



Universidad de Buenos Aires

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

**Análisis espacio-temporal de la distribución de
granizo y sus entornos asociados en el sudeste
de Sudamérica en base a datos de estaciones
meteorológicas y reportes ciudadanos.**

Tesista: Agustín Granato

Director: Hernán Bechis

Co-directora: Paola Salio

A mi familia, por ayudar, bancar, insistir y estar siempre.

A Agustín Rojas, porque llegamos juntos.

A la Universidad de Buenos Aires, a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, al Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Por ser una segunda casa, porque a pesar de atravesar miles de adversidades todo el tiempo es un lugar que siempre busca lo mejor para todo el que lo habita, y permite cumplir muchos sueños. Personal docente y no docente, gracias.

A todos los profesores del DCAO, por tener siempre el mejor trato posible durante las extensas horas de clase y enseñar constantemente.

A Paola Salio, por enseñarme muchísimo, adoptarme académicamente, permitirme rozar con el sector profesional y hacerme crecer. Por darme muchas facilidades para avanzar en mi carrera, una oficina para estudiar, permitirme conocer el mundo. Siempre manteniendo un nivel de trato y de confianza muy ameno y sin perder la profesionalidad.

A Hernán Bechis, por ayudarme a aprender en el mundo de la investigación, enseñarme manejos, responsabilidades, a ser altamente profesional. Para luego aceptar ser mi director de tesis y guiarme de la mejor manera posible, entendiendo tiempos, exigiendo de buena manera, permitiendo las distensiones, las risas, los comentarios sobre Racing, pero luego volviendo a concentrarnos. Por mostrar mucha pasión y amor por la meteorología, y transmitirlo. A Paola y Hernán, espero haberlos aprovechado como debía, y ojalá sigamos cruzándonos.

A la oficina 2408 del DCAO, por aceptarme con mucha calidez y enseñarme mucho.

A Delfi y Agus, por ser mi primer grupo de amigos en la facultad, de estudio, de compañía, de mates. Por las infinitas horas pasadas en la biblioteca. La vida nos llevó por caminos separados, pero agradezco infinitamente haberlos cruzado en mi camino.

A la 'Julineta', Juli y Juani, por hacer todo mucho más fácil. Por los debates sobre los distintos temas, los resúmenes, las risas, las videollamadas pre parcial/final, los mates de Juani, y miles de cosas. Por acompañarme en todos los momentos, escuchar mis quejas, y solucionarlas.

A mis papás, por ayudar en todo, insistir en el estudio, darme confianza constantemente incluso cuando yo sabía o creía que “no llegaba”, porque siempre fueron y son prioridad mis problemas, gracias por esa entrega constante, esa confianza y ese apoyo. A mis hermanos, por permitir la risa todo el tiempo, por ser ambos un lugar sin ninguna exigencia, por compartir la música y el humor. A mi tío, por ayudar en todo y estar siempre con el mejor humor, en las buenas y malas. A mis abuelos, por interesarse todo el tiempo, apoyar y colaborar en todo lo posible, y distraerme con charlas de fútbol o alguna de las tantas anécdotas de su vida.

A Larry y Flor, por aguantarme en todo, por escucharme en miles de horas de audio o de mate este último tiempo.

A mis amigos, el ‘solcito’, por ser una vía de escape constante, por preguntar cuestiones meteorológicas, interesarse y acompañar.

Resumen

El presente trabajo de tesis aborda un análisis exhaustivo de los reportes de granizo en Argentina, integrando datos de estaciones meteorológicas y reportes ciudadanos para estudiar la frecuencia, estacionalidad y variabilidad de estos eventos. Utilizando análisis estadísticos y descriptivos, se identificaron diferencias regionales y estacionales significativas. Las regiones noroeste y sur del país mostraron una alta frecuencia de eventos, seguido por la región central del territorio (Cuyo y Córdoba), especialmente concentrados en los meses de primavera y verano.

El estudio también avanzó en la clasificación de los eventos por tamaño: granizo **no severo** (menor de 2 cm de diámetro), granizo **severo** (entre 2 y 5 cm de diámetro) y granizo **significativamente severo** (mayor a 5 cm de diámetro), destacando máximos de granizo severo y significativamente severo en Cuyo, Córdoba, el noreste y el centro este del país. Estos hallazgos subrayan patrones climáticos relevantes y su variabilidad a lo largo del tiempo.

Adicionalmente, se analizaron los reportes ciudadanos recolectados en la base SAMHI, la cual se destaca por su amplia cobertura espacial y su capacidad para registrar reportes de granizo en regiones con escasa presencia de estaciones meteorológicas. Se resaltan máximos de reportes en áreas densamente pobladas como el sur de Brasil, el área metropolitana de Buenos Aires y regiones específicas como Cuyo y las Sierras de Córdoba. Este estudio subraya la importancia de SAMHI como herramienta complementaria para ampliar el conocimiento sobre el granizo en la región.

Por último, se evaluaron los entornos meteorológicos asociados a estaciones que muestran tendencias positivas en eventos de granizo. Se analizaron los siguientes parámetros ambientales: cortante efectiva, MUCAPE e isoterma de 0 °C. Algunas estaciones evidenciaron incrementos en MUCAPE y cortante, sugiriendo futuros escenarios favorables para convección organizada y granizo severo, mientras que otras reflejaron una disminución de estos parámetros, favoreciendo la ocurrencia de granizo no severo. Se discuten las posibles causas de estas tendencias y su proyección a futuro.

Índice

1. Introducción	1
2. Información utilizada	11
Bases de datos de ocurrencia de granizo	11
Datos diarios de granizo en libretas meteorológicas	11
Planillas de granizo en Estaciones Meteorológicas	13
Reportes ciudadanos: Base de datos SAMHI	15
Datos de reanálisis ERA5	16
3. Metodología	17
Climatología de granizo 1960 - 2023	17
Cálculo de tendencias temporales de ocurrencia de granizo	17
Análisis espacio-temporal de los reportes de Planillas de granizo	19
Análisis espacio-temporal de reportes de granizo de base SAMHI	20
Análisis e identificación de parámetros en estaciones seleccionadas	20
4. Resultados	22
Climatología de granizo 1960 - 2023	22
Ciclo anual de la ocurrencia de granizo a nivel regional	26
Tendencias temporales de granizo, por estación y a nivel regional	28
Planillas de granizo	33
Base de datos SAMHI	38
Parámetros ambientales asociados al granizo en estaciones seleccionadas	44
5. Conclusiones	54
6. Bibliografía	58
7. Anexo	61

Índice de figuras

Figura 1.1. Probabilidad anual promedio global de granizo grande normalizada a un área de 100×100 km desde 1979 hasta 2015, según el modelo estadístico de Prein y Holland (2018). Figura del trabajo Prein y Holland (2018).	2
Figura 1.2. Probabilidad acumulada de granizo ($>20\%$) estimada usando las temperaturas de brillo. Los datos se ajustaron para corregir diferencias entre los instrumentos GMI y TMI. Figura del trabajo Bang y Cecil (2019).	3
Figura 1.3. Observaciones de granizo sobre Europa del periodo 2008-2017, base de datos ESWD del ESSL. Figura del trabajo Allen et al. (2019)	4
Figura 1.4. Panel izquierdo, frecuencia anual de eventos de granizo en Argentina. Panel derecho, zonas de caída de “piedra destructora” en el año 1926. Figura del trabajo Hoxmark (1927).	5
Figura 1.5. Cantidad de reportes por año de planillas de granizo.	6
Figura 1.6. Gráficos de violín que muestran la distribución de las variables termodinámicas asociadas con granizo (verde). Los reportes se dividen según su intensidad: granizo no severo (NSH), severo (SH) y significativamente severo (SSH). Figura del trabajo Bechis et al. (2024).	9
Figura 2.1. Cantidad de estaciones con menos del 20% de datos faltantes, iniciando el período del cálculo en 1900 y avanzando temporalmente hasta la actualidad.	12
Figura 2.2. Planilla de reportes de granizo donde se muestra un ejemplo de los horarios en los reportes de granizo y su información de duración en la sección “Anotaciones”.	13
Figura 2.3. Planillas de reporte de granizo del SMN simplificadas establecidas en 2022.	14
Figura 2.4. Año del primer reporte de cada estación en el período 1977-2023 indicado en la información proveniente del SMN.	15
Figura 3.1. Ubicación de las estaciones seleccionadas por las zonas establecidas.	18
Figura 4.1. Promedio anual de reportes de granizo por estación. Período 1960-2023.	23
Figura 4.2. Promedio anual de reportes de granizo por estación utilizando la interpolación de Kriging, en el período 1960 - 2023. En círculos con contornos blancos se muestran los valores en cada una de las estaciones.	24
Figura 4.3. Frecuencia porcentual por año para cada región	27
Figura 4.4. Serie temporal de cantidad de reportes para cada región (líneas azules), con media móvil cada 5 años (negro) y tendencia lineal (línea punteada roja).	31

Figura 4.5. Mapa de tendencias por estación, período 1960 a 2023 (reportes SI-NO), utilizando el método de interpolación Kriging. En sombreado, la tendencia temporal en cantidad de reportes por año. En verde las estaciones con tendencia significativa.	32
Figura 4.6. Promedio anual de ocurrencia de granizo a partir de las planillas oficiales de granizo. Período 1988 - 2023.	34
Figura 4.7. Histogramas de diámetros de granizo normalizados por región para el período 1988 - 2023. Los intervalos del histograma son: 0 - 0.5, 0.5 - 1, 1 - 2, 2 - 3, 3 - 4, 4 - 5, 5 - 6, 6 - 7, 8 - 9, 9 - 10 cm.	35
Figura 4.8. Distribución de diámetros de granizo, en días de granizo por año en el período 1988 - 2023.	37
Figura 4.9. Cantidad de reportes totales ciudadanos contenidos en la base SAMHI en el período 2018 - 2023.	39
Figura 4.10. Histogramas de diámetros de granizo de la base SAMHI en el período 2018 - 2024. Cantidad de reportes con dato de diámetro: 6173.	40
Figura 4.11. Distribución del máximo tamaño de granizo en cada retícula para la base SAMHI en el período 2018 - 2023.	41
Figura 4.12. Distribución de diámetros de granizo, en días de granizo por año en el período 2018 - 2023, base SAMHI.	42
Figura 4.13. Comparación de días de granizo por año de las tres bases disponibles en este trabajo en el período 2018 - 2023.	43
Figura 4.14. Cantidad total de reportes de granizo por año para las estaciones Aeroparque y Concordia (panel superior) y Córdoba observatorio y Formosa Aero (panel intermedio) y La Quiaca y Malargüe Aero (panel inferior) en el período 1979 - 2023.	45
Figura 4.15. Diagramas de dispersión indicando la cortante efectiva, MUCAPE y altura de la isoterma 0°C.	46
Figura 4.16. Serie temporal de los percentiles 90 y 99 de cortante efectiva en el período 1979 - 2023.	48
Figura 4.17. Serie temporal de los percentiles 90 y 99 de MUCAPE en el período 1979 - 2023.	50
Figura 4.18. Serie temporal de la altura de la isoterma media anual en el período 1979 - 2023.	52

Capítulo 1.

Introducción

La región del sudeste de Sudamérica (SESA), y Argentina en particular, es reconocida como una de las áreas de mayor frecuencia de convección húmeda profunda intensa y/o severa (Zipser et al. 2006). A nivel mundial, las pérdidas ocasionadas por eventos convectivos extremos, como granizo superior a 2.5 cm, tornados, fuertes ráfagas de viento e inundaciones han mostrado una tendencia creciente en los últimos años (Munich, 2016; Changnon, 2009). En los Estados Unidos, la pérdida anual promedio debido a tormentas convectivas severas es de \$11.23 mil millones (en U\$D de 2016), comparable con \$11.28 mil millones por huracanes (Gunturi et al. 2017). En particular, el granizo, asociado a estos sistemas convectivos, es uno de los fenómenos meteorológicos que causa mayor daño, representando una amenaza considerable para las personas, los animales y las propiedades. Afecta infraestructuras como edificaciones, vehículos y especialmente la producción agrícola, generando importantes pérdidas económicas. Particularmente en nuestro país, en Mendoza, la Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas reporta pérdidas en la producción agrícola debido al granizo en distintos años (por ejemplo: [Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas, 2014](#); [Gobierno de Mendoza, 2020](#)). El granizo también es una preocupación constante para los agricultores del Alto Valle de Río Negro durante la temporada cálida, debido a los daños significativos que pueden causar en la producción (Rodríguez and Muñoz, 2017). Incluso en la Ciudad de Buenos Aires y zonas aledañas el granizo es protagonista causando daños económicos y materiales (26 de Julio de 2006, [Infobae, 2024](#); [El 1 Digital, 2024](#)). Esto subraya la importancia de los eventos de granizo para nuestro país. Por esto, es interesante realizar un estudio de su ocurrencia, las causas y entornos asociados a los eventos que generan granizo y en ocasiones granizo severo.

Conocer las condiciones previas del entorno y los procesos de escala sinóptica hasta convectiva que favorecen la generación de tormentas de granizo constituye una herramienta fundamental para avanzar hacia una mejora del pronóstico a corto y mediano plazo y la generación de avisos y alertas tempranas. La disponibilidad de bases de datos de ocurrencia de convección húmeda profunda y fenómenos de tiempo severo permite caracterizar el espectro de condiciones favorables para la formación de las tormentas de granizo y sus diferencias con situaciones no-severas ó más favorables para otras amenazas (ráfagas de viento, tornados). Junto con esto, la disponibilidad de este tipo de bases de datos permite

cuantificar el riesgo asociado a este fenómeno, y por ende facilitar el trabajo de las agencias de gestión de riesgo, contribuyendo así a mitigar los efectos de este tipo de tormentas.

Antecedentes en el mundo

La importancia del granizo y sus consecuencias se extienden a lo largo del mundo. Numerosos trabajos han buscado lograr entender los procesos microfísicos responsables de su formación, su frecuencia de ocurrencia y factores que modulan su severidad en distintas zonas del planeta (Allen et al. 2019).

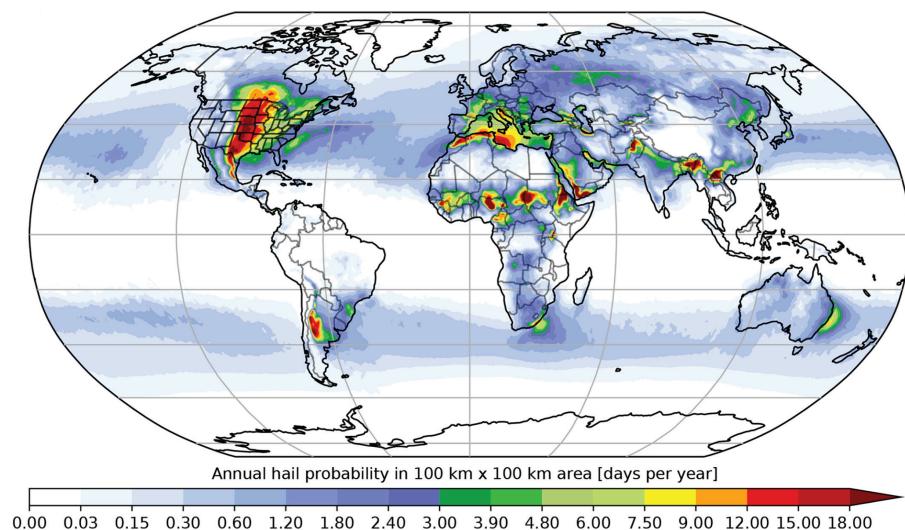


Figura 1.1. Probabilidad anual promedio global de granizo grande normalizada a un área de 100×100 km desde 1979 hasta 2015. Figura del trabajo Prein and Holland (2018).

Diversos trabajos intentan cuantificar la ocurrencia del granizo a lo largo del mundo. Prein et al. (2018) utiliza un modelo estadístico para estimar la probabilidad de granizo a nivel global (Figura 1.1), mientras que en Bang y Cecil (2019) se observa una notable frecuencia de reducción en las temperaturas de brillo de microondas, como indicador de la elevada presencia de hielo (granizo y/o graupel) en las nubes. Ambos trabajos encuentran altas frecuencias de granizo en la región del SESA.

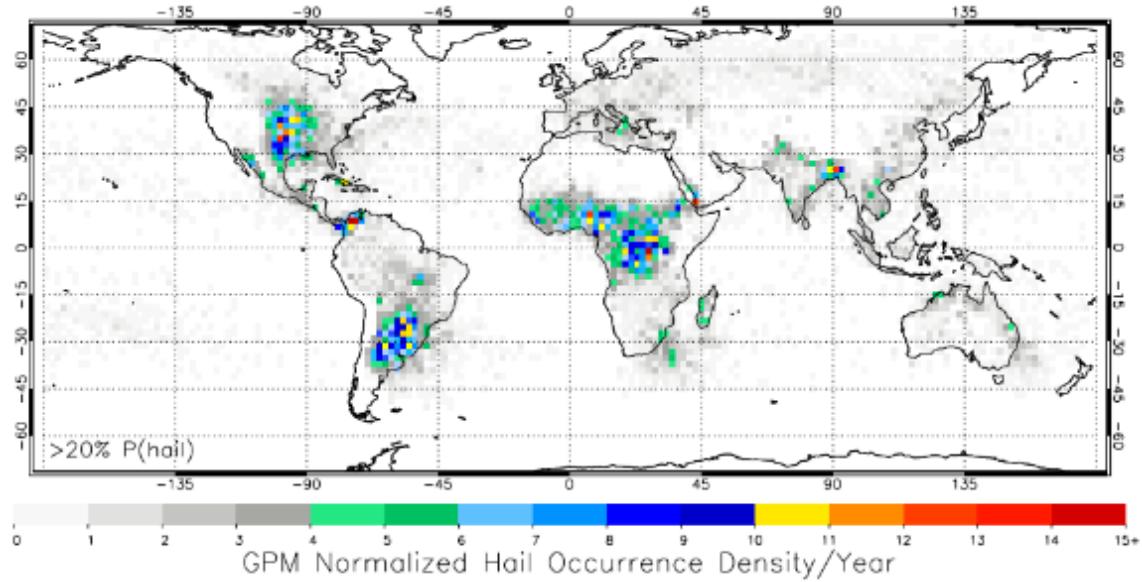


Figura 1.2. Probabilidad acumulada de granizo (>20%) estimada usando las temperaturas de brillo. Los datos se ajustaron para corregir diferencias entre los instrumentos GMI y TMI, se aplicó un filtro para nieve/hielo, se normalizaron según los pasos del satélite y el área, promediando los resultados en cuadrículas de $2 \times 2^\circ$ para suavizar el mapa. Figura del trabajo Bang y Cecil (2019).

Como se menciona en Allen et al. (2019), “Aún se desconoce mucho sobre los procesos que conducen al crecimiento del granizo y las condiciones ambientales sobre su ocurrencia, tamaño y magnitud, especialmente fuera de los Estados Unidos y Europa.” Si bien ciertos parámetros se han identificado como importantes para la ocurrencia de tormentas de granizo: CAPE, cortante, cortante efectiva (Púčik et al. 2015, Taszarek et al. 2017, Kumjian y Lombardo 2020, entre otros), también es cierto que las tormentas graniceras suelen desarrollarse en un amplio espectro de diferentes condiciones ambientales, en los que las características geográficas a nivel regional y local tienen una marcada influencia (Zhou et al. 2021). Utilizando datos de reanálisis, Taszarek et al. (2020) muestran que las diferencias entre los entornos asociados a tormentas severas en los Estados Unidos y Europa pueden llegar a ser muy marcadas. Parámetros de pronóstico desarrollados y calibrados en base a climatologías locales de eventos severos (en su mayoría centradas en las grandes planicies de los EE.UU.) pueden presentar severas deficiencias fuera de las regiones para las que fueron creados, por lo que no deben ser utilizados sin una previa evaluación.

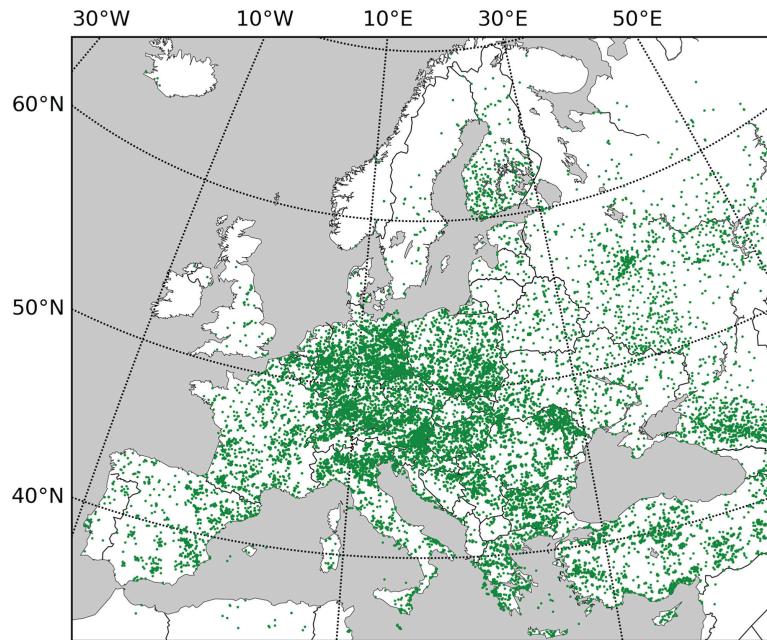


Figura 1.3. Observaciones de granizo sobre Europa del periodo 2008-2017, según la base de datos ESWD del ESSL.. Figura del trabajo Allen et al. (2019).

En este contexto, y tomando como referencia la experiencia de la 'European Severe Weather Database' (Dotzek et al. 2009), una base de datos de reportes ciudadanos gestionada por el European Severe Weather Laboratory (ESSL, Figura 1.3), investigadores, servicios meteorológicos y aficionados de varios países de Sudamérica se encuentran colaborando para generar una base de datos de amenazas meteorológicas y sus impactos a nivel sudamericano (SAMHI, <https://samhi.cima.fcen.uba.ar/>, Salio et al. 2024). Esta base de datos busca complementar reportes oficiales con otros obtenidos a partir de redes sociales, diarios digitales y redes de aficionados, lo que permite una mayor cobertura territorial y una mejor descripción de los fenómenos e impactos asociados. En particular, la ocurrencia de tormentas de granizo que afectan áreas pobladas genera una fuerte disrupción de las actividades cotidianas, lo que suele traducirse en numerosos reportes en redes sociales. La recolección sistemática y con control de calidad de esta información resulta sumamente útil para realizar investigaciones enfocadas en este tipo de tormentas, a su vez que son un insumo fundamental para una correcta cuantificación de las capacidades de detección de las herramientas derivadas de sensores remotos.

Antecedentes en Argentina y en la región

En Argentina, fuera de períodos específicos o de proyectos de alcance local, la recolección sistemática de información acerca de eventos de granizo es escasa o de difícil acceso. El primer antecedente del estudio de granizo sobre nuestro país es el de Hoxmark (1927), donde se estudió la frecuencia anual en 83

estaciones meteorológicas como así también la época del año en la cual se registraron los eventos. Además realiza un estudio de las zonas que se vieron afectadas en el año 1926 por granizo destructivo (Figura 1.4).

