



# 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

## Climatología de eventos de granizo en Argentina

Tesista: Romina Nahir Mezher

Director: Vicente Barros

Co-Director: Moira Doyle

A mi familia, por permitirme hacer realidad mis sueños

A Martín, por hacerme cada día más feliz

## **Agradecimientos**

Al Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos por darme un lugar para desarrollar mi carrera.

Al Dr. Vicente Barros por darme mi primer lugar de trabajo y por todo lo que me enseño.

A Moira Doyle, por aconsejarme y por llevarme al Instituto de Clima y Agua.

A Claudia Campetella, por escucharme y enseñarme tanto.

A Pablo Mercuri, por el “aguante” en estos dos años, su generosidad y por enseñarme a trabajar con otros profesionales.

A mis compañeros de INTA, por el apoyo de todo este tiempo.

A Mónica Marino, gracias a vos encontré mi vocación y la profesión que me apasiona.

A mis amigas de la vida, Mer, Ceci y Noe por escucharme siempre y reírnos tanto.

A “Las brujas”, Barbi, Carito, Caro, Cyn, Lau, Lala, Palom por todos los buenos momentos vividos y por las meriendas de las “ocho”.

A Ezequiel, Juan, Lorena, Luciano, Matías, Natalia, Ramiro, Ricardo por estar conmigo siempre en los momentos más importantes de mi vida.

## **Resumen**

Los últimos años se han caracterizado por la ocurrencia de granizo en grandes ciudades que perjudicaron y condicionaron las actividades cotidianas. El análisis de eventos de granizo es complejo debido a la aleatoriedad que presenta el fenómeno y a la forma puntual en que se realiza la observación.

Se realizó una recopilación, armado y verificación de una completa base de datos de eventos de granizo de todo el país. Se estudió el comportamiento del granizo en forma espacial y temporal como así también metodologías de interpolación para esta variable.

La distribución espacial de los promedios anuales mostró dos claras regiones con máximos en la ocurrencia anual de eventos. El análisis de las frecuencias mensuales y estacionales mostraron que las estaciones cálidas, Primavera y Verano son las que registran la mayor cantidad de eventos. A su vez se estudiaron la hora y duración más frecuente de ocurrencia del evento, el tamaño y tiempo de conservación en el suelo del granizo y la intensidad del fenómeno.

Se estudiaron las tendencias regionales de los promedios anuales en todo el país y se analizó la circulación atmosférica asociada a la ocurrencia de eventos de granizo sobre la región Pampeana.

# Índice

Resumen

Listado de figuras

Listado de tablas

## 1. Introducción

1.1. Climatologías de granizo en el mundo

1.2. Estudios previos de granizo en Argentina

1.3. Motivación y Objetivos

## 2. Datos y metodología

2.1. Observaciones de eventos de granizo

2.2. Datos de eventos de granizo utilizados

2.2.1. Controles de calidad de los datos observados

2.2.2. Cambio de ubicación de las estaciones meteorológicas

2.2.3. Estaciones meteorológicas con más de 75 años de datos

2.2.4. Estaciones meteorológicas solicitadas al INTA

2.3. Datos obtenidos a partir de las planillas de granizo

2.4. Frecuencia de observación diaria

2.5. Estadísticas de los datos

2.5.1. Frecuencia anual

2.5.2 Frecuencia mensual y estacional

2.6. Tendencias

2.7. Circulación Atmosférica

## 3. Estudio de métodos de interpolación

3.1. Método Kriging

3.2. Mapas interpolados

## 4. Climatología de eventos de granizo en Argentina

- 4.1. Promedios anuales
  - 4.2. Frecuencia estacional
  - 4.3. Información de las planillas de granizo
  - 5. Tendencias
    - 5.1. Tendencias por estación meteorológica
    - 5.2. Tendencias regionales
  - 6. Circulación atmosférica asociada a la ocurrencia de eventos de granizo
  - 7. Conclusiones
- Anexo
- Referencias

## Listado de figuras

**Fig. 1.** Promedio de días de granizo en periodos de 5 años en Estados Unidos (Changnon y Changnon 2000).

**Fig. 2.** Frecuencia anual de eventos de granizo durante el periodo 1961-2005 en China (Zhang y otros 2008).

**Fig. 3.** Frecuencia anual de eventos de granizo durante el periodo 1987-1996 en Francia (Vinet 2001).

**Fig. 4.** Frecuencia anual de eventos de granizo en Argentina (Hoxmark 1927).

**Fig. 5.** Casilleros en los cuales se indica la presencia de granizo en la estación.

**Fig. 6.** Planillas de granizo de la estación meteorológica San Rafael.

**Fig. 7.** Ubicación de las 91 estaciones meteorológicas utilizadas.

**Fig. 8.** Ejemplo de la base de datos diaria de granizo.

**Fig. 9.** Porcentaje de datos faltantes por estación meteorológica.

**Fig. 10.** Libro de observaciones pluviométricas del año 1943. Se marca con un círculo rojo como se registraron los eventos de granizo.

