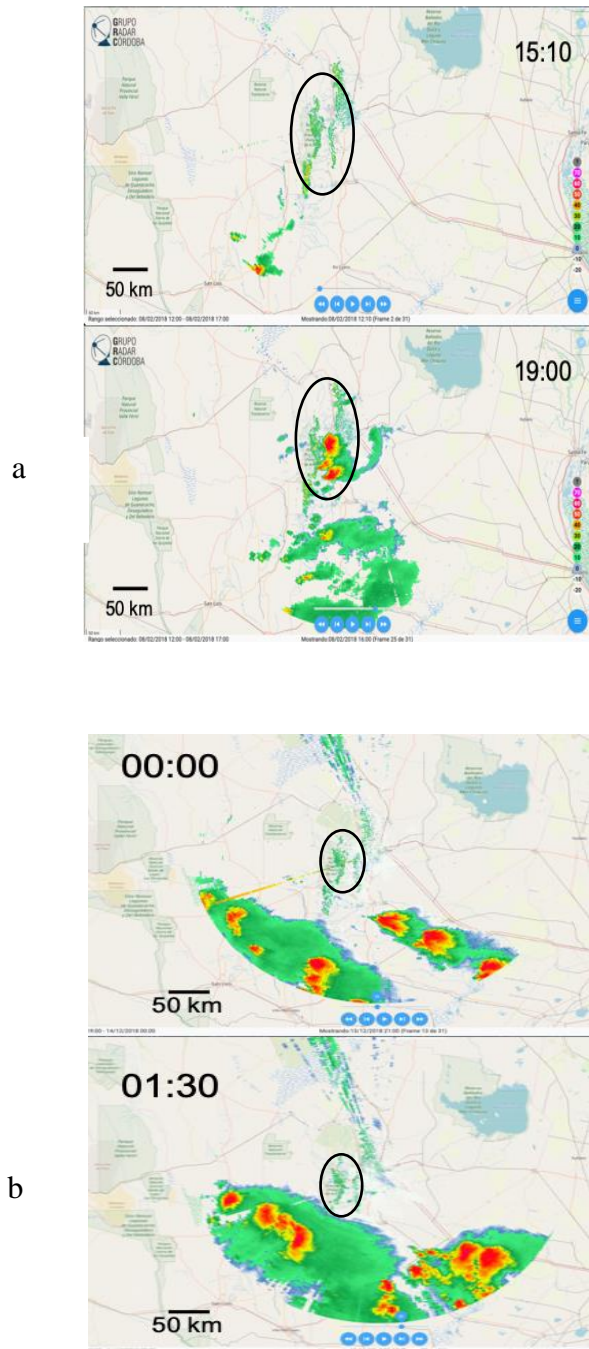


Figura 9. Imágenes de radar COLMAX en las que se observan formaciones nubosas sobre las Sierras de Córdoba, (a) Tormenta de Febrero, (b) tormenta de Diciembre

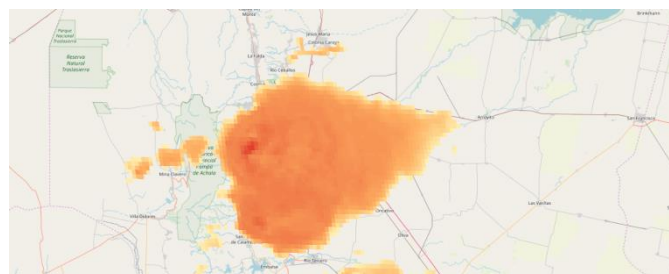


Figura 10. Formaciones de nubes pulsadas que avanzan desde el oeste alimentando la celda norte de la

tormenta del 8 de Febrero.

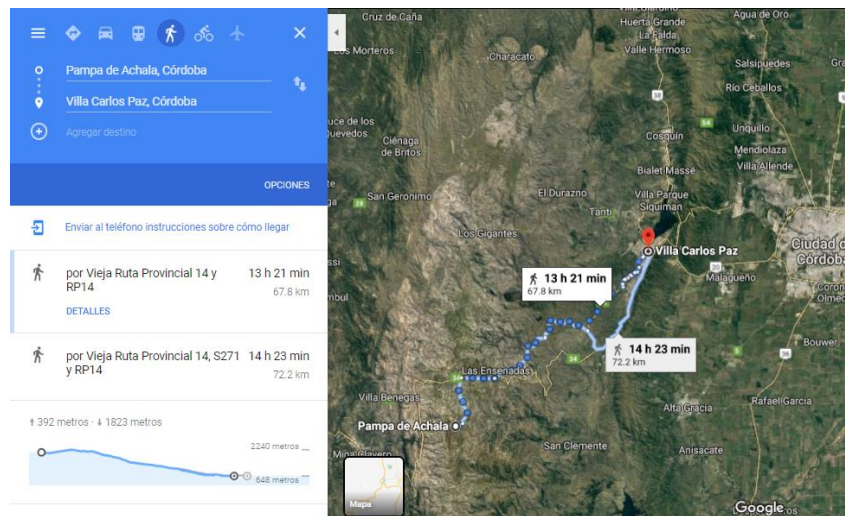


Figura 11. Recorrido entre la Pampa de Achala y Villa Carlos Paz con evidencia del desnivel del terreno (extraído de <https://www.google.com/maps>)

Discusión y conclusiones

Las celdas graniceras en las tormentas estudiadas de 2018, se desplazan desde el oeste y los granizos gigantes caen en los valles al pie este del monte. Para identificar las celdas fue imprescindible contar con los datos de la geolocalización temporal de las granizadas.

Las dos tormentas estudiadas son muy diferentes, por otro lado características, en cuanto a dimensiones tridimensionales, la de diciembre supera en más del doble a la de Febrero (ver parte 3 de esta recopilación). Para poder estudiar en detalle este aspecto, es necesario analizar las variables meteorológicas de cada tormenta. Mediante estudios de este tipo Laura Levi et al (1989 y 1991) determinan la importancia de la orografía en la tormenta de granizos gigantes de Alta Gracia de 1988 (ver más detalles en la parte 2 de esta recopilación) Levi considera que la tormenta granicera de Alta Gracia es un sistema convectivo lineal, que se desplaza desde el sudoeste de la provincia hacia el norte, y que “el movimiento ascendente atmosférico probablemente fue mejorado por la convergencia forzada en las laderas de la montaña, situación favorable para generar nubes convectivas profundas” Finalmente, De acuerdo con Bueno Repinaldo et al. 2017 y Teitelbaum y D’Andrea, 2015 hay fuertes evidencias de que la orografía de la región cumple un rol importante en la formación de los granizos de gran tamaño.

En ambas tormentas de 2018 estudiadas hay evidencia de llovizna pulsada en líneas paralelas a las Sierras de Córdoba, entre la Pampa de Achala y la ciudad de Córdoba. Según los cálculos realizados por Crespo et al (2019), es posible identificar ondas de montaña en la génesis de la celda granicera norte de la tormenta de febrero de 2018. Por ello, las ondas de gravedad o de montaña son un mecanismo que contribuye a la formación de la celda convectiva generadora de granizos, en total consistencia con los estudios y modelos propuestos por Repinaldo et al 2015.

Referencias

- Bueno Repinaldo, H. F., M. Nicolini, and Y. Skabar Gracia, 2017: Inclinación de un sistema convectivo sobre las Sierras de Córdoba y sensibilidad a modificaciones en el perfil orográfico. *Meteorologica*, **42**, 23–42. Repinaldo et al. 2017
- Crespo y Arena (2019) Tormenta granicera en la provincia de Córdoba I: imágenes de Satélite. EIDIPA, Córdoba-Argentina. 2019
- Crespo, Comes y Arena (2019) Tormenta granicera en la provincia de Córdoba II: imágenes de radar. EIDIPA, Córdoba-Argentina. 2019
- Dennis, E. J., and M. R. Kumjian, 2017: The impact of vertical wind shear on hail growth in simulated supercells. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **74**, 641-663
- Levi, Lubart, Nasello, Arena (1989) Proceeding of Third Intern. Conf.on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, pp 343
- Levi, Arena, Nasello, Lubart, 1991 Condiciones iniciales de crecimiento de granizos gigantes. CONGREGMET VI. Anales del Centro Argentino de Meteorología. 23-27 set. 1991. Bs. As. Arg.
- Mulholland, J. P., S. W. Nesbit, R. J. Trapp, K. L. Rasmusen, and P. V. Salio, 2018: Convective Storm Life Cycle and Environments near the Sierras de Córdoba, Argentina. *Monthly Weather Review*, **146**, 2541–2557, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0081.1>.
- Teitelbaum, H., and F. D'Andrea, 2015: Deep convection east of the Andes Cordillera: four hailstorm cases. *Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, **67**.
- Tutte J., Carbone R y Arkin P (2008) Comparison of Ground-Baser Radar and Geosynchronous Satellite Climatologies of Warm-Season Precipitation over the United States. *JAMet and Clim V* **47**, *1*, 12, P. 3264-
- Vidal, L., 2014: Conveccion extrema sobre Sudamerica: estructura interna, ciclos de vida e influencia de la topografia en la iniciacion. Universidad de Buenos Aires, 275 pp.
- Agradecimientos** Al grupo radar Córdoba. Secretaría de Ciencia y Tecnología de UNC. Al Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba y a la FAMAFA-UNC por su aporte al programa Cosecheros de Granizos Córdoba <https://mincyt.cba.gov.ar/portfolio-items/cosecheros-de-granizo/>. Secretaria de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba

Parte 2: Descripción preliminar de los granizos recolectados

L. Arena

Introducción

Las piedras hidrometeoros de tormentas se consideran granicitos (graupels) cuando tienen dimensiones (diámetro medio) menor a 1cm. A partir de 1,5 cm se habla de granizos. Son grandes cuando tienen dimensiones de unos 4 cm y cuando superan los 7 cm se habla de granizos gigantes. En las tormentas de 2018 descritas en esta recopilación y la de 1988 estudiada por el equipo de Levi (Levi et al. 1989 y 1991). se encontraron granizos de dimensiones que llegan hasta los 17cm de longitud en la zona de los valles de las serranías de Córdoba- Argentina. En la figura 1, se muestran las poblaciones principales en las que se han recogido estos granizos de gran tamaño.

En las partes anteriores del presente trabajo se describieron las celdas de tormentas que produjeron granizos gigantes en la región cercana a Villa Carlos Paz el 8 de Febrero y a Villa del Dique en el Embalse de Río Tercero el 13 de Diciembre de 2018. Además, en 1988 se estudiaron granizos caídos en Alta Gracia, también de gran tamaño y que han sido descritos por Levi et al (1989 y 1991).

En esta parte de esta recopilación se presentan los estudios cristalográficos de los granizos, con el fin de recabar información para caracterizar la tormenta de origen. Además, se comparan las piedras de las tormentas producidas en la región, temporalmente separadas 30 años, con el fin de identificar posibles indicios de efectos del cambio climático.

Materiales y Métodos

En todos los casos, los granizos fueron recolectados en diferentes direcciones de las ciudades de Villa Carlos Paz, Villa del Dique y Alta Gracia conservados a temperatura de -15°C y procesados en cámara fría a una temperatura de -12°C . Se realizan cortes de secciones de las piedras y se estudia la estructura interna mediante observaciones a ojo desnudo y con microscopía de transmisión con luz natural y polarizada (Levi et al, 1991) Se estudiaron más de 50 granizos de 4 a 17 cm de longitud máxima.

Resultados

En la tabla 2 se presentan los resultados de los estudios granizos recolectados, en la que se indica la localización principal, la hora, el área de las formaciones de nubes, cantidad de granizos recolectados y estudiados en el laboratorio y sus aspectos externos (lóbulos, color) e internos (cantidad y tipo de burbujas) demás, se clasifica la densidad en función de la presencia a de burbujas gigantes o alta densidad de burbujas pequeñas ($\ll 1\text{mm}$) en esponjosos o sólidos.