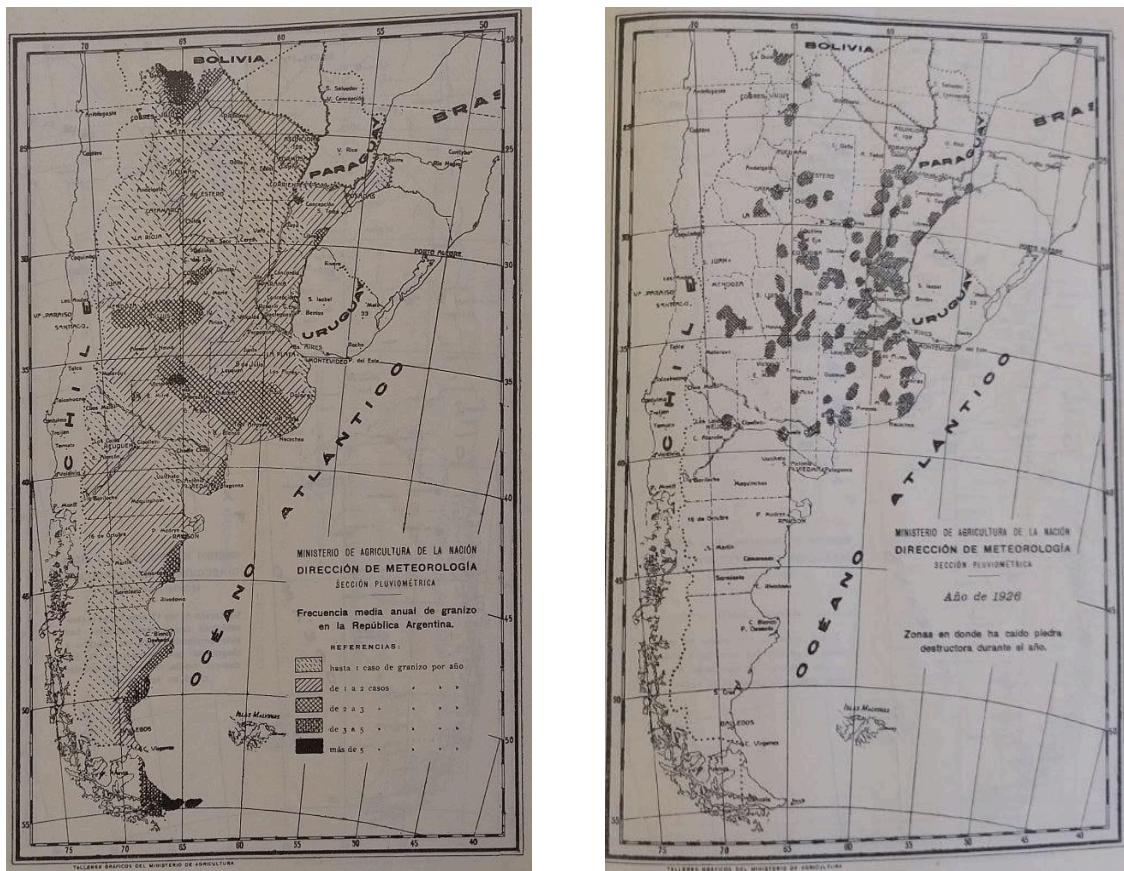


Figura 1.4. Panel izquierdo, frecuencia anual de eventos de granizo en Argentina. Panel derecho, zonas de caída de “piedra destructora” en el año 1926. Figura del trabajo Hoxmark (1927).

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dispone de observaciones de ocurrencia de granizo a partir de su red de estaciones oficiales, algunas de ellas casi centenarias. Si bien estos datos permiten realizar climatologías en las que se analizan tanto la distribución espacial de los eventos de granizo como sus tendencias a largo plazo, como en Mezher et al. (2012), esta red tiene muy baja densidad espacial, lo que se suma a la falta de detalles acerca de hora de ocurrencia, tamaño e impactos asociados en la mayoría de los reportes. Esto hace que la información que se puede extraer sea limitada. Sumado a este problema, el reporte en planillas de granizo, que si bien cuentan con información detallada sobre cada evento, no es una actividad obligatoria en las estaciones meteorológicas. Muchas veces el registro de las estaciones oficiales no resulta ajeno a las condiciones socioeconómicas del país, observándose que el número de reportes en la base de datos se reduce considerablemente en períodos de crisis económicas

(inicios de la década de 1990 y el 2001) y de salud (la pandemia de COVID-19 durante el 2020) (Figura 1.5).

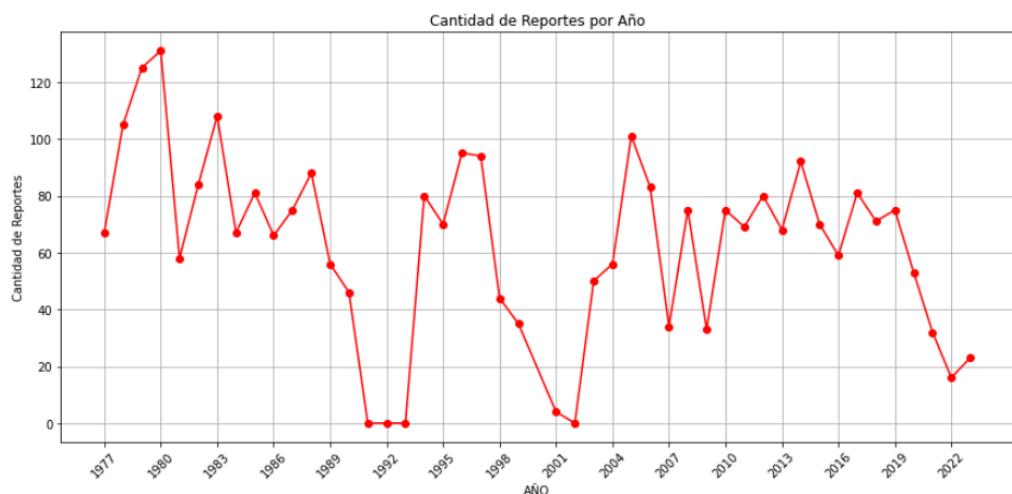


Figura 1.5. Cantidad de reportes por año en planillas de granizo

Diversos estudios han demostrado la alta incidencia de tormentas de granizo en la región, utilizando tanto mediciones directas como observaciones remotas. Mezher et al. (2012) demuestra la alta frecuencia de granizo en dos regiones marcadas del país. La primera sobre las provincias de Mendoza y Córdoba, y la segunda sobre la costa sur de la Patagonia. Sobre la primera región, la frecuencia más alta de granizo se encuentra sobre la provincia de Mendoza al pie de los Andes y extendiéndose hacia el este, con una ocurrencia de 3.2 eventos por año, esta zona se extiende hacia el este llegando hasta Santa Rosa, La Pampa. El segundo máximo de esta región se encuentra al este de las Sierras de Córdoba, en las estaciones de Río Cuarto y el aeropuerto de la ciudad de Córdoba (con 2.01 y 2.25 eventos de granizo por año respectivamente). En las provincias de Mendoza y San Luis, la frecuencia de tormentas de granizo severo es significativa; en alrededor del 8% de los días de la temporada cálida (primavera y verano) se registran granizos superiores a 2 cm (Rosenfeld et al. 2006). Asimismo, la zona central de Córdoba suele experimentar granizo severo (Mezher et al. 2012; Matsudo y Salio 2011; Rasmussen et al. 2014), alcanzando en ocasiones tamaños gigantescos (Kumjian et al. 2020). Sobre la segunda región de alta frecuencia de eventos identificada por Mezher et al. (2012), la costa sur de la Patagonia presenta un valor de 3.6 eventos de granizo por año, aunque hay que tener en cuenta que es posible que la gran mayoría de estos eventos registrados como granizo pueden corresponder a graupel u otros tipos de precipitaciones sólidas. En esta zona, el desarrollo de celulares abiertos en aire frío generando gotas congeladas y/o graupel es mucho más frecuente que los eventos más intensos de convección húmeda

profunda capaz de generar granizo.

A parte de estas dos marcadas regiones de mayor frecuencia, en Mezher et al. (2012) se identifican dos estaciones, ambas ubicadas en el norte del país, que reportan la mayor frecuencia media anual de granizo en la Argentina. Estas son las estaciones de La Quiaca, provincia de Jujuy (3459 m de altura sobre el nivel del mar) con un promedio de 4.5 eventos de granizo por año, y Bernardo de Irigoyen, Misiones (845 m de altura) con 4.8 eventos por año. Marcelino et al. (2004) estudiaron los eventos de granizo en el estado brasileño vecino de Santa Catarina, encontrando una frecuencia regional máxima en Sao Jose do Cedro, una ciudad muy cercana a Bernardo de Irigoyen, con un valor medio anual de 5 eventos por año, lo que indica concordancia entre ambos trabajos y confirma que esta región se encuentra afectada por este fenómeno.

La distribución temporal de la ocurrencia de granizo es otro aspecto que analizan los trabajos mencionados previamente. Mezher et al. (2012) muestra que en el oeste del país, al norte de 38° S, los meses de verano tienen la mayor frecuencia de eventos de granizo, seguidos por la primavera (1.6 y 0.6 promedio de eventos de granizo respectivamente). En estas dos estaciones ocurren entre el 80 y el 90% del total de eventos anuales. Durante el invierno, la frecuencia de granizo es casi nula. Sobre el centro del país, la frecuencia máxima se da durante la primavera, siendo considerable el verano también. Este ciclo se debe a la variación del patrón de precipitación sobre esta región, ya que presentan una temporada con abundantes lluvias y otra con precipitaciones escasas o nulas. El noreste también cumple con esta frecuencia temporal, teniendo los mínimos de precipitación hacia finales del invierno (Agosto/Septiembre). Analizando el ciclo diurno de las tormentas asociadas a granizo desde los satélites de microondas Bruick et al. (2019) quien realiza un estudio al este de los Andes y sobre las Sierras de Córdoba, encuentra el máximo de frecuencia se da durante la tarde, comenzando la convección a las 1700 UTC, extendiéndose hacia la noche. Este máximo marcado en las horas de la noche es coincidente con el pico de lluvia intensa a las 0600 UTC para esta región, mostrado por Matsudo y Salio (2011). Es importante mencionar que Bruick et al. (2019) utiliza los proxys derivados de datos satelitales de Bang y Cecil (2019), lo que habilita una mejor cobertura espacial y temporal, permitiendo describir el ciclo diurno. Sin embargo, estas estimaciones aún carecen de una validación robusta con observaciones en superficie en la región, por lo que esfuerzos para su calibración a nivel local se encuentran en proceso (Galligani et al., 2024).

Martins et al. (2017) realiza una climatología de las tormentas de granizo destructivas sobre el sur de Brasil. Consigue resultados horarios en el ciclo diurno similares a los obtenidos por Bruick et al. (2019) sobre el centro del país, pero además observa un máximo relativo entre las 04-06 hs de la madrugada (07 - 09 UTC) en el estado de Paraná (lindante con el noreste de Misiones), asociado a que esta y la parte noreste de Argentina es una zona de alta frecuencia de sistemas convectivos de mesoscala, los cuales suelen tener su fase madura tarde en la noche (Salio et al. 2007).

Bruick et al. (2019) investiga las características y condiciones sinópticas en las que se dan las tormentas de granizo en Sudamérica, utilizando datos del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) - Precipitation Radar (PR). Adaptando la metodología de caracterización de modos convectivos en base a datos de radar propuesta en Mulholland et al. (2018) a datos del TRMM, Bruick et al. (2019) clasifica a los núcleos convectivos con alta probabilidad de granizo en las categorías de celdas discretas, multicelulares organizadas o multicelulares desorganizadas. Se analizaron un total de 264 tormentas de alta probabilidad de granizo entre septiembre y marzo 1998-2013, y los resultados sugieren una mayor incidencia de modos convectivos multicelulares en la producción de granizo, por supuesto teniendo en cuenta las limitaciones en la detección del mismo a través de datos satelitales ya mencionadas. En nuestra región, la falta de informes sistemáticos sobre tormentas dificulta la correlación entre el granizo detectado por el radiómetro y las observaciones en tierra. Garuti et al. (2024) realizó un estudio de la performance de un algoritmo de clasificación de hidrometeoros (HID) de lógica difusa presentado en Dolan et al. (2013) para la detección de granizo donde se analizaron doscientos cuarenta y tres casos con diferentes modos de convección y tamaños de granizo para demostrar la metodología de validación. Dicho trabajo analizó numerosos casos a lo largo de los radares de Argentina pero es relevante destacar que usando la información de Córdoba (RMA1), el 11 de diciembre de 2018 a las 18 UTC se reportó granizo de hasta 8 cm en Arroyito y el sistema HID lo detectó correctamente. Un segundo caso se da el 3 de noviembre de 2021 a las 18:40 UTC, en El Soberbio, Misiones, las tormentas con granizo intenso dañaron cultivos y viviendas, pero el HID no lo detectó debido a la atenuación por lluvias intensas. Durante el 11 de agosto se compararon las mediciones del RMA5 y un radar de banda S en Brasil, encontrando diferencias en las mediciones atribuibles a resonancia y atenuación en la banda C.

Bechis et al. (2024) analizan una muestra de eventos de granizo con diámetros disponibles en Sudamérica, comprobando que valores altos de CAPE y cortante profunda favorecen el desarrollo de tormentas con potencial para producir granizo, mostrando una relación positiva entre el tamaño del

granizo y estos valores, más notablemente para el segundo parámetro (Fig. 1.6 a-b). Además, no encuentran una correlación directa entre el tamaño del granizo y la altura de la isoterma de cero grados aunque estos valores resultan menores que los asociados a reportes de ráfagas de viento destructivas provenientes de tormentas convectivas (Fig. 1.6 c). Una isoterma de cero más baja reduce el riesgo de derretimiento de las piedras de granizo por debajo de ese nivel. El derretimiento total de una piedra de granizo depende de su masa; sin embargo, el calor necesario para que esto ocurra se transfiere a través de la superficie. Así, debido a que la relación entre área y volumen es mayor en granizos de menor tamaño, estos son más vulnerables al derretimiento que los de mayor diámetro (van den Heever and Cotton, 2004). Por lo tanto, un aumento en la altura de la isoterma de cero grados impacta más a los granizos pequeños.

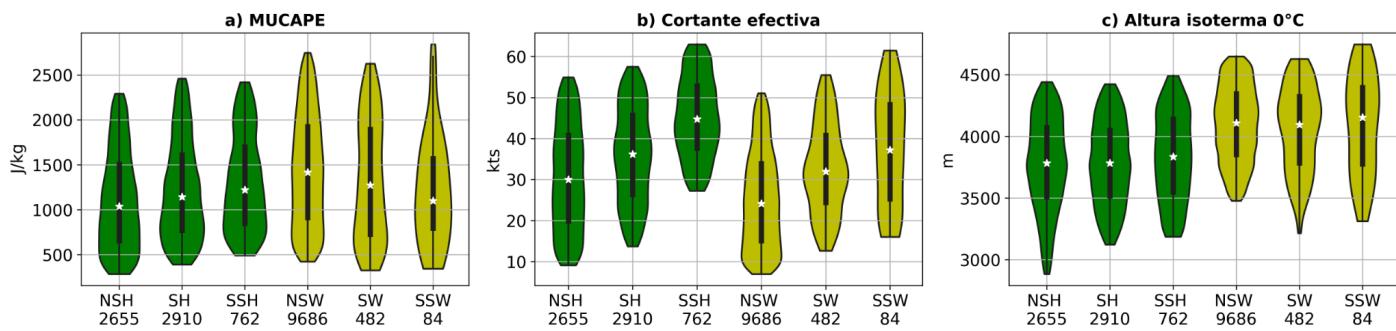


Figura 1.6. Gráficos de violín que muestran la distribución del a) CAPE de la parcela más inestable, b) cortante efectiva y c) altura de la isoterma de 0°C asociadas a reportes de granizo (verde) y ráfagas de viento destructivas (amarillo) en Sudamérica. Los reportes se dividen según su intensidad: granizo no severo (NSH), severo (SH) y significativamente severo (SSH). Figura del trabajo Bechis et al. (2024)

Motivación y Objetivos

Debido a la importancia de la ocurrencia de granizo y su impacto social, se busca caracterizar la distribución espacio-temporal de las tormentas de granizo en el SESA, y analizar las condiciones favorables para su ocurrencia, a partir de la generación de una base de datos de granizo que combine observaciones oficiales, reportes ciudadanos y diversas fuentes no oficiales.

Objetivos específicos

1. Analizar la distribución espacio-temporal del granizo en Argentina, continuando el análisis realizado por Mezher et al. (2012) a partir de los datos de estaciones oficiales hasta la actualidad.

2. Analizar la ocurrencia diaria de eventos de granizo en el SESA a partir de información de estaciones meteorológicas oficiales y reportes no oficiales recolectados en la base de datos de eventos severos. Determinar las ventajas y desventajas de combinar ambas fuentes de información.
3. Analizar la distribución espacio-temporal de la ocurrencia de granizo severo (>2 cm) y no severo en SESA a partir de información detallada, disponible en la base de datos de eventos severos y planillas de granizo del SMN. Determinar regiones favorables para el desarrollo de tormentas de granizo severo.
4. Analizar las condiciones en las que se produce el granizo registrado para ciertas estaciones meteorológicas que resulten de interés en base a los resultados obtenidos, identificando parámetros ambientales adecuados que permitan entender las condiciones de granizo en cada estación seleccionada.

Capítulo 2.

Información Utilizada

Bases de datos de ocurrencia de granizo

En este trabajo se utilizan distintas bases de datos de ocurrencia de granizo de alcance nacional y regional, las mismas son:

1. Datos diarios de granizo en Libretas Meteorológicas
2. Planillas de granizo en Estaciones Meteorológicas
3. Reportes ciudadanos: Base de datos SAMHI

A continuación se describe cada una de ellas y los desafíos presentes en el uso de las mismas y su comparación.

Datos diarios de granizo en libretas meteorológicas

La primera base de datos utilizada consiste en reportes diarios de ocurrencia de granizo informados por las estaciones meteorológicas oficiales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) que se muestran en la Tabla ANEXO I. Dicha base de datos fue compilada por Mezher et al. (2012) con el fin de realizar la climatología de granizo en Argentina en el período 1960-2008 a partir de libretas meteorológicas. Los observadores en las estaciones tienen la obligación de completar estas libretas mensualmente. La base de datos cuenta con información en algunas estaciones que data desde 1908 y fue extendida con los datos más recientes hasta 2023. Es importante mencionar que estos datos pasaron por un exhaustivo control de calidad llevado a cabo por Mezher et al. (2012), donde se encontraron reportes que no figuraban en la base original del SMN e incluso cambios de ubicación de ciertas estaciones. Debido a la aleatoriedad del fenómeno y a la poca distancia en la reubicación de las estaciones, Mezher et al. (2012) consideró esas series como homogéneas y aquí se mantendrá ese criterio. Estos datos corresponden únicamente al suceso de granizo, es decir, el observador de cada estación completa si se registró la observación durante el día correspondiente, estos datos no contienen información sobre el diámetro o el horario del fenómeno. Sin embargo, esta información es hasta el momento la única que cuenta con un registro lo suficientemente extenso en el tiempo como para analizar de manera robusta la ocurrencia de granizo en la Argentina y sus tendencias temporales.

Para seleccionar las estaciones meteorológicas adecuadas para el análisis, se solicitó la información disponible en el SMN respecto de los períodos en los que cada estación reportó y los correspondientes períodos faltantes. Se consideró que una serie era adecuada para ser incluida en el análisis cuando contaba con menos del 20% de datos faltantes entre una fecha determinada y la actualidad. En base a esta información, se pudo constatar un considerable aumento de la cantidad de estaciones con menos del 20% de días faltantes a partir del año 1960 (Figura 2.1) por lo que se estableció el período 1960-2023 para este estudio con la presente información. Desafortunadamente, algunas estaciones (principalmente del INTA) no cuentan con información de faltantes. Dada la característica poco frecuente de la caída de granizo, es posible que existan períodos relativamente extensos en los que no se registre el fenómeno en una estación. Sin información respecto de la continuidad de las observaciones en ese período, sólo se puede especular si estos períodos largos sin datos se deben a una ausencia del fenómeno o a que la estación no estaba en funcionamiento. Considerando este nivel de incertidumbre de esas series de datos, las mismas no fueron tenidas en cuenta en el presente análisis.

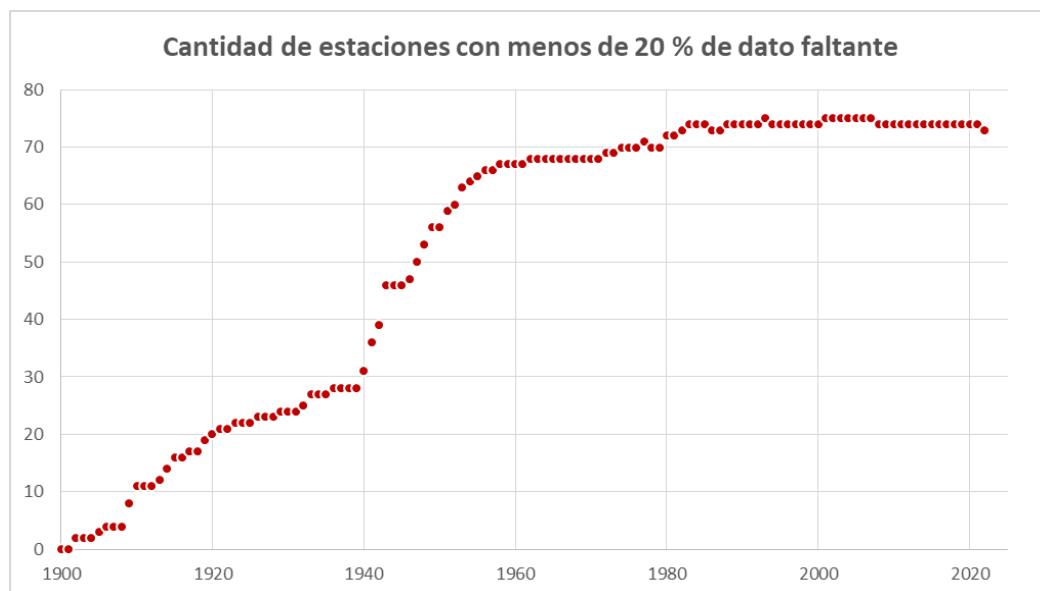


Figura 2.1. Cantidad de estaciones con menos del 20% de datos faltantes, iniciando el período del cálculo en 1900 y avanzando temporalmente hasta la actualidad.

Por todo este proceso de verificación fueron apartadas las siguientes estaciones: Oliveros Inta, Marcos Juárez Inta, Oberá Aero, General Paz, Las Lomitas, Bernardo de Irigoyen Aero, Bella Vista Inta, Paso de Indios, San Antonio Oeste Aero, Viedma Aero, Ushuaia Aero, Perito Moreno, Lago Argentino y Gobernador Gregores.

Planillas de granizo en Estaciones Meteorológicas

La segunda base de datos corresponde a las planillas de granizo de cada estación meteorológica oficial (SMN - INTA) adicionales a la libreta meteorológica. Estas planillas, además de la fecha del suceso, presentan información horaria (hora de inicio y fin) y descriptiva del fenómeno, incluyendo el diámetro promedio y máximo del granizo, su forma (cónica, esférica, otras) y dureza, el porcentaje de la superficie de suelo cubierta. Además incluyen información de fenómenos en la vecindad de la estación e información de otras variables como el viento y el tiempo significativo.

Si bien la información de estas planillas se encuentra digitalizada, la información de la hora de ocurrencia se presenta en un apartado de “Anotaciones” (Figura 2.2), cuyo formato irregular dificulta el análisis. Debido a ello, se realizó un trabajo manual de extracción de esta información. De esta manera, cada reporte de granizo en estas planillas puede ser asociado a una fecha y hora determinada.

Figura 2.2. Planilla de reportes de granizo donde se muestra un ejemplo de los horarios en los reportes de granizo y su información de duración en la sección “Anotaciones”.

Estas planillas han sido de carácter no-obligatorio en las estaciones, por lo que no es posible determinar la completitud de las series. Con el fin de facilitar la tarea del observador, el SMN decidió simplificarlas en el año 2022, manteniendo la información más relevante. En estas nuevas planillas se solicita información

de duración del fenómeno, tamaño (diámetro promedio y máximo), cantidad (que refiere al porcentaje de superficie cubierta), forma, precipitación líquida (y en qué momento de esta cayó el granizo) y viento (dirección y velocidad). En las planillas figura “NO GRANIZÓ” si no ocurrió el evento en todo el mes (Figura 2.3).

Estación OMM Nº		87548	Mes:	9	Año:	2022											Servicio Meteorológico Nacional Argentina					
Nombre estación		Junin Aero					NOTA: completar con "NO GRANIZÓ" si no ocurrió el evento en todo el mes										NO GRANIZÓ					
DIA DEL MES	DURACION		TAMAÑO		CANTIDAD			FORMA			PRECIPITACION LIQUIDA (lluvia)						VIENTO			NOTAS		
	Inicio	Fin	Diametro promedio (en cm)	Diametro maximo (en cm)	Menos del 50% de la superficie cubierta	Mas del 50% de la superficie cubierta	Espesor promedio de la capa de granizo (en cm)	Esferica	Conica	Otra	La caida de granizo de dia ...	Antes de la lluvia	Despues de la lluvia	Al mismo tiempo	Debil	Moderada	Fuerte	Tasa promedio (en mm/h)	Acumulado (en mm)	Direccion (en grados)	Velocidad (en km/h)	
2	14:15	14:30	2.5	5.5	X		1.5	X				X		X		X		25	30	195	65	

Figura 2.3. Planillas de reporte de granizo del SMN simplificadas establecidas en 2022.