**Fig. 11.** Modelo teórico de un Semivariograma con sus principales componentes.

**Fig. 12.** Semivariograma experimental de los promedios anuales de eventos de granizo.

**Fig. 13.** Semivariograma teórico con un ajuste esférico.

**Fig. 14.** Boxplot de promedio de promedios anuales de eventos de granizo.

**Fig. 15.** Tendencias espaciales de los promedios de eventos de granizo sobre Argentina. En rojo se muestra la tendencia de Oeste a Este y en azul la tendencia de Norte a Sur.

**Fig. 16.** Resultado de la verificación del ajuste para el método Ordinary Kriging.

**Fig. 17.** Promedio anual de eventos de granizo interpolado con el método Ordinary Kriging.

**Fig. 18.** Ídem figura 17 con el método Inversa de la Distancia.

**Fig. 19.** Frecuencia Porcentual de eventos de granizo en Verano.

**Fig. 20.** Ídem figura 19, pero para el Otoño.

**Fig. 21.** Ídem figura 19, pero para el Invierno.

**Fig. 22.** Ídem figura 19, pero para el Primavera.

**Fig. 23.** Frecuencia de eventos por mes en la región de Cuyo (periodo 1960-2008).

**Fig. 24.** Ídem figura 23, pero para la región Noroeste.

**Fig. 25.** Ídem figura 23, pero para la región Noreste.

**Fig. 26.** Ídem figura 23, pero para la provincia de Córdoba.

**Fig. 27.** Ídem figura 23, pero para la región Sur de Santa Fe, Entre Ríos y Norte de Buenos Aires.

**Fig. 28.** Ídem figura 23, pero para la región Sur de Buenos Aires.

**Fig. 29.** Ídem figura 23 pero para la región Patagonia Norte.

**Fig. 30.** Ídem figura 23 pero para la región Patagonia Sur.

**Fig. 31.** Hora de ocurrencia de eventos de granizo en Buenos Aires y La Pampa.

**Fig. 32.** Ídem figura 31, pero para Ciudad de Buenos Aires.

**Fig. 33.** Ídem figura 31, pero para Córdoba.

**Fig. 34.** Duración de la ocurrencia de eventos de granizo en Buenos Aires y La Pampa.

**Fig. 35.** Ídem figura 34, pero para Ciudad de Buenos Aires.

**Fig. 36.** Ídem figura 34, pero para Córdoba.

**Fig. 37.** Intensidad de los eventos de granizo en presencia de lluvia en Buenos Aires y La Pampa.

**Fig. 38.** Intensidad de la ocurrencia de eventos de granizo en Buenos Aires y La Pampa.

**Fig. 39.** Ídem figura 37, pero para Córdoba.

**Fig. 40.** Ídem figura 38, pero para Córdoba.

**Fig. 41.** Tamaño de granizo en Buenos Aires y La Pampa.

**Fig. 42.** Ídem figura 41, pero para Córdoba.

**Fig. 43.** Tiempo de conservación en superficie del granizo en Buenos Aires y La Pampa.

**Fig. 44.** Ídem figura 43, pero para Córdoba.

**Fig. 45.** Tendencias por estación meteorológica.

**Fig. 46.** Marcha anual de promedios de eventos de granizo en la región Patagonia Sur.

**Fig. 47.** Ídem figura 46, pero para la región Patagonia Norte.

**Fig. 48.** Ídem figura 46, pero para la región Noroeste.

**Fig. 49.** Ídem figura 46, pero para la región Noreste.

**Fig. 50.** Ídem figura 46, pero para la región de Cuyo.

**Fig. 51.** Ídem figura 46, pero para la provincia de Córdoba.

**Fig. 52.** Ídem figura 46, pero para la región Buenos Aires Sur.

**Fig. 53.** Ídem figura 46, pero para la región comprendida por Buenos Aires Norte, Centro y Sur de Santa Fe y Entre Ríos.