Ejemplos de granizos recolectados pueden verse en la figura 12. En la figura 13, extraída de trabajos anteriores se muestran a modo de ejemplo granizos de Villa Carlos Paz 2018: Secciones delgadas de dos granizos I y II, de unos 4cm diámetro, vistas entre polarizadores cruzados (los colores representan cristales) y luz transmitida (en la que se ponen en evidencia los anillos debidos a pequeñas burbujas) El embrión del granizo I es más cónico que el II que resulta de tipo esférico. En general, el número medio de los anillos que se observan a simple vista es de 4 antes del crecimiento esponjoso



Figura 12: Granizos recolectados en Villa Carlos Paz en 2018. Los últimos dos de la derecha están biseccionados

Tabla 2: características de las granizadas y los granizos recolectados

SOBRE GRANIZOS RECOLECTADOS			
Tormenta	Febrero	Diciembre	Diciembre
Fecha	8022018	13122018	13122018
localización recolectados	granizos V. Carlos Paz	Villa del Dique	Córdoba
hora de caída (UTC)	19-19:20	2:15 (14 dic)	
área previa a la granizada [km2]	<<50000	>>100000	
cantidad de granizos	40	1	8 (graupel)
diámetro mínimo (cm)	2	8	0.8
diámetro máximo	17	8	1.3
forma geométrica prevalece	Esféricos	Esférico	Esférico
Presencia de lóbulos (rastros)	si	Si	No
burbujas micrométricas	si	Si	Si
burbujas gigante >2mm	si	Si	
densidad: esponjoso	si	Si	
densidad: sólido	pocos	No	



Más detalles de estos estudios pueden verse en el apéndice 2. Además, allí se encuentra una descripción comparativa de los granizos de la tormenta de 1988 en Alta Gracia y 2018 en Villa Carlos Paz

Discusión y conclusiones

En la figura 12, se muestran algunos granizos representativos de la granizada en los que se observan diferentes estructuras externas, formas cuasi esféricas, algunos estrellados y otros con una mitad con lóbulos mientras la otra es lisa. Internamente, los embriones (figura 13) resultan rodeados por una cantidad anillos similar, en general 4, hasta los 3 cm, indicando que, en esta etapa los granizos pueden haber realizado recorridos similares en la nube (Levi et al, 1989 y 1991) En ambos granizos, de la figura 13, es posible observar gran cantidad de burbujas de importante tamaño, de varios milímetros, que explica un crecimiento esponjoso de los mismos, característica típica de estos granizos gigantes (Dennis y Kumjiam, 2017)

Las granizadas y las piedras estudiadas de las tres tormentas guardan grandes similitudes, tanto en la distribución superficial de granizos caídos como en el aspecto propio de estos últimos. Efectivamente, ambos conjuntos de granizos, de 2018 y 1988, estudiados tienen los mismos tipos de embriones, la estructura esponjosa, la forma lobular y oblada. A pesar de ser tormentas que se han gestado separadas por un lapso de tiempo de 30 años, producen piedras similares; por lo tanto, podría hablarse de tormentas convectivas parecidas. Por esto puede inferirse que los factores orográficos priman sobre los climáticos para la formación de estas tormentas severas.

Bibliografía consultada

Altinger de Schwarzkopf, M. L., and L. C. Rosso (1982), Severe storms and tornadoes in Argentina, Preprints, 12th Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc.,

59–62.

Bueno Repinaldo, H. F., M. Nicolini, and Y. Skabar Gracia, 2017: Inclinación de un sistema convectivo sobre las Sierras de Córdoba y sensibilidad a modificaciones en el perfil orográfico. *Meteorológica*, 42, 23–42. Repinaldo et al. 2017

Crespo Ayala y Arena, 2019 TORMENTA GRANICERA EN LA PROVINCIA DE CÒRDOBA: IMÁGENES SATELITALES. EIDIPA, Córdoba Argentina (Aceptado para su publicación)

Crespo Ayala, Raúl Comes y Arena, 2019 TORMENTA GRANICERA EN LA PROVINCIA DE CÒRDOBA: II. IMÁGENES DE RADAR. EIDIPA, Córdoba Argentina (Aceptado para su publicación)

Dennis, E. J., and M. R. Kumjian, 2017: The impact of vertical wind shear on hail growth in simulated supercells. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 74, 641–663

Levi L., Lubart L., Nasello O., Arena L. (1989) Proceeding of Third Intern. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, pp 343

Levi, Arena, Nasello, Lubart, 1991 Condiciones iniciales de crecimiento de granizos gigantes. CONGREGMET VI. Anales del Centro Argentino de Meteorología. 23-27 set. 1991. Bs. As. Arg.

Mapas: provincia de Córdoba
https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKewjd3KSOoPPiAhWQJ7kGHffiDW0QjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fwww.mapade.org%2Fcordoba.html&psig=AOvVaw1uOhrbwc7_AOxtnuzjJfiO&ust=1560954826754597

Mulholland, J. P., S. W. Nesbit, R. J. Trapp, K. L. Rasmussen, and P. V. Salio, 2018: Convective Storm Life Cycle and Environments near the Sierras de Córdoba, Argentina. *Monthly Weather Review*, 146, 2541–2557, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0081.1>.

Rasmussen y Houze, 2016, Convective Initiation near the Andes in Subtropical South America. *American Meteorological Society*. V. 144, p. 2351

Rasmussen, K. L., M. D. Zuluaga, and R. A. Houze Jr., 2014: [Severe convection and lightning in subtropical South America](#). *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7359–7366, doi:10.1002/2014GL061767. [Featured cover](#). ("AGU Editors Research Spotlight" [What causes extreme hail, tornadoes, and floods in South America?](#), *EOS*, Vol. 96, 11 May 2015.)

Teitelbaum, H., and F. D'Andrea, 2015: Deep convection east of the Andes Cordillera: four hailstorm cases. *Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, 67.

Vidal, L., 2014: Conveccion extrema sobre Sudamerica: estructura interna, ciclos de vida e influencia de la topografia en la iniciacion. Universidad de Buenos Aires, 275 pp.

Agradecimientos A la Lic. Maite Grando y las becarias de extensión Lucía Martínez y Sofía Sandor por su colaboración en el procesamiento, en cámara fría, de los granizos. Al Sr. José Barcelona técnico del laboratorio de Física de la Atmósfera Laura Levi de la FAMAFA-UNC. A la SECYT por el aporte de fondos a

la investigación. Al Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba y a la FAMAF-UNC por su aporte al programa Cosecheros de Granizos Córdoba
<https://mincyt.cba.gov.ar/portfolio-items/cosecheros-de-granizo/>

TERCER PARTE: estimación del lugar y horario de granizada

Metodología para el trazado de las trayectorias de las granizadas

Anthony Crespo y Lucía E. Arena

Introducción

En el proceso de caracterización de las nubes convectivas que dan origen a granizadas es importante geolocalizar temporalmente la caída de granizos. De acuerdo con Roca y Ramanathan (1999) la temperatura de brillo está directamente asociada con el tipo de nube (ver tabla 1). Utilizando el canal 11 del GOES 16 que, además de la presencia de agua en sus diferentes estados, permite identificar el tope de nube se determina la temperatura de brillo de interés.

Table 2. *Cloud classification criteria (Roca and Ramanathan 1999).*

Sl. no.	IRTB range (°C)	IRTB range (K)	Potential cloud types
1	0 to 10	273 to 283	Warm cloud like cumulus or stratocumulus
2	-10 to 0	263 to 273	
3	-20 to -10	253 to 263	Mixed clouds
4	-30 to -20	243 to 253	
5	-40 to -30	233 to 243	
6	-50 to -40	223 to 233	Huge mixed clouds like cumulonimbus (deep convective clouds) or cold high clouds
7	-60 to -50	213 to 223	
8	< -60	< 223	

IRTB: Infrared Brightness Temperature.

Tabla 1. Criterios de clasificación de nubes en función de la temperatura de brillo (Extraído de Konduro et al 2003)

De acuerdo con la clasificación de las tormentas de la Tabla 1 se procesan las imágenes del canal 11, filtrando las temperaturas menores a 200K o a 205K para el estudio de la corriente ascendente (updraft) de la nube y visualizar núcleos asilados. Debe notarse que la trayectoria obtenida con este método tendrá un corrimiento sistemático en la dirección de los vientos.

Por otro lado, para caracterizar el tamaño, y establecer un indicio de la magnitud de la tormenta, se filtraron las imágenes a tres temperaturas máximas: 250, 211, y 205 K.

A continuación se describe el método desarrollado para estudiar la evolución temporal del área de la nube y el tope de la misma. Y luego, se aplica este método a dos tormentas de febrero y diciembre de 2018 que han sido descritas en trabajos anteriores por Crespo y Arena (2019), Crespo et al (2019) y en las primeras partes de esta recopilación.

Método desarrollado

Se desarrolló un programa en PYTHON 3.7.3 para poder procesar las imágenes del GOES-16. El programa es basado en un programa previo, desarrollado por "GEONETCAST-America" y adaptado para lo que estamos analizando en este trabajo. En el programa principal se hace un

llamado a un código por separado llamado “remap.py” en donde se obtiene la información almacenada en el NETCDF del satélite y corre de la siguiente manera:

1. Importa los paquetes de NETCDF, numpy, gdal y tiempo.
2. Se define el valor de kilómetros por cada grado.
3. Se extrae la variable de la altura del satélite para poder definir los límites de imagen.
4. Se define las diferentes variables que se utilizan para poder calcular el sistema de referencia espacial para el Goes-16
5. Se transforma la referencia espacial del GOES 16 a el sistema de WSG84 a través del paquete gdal
6. Luego se escriben cuatro definiciones:
 - a. Definición que extrae driver para crear una copia de la imagen de los datos para poder exportar como geotiff
 - b. Definición que calcula la resolución en base a las dimensiones de los datos para la creación del geotiff
 - c. Definición que extrae el factor de escala y el “offset”
 - d. Definición que reprojecta la data en un sistema de coordenadas en base a la referencia de los datos en pixeles
 - i. Lee la escala y el “offset” del archivo NETCDF
 - ii. Se abre los datos del NETCDF
 - iii. Se crea una projection y una geotransformacion
 - iv. Se calcula las dimensiones de cada pixel
 - v. Se obtienen el driver de la memoria
 - vi. Se crea un nuevo pixel
 - vii. Se crea una nueva proyección y geotransformacion
 - viii. Se re-mapea la proyección y todos los datos
 - ix. Se cierra el archivo
 - x. Se crea un “array” con los datos y nueva referencia
 - xi. Se le aplica la escala y el “offset”
 - xii. Se devuelve la nueva list de array para poder proyectar en basemap

Una vez se obtiene la nueva lista de “array” con un sistema de coordenadas, se leen los datos y a través de un forloop; si los datos provienen del canal 7 al canal 16, los datos se mantienen en temperatura de brillo; pero si los datos provienen del canal 1 al canal 6, los datos se re-definen tomando los datos negativos y reescribiéndolos a cero, normalizar los datos restantes a 1.16 y ajustar todos los datos mayores de 1.0 a 1.0. Se define el tamaño de la imagen. Se crea la proyección en BASEMAP en base a la latitud y longitud máxima de las cuatro esquinas de la imagen. Se dibujan las líneas nacionales y provinciales de Argentina en base a los “shapefiles” ya existentes. Se dibujan los paralelos y meridianos. Se dibuja la escala. Se crea un forloop, y si los datos provienen de un canal entre el 8 y el 10, se utiliza un archivo de colores llamado “WVCOLOR35.cpt” y si los canales son mayores o igual al canal 11, se utiliza el archivo “IR4AVHRR6.cpt”. Se extrae la fecha, y hora del archivo con los paquetes “datetime” y “calendar”. Luego se agrega un cuadrado negro, donde se agrega el texto que proviene de la fecha, hora, y canal analizado. Luego se proyecta la barra de colores en base al canal que se entre. Se salva la imagen, y se crea geotiff para ser utilizado en otras plataformas, tales como QGIS.