Las planillas de granizo, comenzaron a utilizarse a partir del año 1977, aunque no todas las estaciones iniciaron sus registros en ese año (Figura 2.4). Para utilizar las estaciones en un período común, es necesario elegir un año en el que la mayoría de las estaciones hayan comenzado a reportar. Es necesario destacar que se constataron casos en los que una misma estación registró un evento de granizo en las planillas de granizo, pero ese evento no se reflejaba en los datos diarios de la libreta meteorológica. En esos casos, el evento fue incorporado a la serie de la estación correspondiente en la base de datos diarios de granizo en libretas meteorológicas

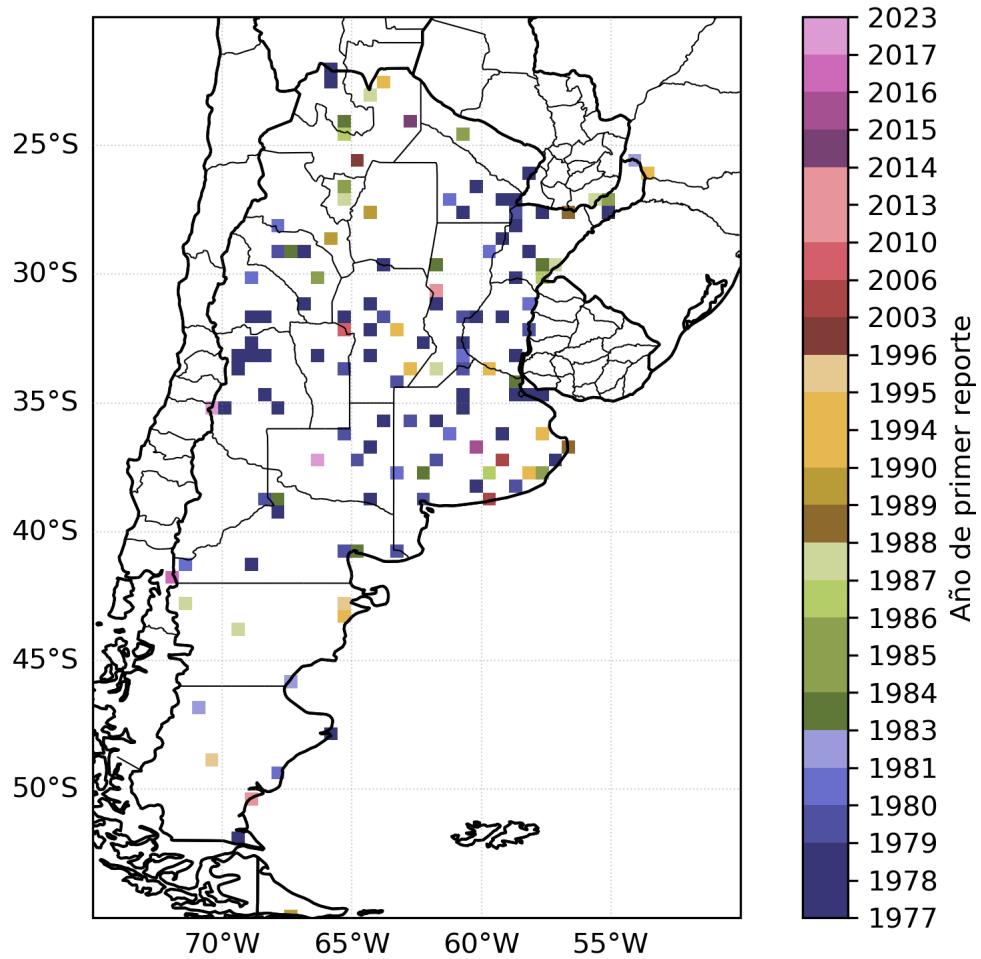


Figura 2.4. Año del primer reporte de cada estación en el período 1977-2023 indicado en la información de planillas de granizo proveniente del SMN.

Reportes ciudadanos: Base de datos SAMHI

La base de datos de amenazas meteorológicas y sus impactos de America del Sur (SAMHI, <https://samhi.cima.fcen.uba.ar/>, Salio et al., 2024) cuenta con reportes de granizo recolectados a partir de búsquedas en redes sociales, periódicos digitales, foros, observaciones oficiales, entre otras. SAMHI se actualiza regularmente desde 2018 hasta el presente. Además, esporádicamente se incorporan reportes anteriores a ese período, incluyendo información de publicaciones científicas relacionadas, boletines de divulgación, etc. Esta base de datos incluye información de granizo de Argentina, Brasil, Chile, Uruguay y Paraguay. Datos de este último país aún no cuentan con control de calidad, por lo que no serán incluídos en esta tesis. Se debe tener en cuenta que los períodos de reportes en cada país no coinciden, Brasil:

reporta continuamente desde el inicio de 2018, Argentina: temporadas cálidas de 2018 a 2020 y desde 2021 reporta continuamente, Uruguay: reporta continuamente desde Agosto de 2021 y Chile sólo hay algunos reportes esporádicos (uno de 2019 y dos de 2020).

La base de datos SAMHI cuenta con información descriptiva del granizo (diámetro máximo, imágenes/video), los impactos asociados y su localización espacial y temporal. Cada reporte de esta base es verificado por personal calificado, cada reporte se valida espacial y temporalmente, utilizando herramientas provistas por los sensores remotos, incluyendo cada reporte la incertidumbre evaluada en cada caso.

La utilización de esta base permite analizar las frecuencias temporales y espaciales de granizo en Argentina y la región desde otro punto de vista, dada la mayor cobertura espacial que trasciende las fronteras de nuestro país, en comparación con los datos de estaciones oficiales anteriormente mencionadas. Además, la comparación con los conjuntos de datos de estaciones permite identificar virtudes y deficiencias en la red oficial de estaciones de superficie. No fue necesario un trabajo de adaptación de estos datos debido a que el formato estandarizado de los reportes simplifica su manipulación.

Datos de reanálisis ERA5

Para el análisis de las condiciones en las que se da el granizo en las estaciones elegidas, se construyen los perfiles verticales en la ubicación de las mismas utilizando datos de reanálisis ERA5. El mismo tiene un espaciamiento horizontal aproximado de 31 km y 137 niveles híbridos de presión sigma en el plano vertical, desde la superficie hasta 0.01 hPa. Se utilizaron los datos en los niveles nativos del modelo que cuentan con mayor resolución en la capa límite comparado con los productos interpolados en niveles de presión, lo que permite una mejor representación del perfil vertical de la atmósfera.

3. Metodología

Climatología de granizo 1960-2023 en base a datos diarios de estaciones meteorológicas

A partir de la base de **datos diarios de granizo en libretas meteorológicas** y agregando los reportes que no sean coincidentes con la base mencionada, de las **planillas de granizo** en el período 1960 - 2023 se calcula la frecuencia absoluta de ocurrencia de eventos de granizo y partir de esta información se obtiene la cantidad de días por año de granizo en todo el año o en las estaciones de Diciembre - Enero - Febrero (DEF, verano), Marzo - Abril - Mayo (MAM - Otoño), Junio - Julio - Agosto (JJA, invierno) y Septiembre - Octubre - Noviembre (SON, primavera).

La información de las estaciones se interpola a una retícula de 0.5 y 0.5 grados en latitud y longitud respectivamente sobre la Argentina utilizando el método de interpolación de kriging empleado con éxito anteriormente en Mezher et al. (2012). Este método utiliza herramientas estadísticas para describir la distribución espacial de las variables, presuponiendo que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. Para la implementación de este método se utiliza la función OrdinaryKriging con un modelo de variograma lineal de la librería de python PyKrig (Murphy, et al. 2024).

Cálculo de tendencias temporales de ocurrencia de granizo, por estación y a nivel regional

Se realiza una análisis de la evolución temporal de ocurrencia de granizo en Libretas Meteorológicas en el período 1960 - 2023. Las regiones seleccionadas para el análisis se muestran en la Figura 2.5, y son coincidentes con Mezher et al. (2012) basada en la correlación lineal de las series anuales de todas las estaciones. Como se observa en la Figura 2.5, estas regiones incluyen:

- **Cuyo:** Mendoza y San Juan.
- **Noroeste:** Salta, Jujuy, La Rioja y Tucumán.
- **Noreste:** Misiones, Corrientes, Chaco y Formosa.
- **Córdoba.** Todas las estaciones de esta provincia.
- **Centro Este:** Santa Fe, Entre Ríos, Norte de Buenos Aires (latitudes menores a 36°S) y La Pampa.
- **Sur de Buenos Aires:** Sur de Buenos Aires (latitudes mayores a 36°S)
- **Patagonia Norte:** Río Negro y Chubut.

- **Patagonia Sur:** Santa Cruz y Tierra del Fuego.

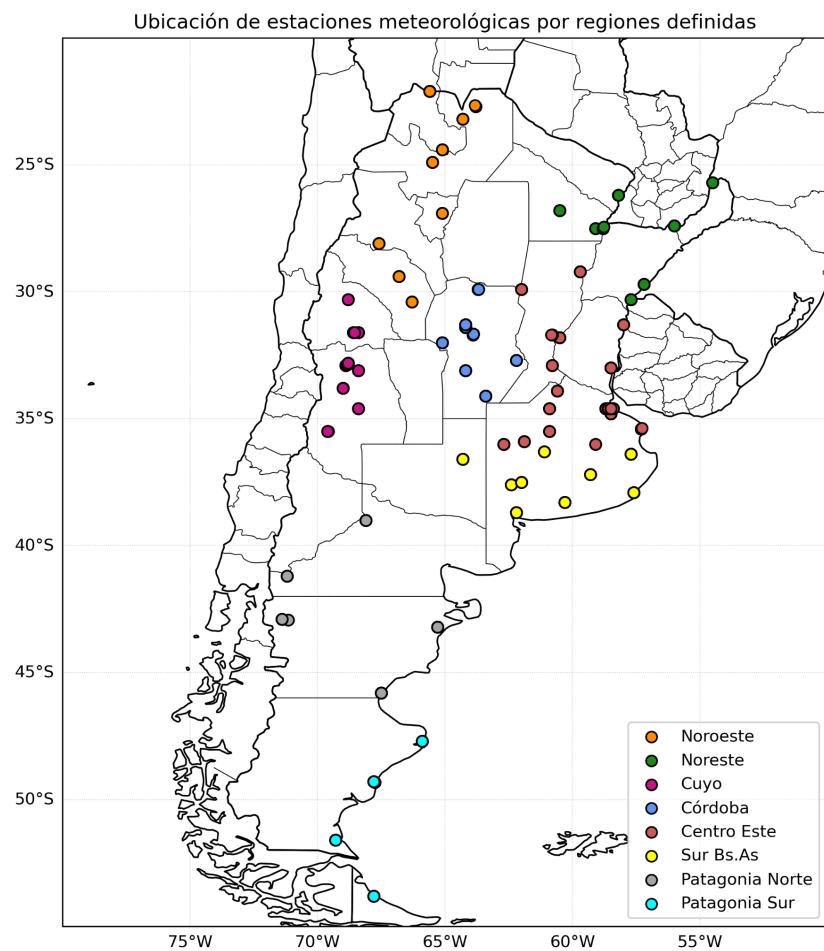


Figura 3.1. Ubicación de las estaciones seleccionadas por las zonas establecidas.

Además del análisis a nivel regional, se analizan también las tendencias temporales de la ocurrencia de granizo al nivel de cada estación para identificar ubicaciones específicas en las que estas tendencias son más relevantes. En ambos casos, la tendencia se calcula sumando los reportes totales por año de cada estación -o en todas las estaciones de cada región- y luego utilizando la función *linregress* de la librería SciPy (Virtanen et al., 2020) para realizar una regresión lineal sobre los datos. Esta función ajusta una línea recta a los datos utilizando el método de mínimos cuadrados ordinarios. A las tendencias calculadas se le realiza un test de significancia. Partiendo de una hipótesis nula (H_0) que establece que la tendencia no es significativa, se calcula el *p* valor utilizando el estadístico de T-Student, el cual representa la probabilidad de obtener los datos observados si la H_0 fuera cierta. Si el *p* valor es menor a 0.05 (valor establecido) hay menos del 5% de probabilidad de obtener los datos observados si realmente la tendencia no es significativa. Por lo tanto, como es un valor de probabilidad muy bajo, rechazamos la

hipótesis nula y decimos que la tendencia es estadísticamente significativa. Por otro lado, si el p valor mayor o igual a 0.05 entonces no hay suficiente evidencia para decir que la tendencia es significativa.

Análisis espacio-temporal de los reportes contenidos en Planillas de granizo en Estaciones Meteorológicas.

Como se mencionó anteriormente, las planillas de granizo comenzaron a utilizarse en 1977. Al no contar con información con respecto de posibles períodos faltantes en los registros de planillas, el análisis de esta base de datos resulta más complejo y de características exploratorias. Es por ello que se seleccionaron aquellas estaciones cuya primera observación fuera en el año 1988 o antes (ver Fig. 2.4), de manera de incluir la mayor cantidad de estaciones posibles en un período coincidente de 35 años. Hay que tener en cuenta que si bien hay algunas estaciones en el que su primer reporte es cercano a 1977, eventualmente dejaron de reportar o no tuvieron más eventos de granizo, lo que es difícil establecer. Para estudiar la distribución espacial de los reportes, estos fueron interpolados a una grilla regular de 0.5 x 0.5 grados de latitud y longitud. Al realizar este grillado, varias estaciones cercanas entre sí pueden quedar incluidas en un mismo punto de retícula. Para tener esto en cuenta, se analizarán los días de granizo. Esto quiere decir que, si en un mismo punto de retícula para un mismo día coexisten reportes de granizo de varias estaciones, o varios reportes de la misma estación, en el cálculo se considera como un sólo día con granizo.

Además, a partir de los datos contenidos en estas planillas se realizó un análisis de la distribución espacio-temporal del granizo para diferentes umbrales de diámetro del granizo. En particular, se buscó identificar regiones propensas a la ocurrencia de granizo de diferentes niveles de severidad, definidos en base a su tamaño:

- **Granizo no severo:** menor a 2 cm de diámetro.
- **Granizo severo:** entre 2 y 5 cm de diámetro.
- **Granizo significativamente severo:** mayor a 5 cm de diámetro.

Se realizaron histogramas del diámetro del granizo en cada región, con el objetivo de identificar las categorías más frecuentes en cada una de ellas. Las frecuencias fueron normalizadas respecto a la cantidad de reportes para cada diámetro por la cantidad total de los reportes en cada región. Para

extraer mayor información en las categorías más bajas de tamaño, se consideran los intervalos de 0 cm a 0.5 cm, de 0.5 cm a 1 cm, mientras que para los reportes de mayor tamaño, se emplean intervalos de centímetros completos de manera progresiva.

Análisis espacio-temporal de reportes de granizo en la base SAMHI en Argentina y Sudamérica.

Se describen en este trabajo las características de base de datos de granizo contenida en SAMHI (<https://samhi.cima.fcen.uba.ar/>, Salio et al. 2024), a partir de un análisis espacio-temporal de la ocurrencia de granizo en Argentina y el resto de países que forman parte de esta iniciativa: Uruguay, Chile y Brasil para el período 2018 - 2023. De igual manera que para las planillas de granizo, se realiza una interpolación a una grilla de 0.5 x 0.5 grados y se calculan los días con granizo. Debido a que la base cuenta con reportes ciudadanos, en zonas muy densas poblacionalmente se cuenta con muchos reportes para una misma situación. Es por ello que es necesario analizar los días de granizo para mitigar esta situación.

Además, se realizó un estudio de la distribución espacial de los reportes de granizo de diferentes categorías de tamaño en toda la región, manteniendo los umbrales de severidad ya mencionados. Adicionalmente, se analizó la distribución de tamaños de granizo en esta base de datos para toda la región por medio de un histograma normalizado.

Análisis de parámetros ambientales asociados al granizo en estaciones seleccionadas

En base a los resultados de la climatología en base a datos de estaciones de libretas meteorológicas, se identificaron estaciones relevantes y representativas de las diferentes regiones tanto por su alta frecuencia de ocurrencia de granizo, así como presentar tendencias temporales significativas de ocurrencia del fenómeno. En estas estaciones, se analizaron diferentes parámetros ambientales que han sido identificados como relevantes para el estudio de la convección húmeda profunda y las tormentas de granizo en general. Se analizaron tres parámetros, la energía potencial disponible para la convección de la parcela más inestable (MUCAPE), la cortante efectiva y la altura de la isoterma de cero grados sobre el nivel del suelo. Es necesario definir estos parámetros para entender por qué los analizamos. El CAPE es la energía potencial disponible en la atmósfera para la convección, es decir, la cantidad de energía que ganaría una parcela al ascender desde su nivel de libre convección y permite estimar la velocidad de la

ascendente en una nube convectiva. El MUCAPE, utilizado en este trabajo, es el CAPE calculado para la parcela más inestable, y resulta útil en casos en los que la convección no se inicia desde parcelas de superficie como ocurre con frecuencia en nuestro país (Bechis et al., 2024). La cortante vertical del viento influencia fuertemente la estructura y evolución de las tormentas (Weismann and Klemp, 1982), y altos valores en una capa suficientemente profunda de la tropósfera (típicamente los primeros 4 o 6 km) suelen asociarse con una mayor probabilidad de formación de superceldas y granizo de características severas (Púčik et al., 2015; Taszarek et al., 2017, entre otros). La cortante efectiva (Thompson et al., 2007) se define como la cortante entre la base de la capa de infljo de la tormenta (típicamente el primer nivel del sondeo con al menos 100 J/kg de CAPE y menos de 250 J/kg de inhibición convectiva) y el 60 % de la altura de la tormenta, definida como la distancia entre ese nivel y el nivel de equilibrio. Este parámetro resulta útil para identificar entornos potencialmente favorables para el desarrollo de superceldas tanto en convección desde parcelas de superficie (para el cual es similar a la cortante en la capa 0-6 km) como para convección elevada. La isoterma de 0°C es la altura a la que se encuentra el punto de fusión de agua a hielo. Un incremento en la altura de este nivel significa un potencial para el derretimiento de granizo mayor, especialmente para las piedras de granizo de menor tamaño, como ya se ha mencionado.

Para este análisis, se extrajeron los perfiles verticales en la ubicación de cada estación, extrayéndose 24 perfiles en cada día para todo el período entre el inicio de los datos de reanálisis, 1979, hasta fin de 2023. Se utilizó la librería SHARPy para el cálculo de los parámetros convectivos basados en los sondeos extraídos (Blumberg et al. 2017). Se analizaron las variaciones temporales de estos parámetros en las estaciones seleccionadas a partir del estudio de la evolución anual de los percentiles 90 y 99 para las variables MUCAPE y cortante efectiva, y la media de la isoterma de cero grados. El análisis de percentiles para los primeros dos parámetros convectivos es similar al propuesto por Mohr y Kunz (2013), quienes notan que estos valores reflejan mejor el potencial para el desarrollo convectivo que la media. Además de esto, se analizó la distribución de estos mismos parámetros en los días en que se encontró granizo en las estaciones seleccionadas, buscando el perfil más inestable del día ya que los reportes no tienen información de horario del evento. Dado que estos datos no cuentan con información cualitativa del tamaño o características del granizo, este análisis busca identificar tipos de entornos favorables para el desarrollo de tormentas de granizo en dichas estaciones y la posible influencia de variaciones temporales en los citados parámetros convectivos sobre la frecuencia observada de granizo.

4. Resultados

En esta sección se presenta un análisis espacial de la distribución de reportes de granizo a nivel nacional, utilizando las bases de datos disponibles, permitiendo describir la distribución del granizo en nuestro territorio.

Climatología de granizo 1960-2023

La Figura 3.1 muestra el promedio anual de cantidad de días por año de reportes de granizo para la base de datos diarios de granizo en estaciones meteorológicas y la interpolación, con el método de Kriging, de estos promedios de manera de abarcar todo el territorio. Se destacan máximos de ocurrencia sobre el centro oeste del país, en la provincia de Mendoza particularmente en las estaciones de Malargüe y San Rafael, superando los 3.6 reportes de granizo por año. Otro máximo importante a tener en cuenta se ubica sobre el noroeste del país, en la estación de La Quiaca, en el norte de Jujuy, alcanzando los 6.4 reportes por año. En el sur del país encontramos valores similares en la Patagonia, destacando las estaciones de Río Gallegos Aero y Río Grande con valores de 6.6 y 5.5 reportes por año respectivamente, teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente acerca de que muchos de los reportes en esta región es posible que pueda estar relacionado con graupel dada la baja frecuencia de nubes de desarrollo convectivo profundo en la región. Este es un problema común en las climatologías de granizo en base a datos de estaciones meteorológicas (Allen et al., 2020). Otro máximo relativo a destacar se encuentra sobre el centro del país, en el norte de la provincia de Córdoba, en estaciones cercanas a la capital, teniendo entre 3 y 3.3 reportes de granizo por año en Córdoba Aero y Pilar Observatorio.

Comparando con los resultados obtenidos por Mezher et al. (2012) el promedio anual de granizo se comporta de manera muy similar, y no se observan cambios evidentes. Un detalle a destacar es la caída del promedio sobre el noreste, debido a el apartamiento de la estación de Bernardo de Irigoyen que no superó el proceso de verificación de calidad de los datos explicado en la sección de datos.

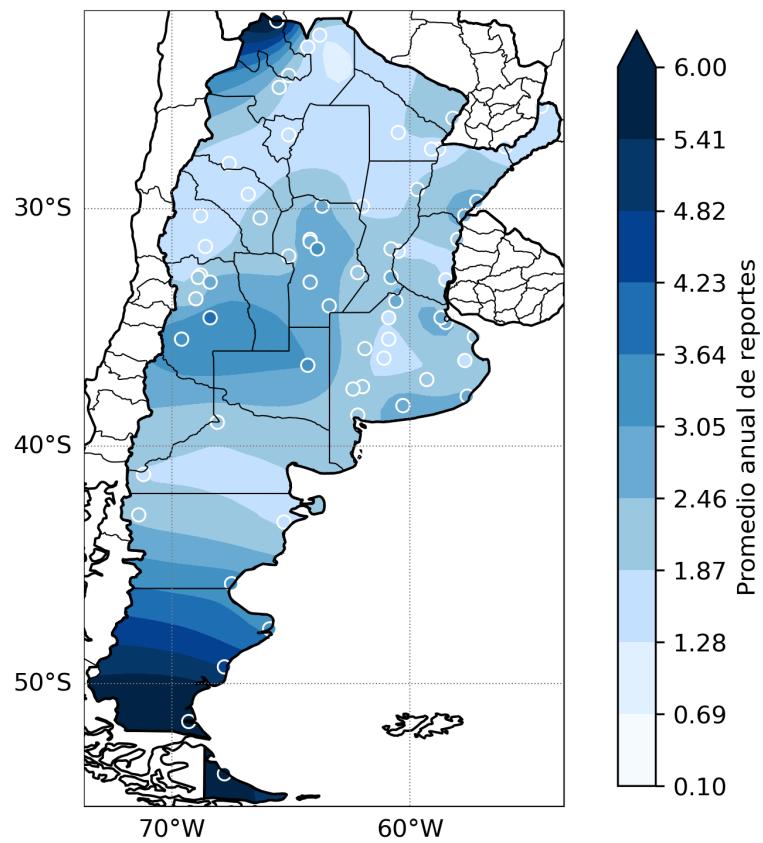
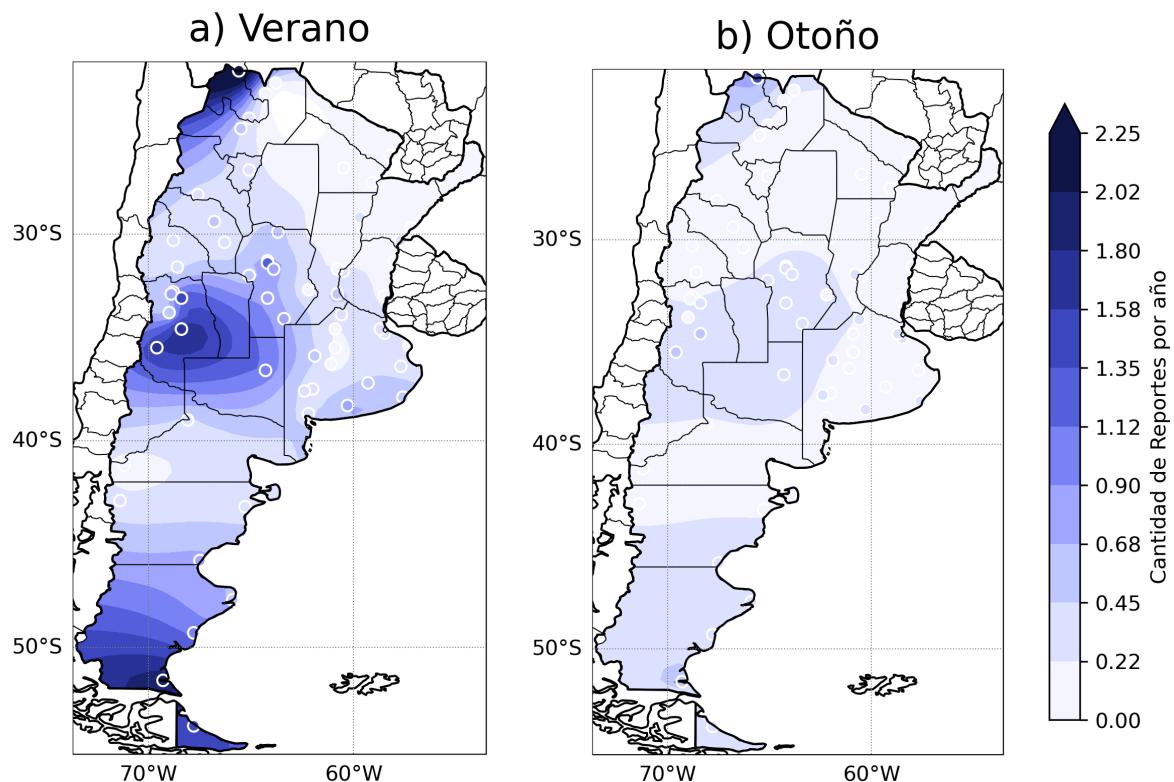


Figura 4.1. Promedio anual de cantidad de días por año de reportes de granizo para la base de datos diarios de granizo en estaciones meteorológicas por estación y campo interpolado. Período 1960-2023.