**Fig. 54.** Altura de la isoterma de 0°C en Ezeiza (periodo 1980-2006).

**Fig. 55.** Anomalía de altura geopotencial de 500 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

**Fig. 56.** Ídem figura 55, pero para el nivel de 1000hPa.

**Fig. 57.** Espesor medio 1000/500 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo.

**Fig. 58.** Anomalía del espesor 1000/500 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo.

**Fig. 59.** Viento zonal medio en 250 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

**Fig. 60.** Viento meridional medio en 925 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

**Fig. 61.** Anomalía del viento zonal en 250 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

**Fig. 62.** Ídem figura 61, pero para el viento meridional en 925hPa.

**Fig. 63.** Corte latitudinal de temperatura durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

**Fig. 64.** Anomalía del índice de temperatura 925-250 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

**Fig. 65.** Marcha anual del índice de temperatura 925-250hPa. en 32,5°S 60°O para el período 1971-2008, sólo considerando los meses desde Septiembre hasta Febrero.

## **Capítulo 1. Introducción**

El granizo es uno de los fenómenos meteorológicos que causa grandes daños en cultivos, estructuras edilicias, automotores, etc. siendo una de las causas climáticas que producen mayores pérdidas económicas. Esto ha llevado a que desde los años 20 comenzaran a realizarse estudios que tratan el problema de daños causados por el granizo debido a los grandes inconvenientes socioeconómicos que conlleva (Flora 1928). Una importante fuente de información para estos estudios han sido las compañías aseguradoras proveyendo datos de pérdidas por daños y/o destrucción de cultivos que alcanzaban millones de dólares sólo en el área productiva agrícola de Estados Unidos. Estas grandes pérdidas económicas fueron las que motivaron el desarrollo de estudios de supresión de granizo en todo el mundo. En algunos países, incluso, se establecieron “campañas antigranizo”. Si bien se utilizaron “cañones contra granizo” desde fines del siglo 19 (Changnon 1981), el auge de estos estudios se ha dado en la década del 60.

Posteriormente los estudios de granizo se focalizaron en la microfísica del mismo y en las causas que originan la formación de cristales de hielo y a su posterior crecimiento dentro de una nube. Con el desarrollo de la tecnología radar se puede, actualmente, observar la estructura vertical de las celdas de tormentas, lo que ha llevado a un importante avance en el conocimiento del proceso de génesis, la evolución y precipitación del granizo.

En los últimos años, debido a las variaciones o los cambios climáticos que se están produciendo, se ha generado la necesidad de estudiar con mayor detalle cómo se ven afectados los eventos extremos por dichos cambios. En particular se han realizado numerosos estudios focalizados tanto en precipitaciones como en temperaturas extremas (Re y Barros 2009; Rusticucci y Tencer 2008), lo que ha permitido ampliar el conocimiento sobre las consecuencias de estos eventos extremos bajo las nuevas

condiciones climáticas. Esto lleva a plantear el interrogante sobre cómo será el comportamiento de las tormentas con granizo bajo estos nuevos escenarios.

### 1.1. Climatologías de granizo en el mundo

En Estados Unidos, Changnon (1971) investigó la relación entre las pérdidas económicas en trigo, maíz y soja y la caída de granizo. Mediante el uso de granizómetros encontró que el 80% de los daños climáticos en dichos cultivos estuvieron relacionados con granizo. Recientemente se han generado patrones de riesgo cultivo-granizo (Changnon 1999) para analizar la variabilidad regional ya que se estima que el daño por granizo produce pérdidas de \$1.2 billones de dólares anuales en los Estados Unidos.

Changnon y Changnon (2000) realizaron una climatología de granizo con 66 estaciones meteorológicas de Estados Unidos abarcando un período de 100 años, 1896-1995. En su análisis tomaron períodos de 5 y 20 años de datos para minimizar las fluctuaciones espaciales (Fig. 1) y hallaron que un 65% de las estaciones registró un mínimo de eventos durante el período 1976-1995 y un máximo a mediados de siglo.