Una vez se tiene el archivo GETIFF, se superpone con un mapa interactivo en QGIS versión 3.6. Una vez se tiene el archivo abierto, se filtraron las imágenes a tres temperaturas máximas: 250, 211, y 205 Kelvin para el estudio de la evolución temporal de ambas tormentas en el estudio. Las imágenes que fueron filtradas a que solo mostraran temperaturas máximas de 250, se utilizaron para calcular el área de ambas tormentas en los horarios que se escogieron. En la función de “measurement” en QGIS, escogí la opción de área donde amplifique la imagen hasta el límite de píxel para poder tener una medición mas exacta, teniendo resultados como el siguiente:

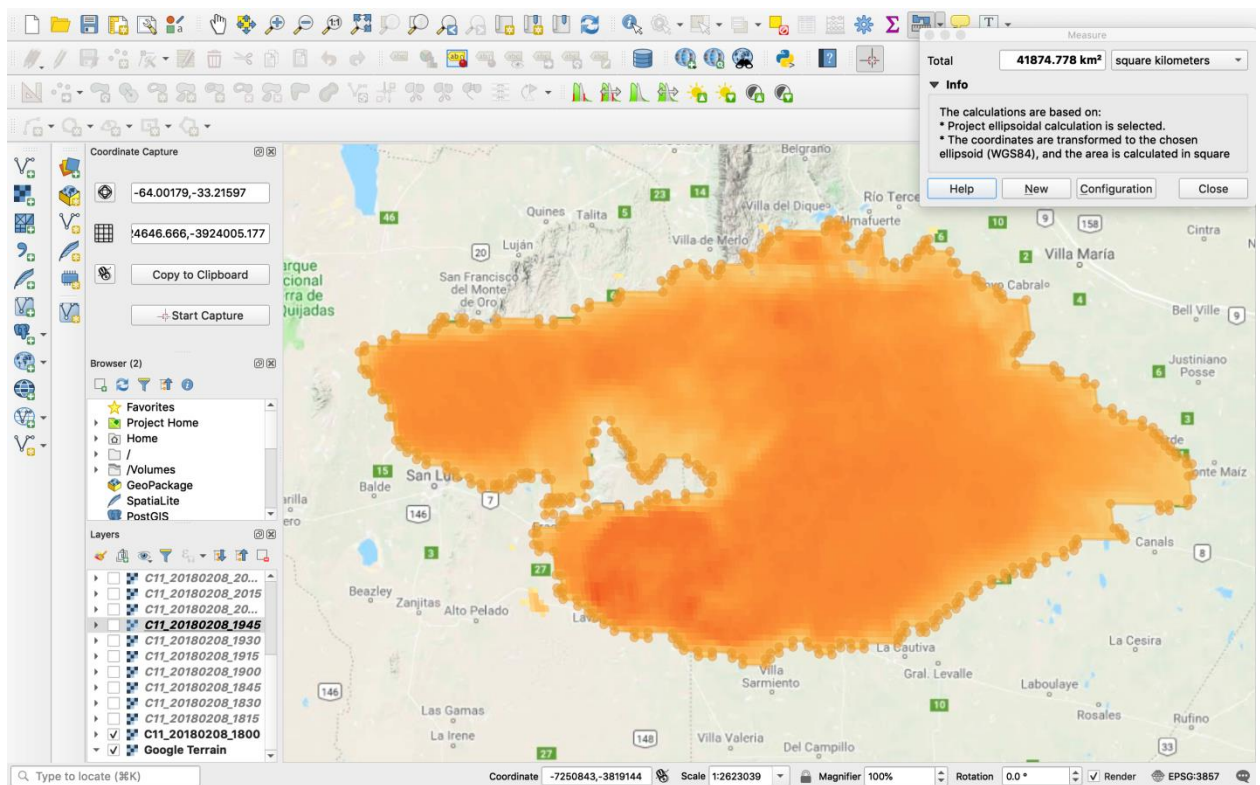
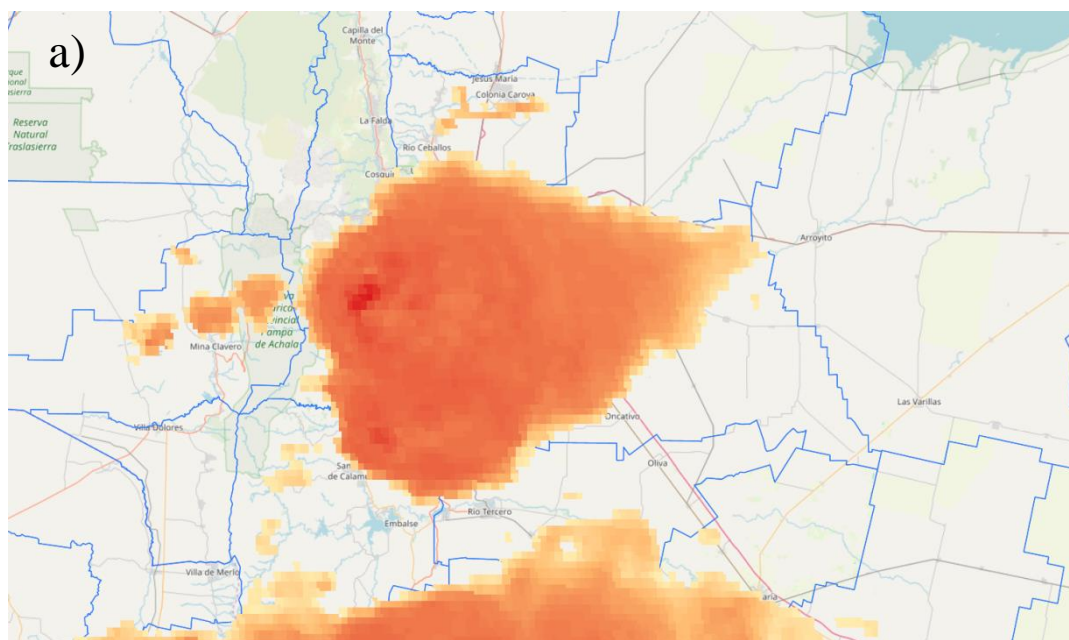


Figura 1: Ejemplo de resultado final del análisis de área en QGIS de Tormenta I del Febrero 8, 2018.

Este mismo procedimiento se sostuvo con los siguientes horarios: 18:00, 18:15, 18:30, 18:45, 19:00, 19:15, 19:30, 19:45, 20:00. En el mismo procedimiento se sustrajo las áreas vacantes dentro de la tormenta. El segundo filtro fue con temperaturas máxima de 211 K, donde solo se consideraban temperaturas de brillo con 3 o mas pixeles. Se esta temperatura específicamente por que a las 18:00 UTC es el único píxel disponible para tomar el punto medio del área con temperatura de brillo mínima, para calcular la evolución temporal de ambas tormentas. En estas imágenes se tomo el centro de la tormenta (que no necesariamente coincidía con el “overshooting top” de la tormenta) para poder tomar la localización en coordenadas para calcular dirección y distancia recorrida por la misma. Este método se muestra en la siguiente imagen:



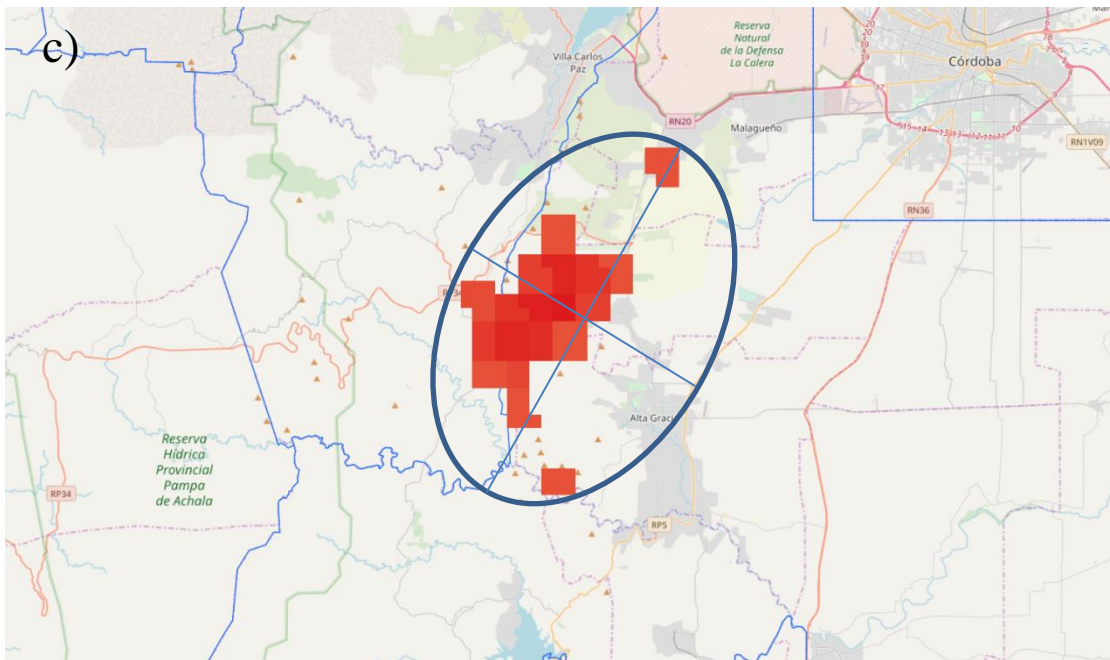
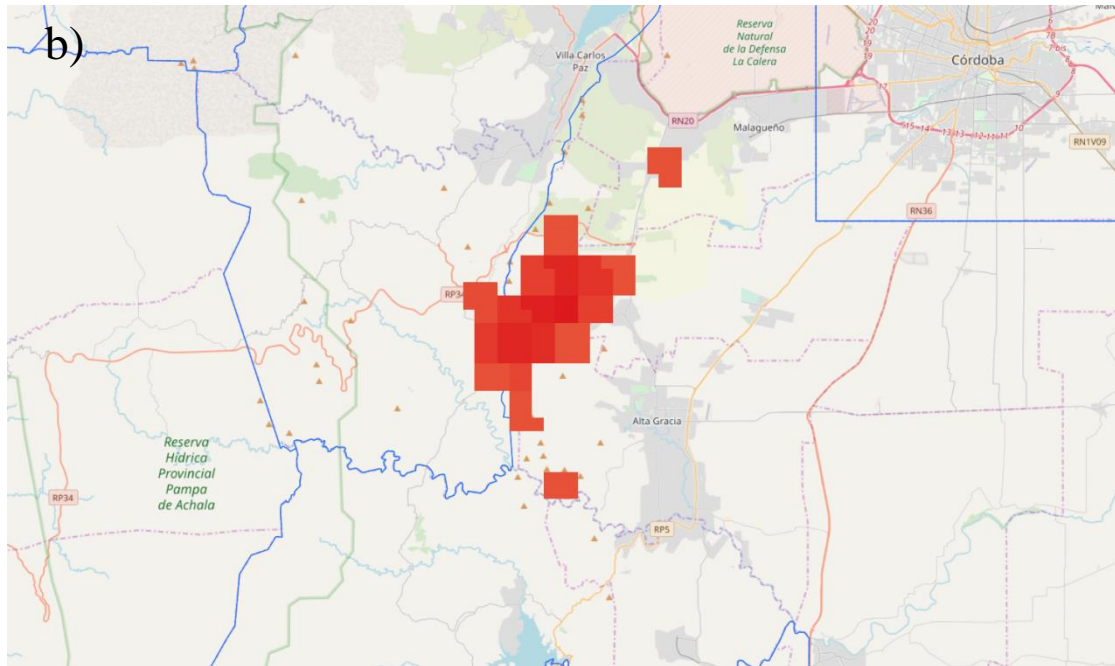


Figura 2. La imagen del canal 11 del GOES 16 (a) es procesada considerando sólo las temperaturas de brillo correspondientes a 205 K, que se presentan en (b) y luego calculando su centro en un elipsis.