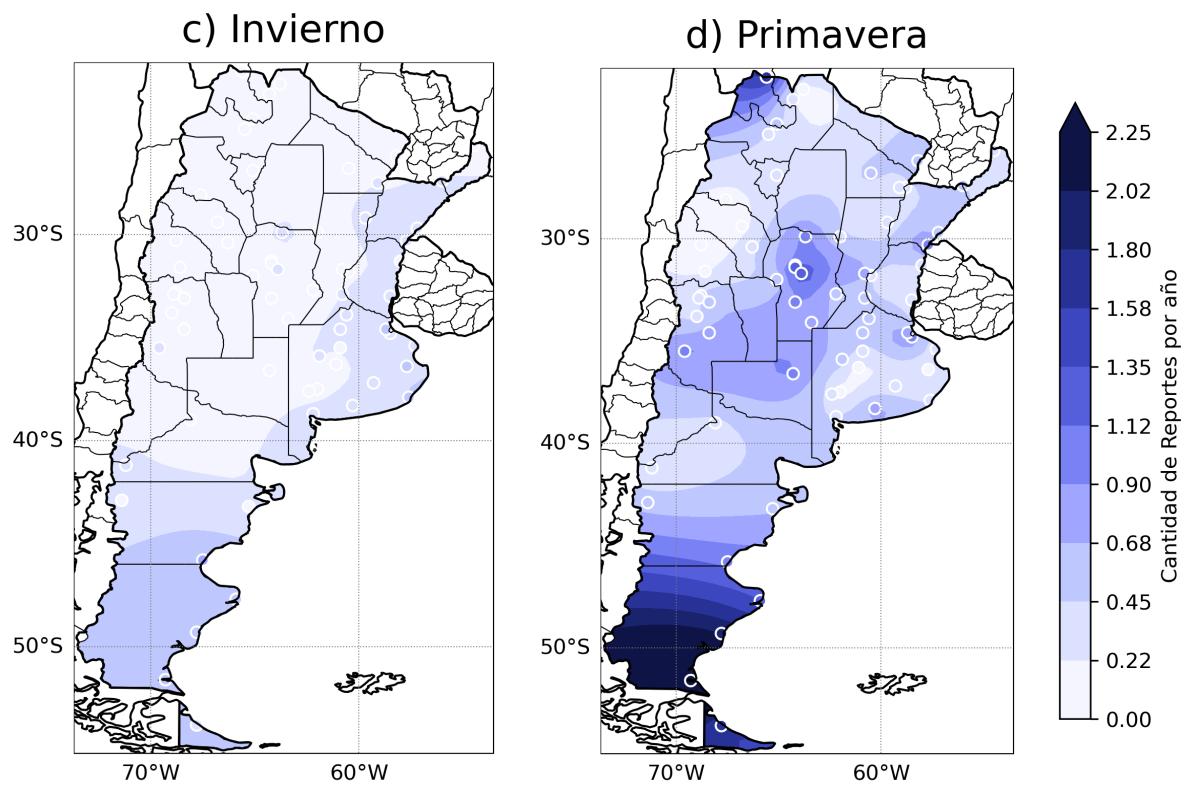


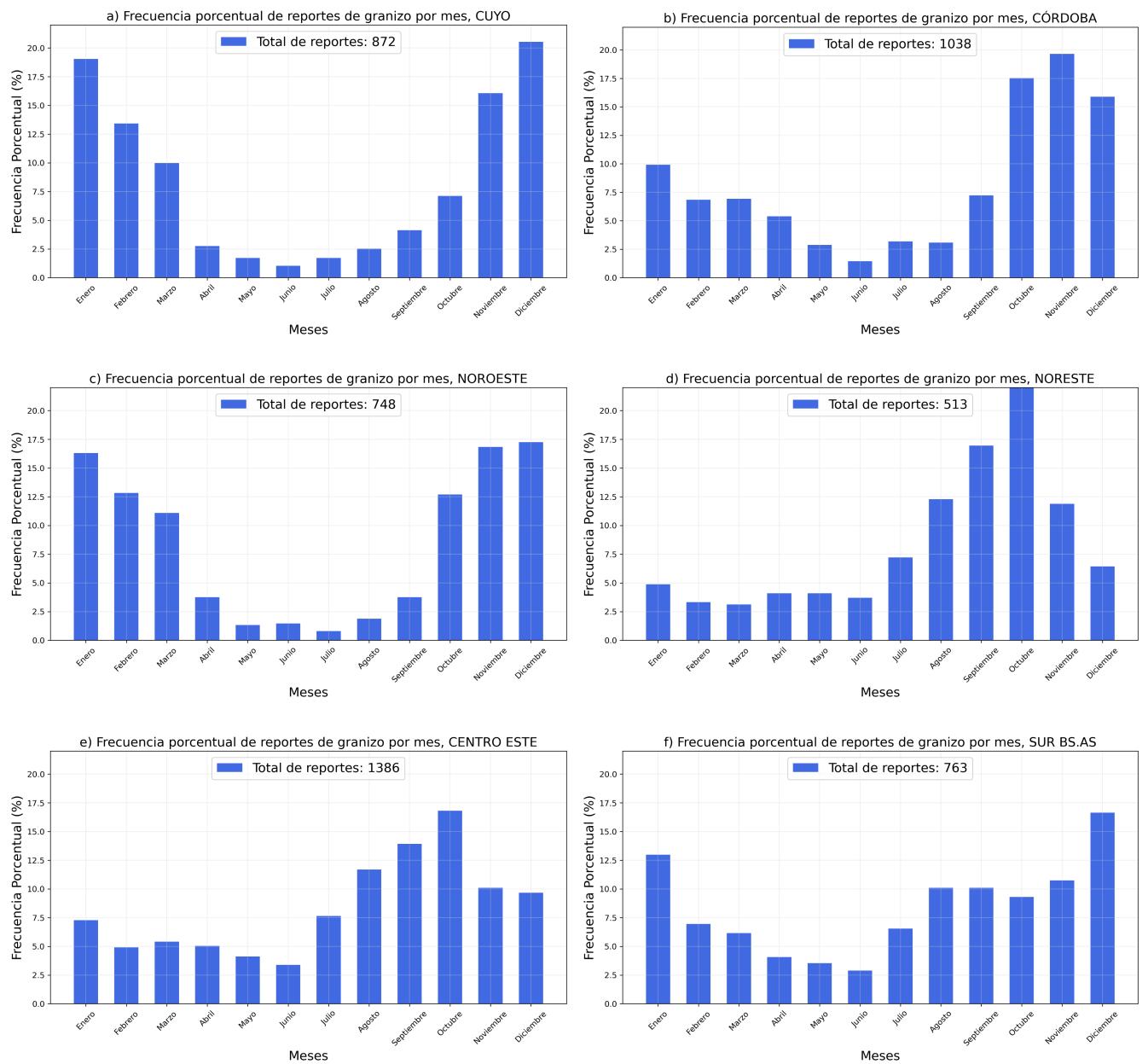
Figura 4.2. Promedio anual de cantidad de días por estación de reportes de granizo para la base de datos diarios de granizo en estaciones meteorológicas por estación y campo interpolado. Período 1960-2023

La Figura 4.2 detalla el promedio anual de cantidad de días por año de reportes de granizo en las distintas estaciones del año, además del campo interpolado. Se destaca una gran diferencia en la ocurrencia en las estaciones cálidas (verano y primavera) comparado con los meses fríos (otoño e invierno), siendo el máximo en verano en la mayoría de las estaciones. En los meses de verano (Figura 4.2 a) se observan los máximos absolutos en la Patagonia y el noroeste del país, con valores de 1.9 y 2.9 días de ocurrencia de granizo por año en las estaciones de Río Gallegos Aero y La Quiaca respectivamente. Además, con un máximo relativo en la región de Cuyo, centro oeste del país, con 1.8 días de granizo por año en la estación de San Rafael. Durante la primavera se mantienen los máximos ubicados en el noroeste y sur del país, en cambio, en el centro oeste, se observa una disminución de la ocurrencia de granizo donde antes estaba el máximo relativo. El mayor valor de esta región se encuentra en la provincia de Córdoba, de entre 1 y 1.3 días de granizo por año (Figura 4.2 d). El otoño (Figura 4.2 b) presenta una distribución espacial similar al verano, por supuesto con una cantidad de reportes mucho menor. En el invierno, la ocurrencia de granizo se evidencia con máximos en la Patagonia y el este de la provincia de Buenos Aires, con 0.6 reportes de granizo por año (Figura 4.2 c).

Comparando los resultados de la interpolación en el período 1960 - 2023 con los obtenidos anteriormente por Mezher et al. (2012) hasta el 2008, se observan algunos cambios que vale mencionar. En el verano se mantiene el máximo de granizo sobre la región de Cuyo. Aunque se destaca un desplazamiento del mismo, anteriormente ubicado sobre las provincias de San Juan y La Rioja, con la actualización se encuentra desplazado hacia el sur de Mendoza. Se mantiene el máximo relativo en el sur de la provincia de Buenos Aires. Durante el otoño, se mantiene la ubicación del máximo sobre el centro-oeste del país, se destaca un importante cambio sobre las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Formosa donde en Mezher et al. (2012) se observaban valores considerables de ocurrencia esto ha cambiando debido al proceso de verificación de calidad de los datos dado que ciertas estaciones fueron apartadas. Sobre la estación invernal, se sostiene la máxima ocurrencia de granizo en la zona este del país con máximos sobre el norte de la provincia de Buenos Aires y Entre Ríos, y sobre en la región Noreste. Para la primavera, se mantiene el máximo sobre el centro del país, Córdoba y alrededores. Además se intensifica el máximo sobre el Noroeste, y aparece un máximo relativo sobre la región de Cuyo.

Ciclo anual de la ocurrencia de granizo a nivel regional

En esta sección se analiza la frecuencia mensual de ocurrencia de granizo en cada una de las regiones seleccionadas para el análisis, y se describen las principales diferencias con la anterior climatología de Mezher et al. (2012). Se analizarán frecuencias porcentuales para las regiones, en las que la cantidad total varía considerablemente.



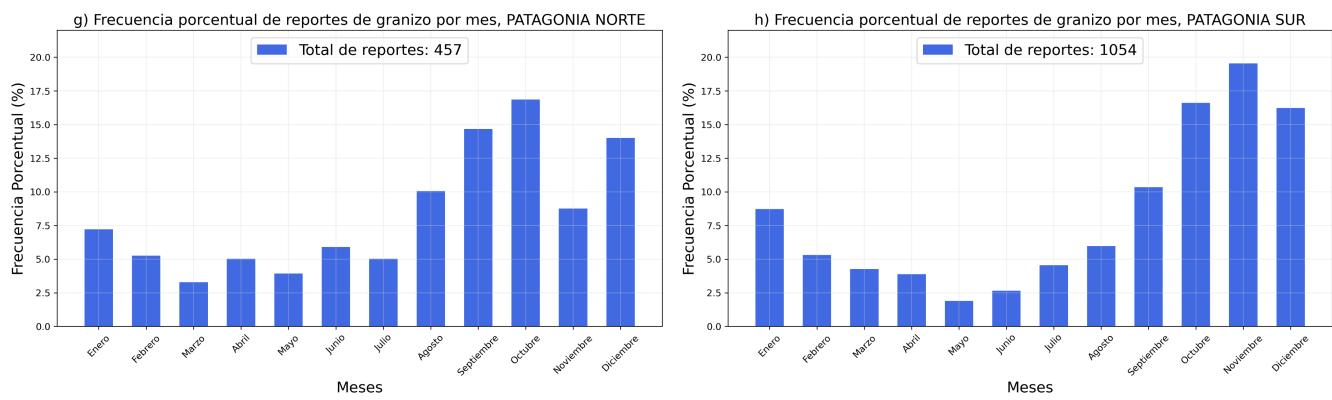


Figura 4.3. Frecuencia porcentual mensual de reportes de granizo por año para cada región

La Figura 4.3 muestra la frecuencia porcentual mensual para el período 1960 - 2023 de cantidad de días por año de reportes de granizo en cada región. En la región de Cuyo (Fig. 4.3a) la máxima ocurrencia de granizo se da en la temporada cálida, siendo mayor en el mes de diciembre con un porcentaje mayor a 20% de los casos, seguido por enero y noviembre. En otoño, invierno y principio de la primavera, la zona presenta muy pocos casos. Comparando con los resultados de Mezher et al. (2012) en las regiones delimitadas, se observa una disminución de la ocurrencia de granizo en Cuyo en los meses de enero, febrero y marzo, y un leve aumento para los meses de invierno.

En Córdoba (Fig. 4.3b) se observa la máxima frecuencia de reportes en los meses de noviembre, cercano al 20 % de casos en este mes, seguido por octubre (con un 17.5 % de casos) y diciembre. El mes de enero presenta un 10% de casos, el resto de los meses no superan el 7.5 % de casos de granizo, siendo mínimo en junio. Comparando con la climatología anterior hasta 2008, se destaca una disminución de los reportes para los meses de octubre, noviembre y diciembre, y mayor cantidad de reportes en los meses de enero y septiembre.

Sobre la región Noroeste (Fig. 4.3c), encontramos las máximas frecuencias cercanas al 17% de casos en los meses de noviembre, diciembre y enero. Durante el invierno, los casos no superan el 2.5 % de frecuencia porcentual. Como principal diferencia con los resultados de Mezher et al. (2012) se destaca la ocurrencia de granizo durante los meses de invierno, los cuales no tenían prácticamente reportes en la climatología anterior. Además, se observa una disminución de la ocurrencia en el mes de noviembre y un aumento en octubre y se establece enero como el mes con mayor frecuencia de granizo cuando anteriormente el máximo lo compartían entre diciembre y enero.

En el Noreste (Fig. 4.3d), la temporada de granizo se concentra principalmente entre los meses de agosto a noviembre, con octubre con la frecuencia máxima, concentrando el 25% de los reportes. Fuera de esta época, la zona presenta porcentajes similares que no superan el 7.5 % de frecuencia. Las mayores diferencias con la anterior climatología se encuentran en una disminución de la frecuencia para el mes de septiembre y un aumento en los meses de enero y febrero, el resto de los meses mantiene un comportamiento similar.

En la región Centro Este (Fig. 4.3e), encontramos un comportamiento similar que la zona Noreste, aunque con valores menores para la primavera. Se observa un máximo de ocurrencia de granizo en el mes de octubre mayor al 16% de frecuencia porcentual, seguido por el mes de septiembre cercano al 13%. En el verano los valores son cercanos al 10 y 8 % en diciembre y enero. Comparando con la climatología anterior, se observa una disminución de la ocurrencia en los meses de máxima frecuencia, septiembre y octubre, mientras que un aumento en los meses de noviembre, diciembre, enero y marzo. Sobre el sur de la provincia de Buenos Aires (Fig. 4.3f), se destacan máximos de ocurrencia en el verano, con valores mayores al 16% en diciembre y cercanos al 12.5% en enero. Se observa también otro máximo relativo por debajo del 11 % en noviembre. La ocurrencia de granizo decae hacia los meses de primavera con valores iguales o menores al 10%. Comparando con la climatología hasta el 2008, no se observa un máximo relativo en el mes de octubre. El resto de los meses se comporta de manera similar, con un pequeño aumento en la frecuencia de los meses de otoño/invierno.

Analizando el sector sur del país (Fig. 4.3 g-h), se destaca el máximo de ocurrencia durante la primavera en la Patagonia Norte (Fig. 4.3g) y en la Patagonia Sur (Fig. 4.3h). Comparando con los resultados anteriores de Mezher et al. (2012), en la parte norte de la Patagonia se observa una marcada disminución de la ocurrencia de granizo en el mes de noviembre, manteniendo la ocurrencia máxima en los meses de septiembre y octubre. Hacia el sur, se mantiene el máximo absoluto en el mes de noviembre, el mes de octubre que antes se ubicaba como segundo máximo, ahora presenta frecuencias similares a las del mes de diciembre.

Tendencias temporales de ocurrencia de granizo, por estación y a nivel regional

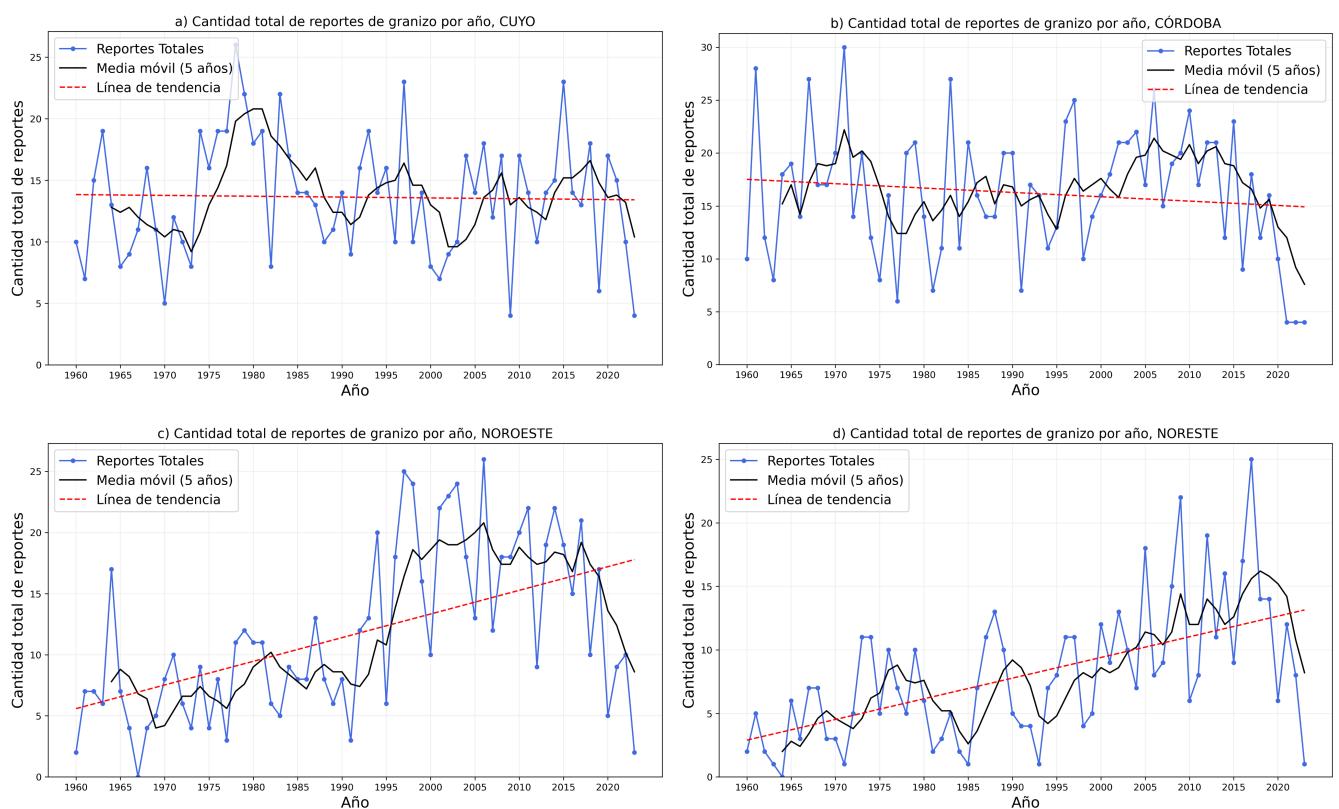
La extensión temporal de la base de datos diarios de granizo permite analizar la variabilidad temporal de la ocurrencia de granizo en cada estación y en cada una de las regiones analizadas. La Figura 4.4 muestra

las series temporales de cantidad total de reportes de granizo por año, la media móvil cada 5 años y la tendencia en cada región. A continuación se describen las características más importantes de cada región y si la tendencia lineal resultó significativa o no de acuerdo al test de t-student:

- **Cuyo (Fig. 4.4a), no significativa:** La región no presenta una tendencia apreciable a lo largo del tiempo en la ocurrencia de granizo (con una disminución de -0.0067 reportes por año). Si bien se observa cierta variabilidad interanual en la serie, con algunos períodos de mayor actividad (destacando el año 1978 con 26 reportes), la tendencia a largo plazo se mantiene prácticamente constante.
- **Córdoba (Fig. 4.4b), no significativa:** Se observa una leve tendencia negativa sobre la provincia, aunque no significativa (con -0.041 reportes por año). En los últimos 20 años, luego de un máximo relativo se observa una caída en la ocurrencia de granizo, llegando a un mínimo absoluto para los últimos 3 años de 4 reportes por año de granizo.
- **Noroeste (Fig. 4.4c), tendencia significativa:** Región con tendencia positiva significativa en la ocurrencia de granizo (con un aumento de 0.19 reportes por año), desde el año 1990 se observa un aumento significativo de los reportes superando los 25 casos en el año 2006, a partir de este año se ve una merma en los casos hasta la actualidad.
- **Noreste (Fig. 4.4d), tendencia significativa:** Esta región también tiene tendencia positiva y significativa (con 0.16 reportes por año), en aumento desde 1985 aunque se observan ciclos en la misma pero no de mucha amplitud. Llegando a un máximo absoluto en el año 2017 con 25 reportes de granizo, en los últimos años hay una caída de los mismos. Mantiene la tendencia encontrada hasta 2008.
- **Centro Este (Fig. 4.4e), no significativa:** Luego de una caída de los reportes de granizo, a partir de 1999, hay un aumento de reportes de granizo que luego decae para los últimos años, dando como resultado una tendencia positiva aunque no significativa (llegando a un aumento de 0.03 reportes por año). En los últimos años hay una caída de los reportes de granizo, permitiendo observar que se trata de una serie inmersa en un ciclo de amplitud importante, similar al que se observa en la región Noroeste (Fig. 3.4c)
- **Sur Bs.As (Fig. 4.4f), tendencia significativa:** Se observa un período muy marcado de pocos eventos de granizo entre 1980 y 2005. A partir de este año, se destaca un aumento importante en los reportes de granizo, superando el período previo de alta actividad anterior a 1980, llegando a un máximo absoluto de 40 reportes en el año 2010 (con una tendencia positiva de 0.092 reportes por

año). Este último período de alta actividad evidencia un ciclo de baja frecuencia en la actividad que no se llegó a observar por completo en la climatología anterior.

- **Patagonia Norte (Fig. 4.4g), tendencia significativa:** Se observa un incremento en los últimos años de los datos, con una tendencia positiva y significativa (con un aumento de 0.074 reportes por año), llegando a un máximo absoluto en 2019 superando los 20 reportes de granizo. Esto marca la diferencia con la climatología anterior donde no se observaba una tendencia en los eventos de granizo.
- **Patagonia Sur (Fig. 4.4.h), tendencia significativa:** Se observa una tendencia positiva sobre la región (de 0.41 reportes por año), teniendo en cuenta que sobre la misma, es muy probable que los reportes estén relacionados con graupel ya que es poco probable tener nubes de desarrollo convectivo en esta zona.