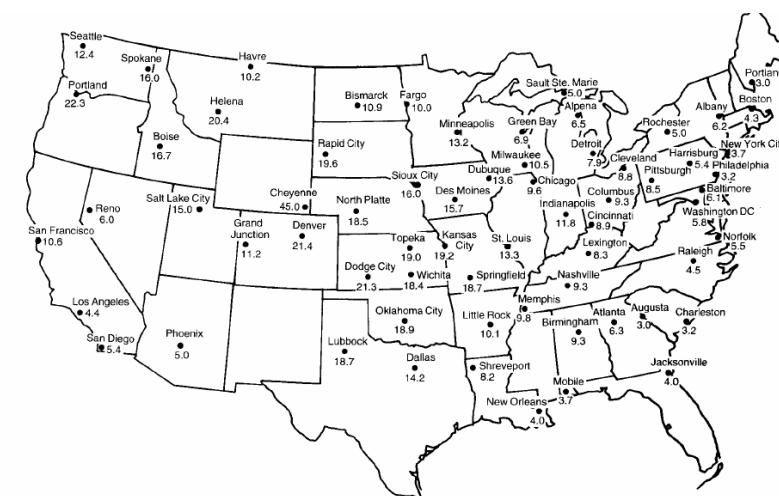


Fig. 1. Promedio de días de granizo en períodos de 5 años en Estados Unidos (Changnon y Changnon 2000).

La frecuencia de granizo grande (mayor a 5cm) en Estados Unidos fue analizada por Schaefer y otros (2004). Encontraron que en el centro del país se produce la mayor cantidad de eventos, principalmente en Oklahoma y el norte de Texas, durante la Primavera y con un máximo en el mes de Abril.

En Canadá se realizaron climatologías de granizo principalmente en la región de Alberta, recolectando la información necesaria mediante el uso de granizómetros. Etkin y Brum (2001) analizaron la frecuencia de granizo en la temporada cálida, de Mayo a Septiembre, del período 1977-1993 y encontraron que los mayores valores se registran en Alberta y Columbia Británica alcanzando los 5 días por temporada. Estos valores van disminuyendo hacia el Este hasta alcanzar una frecuencia de 1 día por temporada en Ontario y Maritimes.

En Italia, Gaiotti y otros (2003) analizaron el comportamiento del granizo en una pequeña región del Noreste, Friuli Venecia Giulia. Utilizando una red de 4x4km de granizómetros desde Abril a Septiembre encontraron que los meses de Junio y Julio son los más afectados por el granizo. Analizaron también las horas del día en las que se observan las mayores frecuencias de granizo encontrando que las horas de máxima ocurrencia son entre las 12 y 18 hs.

Fraile y otros (1999) estudiaron 25 granizadas ocurridas entre 1990 y 1995 con la ayuda de una red de 250 granizómetros ubicados en la provincia de León, España. Analizaron las variables obtenidas por medio de los impactos y encontraron que hay una fuerte correlación entre la energía total del impacto y la masa precipitada. Los resultados muestran que una gran cantidad de granizo por unidad de área no significa que el total de energía de impacto o la masa precipitada sean grandes.

Debido a la similitud de las características climáticas entre China y Argentina (Köppen 1923) es interesante comparar climatologías. En 2008, Zhang y otros realizaron una climatología completa de China abarcando el período 1961-2005. La figura 2, tomada de dicho trabajo, presenta la frecuencia de las tormentas de granizo; allí se

observa que las frecuencias más altas se ubican en las zonas montañosas, especialmente en el Plateau Central Tibetano. En el norte de China, región de mayor altitud, la temporada de granizo comienza a fin de la Primavera y se extiende hasta comienzo del Otoño, mientras que en el Sudeste el granizo ocurre típicamente en la Primavera. La gran mayoría de los eventos ocurre en horas de la tarde y principio de la noche.