Este método fue descartado una vez que los datos fueron procesados. Este método no correlacionaba efectivamente el recorrido de la tormenta con las localizaciones donde granizo. Entonces se utilizó el filtro con temperaturas máximas de 205 K, donde solo se calculó el centro con un círculo se escogió un área de temperatura de brillo mas bajas, y la misma se marco con un círculo donde se calculo el centro; se tomaron las coordenadas y luego se calculo la distancia para poder graficar en Excel.

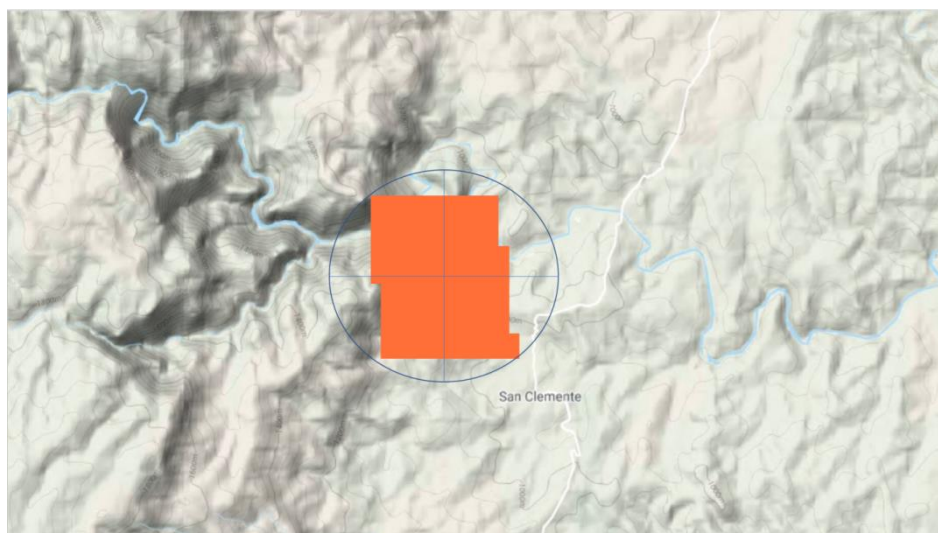


FIGURA 4: Método final que se utilizó para calcular la trayectoria de las Tormentas I y II en Febrero 8, 2018.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Los métodos desarrollados se aplicaron a las tormentas de 2018 en las que se recolectaron granizos. La figura 5 muestra la trayectoria de los topes de nube identificados por las temperaturas de brillo menores a 205K y la de los granizos recolectados. En la tabla 2 se presentan los horarios de caída de granizo para cada loca

Tabla 2: Información de las granizadas correspondientes a la tormenta del 8 de Febrero de 2018

Localidad	Coordenadas	Hora de caída de granizo (UTC)	Fuente de información	
			Granizo recogido	Redes sociales
<i>Icho Cruz</i>	-31.470844, 64.541380	- 18:50	No	Si
<i>San Lorenzo</i>	-31.673264, 65.016326	- 19:20	Si	Si
<i>Tupungato</i>	-31.431458, 64.217431	- 19:20	Si	Si
<i>Villa Carlos Paz Calle Tokio</i>	-31.421580, 64.500763	- 19:30	Si	Si
<i>San Nicolás</i>	-31.418625, 64.168201	- 19:45	No	Si

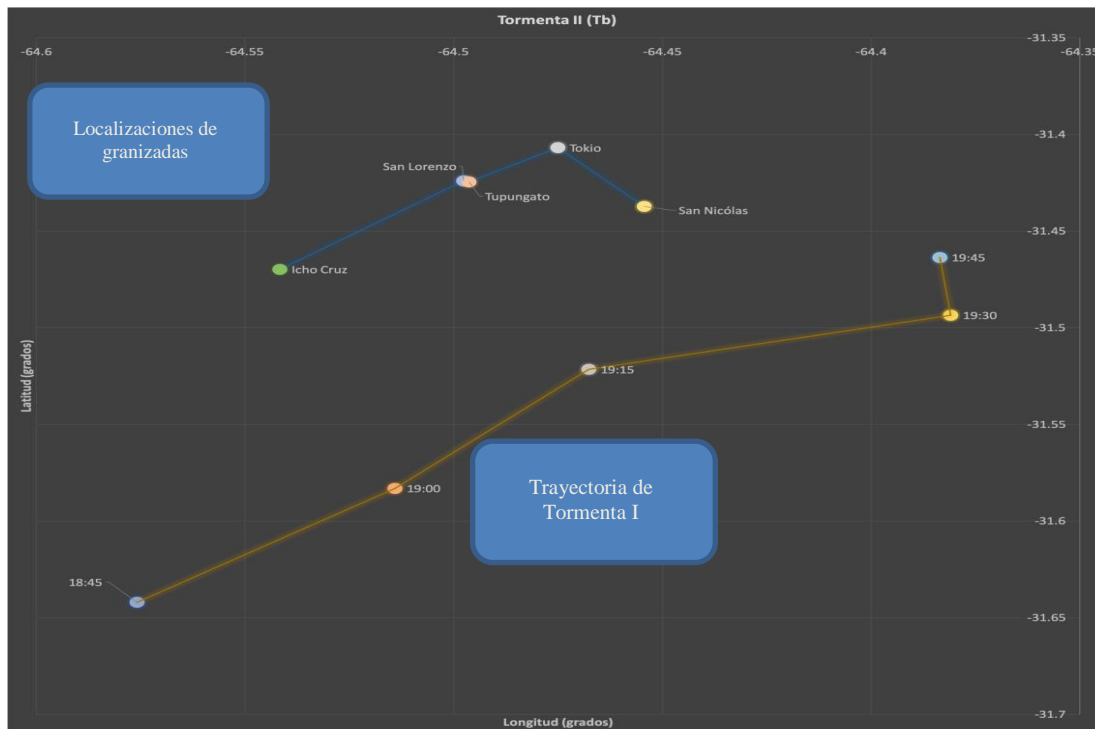


Figura 5. Trayectorias de las granizadas según la evaluación temporal de la temperatura de brillo menores o iguales a 205K, en color marrón. Más al norte, en azul, se distingue la trayectoria de los granizos registrados en tierra (detalles de los horarios y coordenadas están en la tabla2)

Es importante destacar que las localidades en que se registran granizos están ubicadas sistemáticamente al norte oeste, en el orden de los 10 km (Una décima de grado en latitud es del orden de 10 km) del lugar estimado mediante el método de la temperatura de brillo. Considerando que las tormentas se dirigen hacia el este y noreste, es razonable esperar que las granizadas estén en la dirección observada, coincidente con las zonas de yunque de las nubes.

Este mismo método fue aplicado a la tormenta del 13 de diciembre de 2018 con el resultados que se muestran en las figuras 6 y 7 que corresponden a los horarios anterior e inmediatamente posterior a la granizada registrada en Villa del Dique, en el Embalse de Río Tercero. En la figura 6, se observa que la zona del embalse está cubierta por la temperatura de brillo de 200K lo que hace que esta temperatura sea un indicador de granizada. Sin embargo, en las núcleos aislados para lo cual se debió llegar a una temperatura menor de una 200K o menos.

Por otro lado, en la figura 7 es importante notar la formación de celdas organizadas que se constituye en el norte que comienza en la reserva de la Pampa de Achala y llega hasta el llano en la zona pampeana de Oncativo

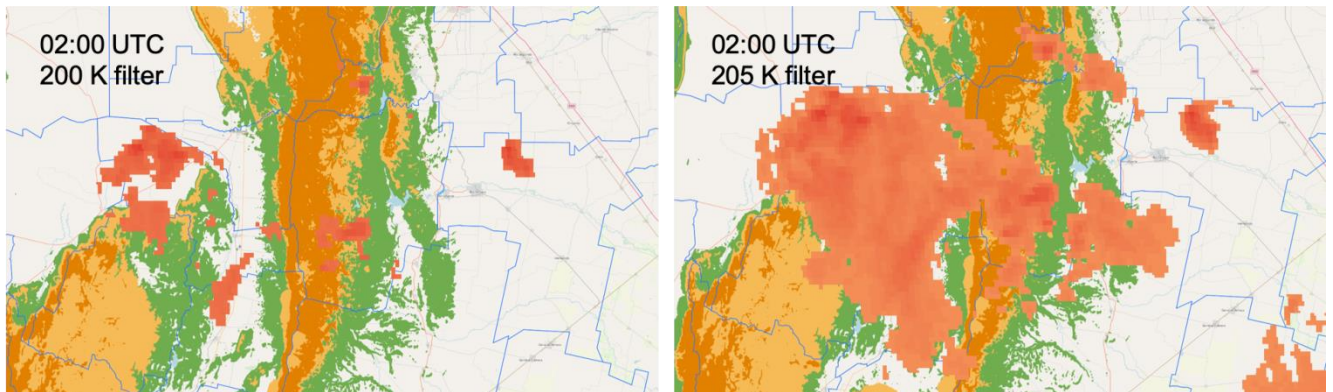


Figura 6. Distribución espacial de las temperaturas de brillo igual y menor de 205K (en a) y 200K (en b) , en un horario inmediatamente anterior al registro de la granizada y la recolección de granizos de Villa del Dique en Embalse Río III y Villa Rumipal el día 13 de Diciembre de 2018. Además, tormenta fue superpuesta en capa raster en QGIS muestra clasificación de montañas desde las colinas en color verde hasta altiplano en color marrón.

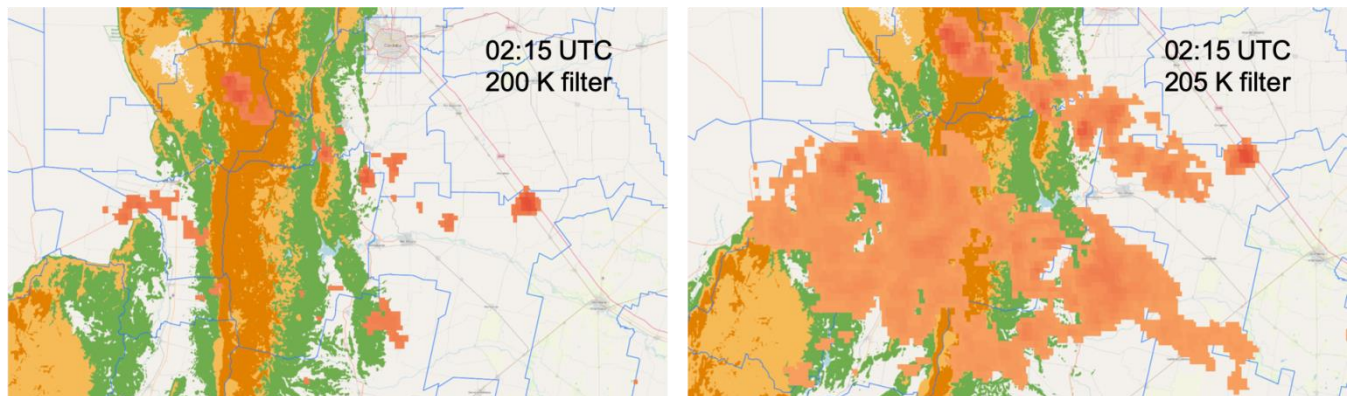


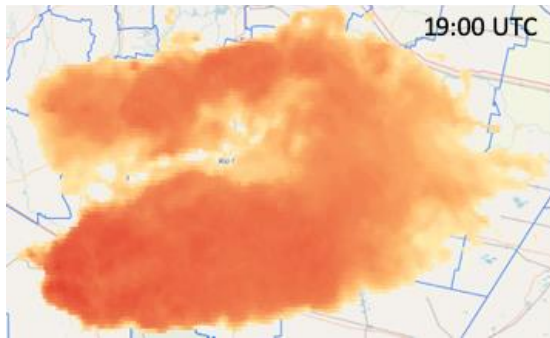
Figura 7 en la que se observa la distribución espacial de las temperaturas de brillo igual y menor de 205K (en a) y 200K (en b), en un horario inmediatamente posterior al registro de la granizada y la recolección de granizos de Villa del Dique en Embalse Río III, y Villa Rumipal el día 13 de diciembre de 2018. Además, tormenta fue superpuesta en capa raster en QGIS muestra clasificación de montañas desde las colinas en color verde hasta altiplano en color marrón.