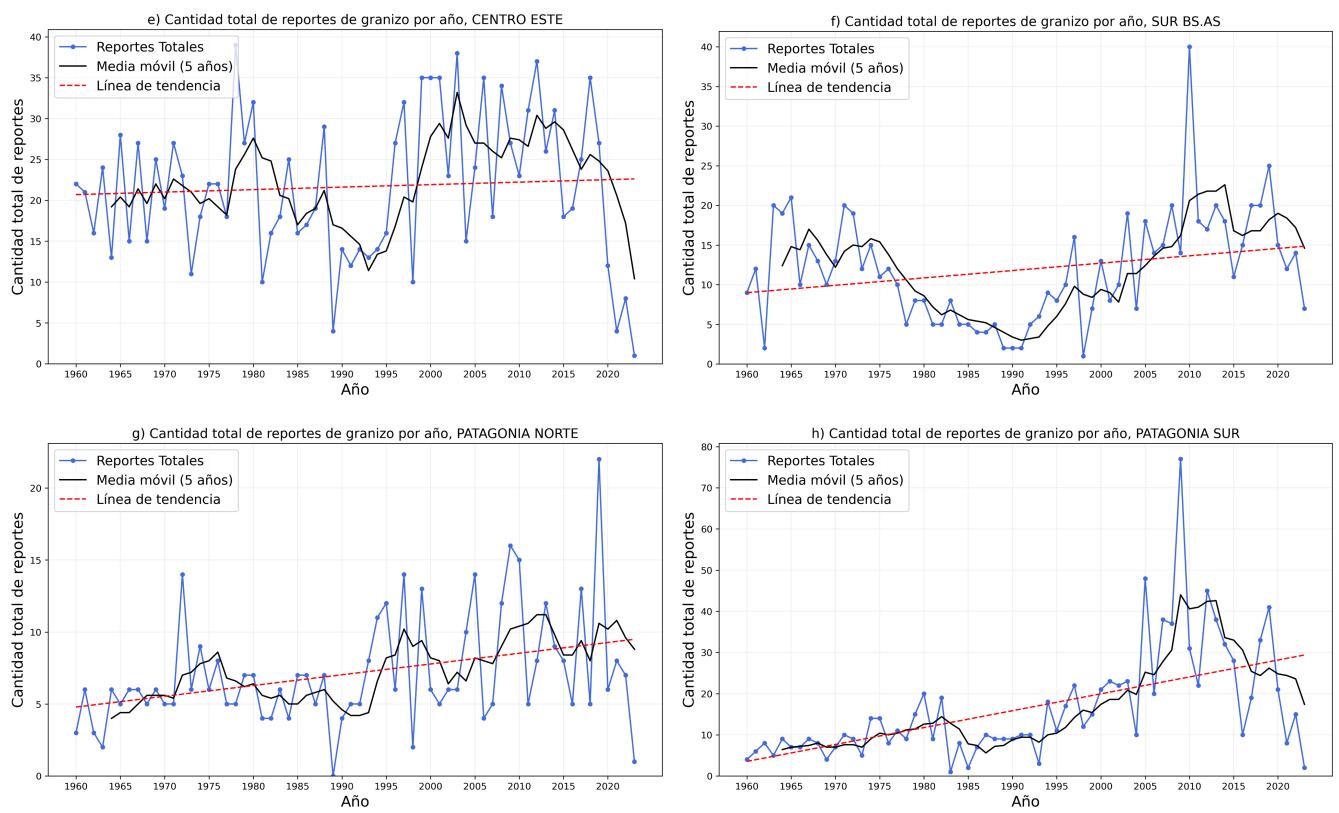


Figura 4.4. Serie temporal de cantidad de reportes para cada región (líneas azules), con media móvil cada 5 años (negro) y tendencia lineal (línea punteada roja).

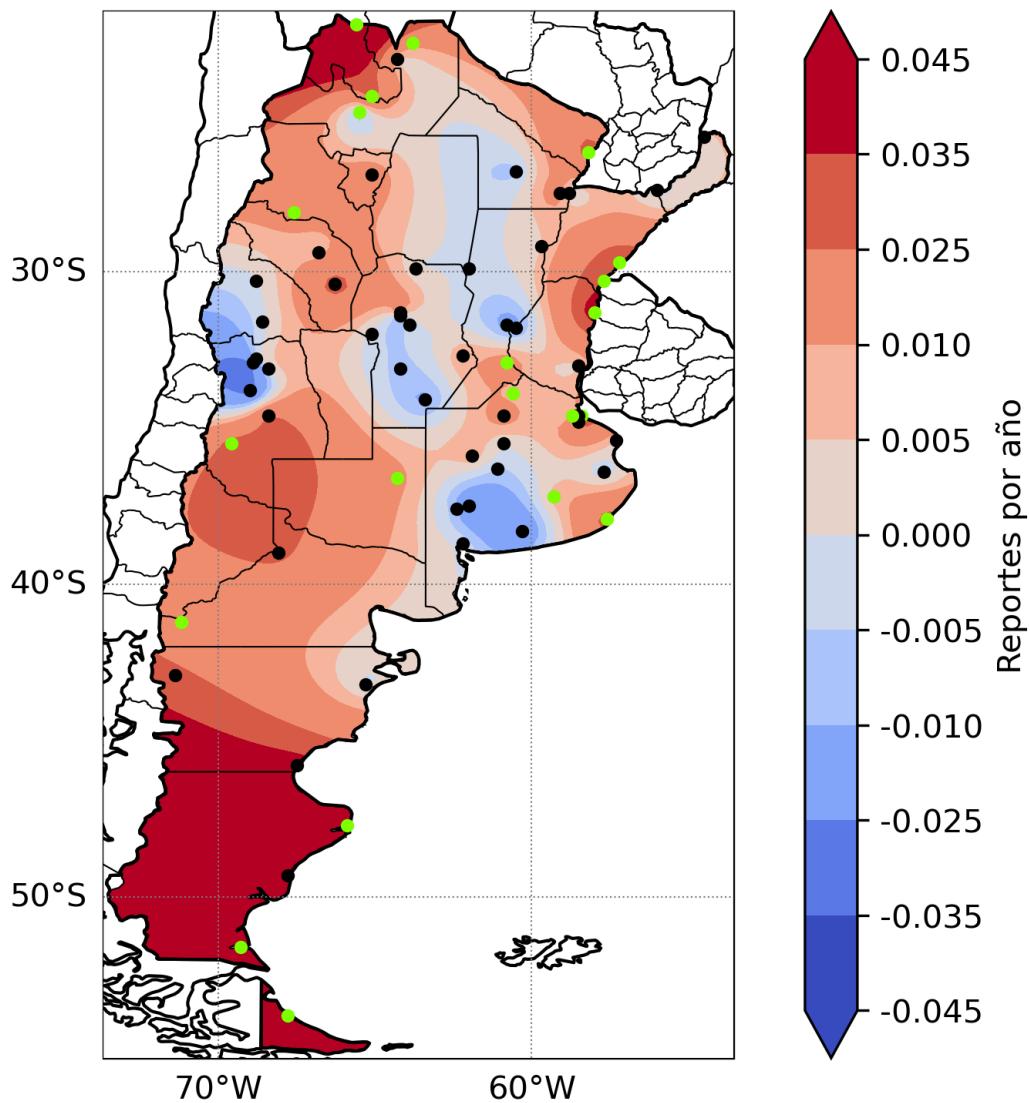


Figura 4.5. Mapa de tendencias por estación, período 1960 a 2023 (reportes SI-NO), utilizando el método de interpolación Kriging. En sombreado, la tendencia temporal en cantidad de reportes por año. En verde las estaciones con tendencia significativa.

La tendencia individual de cada una de las estaciones se analiza en la Figura 4.5. En general, las tendencias observadas se corresponden con las tendencias de las zonas a las que cada estación pertenece, a excepción de las regiones de Cuyo y Sur de Buenos Aires que no presentan homogeneidad en el resultado individual. La zona norte de Cuyo presenta tendencias negativas y la sur tendencias positivas, y significativa en el caso de la estación Malargüe. Para la región del sur de Buenos Aires se observa una tendencia positiva y significativa sobre el este de la región, y en cambio, negativa sobre el oeste. La zona central del país presenta tendencias negativas en algunas estaciones, como en el norte de Mendoza; sur y centro de Córdoba, la región norte de Santa Fe incluyendo zonas de Santiago del Estero y Chaco, y el sur oeste de Buenos Aires. Si bien en general se observa un aumento en la ocurrencia de granizo en la franja central, algunas estaciones puntuales se comportan de manera contraria, aunque

ninguna presenta tendencia negativa significativa. Por ejemplo, tendencias negativas no significativas se observan en Córdoba en las estaciones de Río Cuarto, Laboulaye, llegando hasta Pilar. Algo similar ocurre en la provincia de Mendoza donde la región cercana a la capital presenta valores negativos de tendencias no significativas, mientras que el sur de la provincia, presenta valores positivos y significativos en la estación de Malargüe.

En el noreste de Entre Ríos y sudeste de Corrientes, las estaciones Concordia, Monte Caseros y Paso de los Libres muestran valores positivos y significativos. La coexistencia de estas tres estaciones con tendencias positivas altas y significativas en una misma región resulta de particular interés, dado que indica una marcada señal de aumento de casos de granizo en esa región en particular. Las posibles causas detrás de este aumento en la cantidad de reportes se analizarán en la siguiente sección.

Otras zonas con valores positivos se encuentran en el noroeste del país, con Tinogasta, Salta Aero, Jujuy Aero, Tartagal y La Quiaca con resultados significativos. La Patagonia, tanto la región norte como la sur, presenta resultados positivos en la tendencia de la ocurrencia del granizo reportado, aunque para estas estaciones estos resultados no son del todo confiables debido a la ya mencionada posibilidad de que se haya reportado graupel como granizo.

Planillas de granizo

En esta sección se analiza la información contenida en las **Planillas de granizo en Estaciones Meteorológicas**. Se estudiará la distribución espacial de los reportes totales, y, dado que esta base de datos lo permite, se estudiará la distribución de los diferentes tamaños informados en las planillas. El análisis de esta base de datos es exploratorio dado que la falta de información acerca de la completitud de las series analizadas hacen que los reportes y los resultados deban ser tomados con precaución.

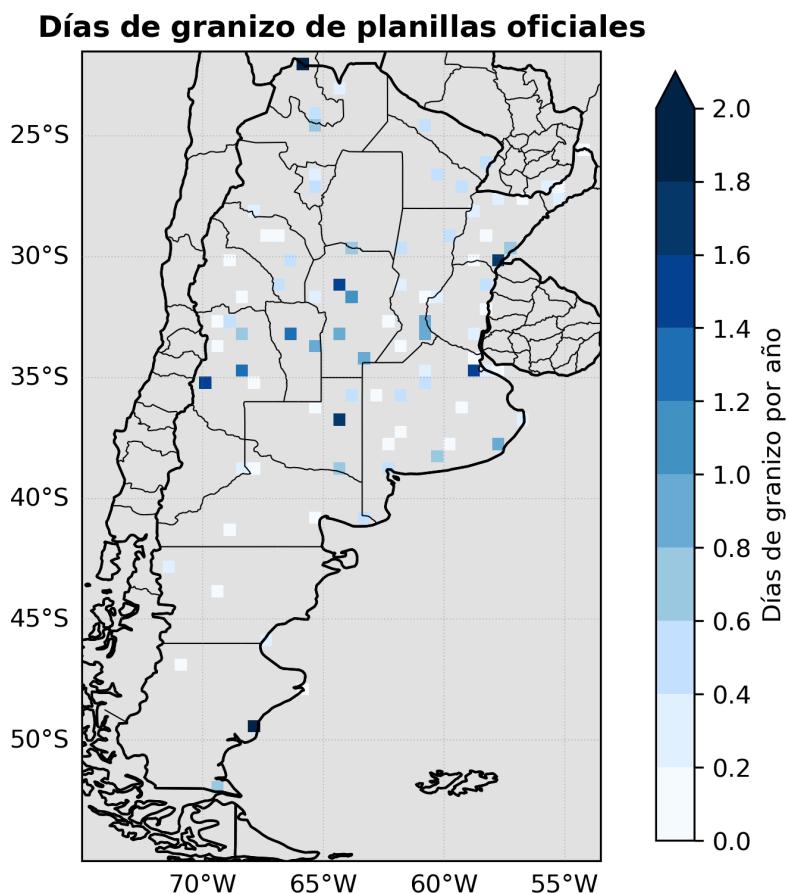


Figura 4.6. Promedio anual de cantidad de días por año de reportes de granizo a partir de las planillas oficiales de granizo. Período 1988 - 2023.

En la Figura 4.6 se muestra el promedio anual de cantidad de días por año de reportes de granizo en la grilla de 0.5×0.5 grados. Se destacan máximos de día de granizo sobre la región de Cuyo y la provincia de Córdoba, correspondiente con los resultados obtenidos en la base de datos diarios de granizo en Libretas Meteorológicas analizada anteriormente. Otros máximos interesantes se observan sobre el Área Metropolitana de Buenos Aires (asociada a la alta densidad de estaciones en esta región), el sudeste de Corrientes, el extremo noroeste del país y el centro de La Pampa, asociado a la estación de Santa Rosa.

Es interesante analizar ciertas zonas con poca cobertura espacial de reportes a falta de estaciones. En particular, una gran área sobre Santiago del Estero, Chaco y Santa Fe, donde climatologías generadas a partir de sensores remotos como la de Bang y Cecil (2019) indican frecuencias relativamente altas de granizo carece de información confiable a partir de estos datos de estaciones.

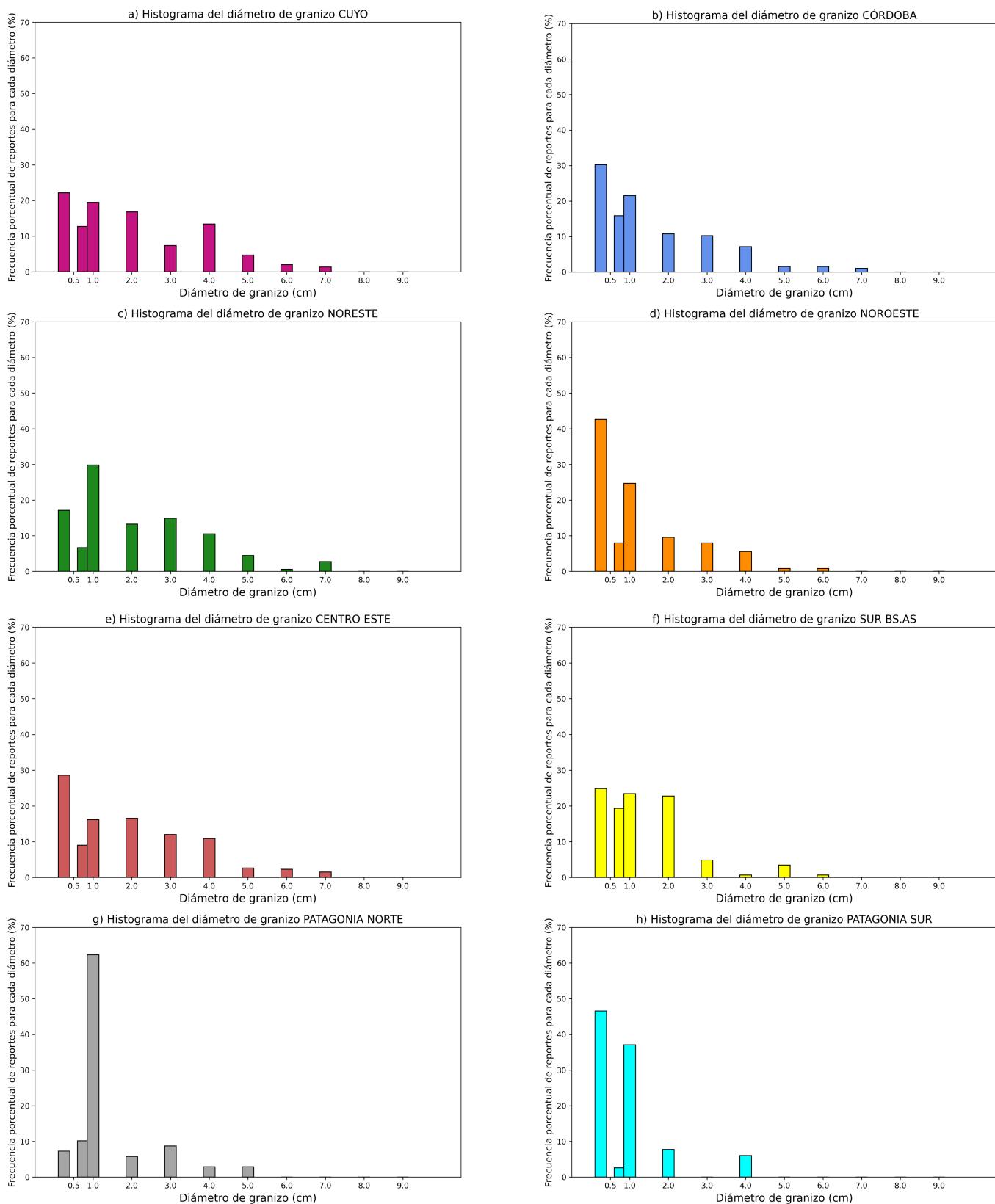


Figura 4.7. Histogramas de diámetros de granizo normalizados por región para el período 1988 - 2023. Los intervalos del histograma son: 0 - 0.5, 0.5 - 1, 1 - 2, 2 - 3, 3 - 4, 4 - 5, 5 - 6, 6 - 7, 8 - 9, 9 - 10 cm.

Observando la distribución de tamaños sobre las regiones (Figura 4.7), se destacan como características principales que el sur del país (Patagonia Sur y Norte) es la región con mayor frecuencia de granizo no severo, seguido por el noroeste (Figura 4.7 c, g-h). Sobre el granizo severo, se observa la región del noreste diferenciada del sector oeste, ya que presenta mayor predominancia de eventos de granizo severo (Figura 4.7 d), con un máximo relativo en el intervalo de 3 a 4 cm. Además, Córdoba, Cuyo y Centro Este, presentan valores importantes de ocurrencia de granizo severo (Figura 4.7 a-b, e), con las últimas dos con máximos relativos en 2 y 4 cm de diámetro. Respecto de la ocurrencia de granizo significativamente severo, las mayores frecuencias relativas se encuentran en las regiones de Cuyo, Noreste, Córdoba y Centro Este (Figura 4.7 a-c, e), con la región Noreste presentando el máximo de frecuencia en el granizo de mayor tamaño (7 cm de diámetro). Las regiones Centro Este y Córdoba presentan una distribución similar sobre los tamaños del granizo, aunque se destaca una leve diferencia para el granizo severo y significativamente severo teniendo mayor frecuencia la región Centro Este (Figura 4.7 b, e). El sur de Buenos Aires presenta mayores frecuencias para granizo no severo, aunque también se observan algunos casos de granizo severo y significativamente severo (intervalo de 5 a 6 cm) (Figura 4.7 h).

Sobre la región sur del país, la zona Patagonia Norte presenta mayor frecuencia de granizo severo en comparación con Patagonia Sur, con las mayores frecuencias relativas en el intervalo de 1 a 2 cm. En la región Patagonia Sur se observan frecuencias relativas predominantemente de granizo no severo, muy notablemente en el intervalo de 0 a 0.5 cm. Frecuencias altas en este intervalo indican la ocurrencia de graupel reportado como granizo (Figura 4.7 d, g-h). Por convención, instituciones como la American Meteorological Society (<https://glossary.ametsoc.org/wiki/Hail>) consideran como granizo a hidrometeoros con diámetros mayores o iguales a 0.5 cm, lo que no ocurre con los reportes en esta base de datos. Un aspecto a distinguir y analizar son los reportes entre 4 y 5 cm de diámetro sobre la Patagonia Sur los que provienen de la estación San Julián Aero, durante el mismo mes, del mismo año: 10/1994 (Figura 4.7 h). Incluso 4 de ellos durante la misma semana y dentro de estos, 2 durante el mismo día. Esto genera sospecha sobre los mismos debido a la latitud de la estación y la seguidilla en la ocurrencia. Se decidió mantener estos reportes, para ilustrar las características de la base de datos y tener en cuenta estos posibles errores.

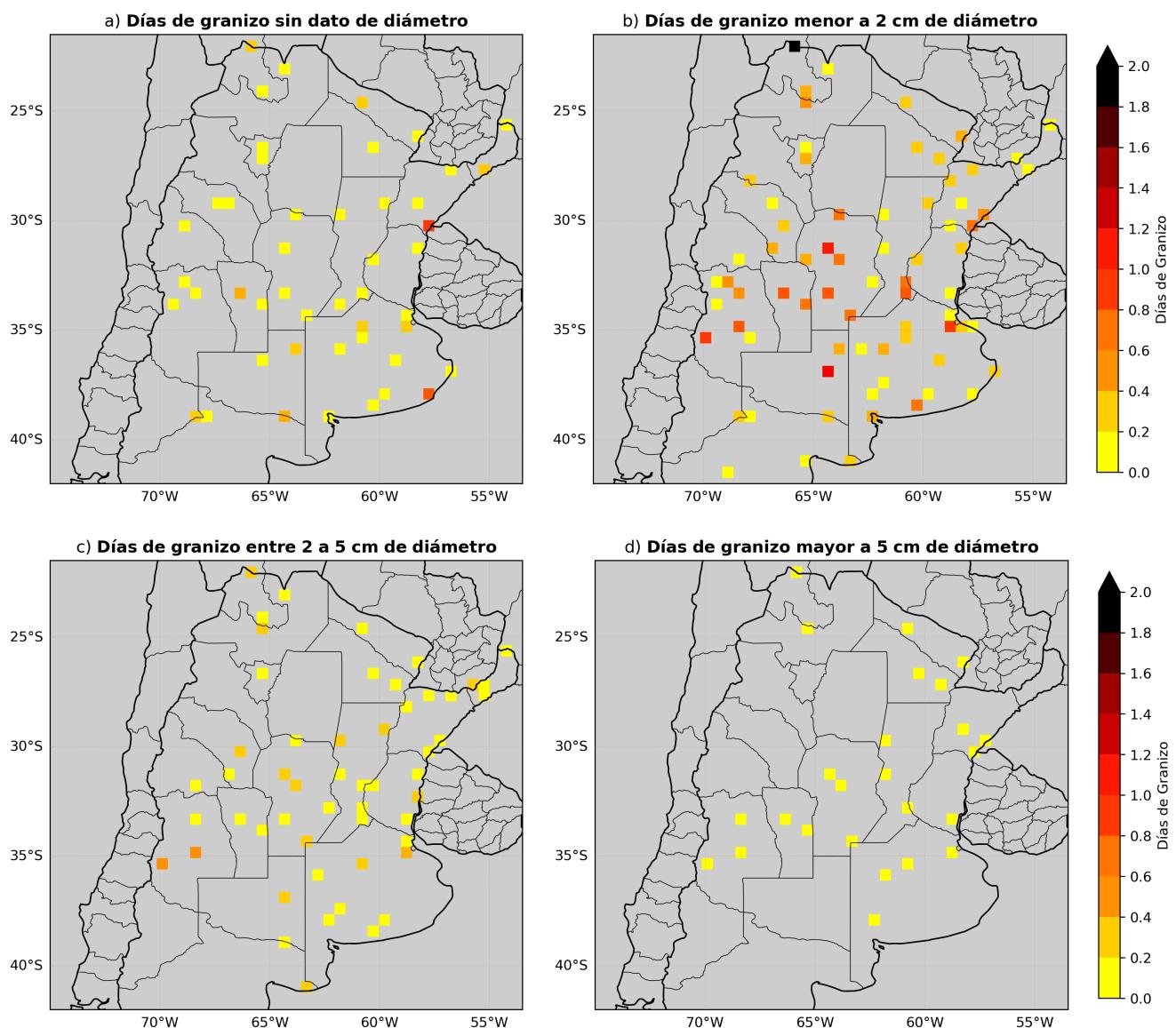


Figura 4.8. Distribución de diámetros de granizo, en días de granizo por año en el período 1988 - 2023.

La distribución espacial de los tamaños de granizo reportados en las planillas de granizo sobre el territorio argentino se muestra en la Figura 4.8. El análisis se limita hasta los 42° de latitud sur para proveer más detalle en regiones en las que es más probable que los reportes correspondan efectivamente a granizo. A pesar de la posible falta de continuidad en los reportes de muchas de las estaciones, algunos patrones son interesantes de analizar. El primer panel (Fig. 4.8a) muestra los días de granizo sin dato de diámetro, encontrando una considerable cantidad de casos en los que se ha informado la ocurrencia de granizo pero no detallado el diámetro del mismo a pesar de ser completadas estas planillas por personal capacitado. Esto, sumado a la falta de continuidad en los reportes de esta base, indica que la misma sólo puede usarse, por el momento, para hacer un análisis superficial de la distribución.