Tabla 3: Áreas de las dos tormentas en febrero 8 en orden cronológico en kilómetros cuadrados.

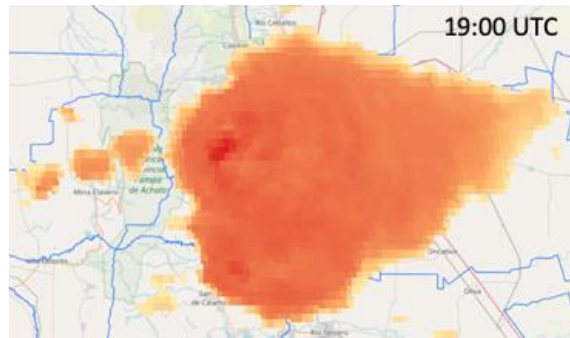
Time	Storm	Area (km ²)	Storm	Area (km ²)
18:00	1	41830.651	2	2285.904
18:15	1	45006.619	2	3274.813
18:30	1	46664.485	2	4688.342
18:45	1	48913.634	2	6959.093
19:00	1	51278.884	2	9591.294
19:15	1	52074.927	2	13838.734
19:30	1	54082.991	2	17248.663
19:45	1	54453.127	2	20769.278
20:00	1	42508.204	2	39464.666

Tabla 4: Áreas de las dos tormentas en Diciembre 13 en orden cronológico en kilómetros cuadrados.

Time	Storm	Area (km ²)	Storm	Area (km ²)
1:45	west	104328.44	east	107923.804
2:00	west	123887.72	east	103925.445
2:15	combined	235697.96	combined	235697.956



a)



b)

Figura 8: Tormenta I (a) y Tormenta II (b) filtradas a temperaturas máximas de 250 K.

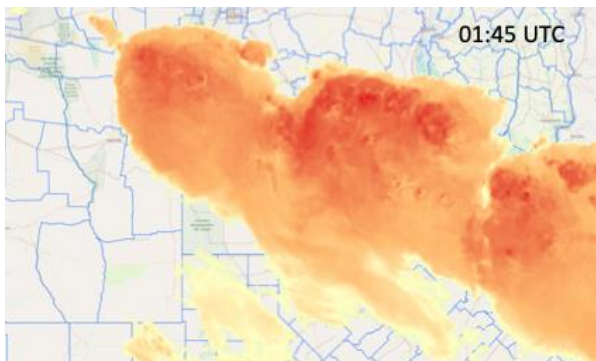


Figura 9: Tormenta del oeste y Tormenta del este filtradas a temperaturas máximas de 250 K.

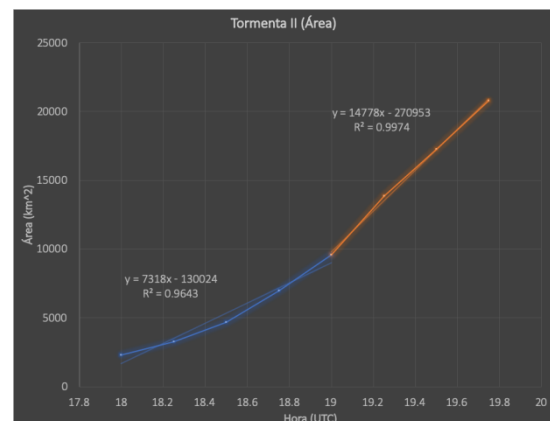
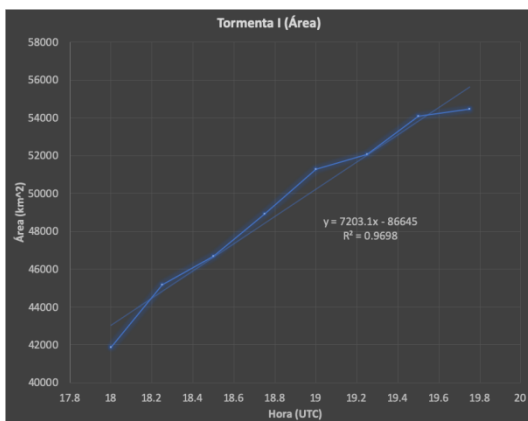
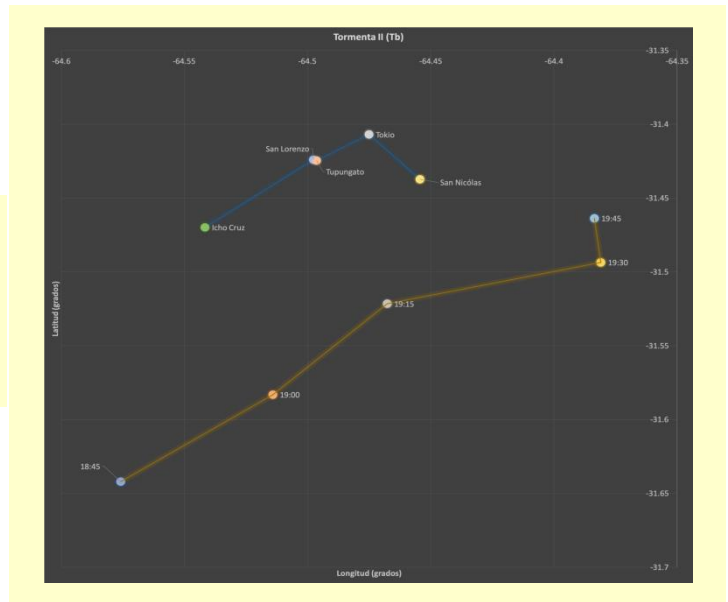


Figura 10: Área de Tormenta I y Tormenta II graficadas correspondiente al horario en UTC.

En la tabla 3 y tabla 4 presentan los datos de las áreas calculadas para las tormentas de 2018, las que están graficadas para algunos horarios particulares cercanos a la recolección de granizos en las figuras 8 y 9. En la figura 10 se presenta las evoluciones temporales de las celdas norte (indicada con II) y sur (I) de la tormenta del 8 de febrero de 2018. Debe notarse la disminución notable del área después de la granizada en la celda norte, y el aumento de la sur cuando incorpora los restos de la norte.

Para la tormenta de Febrero, se reconstruyeron las trayectorias de las celdas norte y sur en función de la temperatura de brillo. Se filtraron las imágenes a tres temperaturas máximas: 250, 211, y 205 K y se seleccionó específicamente la temperatura máxima de 250, que se asocia a la presencia de granizo (Tutte et al, 2008) A partir de los datos de redes sociales, se confirma que en las poblaciones predichas por este método, Icho Cruz y San Nicolás cayó granizo en el horario estimado.

Figura 14. Trayectoria de la temperatura de brillo de 250K del GOES 16, para la tormenta de Febrero de 2018. Se indican horarios y algunas poblaciones en la que se registra granizo



REFERENCIAS

Konduru, Rakesh Teja & Kishtawal, Chandra & Shah, Shivani. (2013). A new perspective on the infrared brightness temperature distribution of the deep convective clouds. *Journal of Earth System Science*. 122. 1195-1206. 10.1007/s12040-013-0345-4.

Roca R and Ramanathan V 1999 Scale dependence of the monsoonal convective systems over the Indian Ocean; *J. Climate* **13** 1286–1298

Crespo A., Arena L. Tormenta granicera en la provincia de Córdoba I: Imágenes Satelitales. Tercer encuentro Interdisciplinario de Investigaciones en Problemáticas Ambientales (EIDIPA); 2018 Jun 26-28; Cordoba, Cordoba Argentina.

Crespo A., Arena L. Tormenta granicera en la provincia de Córdoba II: Imágenes de Radar. Tercer encuentro Interdisciplinario de Investigaciones en Problemáticas Ambientales (EIDIPA); 2018 Jun 26-28; Cordoba, Cordoba Argentina.

Cuarta parte: los ciudadanos científicos y el registro de granizadas y recolección de granizos

L. Arena

RESUMEN

La toma de decisiones políticas sobre problemas vinculadas a cambio climático requiere del estudio de variables climáticas y meteorológicas de mediano y largo plazo que puedan incidir en el diseño de estas políticas. Para ello es esencial contar con datos certeros, que abarquen, con la mayor densidad posible, el territorio de interés y que se sostengan en el tiempo. El MINCYT ha participado, fuertemente en los últimos años, en el diseño y la implementación de programas que tienen como finalidad la recolección de datos hidro-meteorológicos tales como identificación de crecidas de ríos, de parámetros meteorológicos y registro y recolección de granizos. Estos programas sólo pueden ponerse efectivamente en funcionamiento con la colaboración de la comunidad, por lo que son verdaderos proyectos de ciencia ciudadana en los que el vecino cumple diferentes roles que van desde la recolección de datos hasta la participación efectiva en la investigación. El trabajo de la interacción entre la comunidad y los científicos requiere que el ciudadano reconozca los instrumentos de medición, registre (generalmente mediante fotos) y envíe información o aprenda a utilizar un aplicación o un instrumento de medición con la misma finalidad. Claramente, programas como los que se describen requieren de una apuesta importante a la educación, la divulgación y la difusión. La propuesta puesta en marcha por el MINCYT complementa estos aspectos con actividades tales como conferencias, cursos y talleres en instituciones educativas y en espacios de educación no formales, con el desarrollo de material didáctico escrito, experimental y multimedia, y entrevistas y vídeos para la difusión.