Sobre la ocurrencia de granizo menor a 2 cm de diámetro (Fig. 4.8b), se encuentran varios puntos de valores máximos de días de granizo por año, sobre todo en la región central del país, destacándose la provincia de Mendoza y Córdoba, con entre 1.2 y 1.4 días de granizo por año. Hay un máximo absoluto en la provincia de Jujuy, en la estación de La Quiaca con valores entre 1.6 y 1.8 días de granizo por año.

La distribución de reportes de granizo severo (Fig. 4.8c) muestra un máximo absoluto en la estación de La Quiaca con más de 2 días de granizo por año. Además, se mantienen los máximos relativos en la franja central del país (entre 30° y 38° de latitud sur) con valores entre 1 y 1.2 días de granizo en muchos puntos de varias provincias entre Mendoza y Buenos Aires.

Los reportes de granizo significativamente severo (Fig. 4.8d) se observan con menor frecuencia y en regiones más acotadas que los de tamaños menores. Estos reportes se dieron sólo en la franja central del país, sólo dos estaciones del noroeste (La Quiaca y Salta Aero), y la región noreste del país. No se observan máximos destacables, en todos los lugares de ocurrencia los valores se mantienen menores o iguales a 0.2 días de granizo por año.

Base de datos SAMHI

A continuación se presenta un análisis de los datos contenidos en la base de datos SAMHI. Se analizará la distribución espacial de los reportes de granizo en esta base de datos y la distribución de tamaños. Además, dado que esta base de datos hace hincapié en los reportes ciudadanos, se hará un análisis comparativo con las bases de datos de estaciones, con el fin de ilustrar las ventajas de implementar esta base de datos para el estudio del granizo en el país y la región. Dada la extensión espacial de esta base de datos, en varios resultados de esta sección se mostrará un dominio más grande en pos de visibilizar la cobertura de la misma en buena parte de Sudamérica.

Mapa de **reportes de granizo BASE SAMHI ciudadanos**

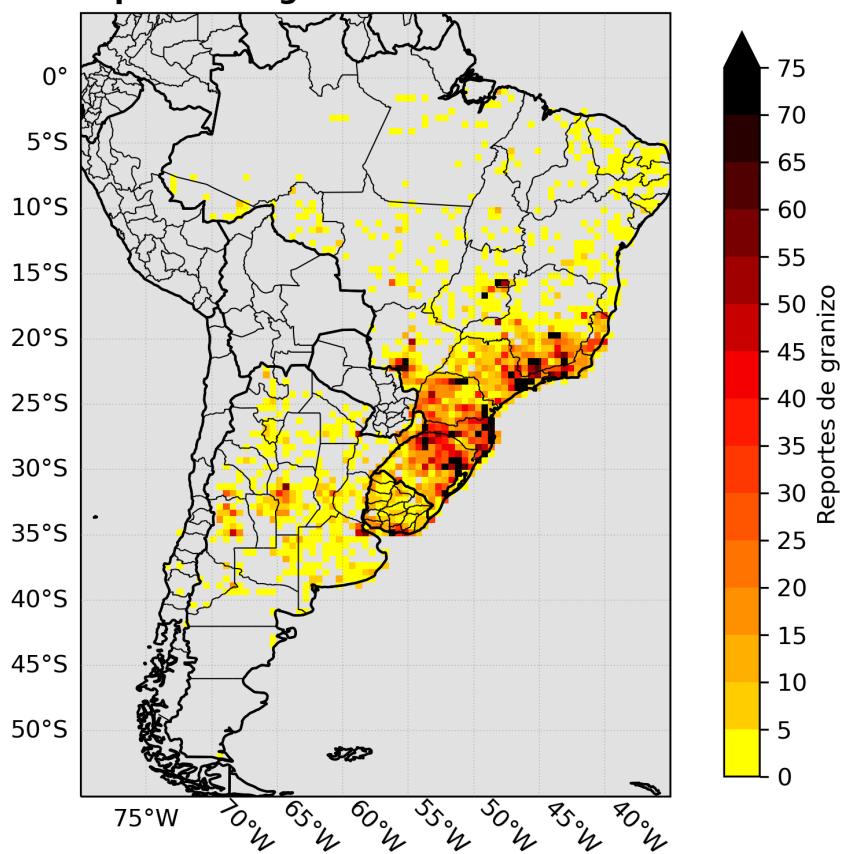


Figura 4.9. Cantidad de reportes de granizo totales contenidos en la base SAMHI en el período 2018 - 2023.

Para ilustrar la extensión territorial y la magnitud de la base SAMHI, la totalidad de los reportes de granizo contenidos en esta base de datos en el período 2018-2023 se muestra en la Figura 4.9. SAMHI cuenta con una amplia cobertura en toda la región, fruto del esfuerzo llevado a cabo por los integrantes de la misma en la búsqueda de reportes, su carga a la base y su posterior verificación. Permitiendo observar los máximos absolutos de cantidad de reportes en los estados del sur de Brasil, producto de la alta densidad poblacional y por la mayor continuidad en la carga de reportes en los primeros años de SAMHI. Otras zonas a destacar son el área metropolitana de Buenos Aires y las zonas relativamente pobladas del sur de Uruguay donde se presentan máximos relativos de cantidad de reportes de granizo. Por último, es interesante resaltar los máximos relativos de Cuyo y de las Sierras de Córdoba, coincidente con lo encontrado en las bases de datos de estaciones meteorológicas analizadas en las secciones anteriores.

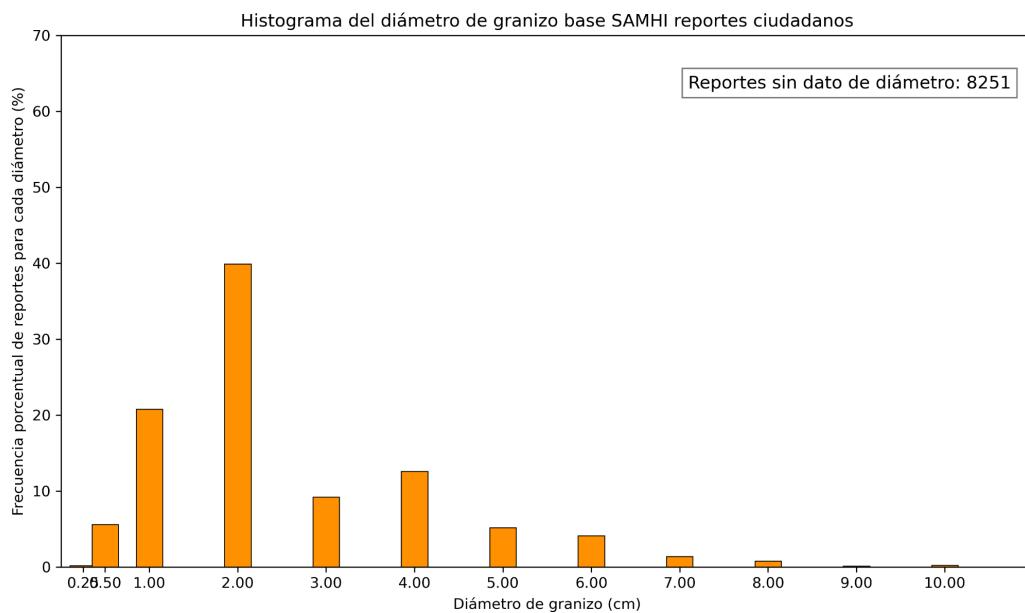


Figura 4.10. Histogramas de diámetros de granizo de la base SAMHI en el período 2018 - 2024. Cantidad de reportes con dato de diámetro: 6173.

La distribución de los diámetros máximos de granizo reportados en la base se muestra en la Figura 4.10. Sobre los diámetros más pequeños, si bien la base abarca una región más grande, se observa una frecuencia menor de reportes de granizo menores a 1 cm e incluso muy pocos reportes por debajo de los 5 mm. Esto puede deberse a 2 causas, que el control de calidad de la base impide que se reporten eventos de graupel u otra precipitación sólida que no correspondan a granizo, y la segunda, que en los eventos de granizo de este tamaño, es poco frecuente que estos reportes incluyan una foto del mismo con algún elemento que permita estimar el tamaño por lo cual muchas veces no se incluye reportes de tamaño en la base.

Se destaca la máxima ocurrencia de granizo de 2 cm, con una frecuencia porcentual del 40% de los 6173 reportes totales que cuentan con esta información. Además del 20% de reportes de 1 cm de diámetro, otro aspecto a destacar de este resultado es el máximo relativo para los 4 cm de diámetro superando el 10% de los casos, seguido por granizo de 3 cm levemente por debajo del 10%. Sobre el granizo significativamente severo, son considerables los valores para granizo de 5 cm y valores mayores, llegando casi al 5% de frecuencia porcentual de reportes de granizo para valores de 5 y 6 cm. Se observan valores mínimos pero no nulos de reportes de granizo de 7 cm y mayores, desde aproximadamente 4% de frecuencia porcentual disminuyendo a mayores valores.

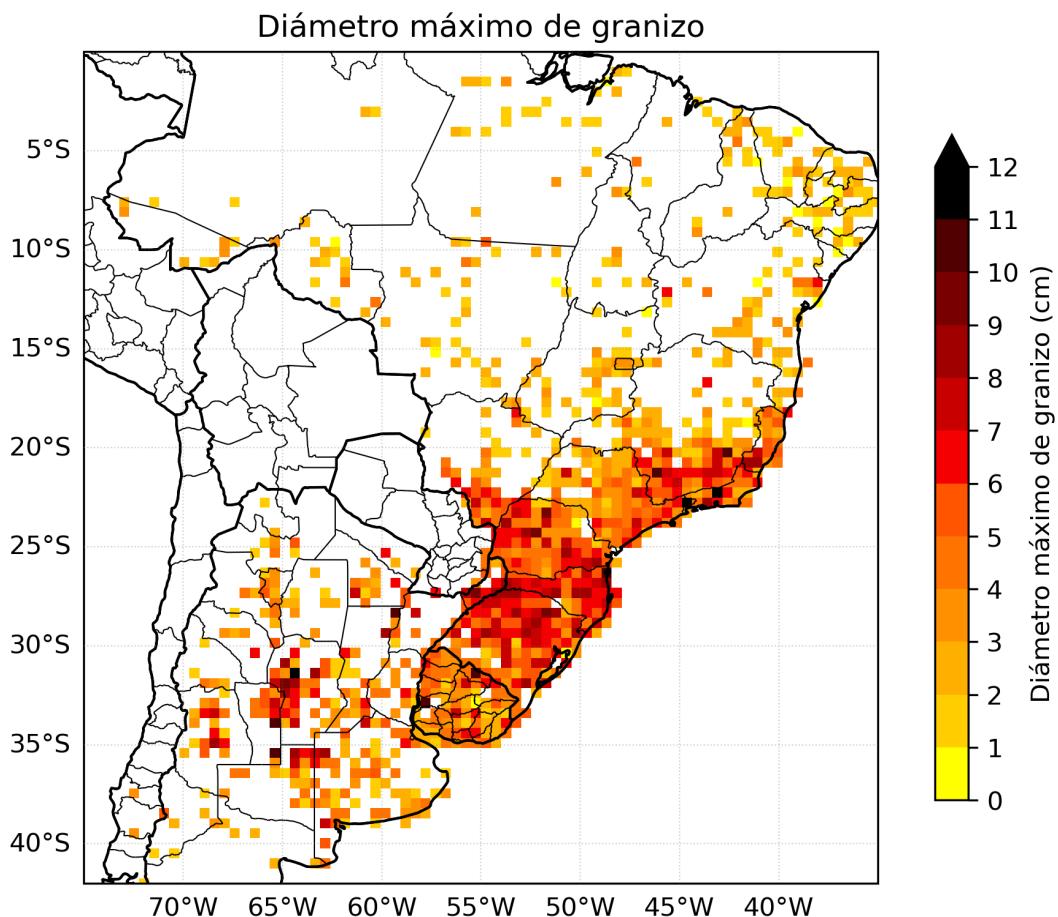


Figura 4.11. Distribución del máximo tamaño de granizo en cada retícula para la base SAMHI en el período 2018 - 2023.

La Figura 4.11 muestra el diámetro máximo observado en cada punto de grilla en el período de estudio. En la región central de central de nuestro país existen amplias zonas en Córdoba, San Luis, Mendoza norte de La Pampa y oeste de Buenos Aires en donde se alcanzan diámetros entre 7 y 9 cm de diámetro, con algunos registros puntuales superando los 11 cm, llegando a 23.7 cm en la ciudad de Villa Carlos Paz (diámetro calculado a través de fotogramas y análisis de pixeles Kumjian et al. 2020). En el noroeste del país los diámetros máximos registrados son más pequeños, con valores en este período de entre 2 y 5 cm. Otras zonas de la provincia de Buenos Aires y el centro este del país registraron valores de 3 cm o menos de diámetro, aunque de manera puntual se observan registros que superan los 7 cm. Otra zona propensa a la ocurrencia de granizo de gran tamaño se observa en el noreste Argentino y sudeste de Brasil, con valores máximos de entre 8 y 10 cm de diámetro y varios puntos superando los 11 cm. En Uruguay, si bien presenta algunos registros superiores a los 11 cm de diámetro máximo, gran parte del país posee máximos mucho menores entre 3 y 6 cm.

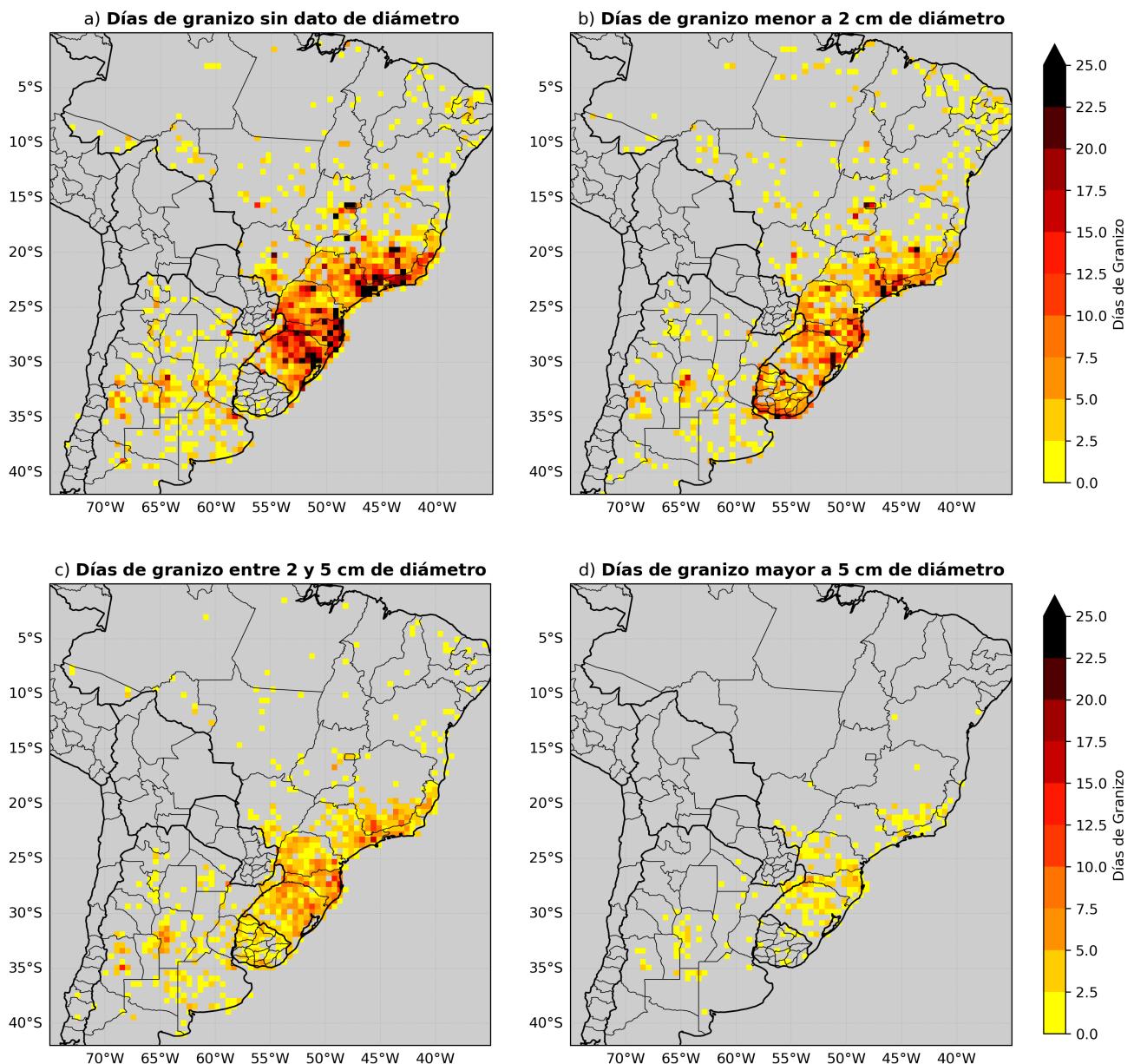


Figura 4.12. Distribución de diámetros de granizo, en días de granizo por año en el período 2018 - 2023, base SAMHI.

La base de datos SAMHI permite analizar la distribución espacial del granizo para los diferentes umbrales de severidad definidos anteriormente: no severo (hasta 2 cm), severo (entre 2 y 5 cm) y significativamente severo (mayor o igual a 5 cm), además de los casos en los que no fue posible determinar el tamaño del mismo (Figura 4.12). A primera vista, la distribución de los reportes para los eventos de granizo sin información de tamaño y no severo (Fig. 4.12 a-b) coincide con la distribución de reportes totales descrita en la Figura 3.9. Se observan los máximos relativos de días de granizo en estas categorías tanto en las regiones de alta frecuencia de granizo determinadas a partir de estaciones en Argentina (regiones de Cuyo, Córdoba), así como en las zonas de alta densidad poblacional (Área

Metropolitana de Buenos Aires, centro de Santa Fe). Lo mismo ocurre con los estados del Sur de Brasil y Uruguay. A medida que aumenta el umbral de tamaño (Fig. 4.12 c-d) comienzan a definirse regiones bastante específicas. Al aumentar el tamaño se difuminan los máximos en zonas de alta densidad de población, y se establecen como zonas propensas a registrar granizo severo y/o significativamente severo las provincias de Mendoza, San Luis, norte de La Pampa, el área de las Sierras de Córdoba, Misiones y los estados adyacentes a Misiones en el sur de Brasil.

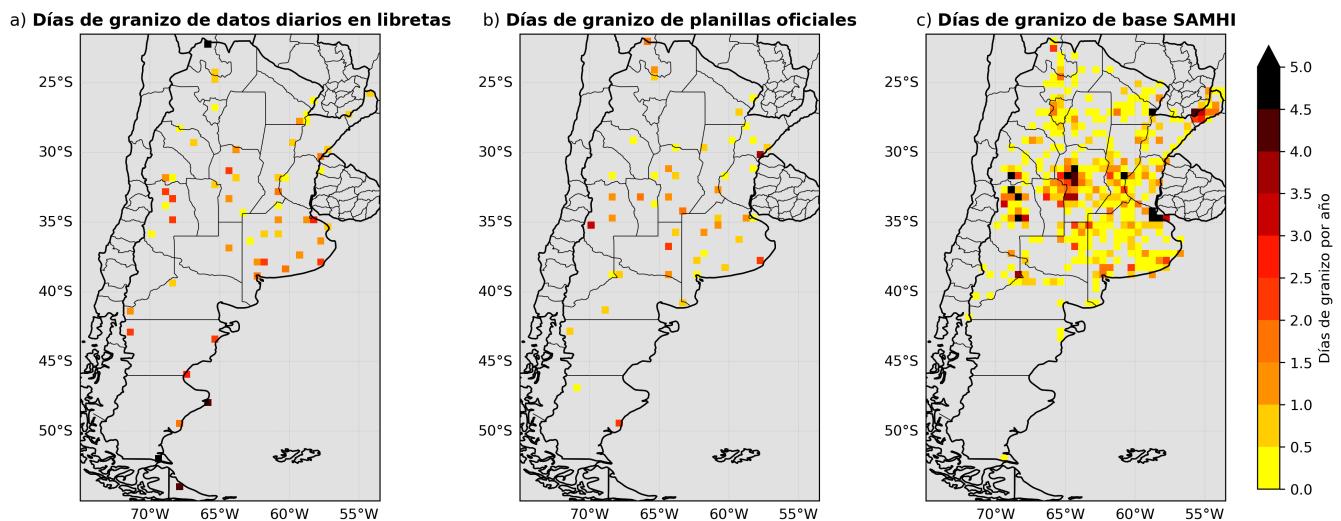


Figura 4.13. Comparación de días de granizo por año de las tres bases disponibles en este trabajo en el período 2018 - 2023.

A fin de ilustrar el valor agregado de la base SAMHI, la Figura 4.13 muestra los días de granizo en Argentina en el período 2018-2023 para las tres bases de datos utilizadas: datos diarios de estaciones, planillas de granizo y la base SAMHI (excluyendo los países limítrofes). Es muy notoria la diferencia de cobertura espacial conseguida por la base de datos SAMHI al incorporar los reportes ciudadanos. En particular, en el norte del país es muy destacable la mejora de la cobertura espacial en provincias como Chaco y Santiago del Estero, en las que la red oficial cuenta con muy poca densidad, inclusive con estaciones que no registraron ningún reporte en este período. Los reportes de la base SAMHI delimitan de manera más clara las áreas de mayor ocurrencia de granizo observados en los reportes oficiales. Cuyo (particularmente Mendoza), las Sierras de Córdoba y el noreste del país (sur de Misiones) se destacan como regiones con máxima ocurrencia de granizo en la base SAMHI. Además, se observan máximos de ocurrencia en regiones de alta densidad poblacional, como el Área Metropolitana de Buenos Aires, asociadas al elevado número de registros cada vez que una tormenta de granizo afecta la región.

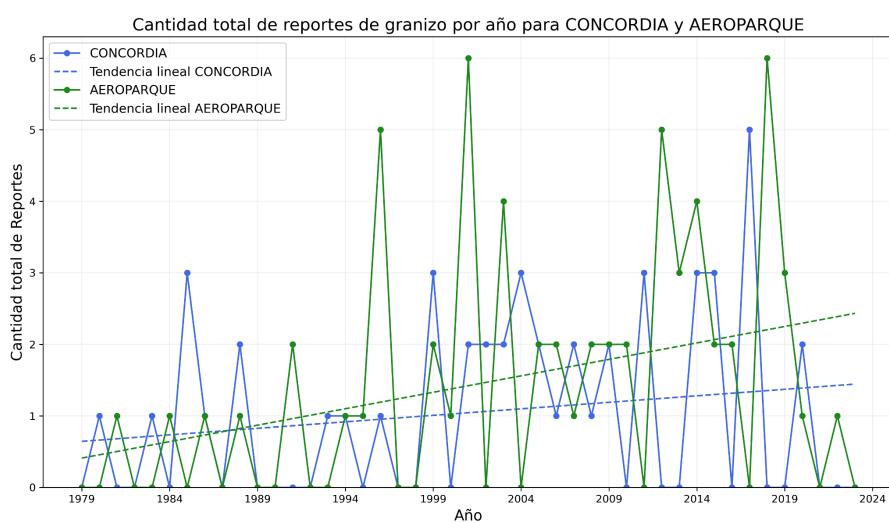
Aunque generalmente la base SAMHI cuenta con mayor cantidad de registros que los contenidos en las bases de datos de estaciones, en la región sur del país no se observan prácticamente registros en SAMHI.

Esto se debe a que el graupel es descartado durante el proceso de control de calidad por el equipo de SAMHI.

Otro ejemplo de las diferencias entre estas bases de datos, es el máximo de reportes ubicado en el noroeste del país. La estación de La Quiaca presenta un máximo en ambas bases de datos relacionadas con reportes oficiales (Fig. 4.13 a-b) que no es representado con tanta claridad en la base SAMHI (Fig. 4.13 c). Dejando en evidencia que hay cosas por mejorar en esta última, en particular, en regiones de condiciones de poca conectividad, las cuales presentan dificultades para encontrar reportes de calidad.

Parámetros ambientales asociados al granizo en estaciones seleccionadas

A partir de los resultados del análisis de la base de datos diarios de estaciones meteorológicas, se seleccionaron 6 estaciones representativas de diferentes regiones para el estudio de los parámetros ambientales: La Quiaca, Formosa Aero, Concordia, Córdoba Observatorio, Malargüe y Aeroparque, de las cuales 5 de ellas presentan una tendencia positiva significativa en el período 1960 - 2023 (ver Figura 4.5), que se mantiene para el período cubierto por los datos de reanálisis ERA5 (1979 - 2023, Figura 4.14). Si bien Córdoba Observatorio no presenta una tendencia positiva significativa, su ubicación en una de las zonas de máxima ocurrencia de granizo tanto en planillas oficiales como en reportes ciudadanos (Figura 3.13) justificó su inclusión en esta sección.