Introducción

De acuerdo lo descrito en las partes anteriores de esta recopilación es evidente la necesidad de contar con datos temperoespacial de las granizadas y con granizos para estudiar en el laboratorio. Así, a pesar de que en la actualidad, además de los datos del servicio Meteorológico Nacional, es posible acceder a herramientas tan importantes como imágenes de radares y satélites, es esencial contar con la participación del ciudadano, en su rol de científico, que registra datos y muestras. Estos aportes del ciudadano científico son fundamentales para realizar modelos de nubes, estudios de la atmósfera y pronóstico en regiones tan vastas como las que abarcan este tipo de tormentas. Esto es así porque se requiere, por un lado, de muchos datos en zonas muy extensas y en largos períodos de tiempo y, por otro es necesario estudiar en laboratorio muestras de granizos que permitan corroborar las observaciones realizadas con el instrumental de alta envergadura. Tal como lo comenta, en su blog, una de las meteorólogas más importantes y la primera de Argentina, María Luis Altinger, especialista en tornados “Los fenómenos y configuraciones del movimiento atmosférico cuyas dimensiones son del orden de los 10 km, o menos, no quedan totalmente representados por el cual de datos que ingresan diariamente a un servicio meteorológico para su análisis y archivo. En consecuencia, al no llegar la información por vía idóneos, el meteorólogo operativo no examina ciertos rasgos del tiempo que son percibidos por el habitante local.⁵” En este sentido, en el caso de los

⁵ <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/tormentas-severas-sus-efectos-y-frecuencia>

granizos, el presente programa Cosecheros de granizo del MINCYT CBA, tiene como finalidad ***contribuir a la caracterización de las tormentas severas de la provincia de Córdoba con datos obtenidos en forma colaborativa con los aportes del ciudadano en su rol de científico***

El programa de cosecheros de granizos requiere de líneas de acción gubernamentales, de educación, divulgación y las propias científicas de investigación (algunos esquemas pueden visualizarse en el apéndice 4) Las actividades que involucra el programa Cosecheros de granizo Córdoba

Para el MINCYT y las instituciones asociadas

- a- Implementación de herramientas para el registro de datos de granizo
 - a. una “regla granicera” para la medición de tamaño y densidad superficial de granizos
 - b. una aplicación informática para el registro mediante imágenes de datos de granizos (tamaño, forma, distribución superficial, horario, geolocalización)
 - c. instructivo para el registro de datos, la recolección de granizos y consejos de defensa civil ante la alerta meteorológica por tormenta severa (<http://www.cba.gov.ar/en-caso-de-tormentas-severas/>) [1]
- b- Difusión masiva de información a través de
 - a. Programa Científicos con voz y vos
 - b. Ferias provincial y nacional de ciencias y tecnologías
 - c. Conferencias
 - d. capacitaciones especiales
 - e. Encuentros entre ciudadanos científicos y científicos profesionales

Sobre temas vinculados a

- i. El rol del ciudadano científico en el estudio de las tormentas severas
 - iii. el programa RELAMPAGO
 - iv. protección del ciudadano
- c- Capacitación de jóvenes estudiantes
 - a. Como parte del programa Compromiso Social Estudiantil de la UNC
 - b. Como ayudantes de extensión o becarios de investigación en ciencia y tecnología de la FAMAF-UNC
 - c. Como estudiantes de la especialización en Física de la Atmósfera de la FAMAF-UNC
 - d- Recolección efectiva de granizos para investigación
 - a. Análisis de datos y decisión de interés de recolección efectiva para laboratorio
 - b. Implementación de reservorios (heladeras con hielo seco, freezer con resguardo de generación de electricidad) y material de protección personal y de los granizos
 - e- Análisis de datos y granizos en el laboratorio

- a. Sistematización de los datos de tormenta obtenidos a partir de la información del ciudadano científico, los radares y satélites y el SMN.
- b. Estudio cristalográfico de los granizos que permite identificar forma, tamaño, núcleo, ciclados en la nube, etc.

A modo de conclusión

Para el MINCYT y los ciudadanos

Del rol del ciudadano científico en el programa Cosecheros de granizo Córdoba (CDT-CBA)

Las observaciones y el estudio de muestras de hidrometeoros (lluvia, granizos, etc) son la base de toda investigación referida a fenómenos meteorológicos. Los investigadores científicos en fenómenos de la atmósfera aportamos datos y modelos que favorecen el desarrollo de mejores pronósticos y alertas temprana de fenómenos meteorológicos de alto impacto, que tienen la finalidad de mejorar la acción y la respuesta de los organismos de protección civil. El rol del ciudadano científico es de colaborador directo del investigador científico. Cumple las acciones de recabar datos, informarlos y recolectar muestras que son esenciales para los estudios de investigación. Sus acciones de recuperación de datos y muestras son únicas y no pueden ser realizadas por alguien más debido a la extensión y la frecuencia de las tormentas. Por ello, con el ciudadano científico que logra una verdadera ciencia abierta

Apendice 1. Trabajos de caracterización de las celdas graniceras de la tormenta de febrero de 2018

Crepo y Arena 2019 y Crespo et al 2019



EIDIPA+UNC 2019
TENDEN EN CUENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGADORES EN PROBLEMÁTICAS
AMBIENTALES DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CÓRDOBA



26 y 27 de junio de 2019 - Ciudad Universitaria, Córdoba

TORMENTA GRANICERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA I: IMÁGENES SATELITALES

Anthony Crespo [Ayala](#), [Luis E. ~~Araoz~~](#)

[Sokolowski](#), *of Wisconsin- Madison, EEUU*

*Laboratorio de Física de la Atmósfera Laura Levi-Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación-
Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba-Argentina
e-mail: aranzas@arnet.unc.edu.ar*

Introducción: La provincia de Córdoba está enclavada en la zona de corriente de chorro de capas bajas de Sudamérica, región SEBA, donde se producen tormentas severas (Vidal, 2014). Es un área de vientos localmente muy intensos que se desarrollan hasta aproximadamente los 2000m de altura y que son los responsables de transportar aire cálido rico en humedad. La orografía de la región (Repinaldo et al. 2017, [Tellebauro y DiAdreas](#), 2015) es otro factor importante que favorece la formación de estas tormentas. En este trabajo se estudia la tormenta severa granicera del 3 de febrero de 2018, que afectó una zona importante del territorio suroeste-centro de la provincia de Córdoba, en la que se recolectaron y registraron granizos gigantes en la zona cercana a Villa Carlos Paz (VCP). **Objetivos:** En el presente trabajo se analizan las imágenes del satélite GOES 16 con el fin de caracterizar la tormenta y correlacionar estos datos con los granizos registrados.

Materiales y Métodos: Los datos de nivel 2 del Satélite GOES 16 se procesan en PYTHON 3.7.3 y se re-proyectan geográficamente con BASEMAP 3.1

Resultados: En la figura 1 (canal infrarrojo lejano 11) se observa una celda importante que se desplaza desde el sur de Córdoba hacia el este y el norte tal como ocurre las típicas tormentas severas de la región descritas por [Muller et al.](#), 2018. Así mismo, a las 17 UTC se evidencia el comienzo de la formación de una nueva celda norte que avanza hacia el este a través de las Sierras de Córdoba. Esta celda evoluciona, independientemente de la anterior, sobre la región en la que se recolectaron y registraron granizos de gran tamaño. En el canal 5 (figura 2) las manchas negras representan la presencia de hielo en la región y el horario en que se registraron y recolectaron granizos.

Conclusiones: La celda norte es productora de los granizos gigantes recolectados en VCP, antes de ser realimentada por la celda sur, por lo que se considera que la orografía cumple un rol fundamental en la generación del sistema convectivo [grainado](#)-norte. En la segunda parte de este trabajo se presentan nuevas evidencias del efecto orográfico generador de la celda de estudio

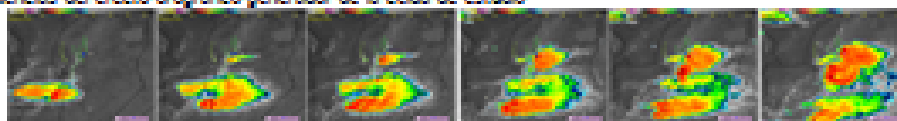


Figura 1: Evolución de la tormenta que granizó en VCP (al norte del de gran superficie), originada en las Sierras de Córdoba.

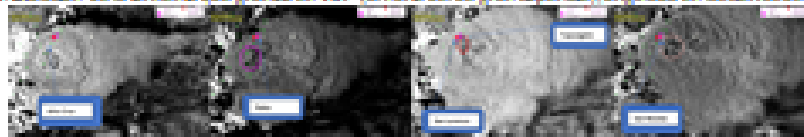


Figura 2: Imágenes del canal 5, IR, canal, que corresponden a los horarios en que se registró caída de granizo.

Referencias

1. Bueno Repinaldo, H. F., M. [Sokolowski](#), and Y. [Gómez-Griso](#), 2017: [Indicador](#) de un sistema convectivo sobre las Sierras de Córdoba, y sensibilidad a modificaciones en el perfil [orográfico](#). [Meteorología](#), 42, 23-42. Repinaldo et al. 2017
2. Mulholland, J. P., S. W. Nesbitt, R. J. Trepp, K. L. [Gonzalez](#), and P. V. [Giles](#), 2018: Convective Storm Life Cycle and Environment near the Sierras de Córdoba, Argentina. [Monthly Weather Review](#), 146, 2541-2557, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0081.1>.
3. Tellebauro, H., and F. [DiAdreas](#), 2015: Deep convection east of the Andes Cordillera: four hailstorm cases. [Actas, Dyn. Meteorol. Oceanogr.](#), 61.
4. Vidal, L., 2014: [Condiciones](#) extremas sobre [Sudamérica](#): estructura interna, datos de [datos](#), e influencia de la [topografía](#) en la [precipitación](#). Universidad de Buenos Aires, 275 pp.

26 y 27 de junio de 2019 - Ciudad Universitaria, Córdoba

TORMENTA GRANICERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA II: IMÁGENES DE RADAR

Sección
Número

Anthony Crespo [Ayala^a](mailto:acrespo@facmat.unc.edu.ar), Raúl A. [Comest^c](mailto:comest@facmat.unc.edu.ar), [Lucía E. Arenas^b](mailto:arenas@facmat.unc.edu.ar)

^aUniversity of Wisconsin-Madison, EEUU.

^bLaboratorio de Física de la Atmósfera Laura Levi-Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación-
Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba-Argentina

e-mail: arenas@facmat.unc.edu.ar

Introducción. La región de Córdoba que rodea la latitud de los 65°S y está al este de las sierras de Pocho es una zona altamente granicera. En este trabajo se estudia la tormenta del 8 de febrero de 2018, que produjo granizos gigantes, de dimensiones mayores a los 7 cm. En la parte I, en este mismo congreso, se ~~describió~~ la formación de una celda convectiva, productora de los granizos registrados, que se genera al oeste de las sierras y se desplaza hacia el este. [Tetelbaum y D'Andrea \(2015\)](#) y [Repinaldo et al \(2017\)](#) las ondas de montaña o de gravedad pueden explicar la formación de este tipo celdas convectivas. **Objetivos:** Comparar las imágenes del radar RMA1 y del satélite GOES 16 con el fin de identificar la génesis del proceso convectivo en términos de ondas de gravedad.

Materiales y Métodos: imágenes del radar RMA1 de la ciudad de Córdoba, página WEB del Grupo Radar Córdoba. **Resultados:** A través de la variable COLMAX TH (máxima reflectividad por columna) del RMA1 se determina, tal como se vio en el trabajo I, que la celda granicera se mueve hacia el este y al norte, independientemente de una celda sur de gran tamaño. Para estudiar las ondas de montaña (ilustradas en la figura 1a) se analizan las imágenes de COLMAX en la zona comprendida entre las sierras de Pocho y la ciudad de Córdoba (figura 2). Sobre las franjas de llovizna (que son permanentes, en este estudio y paralelas a las sierras) aparecen celdas pulsadas desde el oeste. Este mismo fenómeno se puede visualizar en los canales 1 (visible) y 8 (infrarojo-detección de vapor de agua) del GOES 16 (figuras 1b y 1c). La distancia estimada para la longitud de onda de montaña es de 7km y coincide con la separación entre los pulsos observados en las figuras 1 y 2.

Conclusiones: Las ondas de gravedad o de montaña son un mecanismo que contribuye a la formación de la celda convectiva generadora de granizos, en total consistencia con los estudios y modelos propuestos por [Repinaldo et al 2015](#).