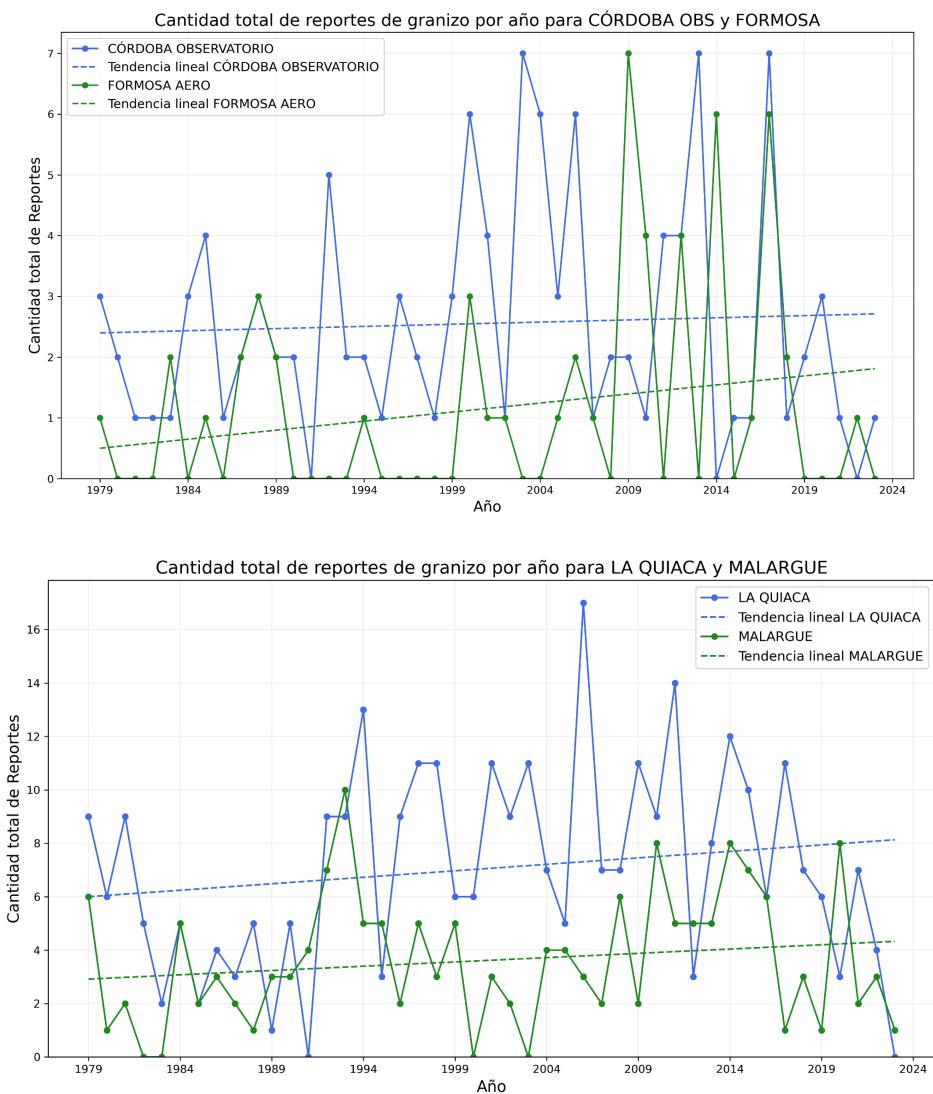


Figura 4.14. Cantidad total de reportes de granizo por año para las estaciones Aeroparque y Concordia (panel superior) y Córdoba observatorio y Formosa Aero (panel intermedio) y La Quiaca y Malargue Aero (panel inferior) en el período 1979 - 2023.

En esta sección, se estudia la variación temporal de los parámetros calculados a partir de los datos de reanálisis del ERA5. Los mismos son el MUCAPE, la cortante efectiva y la isoterma de 0°C. Buscando posibles tendencias en estos parámetros que sean coincidentes o no con la tendencia de ocurrencia de granizo en cada estación. Además, se analizan estos parámetros los días en que se reportó granizo en cada estación. Para ello se identificó la hora en la que se observó el máximo valor de MUCAPE durante el día del reporte como el horario representativo de cada evento. Con el objetivo de observar cómo estos parámetros favorecen el desarrollo de tormentas con potencial para producir granizo en las diferentes estaciones, a continuación se analiza su distribución en cada caso.

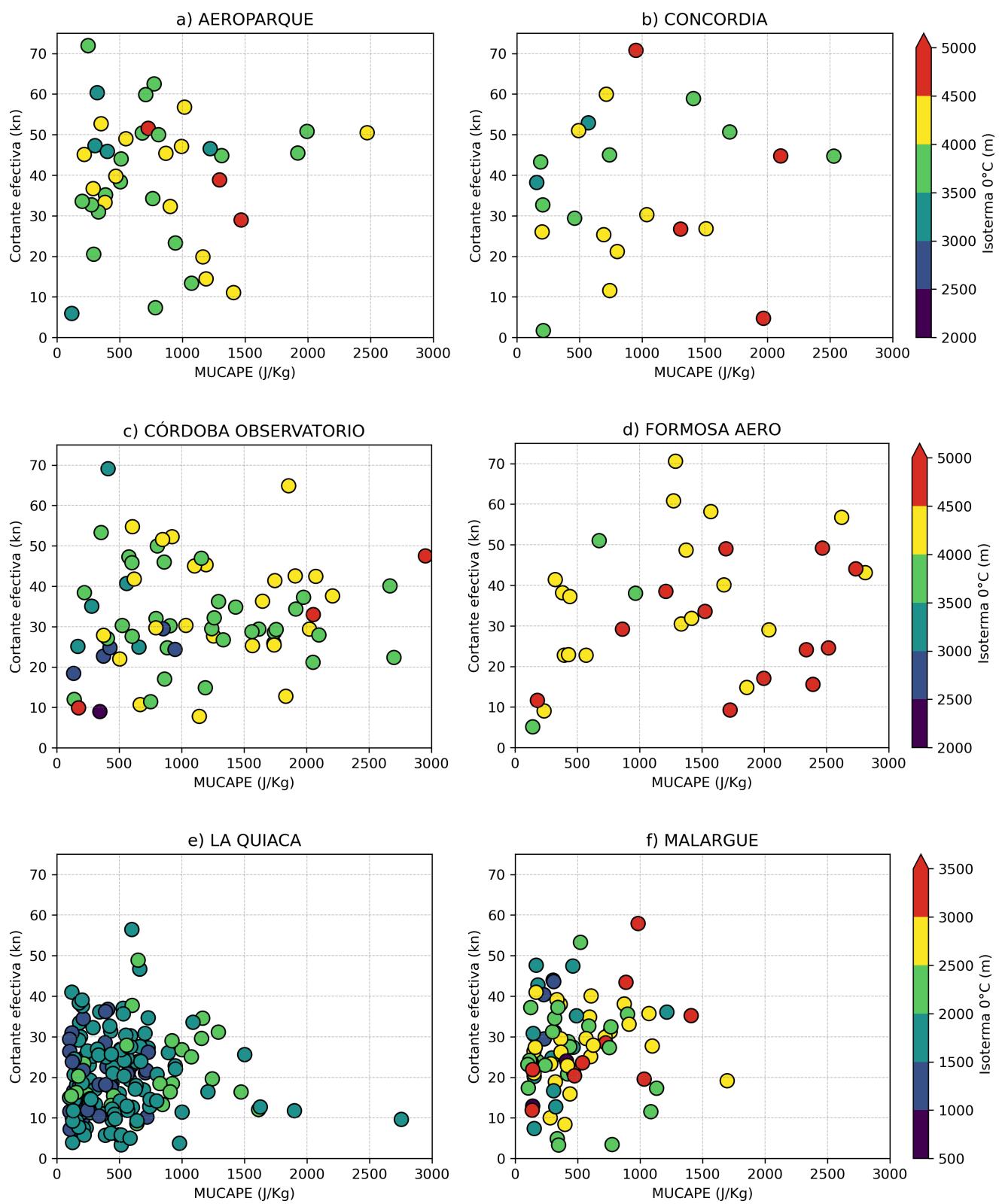


Figura 4.15. Diagramas de dispersión indicando la cortante efectiva, MUCAPE y altura de la isoterma 0°C sobre el nivel del suelo para los eventos de granizo en las distintas estaciones seleccionadas.

Analizando los gráficos de dispersión (Figura 4.15) se observa una fuerte variabilidad en los 3 parámetros para las estaciones de Aeroparque, Córdoba Observatorio y Concordia (Fig. 4.15 a-b-c) lo que sugiere que estos eventos de granizo ocurrieron bajo diferentes regímenes de organización de la convección, ya que como la misma depende fuertemente de la cortante, se observa una gran dispersión de este parámetro, con eventos de granizo con una cortante de 5 kt mientras que otros cercanos a los 70 kt. Se observan tanto valores de MUCAPE que superan los 2000 J/kg como valores muy menores, por debajo de los 250 J/kg. En ocasiones, los reportes están asociados también a cortantes efectivas por encima de los 30-40 kt, lo que sugiere que muchos de estos casos están relacionados potencialmente con modos convectivos supercelulares y granizos de características severas. La fuerte variabilidad también se observa en la altura del nivel de la isoterma 0°C, con casos de isotermas cercanas a superficie, (entre 2000 y 3500 m), y otras de mucha mayor altura (superando los 5000 m).

Formosa Aero presenta una gran mayoría de reportes con valores de MUCAPE mayores a 1000 J/Kg y valores altos en la isoterma de 0°C, entre 4000 y 5000 m y una amplia dispersión en los valores de cortante efectiva, aunque en muchos casos ésta se ubica por encima de los 30 kt (Figura 4.15 d). Esta distribución en estos parámetros es consistente con las altas frecuencias de granizo severo y significativamente severo encontradas para la región Noreste utilizando las planillas de granizo (Ver Figura 4.7). si bien el resultado de los entornos de esta estación puede no ser representativo de toda la región.

Por otro lado, la estación de La Quiaca presenta la gran mayoría de los reportes asociados a valores muy bajos de MUCAPE (casi todos los reportes con valores menores a 1000 J/Kg) y cortante, dando a entender que la mayoría de estos reportes están asociadas a ocurrencia de granizo no severo en tormentas características de la región poco organizadas (Figura 4.15 e). Los valores bajos de la isoterma de 0°C indican también poco potencial para el derretimiento del granizo. Por último, Malargüe (Figura 4.15 f) también presenta valores bajos de MUCAPE, menores a 1000 J/Kg, aunque la cortante efectiva alcanza en ocasiones valores altos para la organización de tormentas (superando en algunos casos los 45 nudos). Esta estación presenta además una gran variabilidad en la altura de la isoterma de 0°C.

A continuación analizamos las tendencias temporales de estos parámetros con el objetivo de entender su evolución en cada estación, y los posibles efectos de cambios en las distribuciones sobre la frecuencia de ocurrencia de granizo. Como se muestra en la Figura 4.15, existe una fuerte variabilidad en los entornos

asociados a los eventos de granizo en estas estaciones, lo que, desconociendo las características del tamaño del mismo, dificulta la atribución de los cambios en la frecuencia observada de granizo a un parámetro en particular. Sin embargo, analizar los percentiles 90 y 99 de las distribuciones de MUCAPE y cortante efectiva en cada estación puede proveer cierta información. Ya que cambios en los extremos de las distribuciones pueden estar asociados a una mayor frecuencia de eventos más extremos relacionados entonces, con eventos de granizo de mayor tamaño.

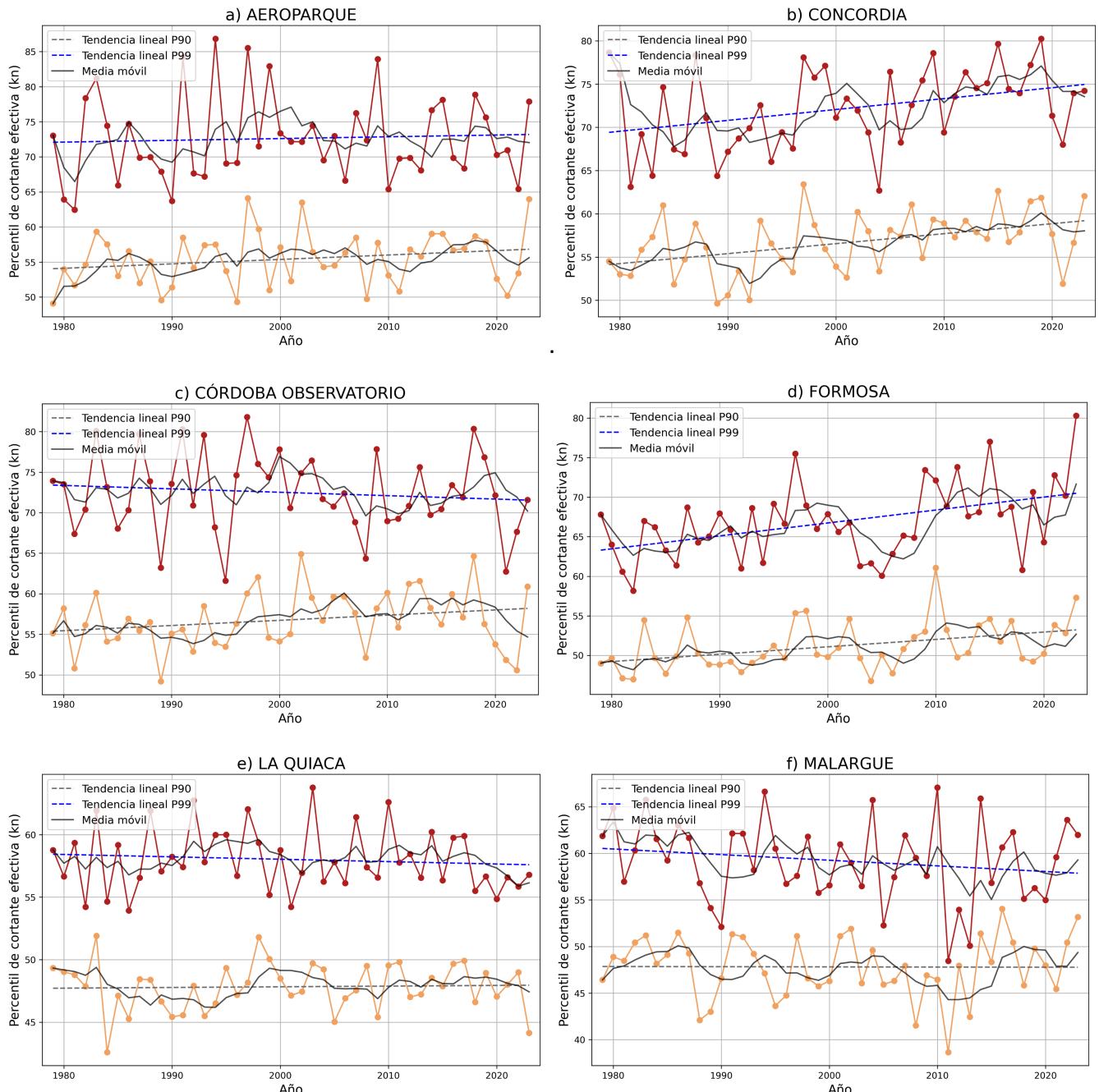


Figura 4.16. Serie temporal de los percentiles 90 y 99 de cortante efectiva en el período 1979 - 2023.

Las tendencias temporales de la cortante efectiva se muestran en la Figura 4.16. Las estaciones de Aeroparque Concordia y Formosa Aero presentan una tendencia positiva tanto para el percentil 99 y el percentil 90, significativas para las últimas dos estaciones (Figura 4.16 a), b), d). Este resultado indica una variación en la distribución hacia valores más extremos, lo que indica una mayor prevalencia de entornos más favorables para la formación de convección organizada y por ende que sea más probable la ocurrencia de granizo severo y significativamente severo (ver Figura 1.6, Bechis et al. 2024). Teniendo en cuenta además que estas estaciones presentan una gran dispersión en los entornos en los eventos de granizo, en algunos casos con valores de MUCAPE altos (discutido en la sección de los diagramas de dispersión), contribuyendo a la ocurrencia de granizo severo. En la estación de Córdoba Observatorio, el análisis resulta más complejo, dado que se observa una tendencia negativa en el percentil 99 de la cortante efectiva, y positiva en el percentil 90 (Figura 4.16 c), lo que sería contraproducente para entornos favorables de convección organizada en eventos más extremos.

La estación de La Quiaca presenta también una tendencia negativa en el percentil 99 mientras que el percentil 90 se mantiene constante (Figura 4.16 e), también siendo contraproducente para entornos favorables para la organización de la convección, esperando entonces menos situaciones favorables para el granizo severo en la estación. Por último, la estación de Malargüe presenta una tendencia negativa del percentil 99 bastante marcado (Figura 4.16 f). Esto tendería a favorecer la ocurrencia de convección menos organizada y por ende una menor frecuencia de eventos de granizo de tamaño grande.

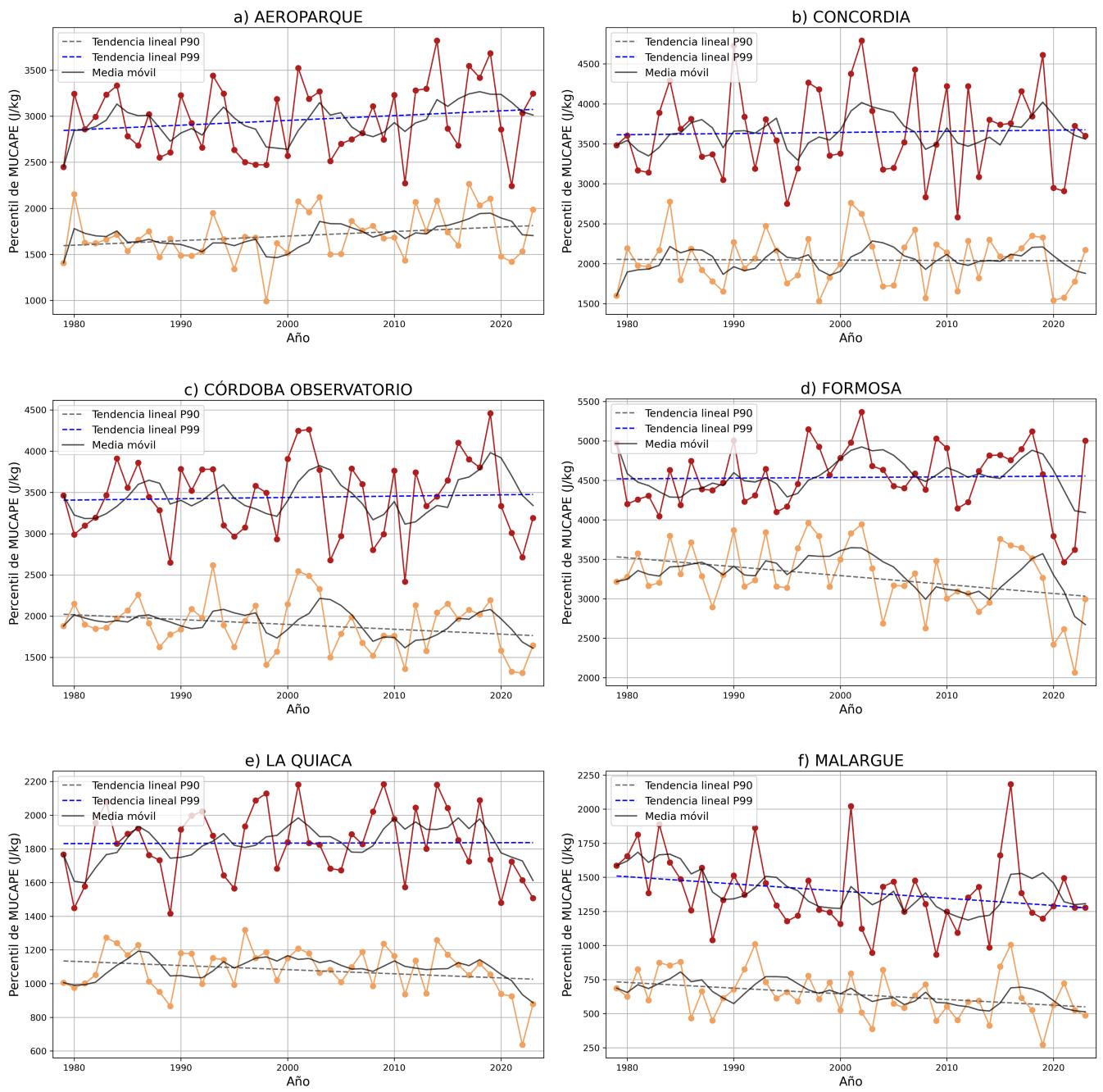


Figura 4.17. Serie temporal de los percentiles 90 y 99 de MUCAPE en el período 1979 - 2023.

Analizando la tendencia temporal del MUCAPE se destaca una tendencia positiva marcada para la estación de Aeroparque (Fig. 4.17 b), dando lugar a esperar hacia el futuro entornos más favorables para convección con mayor energía potencial disponible y por ende condiciones más propicias para granizo severo (Figura 4.17 a). La estación de Concordia también presenta tendencias positivas aunque sólo para el percentil 99, el percentil 90 se mantiene constante (Figura 4.17 b). Para las estaciones de Córdoba Observatorio y Formosa, se observa un aumento muy leve del percentil 99 con el tiempo, aunque el percentil 90 presenta una tendencia negativa (Figura 4.17 c), d). Esto podría concluir una tendencia a que

eventos con condiciones más extremas de inestabilidad tendrán un aumento en la energía potencial disponible, mientras que eventos menos inestables tienden a disminuir su energía disponible para la convección.

La estación de La Quiaca no presenta una tendencia para el percentil 99 pero sí una negativa para el percentil 90 (Figura 4.17 e), dando a esperar condiciones desfavorables con respecto a la energía potencial disponible a convección que pueda desarrollar granizo severo. Por último, la estación de Malargüe presenta una tendencia negativa para ambos percentiles, siendo muy marcada la del percentil 99 (Figura 4.17 f), dando lugar a esperar entornos asociados a convección menos severa y granizo de menor diámetro.

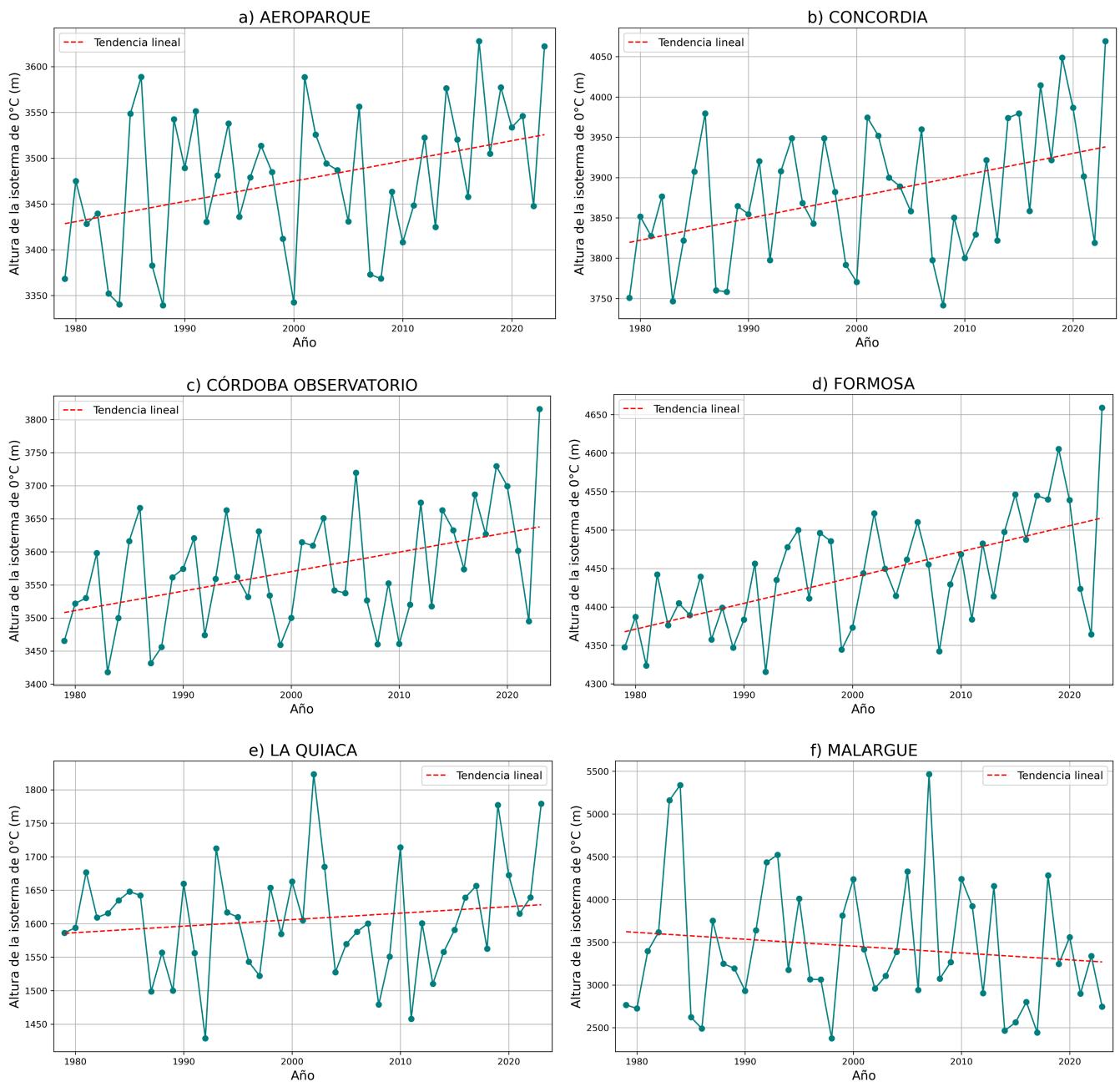


Figura 4.18. Serie temporal de la altura media anual de la isoterma 0°C en el período 1979 - 2023.

Todas las series temporales de la altura de la isoterma de 0°C, presentan una tendencia positiva, excepto por Malargüe (Figura 4.18). Un aumento en la altura de la isoterma de 0°C en general indica un mayor potencial de derretimiento de granizo, afectando principalmente los granizos de menor tamaño. Las estaciones de Aeroparque, Concordia, Córdoba Observatorio y Formosa presentan una amplia dispersión en los entornos asociados en los eventos de granizo (Figura 4.15), por lo que una tendencia positiva en la altura de la isoterma de 0°C (Figura 4.18 a), b), c), d) indica una condición desfavorable en las situaciones de granizo no severo. Como ya se mostró, los eventos de granizo en la estación de La Quiaca, están asociados a entornos con valores bajos de MUCAPE y de cortante efectiva por lo que probablemente

buenas partes de ellos estén asociados a granizo no severo. Es por ello que es esperable que un aumento en la altura de la isoterma 0°C como se observa en la Figura 4.18e) impacte negativamente en la frecuencia de ocurrencia de estos eventos. Sin embargo, esta estación muestra un aumento en la frecuencia de granizo en este período, lo que pone de manifiesto la complejidad del análisis dados los muchos factores que influyen en la formación de granizo.

Por otro lado, la estación de Malargüe muestra una disminución en la altura de la isoterma de 0°C (Figura 4.18 f). Esto potencialmente favorece la ocurrencia de granizo no severo ya que colabora en el no derretimiento del mismo.

Si bien obtener una integración de estos resultados requiere de analizar las interacciones entre las variables, llegar a conclusiones certeras de la evolución futura de los reportes de granizo es sumamente complejo. Los reportes de granizo analizados son fenómenos que ocurren ocasionalmente, los datos diarios en libretas meteorológicas no poseen datos de horario de la ocurrencia de granizo ni de su tamaño, imposibilitando así la caracterización de los entornos específicos en cada estación asociados a granizo no severo, severo o significativamente severo. Por esto, es necesario buscar y promover la construcción de series extensas y robustas de reportes de granizo, y que las observaciones en el Servicio Meteorológico Nacional se realicen manteniendo los esfuerzos de consolidar las planillas de granizo. Esto es muy importante para este tipo de estudios y nos permitirá conocer de manera más adecuada los entornos asociados en la ocurrencia de granizo y por ende, poder pronosticarlos de mejor manera.

5. Conclusión

El análisis espacio-temporal de la ocurrencia de granizo en el sudeste de Sudamérica, y especialmente en Argentina, realizado en este trabajo, aporta conocimientos valiosos sobre la frecuencia, distribución y factores asociados a este fenómeno.

A partir de datos de estaciones meteorológicas se realizó una climatología de granizo en Argentina en el período 1960-2023. Para este análisis el trabajo incluyó un exhaustivo control de calidad. La falta de datos en algunas estaciones limita la descripción de los patrones de granizo en ciertas áreas, especialmente en el período anterior a 1960. Se identificaron tres áreas principales con alta frecuencia de granizo: el noroeste argentino, la región central del país (Cuyo y Córdoba) y la región patagónica, en aspectos generales coincidiendo con estudios previos (Mezher et al. 2012). En particular, los máximos de frecuencia se localizan en las estaciones de La Quiaca, San Rafael y en el sur del país Río Gallegos Aero (con 6.4, 3.6 y 6.6 reportes por año respectivamente). El análisis de información disponible en planillas de granizo indica que esta última región, Patagonia Sur, cuenta con muchos reportes de diámetro menor a 0.5 cm. Esto sugiere que la mayoría de los reportes del sur del país estarían relacionados con eventos de graupel o algún tipo de precipitación sólida, pero no considerado granizo asociado a convección húmeda profunda. Sería necesario en el futuro avanzar en tener medidas de la masa de estas partículas de modo que permita distinguir la densidad de las mismas.

En el aspecto de la estacionalidad, Argentina presenta una alta concentración de eventos en las estaciones cálidas (verano y primavera), con hasta 2.9 reportes por verano en La Quiaca y 1.9 en Río Gallegos, y con un máximo relativo en la región central de 1.8 en San Rafael, Mendoza. Durante la primavera se mantiene la ubicación de los máximos del noroeste y del sur, pero el máximo relativo del centro oeste, desplazándose hacia la provincia de Córdoba (entre 1 y 1.3 días de granizo por año). Las estaciones frías, presentan una merma considerable en la cantidad de reportes. El otoño presenta características similares en la ubicación del granizo que el verano, mientras que en el invierno se denota un desplazamiento de la ocurrencia de granizo hacia el este del país.

Si bien el patrón general de frecuencias de ocurrencia de granizo es bastante similar al encontrado en Mezher et al. (2012), las diferencias encontradas en base a la inclusión o no de algunas estaciones ponen

de manifiesto las dificultades en la determinación de las regiones más relevantes para el granizo en ausencia de una red observacional densa y con observaciones continuas en el tiempo.

En el análisis de la tendencia en la ocurrencia de granizo, se destacan el noroeste y el sur del país con tendencias positivas y significativas de las estaciones disponibles. Sobre el centro del territorio, el sur de Cuyo presenta tendencias positivas y significativas, mientras que el norte de esta región negativas pero no significativas. La provincia de Córdoba presenta variabilidad en las tendencias por estación, aunque predominando desde la capital hacia el sur las tendencias negativas. Desde la Ciudad de Buenos Aires hacia el norte llegando hasta las provincias de Entre Ríos y Corrientes, las tendencias resultan positivas y en varios casos significativas para algunas estaciones. Se destaca el sudeste de Corrientes y noreste de Entre Ríos como un núcleo importante en el que varias estaciones cercanas indican un aumento significativo en la frecuencia de granizo.

Otro aspecto interesante de este trabajo es el análisis de los diámetros de granizo y su distribución espacial a partir de las planillas de granizo del Servicio Meteorológico Nacional. Estos datos indican que el granizo menor a 2 cm se presenta con mayor frecuencia en el noroeste y en el sur de Buenos Aires, mientras que el granizo severo (entre 2 y 5 cm) tiene una mayor prevalencia en el noreste del país y en las regiones de Córdoba, Cuyo y Centro Este. La ocurrencia de granizo significativamente severo se concentra principalmente en Cuyo, Noreste y Córdoba, con el Noreste mostrando los tamaños máximos de hasta 7 cm. La Patagonia presenta reportes de granizo entre 1 a 2 cm en la región norte, y más chicos en la región sur asociados probablemente a graupel, aunque se destaca un caso particular en la estación de San Julián Aero, donde múltiples reportes de granizo severo en el mismo período sugieren posibles errores en el registro. Además, regiones extensas en las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Santa Fe donde es esperable que se observe alta frecuencia de granizo carecen de información confiable en las bases de datos oficiales. Este análisis, aunque preliminar debido a limitaciones en la continuidad y calidad de algunos reportes, permite observar una clara diferenciación regional en la severidad del granizo en Argentina.

La base de datos SAMHI demuestra ser una herramienta valiosa y complementaria a las bases oficiales de estaciones meteorológicas para el análisis de la distribución espacial y los tamaños de granizo en Argentina y la región. Al centrarse en reportes ciudadanos, SAMHI aporta una cobertura espacial significativamente mayor en áreas con alta densidad poblacional, como el área metropolitana de Buenos

Aires, y en regiones con pocos datos oficiales, como Chaco y Santiago del Estero. Además, SAMHI es coherente con las zonas de alta frecuencia de granizo observadas en las bases oficiales, como Cuyo, las Sierras de Córdoba y el noreste argentino.

El análisis de tamaños muestra una concentración de reportes de granizo pequeño (2 cm) y algunos máximos relativos de granizo severo y significativamente severo (de hasta 7 cm) en el noreste y regiones centrales del país. La posibilidad de comparar datos con estaciones permite validar y precisar la información, aunque se observa que en áreas de baja densidad poblacional o con limitaciones de conectividad, como el sur del país y el noroeste, la base SAMHI tiene menor cantidad de registros, lo cual evidencia la necesidad de fortalecer la recolección de reportes en estas áreas.

En conclusión, SAMHI complementa y extiende la cobertura de datos meteorológicos, mejorando la identificación de eventos de granizo en zonas urbanas y rurales de frecuencia de ocurrencia de actividad convectiva, aunque se recomienda un enfoque continuo en la verificación de datos y en el desarrollo de métodos para cubrir áreas con menor acceso a reportes ciudadanos.

El análisis de los entornos asociados a la ocurrencia de granizo en seis estaciones representativas de diferentes regiones de Argentina revela una diversidad significativa en los parámetros meteorológicos y tendencias temporales. La mayoría de las estaciones analizadas (5 de 6) presentan tendencias positivas significativas en la ocurrencia de granizo para los períodos analizados (1960-2023 y 1979-2023). Se observó una fuerte variabilidad en los entornos asociados a eventos de granizo en estas estaciones, poniendo de manifiesto las diferentes condiciones ambientales que dan lugar a estos fenómenos.

La evolución de parámetros como el MUCAPE, la cortante efectiva y la altura de la isoterma de 0°C en las estaciones muestran comportamientos variados. Se destacan los aumentos en MUCAPE y la altura de la isoterma 0°C en varias estaciones, lo que sugiere un mayor potencial para eventos de granizo severo y mayor efecto de derretimiento afectando mayormente los granizos de tamaño menor. En estaciones como La Quiaca y Malargüe, asociadas a entornos menos inestables se observan tendencias negativas en algunos parámetros críticos como el MUCAPE y la cortante efectiva.

La falta de información detallada en los reportes, como el horario y tamaño del granizo, limita la capacidad de caracterizar con precisión los entornos asociados a distintos tipos de granizo. Esto subraya la necesidad de desarrollar series de datos más completas y sistemáticas, tanto así como de consolidar las

observaciones meteorológicas en el Servicio Meteorológico Nacional y la recolección de los reportes ciudadanos en la base SAMHI. Este esfuerzo permitirá una mejor comprensión de los entornos asociados y, en consecuencia, una mejora en la predicción de eventos de granizo en el futuro.

Trabajos a futuro

- Resulta fundamental asegurar la continuidad de la recolección de reportes de la base SAMHI de manera de poder en el futuro trasladar este tipo de estudio climatológico analizando tendencias regionales, frecuencias espaciales y temporales, y tamaños asociados, a toda Sudamérica. Búsquedas retrospectivas de reportes disponibles en internet durante la era digital pre-SAMHI, así como en archivos periodísticos fuera de línea serán fundamentales para generar series robustas y ampliar el período disponible para el análisis.
- Dada la continuación de los esfuerzos en el desarrollo de las series de datos más completas y sistemáticas, analizar los parámetros ambientales asociados al granizo, así como sus situaciones sinópticas asociadas, contribuirá a entender aún mejor las situaciones favorables para granizo severo y significativamente severo, y así poder predecirlas adecuadamente.

6. Bibliografía

Allen, J. T., Giammanco, I. M., Kumjian, M. R., Jurgen Punge, H., Zhang, Q., Groenemeijer, P., ... & Ortega, K. (2020). Understanding hail in the earth system. *Reviews of Geophysics*, 58(1), e2019RG000665. <https://doi.org/10.1029/2019RG000665>

Bang, S. D., & Cecil, D. J. (2019). Constructing a multifrequency passive microwave hail retrieval and climatology in the GPM domain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(9), 1889-1904. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0042.1>

Bechis, H., Ribeiro, B., Cancelada, M. Salio, P., Ruiz, J., Granato, A., & Saucedo, M. Environments Associated with Reports of Hail and Convectively-Generated Damaging Wind Gusts in South America. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4962024>

Blumberg, W. G., Halbert, K. T., Supinie, T. A., Marsh, P. T., Thompson, R. L., & Hart, J. A. (2017). SHARPpy: An open-source sounding analysis toolkit for the atmospheric sciences. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1625-1636. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00309.1>

Bruick, Z. S., Rasmussen, K. L., & Cecil, D. J. (2019). Subtropical South American hailstorm characteristics and environments. *Monthly Weather Review*, 147(12), 4289-4304. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0011.1>

Changnon, S. A., Changnon, D., & Hilberg, S. D. (2009). Hailstorms across the nation: An atlas about hail and its damages. ISWS Contract Report CR-2009-12.

Dolan, B., Rutledge, S. A., Lim, S., Chandrasekar, V., & Thurai, M. (2013). A robust C-band hydrometeor identification algorithm and application to a long-term polarimetric radar dataset. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2162-2186. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0275.1>

Dotzek, N., Groenemeijer, P., Feuerstein, B., & Holzer, A. M. (2009). Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric research*, 93(1-3), 575-586. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.020>

Galligani, V. S., Bang, S. D., Cancelada, M., Salio, P., Bechis, H., Mezher, R., & Granato, A. (2024). Testing a spaceborne passive-microwave severe hail retrieval over Argentina using ground-based dual-polarization radar data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1-19, <https://doi.org/10.1002/qj.4861>

Garuti, E., Salio, P., Galligani, V. S. (2024). Avances en la Detección de Granizo: Un Enfoque basado en Radares de Banda C con Polarización Doble.

Kumjian, M. R., & Lombardo, K. (2020). A hail growth trajectory model for exploring the environmental controls on hail size: Model physics and idealized tests. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77(8), 2765-2791. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0016.1>

Kumjian, M. R., Gutierrez, R., Soderholm, J. S., Nesbitt, S. W., Maldonado, P., Luna, L. M., ... & Salio, P. (2020). Gargantuan hail in Argentina. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(8), E1241-E1258. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0012.1>

Matsudo, C. M., & Salio, P. V. (2011). Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina. *Atmospheric Research*, 100(4), 523-537. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.11.004>

Marcelino, E. V., de Oliveira Marcelino, I. P. V., & de Moraes Rudorff, F. (2004). Cyclone Catarina: Damage and vulnerability assessment. Florianópolis, Brasil. URL: [http://mtc-m12. sid. inpe. br/col/sid. inpe. br/iris, 401912\(2006\), 01-13.](http://mtc-m12. sid. inpe. br/col/sid. inpe. br/iris, 401912(2006), 01-13.)

Martins, J. A., Brand, V. S., Capucim, M. N., Felix, R. R., Martins, L. D., Freitas, E. D., ... & Cecil, D. J. (2017). Climatology of destructive hailstorms in Brazil. *Atmospheric Research*, 184, 126-138. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.10.012>

Mezher, R. N., Doyle, M., & Barros, V. (2012). Climatology of hail in Argentina. *Atmospheric Research*, 114, 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.020>

Mohr, S., & Kunz, M. (2013). Recent trends and variabilities of convective parameters relevant for hail events in Germany and Europe. *Atmospheric Research*, 123, 211-228. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.016>

Mulholland, J. P., Nesbitt, S. W., Trapp, R. J., Rasmussen, K. L., & Salio, P. V. (2018). Convective storm life cycle and environments near the Sierras de Córdoba, Argentina. *Monthly Weather Review*, 146(8), 2541-2557. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0081.1>

Púčik, T., Groenemeijer, P., Rýva, D., & Kolář, M. (2015). Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in central Europe. *Monthly Weather Review*, 143(12), 4805-4821. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0104.1>

Prein, A. F., & Holland, G. J. (2018). Global estimates of damaging hail hazard. *Weather and Climate Extremes*, 22, 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.004>

Rasmussen, S. O., Bigler, M., Blockley, S. P., Blunier, T., Buchardt, S. L., Clausen, H. B., ... & Winstrup, M. (2014). A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on

three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 106, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.007>

Rodríguez, A. B., & Muñoz, A. R. (2017). Granizo: estudio de variabilidad climática en los valles Norpatagónicos. Ediciones INTA. https://www.cafi.org.ar/wp-content/uploads/2017/10/inta_granizo_estudio-de-variabilidad-climatica-en-los-valles-norpatagonicos_1.pdf

Rosenfeld, D., Woodley, W. L., Krauss, T. W., & Makitov, V. (2006). Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorm feeder clouds in Argentina. *Journal of applied meteorology and climatology*, 45(9), 1261-1281. <https://doi.org/10.1175/JAM2403.1>

Salio, P., Nicolini, M., & Zipser, E. J. (2007). Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. *Monthly Weather Review*, 135(4), 1290-1309. <https://doi.org/10.1175/MWR3305.1>

Salio, P., Bechis, H., Ribeiro, B. Z., de Lima Nascimento, E., Galligani, V., Garcia, F., ... & Villagrán Asiales, C. I. (2024). Toward a South American high-impact weather reports database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(7), E1204-E1217. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0063.1>

Taszarek, M., Allen, J. T., Púčik, T., Hoogewind, K. A., & Brooks, H. E. (2020). Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. *Journal of Climate*, 33(23), 10263-10286. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0346.1>

Taszarek, M., Brooks, H. E., & Czernecki, B. (2017). Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 145(4), 1511-1528. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0384.1>

Thompson, R. L., Mead, C. M., & Edwards, R. (2007). Effective storm-relative helicity and bulk shear in supercell thunderstorm environments. *Weather and forecasting*, 22(1), 102-115. <https://doi.org/10.1175/WAF969.1>

Van Den Heever, S. C., & Cotton, W. R. (2004). The impact of hail size on simulated supercell storms. *Journal of the atmospheric sciences*, 61(13), 1596-1609. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<1596:TIOHSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<1596:TIOHSO>2.0.CO;2)

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... & Van Mulbregt, P. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature methods*, 17(3), 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

Weisman, M. L., & Klemp, J. B. (1982). The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Monthly Weather Review*, 110(6), 504-520. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2)

Zhou, Z., Zhang, Q., Allen, J. T., Ni, X., & Ng, C. P. (2021). How many types of severe hailstorm environments are there globally?. *Geophysical Research Letters*, 48(23), e2021GL095485. <https://doi.org/10.1029/2021GL095485>

Zipser, E. J., Cecil, D. J., Liu, C., Nesbitt, S. W., & Yorty, D. P. (2006). Where are the most intense thunderstorms on Earth?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(8), 1057-1072. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-8-1057>

7. Anexo I

Tabla de estaciones meteorológicas oficiales

Estación	Latitud	Longitud	Altura (m)
RIO CUARTO-AERO	-33,12	-64,23	421
PERGAMINO INTA	-33,93	-60,55	65
TRES ARROYOS	-38,38	-60,27	108
SALTA AERO	-24,85	-65,48	1221
BELLA VISTA INTA	-28,43	-58,92	120
PILAR OBS.	-31,67	-63,88	338
CERES AERO	-29,88	-61,95	88
MAR DEL PLATA	-37,93	-57,58	24
SAN LUIS AERO	-33,27	-66,35	713
VILLA MARIA DEL RIO SECO	-29,90	-63,68	341
MONTE CASEROS	-30,27	-57,65	54

PARANA AERO	-31,78	-60,48	78
VILLA DOLORES	-31,95	-65,13	569
NUEVE DE JULIO	-35,45	-60,88	76
DOLORES AERO	-36,35	-57,73	9
GUALEGUAYCHU AERO	-33,00	-58,62	49
AZUL AERO	-36,75	-59,83	132
CORONEL SUAREZ AERO	-37,43	-61,88	233
JUNIN	-34,58	-60,93	80
SANTIAGO DEL ESTERO AERO	-27,77	-64,30	199
SAN MIGUEL	-34,55	-58,73	26
BAHIA BLANCA AERO	-38,73	-62,17	83
BUENOS AIRES	-34,58	-58,48	25
ROQUE SAENZ PEÑA AERO	-26,82	-60,45	92
LABOULAYE AERO	-34,13	-63,37	137
ROSARIO	-32,92	-60,78	25
SANTA ROSA AERO	-36,57	-64,27	191
TRENQUE LAUQUEN	-35,97	-62,73	95
TANDIL AERO	-37,23	-59,25	175
BOLIVAR	-36,25	-61,10	93
PEHUajo AERO	-35,87	-61,90	87
MENDOZA OBS.	-32,88	-68,85	827
SAN RAFAEL AERO	-34,58	-68,40	748
MENDOZA AERO	-32,83	-68,78	704
SAN MARTIN (MZA)	-33,08	-68,42	653
AEROPARQUE BUENOS AIRES	-34,57	-58,42	6
COMODORO RIVADAVIA AERO	-45,78	-67,50	46

CORDOBA OBS.	-31,40	-64,18	425
EL PALOMAR AERO	-34,60	-58,60	12
EZEIZA AERO	-34,82	-58,53	20
LA QUIACA OBS.	-22,10	-65,60	3459
MALARGUE AERO	-35,50	-69,58	1425
NEUQUEN AERO	-38,95	-68,13	271
PIGUE	-37,36	-62,23	304
PUERTO DESEADO AERO	-47,73	-65,92	80
RIO GALLEGOS AERO	-51,62	-69,28	19
SAN ANTONIO OESTE AERO	-40,73	-64,95	7
SAN JUAN AERO	-31,60	-68,55	630
USHUAIA AERO	-54,80	-68,32	14
GOBERNADOR GREGORES	-48,78	-70,17	358
LA RIOJA	-29,38	-66,82	1600
CORDOBA AERO	-31,32	-64,22	474
ORAN AERO	-23,15	-64,32	357
POSADAS AERO	-27,37	-55,97	125
TRELEW AERO	-43,20	-65,27	43
TUCUMAN AERO	-26,85	-65,10	450
LAGO ARGENTINO	-50,33	-72,30	220
MARCOS JUAREZ AERO	-32,70	-62,15	114
PASO DE LOS LIBRES	-29,68	-57,15	70
RECONQUISTA AERO	-29,18	-59,70	53
ESQUEL AERO	-42,93	-71,15	797
OBERA	-27,48	-55,13	343
RIO GRANDE	-53,80	-67,75	22

SAUCE VIEJO	-31,70	-60,82	18
JACHAL	-30,25	-68,75	1175
LA PLATA AERO	-34,97	-57,93	23
BARILOCHE AERO	-41,15	-71,17	840
SAN CARLOS (MZA)	-33,77	-69,03	940
OLIVEROS INTA	-32,55	-60,85	26
GENERAL PAZ	-27,75	-57,63	74
SAN JULIAN AERO	-49,32	-67,75	62
FORMOSA AERO	-26,20	-58,23	60
CHAMICAL	-30,37	-66,28	461
TINOGASTA	-28,07	-67,57	1201
CORRIENTES AERO	-27,45	-58,77	62
IGUAZU AERO	-25,73	-54,47	270
CONCORDIA	-31,30	-58,02	38
RESISTENCIA AERO	-27,45	-59,05	52
JUJUY AERO	-24,38	-65,08	905
SAN PEDRO	-33,68	-59,68	-
VIEDMA AERO	-40,85	-63,02	7
PASO DE INDIOS	-43,82	-68,88	460
FAMAILLA	-27,01	-65,42	363
LAS LOMITAS	-24,70	-60,58	130
MARCOS JUAREZ INTA	-32,68	-62,15	110
LAS FLORES	-36,03	-59,10	36
CATAMARCA	-28,60	-65,77	1700
BERNARDO DE IRIGOYEN AERO	-26,25	-53,65	815
PERITO MORENO	-46,60	-70,93	429

TOLHUIN	-54,70	-67,25	105
CORONEL PRINGLES	-37,98	-61,38	-
PUNTA INDIO B.A.	-35,37	-57,28	22
TARTAGAL AERO	-22,65	-63,82	450