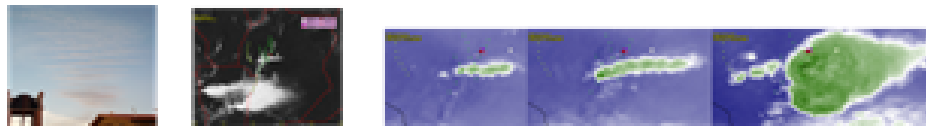


Figura 1: a-nubes que indican la presencia de ondas de montaña. Foto tomada desde Villa Carlos Paz hacia el oeste. (Gentileza de Mariela Fernández), b-Nubes pulsadas observadas en el canal 1, visible, del satélite GOES 16 y c-En el canal 8 (ampliado), que corresponde al infrarojo, e indica la presencia de vapor de agua (las localidades se corresponden con la imagen b)

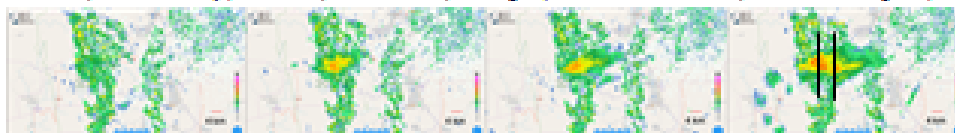


Figura 2: secuencia de imágenes de COLMAX del radar RMA1 en la zona comprendida entre las sierras de Pocho y la ciudad de Córdoba. Sobre las franjas paralelas a las sierras se observan celdas pulsadas con núcleos de lluvia intensa (

Referencias

- 1) Bueno Repinaldo, H. F., M. Nicolai, and Y. Slatko. *Gracia*, 2017: Inclination de un sistema convectivo sobre las Sierras de Córdoba, y sensibilidad a modificaciones en el perfil orográfico. *Atmosferología*, 42, 23-42. Repinaldo et al. 2017
- 2) Mulholland, J. P., S. W. Nesbit, R. J. Trapp, K. L. Battarbee, and P. V. Sela, 2018: Convective Storm Life Cycle and Environments near the Sierras de Córdoba, Argentina. *Monthly Weather Review*, 146, 2541-2557, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0081.1>.
- 3) Tetelbaum, H., and F. D'Andrea, 2015: Deep convection east of the Andes Cordillera: four hailstorm cases. *Tellus Dyn. Meteorol. Cosmog.*, 87.
- 4) Vidal, L., 2014: Convección extrema sobre Sudamérica: estructura interna, ciclos de vida e influencia de la topografía, en la iniciación. Universidad de Buenos Aires, 275 pp.

Apéndice 2: Trabajos de estudio de granizos gigantes correspondientes a las tormentas de febrero de 2018 en Carlos Paz y en Ata Gracia en 1988.

Arena 2019 (a y b) EIDIPA y CONGRESO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Granizos gigantes en la provincia de Córdoba-Argentina. Estudio de dos casos: 1988 y 2018

Lucía E. Arena

Laboratorio de Física de la Atmósfera Laura Levi-Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FAMAF)-Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Córdoba, Argentina.

Dirección de divulgación y Enseñanza de la Ciencia. Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba (MINCYT)

arena@famaf.unc.edu.ar

Resumen

La zona montañosa al oeste de la ciudad de Córdoba se caracteriza por el desarrollo de tormentas severas, con una precipitación significativa de granizo gigante de 7 a 10 cm y con un registro récord de 17.5 cm en la ciudad de Carlos Paz en 2018. En el presente trabajo, se estudian las características de los granizos recogidos e informados en Alta Gracia en 1988 y en Villa Carlos Paz, y pueblos cercanos, en 2018. Para ambas tormentas, 1988 y 2018, hay pruebas sólidas de que las Sierras de Córdoba desempeñan un papel importante en la formación del sistema convectivo. Se hacen cortes de granizo y se estudian secciones delgadas con microscopía visible de transmisión. Las piedras estudiadas de ambas tormentas guardan grandes similitudes en el tipo de embrión (cónico y esférico), la estructura esponjosa, así como la distribución de los anillos de burbujas. A partir de la similitud entre ambas granizadas puede inferirse que los factores orográficos priman sobre los climáticos para la formación de estas tormentas severas.

Abstract

The mountainous area to the west of the city of Córdoba is characterized by the development of severe storms, with a significant rainfall of giant hail from 7 to 10 cm and with a record of 17.5 cm in the city of Carlos Paz in 2018. In the present work, the characteristics of hailstorms collected and reported from Alta Gracia in 1988 and Villa Carlos Paz and nearby towns in 2018 are studied. For both storms of hail 1988 and 2018, there is strong evidence that mountain Sierras de Córdoba play an important role in the formation of the convective system. Hail cuts are made and thin sections are studied with visible transmission microscopy. The studied stones of both storms bear great similarities in the type of embryo (conical and spherical), the spongy structure, as well as the distribution of the bubble rings. From the similarity between both hailstorms it can be inferred that the orographic factors take precedence over the climatic factors for the formation of these severe storms.

Palabras claves: granizo, tormenta severa, burbujas

Keywords: hail, severe storm, bubbles

Introducción

La zona serrana al oeste de la ciudad de Córdoba se caracteriza por el desarrollo de tormentas severas, con precipitación importante de granizos gigantes de 7 a 10 cm y con un récord de 17,5 cm recolectado en la ciudad de Carlos Paz en 2018. En particular, la región de Córdoba que rodea la latitud de los 31,6°S y está al este de las sierras de Pocho (ver figura 1) es una zona de tormentas severas altamente graniceras (Rasmussen y Houze, 2016, Rasmussen et al. 2014, Altinger y Rosso 1982). De acuerdo con Bueno Repinaldo et al. 2017 y Teitelbaum y D'Andrea, 2015 hay fuertes evidencias de que la orografía de la región cumple un rol importante en la formación de los granizos de gran tamaño. En este trabajo se estudian y comparan los granizos registrados y recolectados en dos tormentas, producidas en la región, temporalmente separadas 30 años, con el fin de identificar posibles indicios de efectos del cambio climático.

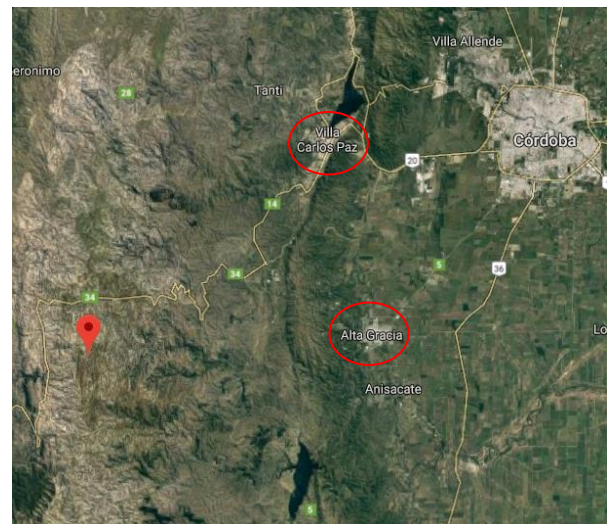
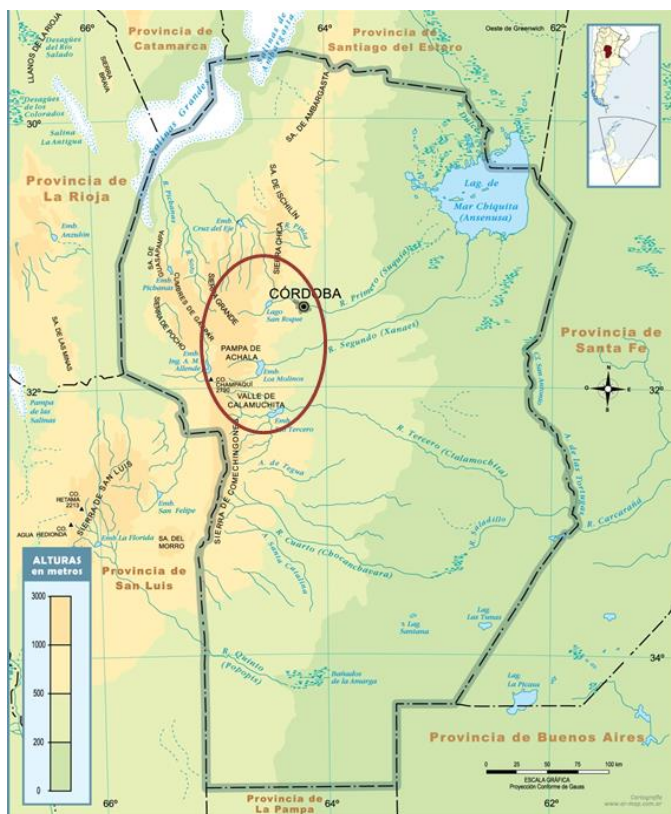


Figura 1. Izquierda: Zona de tormentas severas graniceras de la provincia de Córdoba. Derecha: Localidades donde se recogieron granizos en 1988, Alta Gracia, y 2018, Villa Carlos Paz.

Materiales y metodología

Las piedras estudiadas son de tormentas producidas en la ciudad de Alta Gracia en 1988 alrededor de las 6 UTC y en Villa Carlos Paz, en 2018 entre las 1650 y 1930 UTC. La tormenta de Alta Gracia es caracterizada a partir de datos meteorológicos (Levi et al. 1989) y la de 2018 mediante este mismo tipo de datos sumados a la información de imágenes de satélite y radar (Crespo Ayala et al. I y II, 2019, Arena et al. 2019) En 1989, el equipo de Levi considera que la tormenta granicera de Alta Gracia es un sistema convectivo lineal, se desplaza desde el sudoeste de la provincia hacia el norte, y que “el movimiento ascendente atmosférico probablemente fue mejorado por la convergencia forzada en las laderas de la montaña, situación favorable para generar nubes convectivas profundas” En el caso del sistema convectivo de 2018, se observan ondas de montaña (Crespo et al. I y II, 2019, Arena et al. 2019) que favorecen fuertemente la formación del sistema convectivo generador de los granizos gigantes, de más de 7 cm en uno de sus ejes, que se recolectan en Villa Carlos Paz.

Sobre las granizadas, se cuenta con información verbal, en el primer caso de 1988 (Levi et al. 1989 y Levi et al. 1991), y verbal e infográfica (por redes sociales y entrevistas (1)) en 2018. Los granizos son recolectados en ambas tormentas en seco (antes de la lluvia) y son resguardados en bolsas plásticas con nieve a temperatura de $(-12\pm 2)^{\circ}\text{C}$. Son analizados cristalográficamente en la cámara fría del Grupo de Física de la Atmósfera Laura Levi de la FAMA-UNC. Mediante un procesado mecánico se obtienen láminas delgadas de su eje ecuatorial que son observadas entre polarizadores cruzados y con luz natural. Estos estudios permiten revelar los cristales, en el primer caso de luz polarizada, y las burbujas que constituyen las piedras, con luz natural. Además, se revelan los embriones a partir de los cuales se formaron. Se estudia un total de 15 granizos en 1988 y 50 en 2018. De estos últimos unos 30 tienen ejes menores a 4 cm y mayores a 1.5 cm y 10 tienen uno de sus ejes mayores de 7 cm. En la figura 2, se presentan fotografías que ilustran algunos granizos de ambas tormentas.

Resultados

Sobre las granizadas se sabe que la distribución superficial de los granizos es tal que resultan separados distancias entre 0.5 y 1 m en ambos casos 1988 y 2018. Los granizos estudiados tienen el aspecto general de esferas lisas o bien son estrellados- con lóbulos- y más del 50% son oblados. En la figura 2 se presentan mitades de granizos en las que es posible apreciar los anillos alternados translúcidos y opacos. Estos últimos corresponden a burbujas que, en el caso de los granizos estrellados, siguen la forma de la superficie con ondas que reproducen los lóbulos. El crecimiento resulta en capas concéntricas, que indica un eje principal de giro, en el caso de las piedras obladas. En las figuras 3 y 4, se presentan fotografías de láminas delgadas de algunos granizos en los que se pueden apreciar claramente los anillos y los embriones. En general, los embriones son cónicos (figura 3) y esféricos, ambos de muy baja densidad rodeados por capas cristalinas (translúcidas) alternadas con opacas de espesores menores al milímetro, donde las primeras resultan 3 veces más anchas que las segundas. En un porcentaje mayor al 30% los granizos son esponjosos en el sentido de la cantidad de huecos observados, que tienen dimensiones mayores a 1 mm e muy alta (en granizos de 7 cm de eje mayor, se han encontrado hasta 3 huecos asimétricos con dimensiones de hasta 1,5 cm)

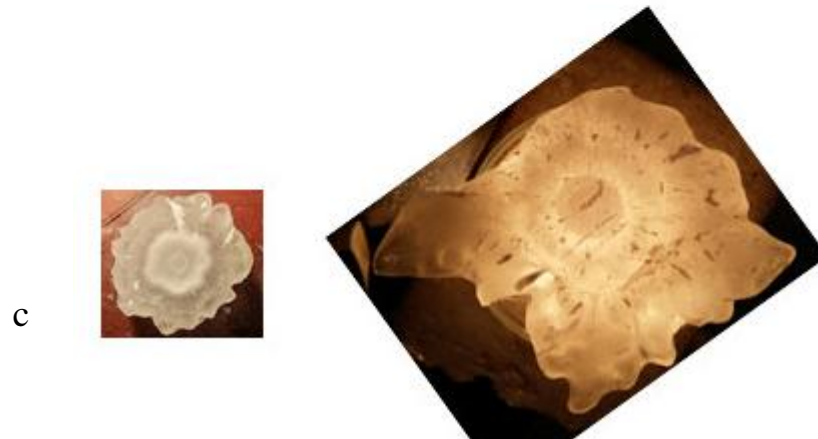
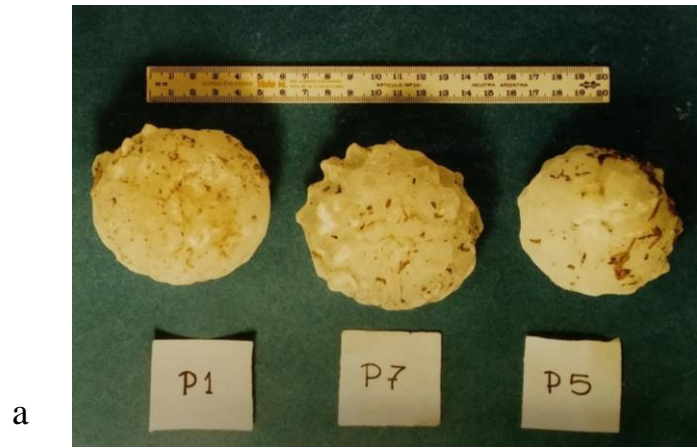


Figura 2: Granizos recolectados en (a) Alta Gracia en 1988 y (b,c) Villa Carlos Paz en 2018. (c) Partes de los granizos biseccionados



Figura 3: Alta Gracia 1988. Sección delgada de un granizo de unos 7 cm de diámetro. Vistas (a) entre polarizadores cruzados (los colores representan cristales) y (b) luz transmitida (en la que se ponen en evidencia los anillos debidos a pequeñas burbujas) El embrión del granizo es de tipo cónico



Figura 4. Villa Carlos Paz 2018: Secciones delgadas de dos granizos I y II, de unos 4cm diámetro, vistas entre polarizadores cruzados (los colores representan cristales) y luz transmitida (en la que se ponen en evidencia los anillos debidos a pequeñas burbujas) El embrión del granizo I es más cónico que el II que resulta de tipo esférico

Conclusiones

Las granizadas y las piedras estudiadas de ambas tormentas guardan grandes similitudes, tanto en la distribución superficial de granizos caídos como en el aspecto propio de estos últimos. Efectivamente, ambos conjuntos de granizos estudiados tienen los mismos tipos de embriones, la estructura esponjosa, la forma lobular y oblada. A pesar de ser tormentas que se han gestado separadas por un lapso de tiempo de 30 años, producen piedras similares; por lo tanto, podría hablarse de tormentas convectivas parecidas. Por esto puede inferirse que los factores orográficos priman sobre los climáticos para la formación de estas tormentas severas.

- (1) Programa “Cosecheros de granizos Córdoba del MINCYT de la Provincia de Córdoba.
<https://mincyt.cba.gov.ar/portfolio-items/cosecheros-de-granizo/>

Referencias

- Altinger de Schwarzkopf, M. L., and L. C. Rosso (1982), Severe storms and tornadoes in Argentina, Preprints, 12th Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc., 59–62.
- Arena, Lucía E., Raúl A. Comes, Anthony Crespo Ayala, Andrés Lighezzolo, 2019, “Tormenta de granizos gigantes en la provincia de CÓRDOBA” Revista de Física de FAMAF-UNC enviado.
- Bueno Repinaldo, H. F., M. Nicolini, and Y. Skabar Gracia, 2017: Inclinación de un sistema convectivo sobre las Sierras de Córdoba y sensibilidad a modificaciones en el perfil orográfico. Meteorológica, 42, 23–42. Repinaldo et al. 2017
- Crespo Ayala y Arena, 2019 TORMENTA GRANICERA EN LA PROVINCIA DE CÒRDOBA: IMÁGENES SATELITALES. EIDIPA, Córdoba Argentina (Aceptado para su publicación)
- Crespo Ayala, Raúl Comes y Arena, 2019 TORMENTA GRANICERA EN LA PROVINCIA DE CÒRDOBA: II. IMÁGENES DE RADAR. EIDIPA, Córdoba Argentina (Aceptado para su publicación)
- Levi L., Lubart L., Nasello O., Arena L. (1989) Proceeding of Third Intern. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, pp 343
- Levi, Arena, Nasello, Lubart, 1991 Condiciones iniciales de crecimiento de granizos gigantes. CONGEMET VI. Anales del Centro Argentino de Meteorología. 23-27 set. 1991. Bs. As. Arg.
- Mapas: provincia de Córdoba
https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEWjd3KSOoPPiAhWQJ7kGHffiDW0QjRx6BAgBEAU&url=https%3A%2F%2Fwww.mapade.org%2Fcordoba.html&psig=AOvVaw1uOhrbwc7_AOxtnuzjJfiO&ust=1560954826754597
- Rasmussen y Houze, 2016, Convective Initiation near the Andes in Subtropical South

America. American Meteorological Society. V. 144, p. 2351

- Rasmussen, K. L., M. D. Zuluaga, and R. A. Houze Jr., 2014: Severe convection and lightning in subtropical South America. Geophys. Res. Lett., 41, 7359–7366, doi:10.1002/2014GL061767. Featured cover. ("AGU Editors Research Spotlight" What causes extreme hail, tornadoes, and floods in South America?, EOS, Vol. 96, 11 May 2015.)
- Teitelbaum, H., and F. D'Andrea, 2015: Deep convection east of the Andes Cordillera: four hailstorm cases. Tellus Dyn. Meteorol. Oceanogr., 67.

Agradecimientos A la Lic. Maite Grando por su apoyo incondicional en la génesis del proyecto y su colaboración en la primer caracterización experimental, en campo y en laboratorio, de los granizos. A las becarias de extensión Lucía Martínez y Sofía Sandor por su colaboración en el procesamiento, en cámara fría, de los granizos. Al Sr. José Barcelona por su colaboración en el laboratorio de Física de la Atmósfera Laura Levi de la FAMAFA-UNC. Al Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba por implementar el programa Cosecheros de Granizos Córdoba. A la SECYT por fondos para llevar a cabo parte de estas investigaciones.

26 y 27 de junio de 2019 - Ciudad Universitaria, Córdoba

TORMENTA GRANICERA EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA: III. LOS GRANIZOS

Sección
Número

Lucía E. Arena

Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación-Universidad Nacional de Córdoba
e-mail: arena@matfya.unc.edu.ar

Introducción. En las partes anteriores del presente trabajo se describió la caída de tormenta que produjo los granizos gigantes caídos en la región cercana a Villa Carlos Paz el 8 de Febrero de 2018, registrados a partir de las 1850UTC.

Objetivo. Estudiar ~~o~~ ~~de~~ ~~los~~ ~~granizos~~, con el fin de recabar información para caracterizar la tormenta de origen.

Materiales y Métodos. Los granizos fueron recolectados en diferentes direcciones de la ciudad de Villa Carlos Paz, distantes un máximo de 30 km, conservados a temperatura de -15°C y procesados en cámara fría a una temperatura de -12°C. Se realizan cortes de secciones de las piedras y se estudia la estructura interna mediante observaciones a ojo desnudo y con microscopía de transmisión con luz natural y polarizada (Levi et al., 1991) Se estudiaron más de 50 granizos de 4 a 17 cm de longitud máxima.

Resultados y discusión. En la figura 1a, se muestran algunos granizos representativos de la granizada en los que se observan diferentes estructuras externas, formas cuasi esféricas, algunos estrellados y otros con una mitad con lóbulos mientras la otra es liza (ver las secciones de la figura 1b) Internamente, los embriones (figura 2) resultan rodeados por una cantidad anillos similar, en general 4, hasta los 3 cm, indicando que, en esta etapa los granizos pueden haber realizado recorridos similares en la nube (Levi et al., 1989 y 1991) En ambos granizos, de la figura 2, es posible observar gran cantidad de burbujas de importante tamaño, de varios milímetros, que explica un crecimiento esponjoso de los mismos, característica típica de estos granizos gigantes (Dennis y Kuznetsov, 2017)



Figura 1: a) Granizos recolectados. b) Partes de granizos ~~de~~ ~~los~~ ~~granizos~~

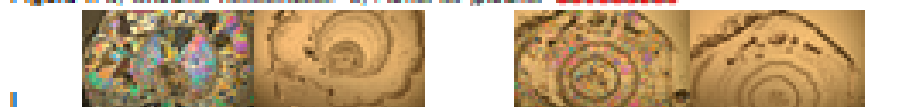


Figura 2: Secciones de pedregales de dos granizos I y II, vistas entre polarizaciones cruzadas (los colores representan cristales) y luz transmitida (en la que se ponen en evidencia los anillos debidos a pequeñas burbujas) El embrión del granizo I es más cónico que el II que resulta de tipo esférico

Referencias

- Levi, ~~Ledach~~, ~~Masella~~, ~~Arena~~ (1989) *Coexistence of Hailstones*. *Córdoba Southern Hemisphere Meteorology and Climatology*, pp 343
- Levi, ~~Arena~~, ~~Masella~~, ~~Ledach~~, 1991 Condiciones iniciales de crecimiento de granizos gigantes. CONGRESO VI. Anales del Centro Argentino de *Meteorología*, 25-27 set. 1991. *So. Am. Arg.*
- Dennis, E. J., and M. R. Kuznetsov, 2017: The impact of vertical wind shear on hail growth in simulated supercells. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 74, 641-663

Agradecimientos A la Lic. ~~Marta~~ ~~Goede~~ y los técnicos de recolección ~~Lucía~~ ~~Marín~~ ~~ez~~ ~~Soledad~~ ~~Goede~~, por su colaboración en el procesamiento, en cámara fría, de los granizos. Al Sr. ~~José~~ ~~Barcelona~~ ~~León~~ técnico del laboratorio de Física de la ~~Atmósfera~~ ~~Laura~~ ~~Levi~~ de la FAMP-UNC. Al Ministerio de Ciencia y ~~Investigación~~ ~~de~~ ~~la~~ ~~Provincia~~ ~~de~~ ~~Córdoba~~ y a la FAMP-UNC por su aporte al programa *Cosecheras de Granizos Córdoba* <https://minc.vt.cba.gov.ar/portafolio-items/cosecheras-de-granizo/>

Apéndice 4: Cosecheros de granizo y ciencia ciudadana

L. Arena

<https://www.cientopolis.org/cordoba-taller-de-ciencia-abierta-y-ciudadana/>

Publicado en Cientópolis Taller de ciencia ciudadana y en acción 2019