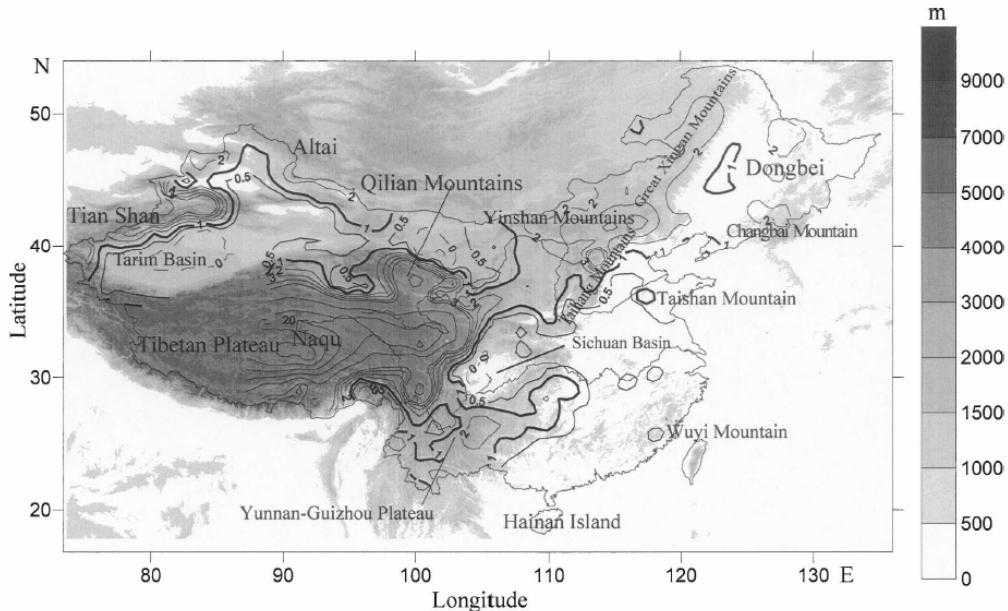


Fig. 2. Frecuencia anual de eventos de granizo durante el período 1961-2005 en China (Zhang y otros 2008).

Como continuación del trabajo de Zhang y otros, Xie y otros (2008) analizaron las tendencias en China con la misma base de datos. Dividieron al país en dos regiones, Norte y Sur ya que encontraron dos tendencias diferentes. Mientras que en el Sur no se observaron cambios en el período 1960-2005, en el Norte se registra una marcada tendencia negativa a partir de la década del 80. Ellos deducen que el aumento observado en la altura de la isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ , de aproximadamente 200mts, es debido al calentamiento global, y éste es un factor importante en la disminución de los eventos de granizo en el norte de China.

En Francia, Vinet (2001) realizó un mapa de riesgo de granizo con datos de 1785 granizómetros durante el período 1987-1996 y encontró que el Sur es el lugar de mayor riesgo de ocurrencia (Fig. 3).

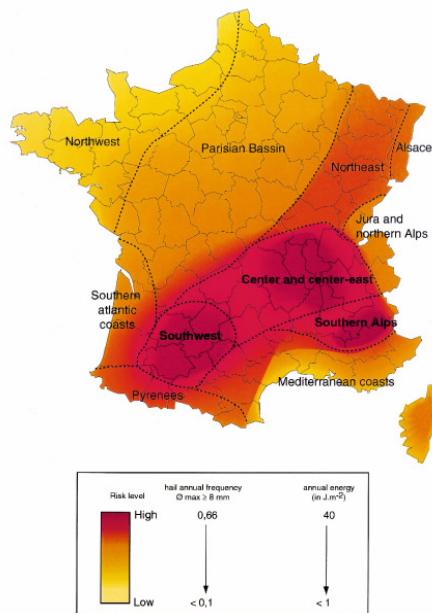


Fig. 3. Frecuencia anual de eventos de granizo durante el período 1987-1996 en Francia (Vinet 2001).

Tuorinen y otros (2007) estudiaron el granizo de gran tamaño (mayor a 2cm) en Finlandia mediante la realización de una climatología en base a observaciones y a información recolectada de diarios y de observadores aficionados cubriendo el período 1930-2006. La temporada de eventos severos de granizo se extiende desde Mayo hasta Septiembre con un máximo en el mes de Julio. El análisis del ciclo diario muestra que la tarde-noche es el horario habitual de ocurrencia. En la gran mayoría de los casos (43%) el granizo tiene un tamaño de 3 cm., sin embargo en el 23% de los casos los tamaños llegan hasta los 5 cm.; en cada verano se registran entre 4 y 5 eventos. Actualmente se observa un aumento de los eventos que los autores atribuyen a la mejora en las observaciones de eventos severos.

## 1.2. Estudios previos de granizo en Argentina

Pocos son los trabajos de granizo que se han realizado en nuestro país. Gran parte de la bibliografía registra la problemática de la provincia de Mendoza con énfasis en los daños que el granizo produce en el cultivo de la vid (Herrera 2000, Perez y Puliafito 2006) como así también en los programas de supresión de granizo y siembra de nubes (Makitov 1999, Saluzzi y Nuñez 1983).

El trabajo de mayor antigüedad hallado es de Hoxmark (1927) quien realizó un cuadernillo de divulgación que plantea lo ocurrido en años previos en Estados Unidos, Europa y en nuestro país detallando la frecuencia media anual en 83 estaciones meteorológicas (Fig. 4) como así también la época del año en la cual se registraron los eventos.



Fig. 4. Frecuencia anual de eventos de granizo en Argentina (Hoxmark 1927).

Saluzzi y Núñez (1975) estudiaron el comportamiento del granizo mediante el uso de denuncias por parte de agricultores de las provincias de Río Negro, Neuquén, La

Pampa, Buenos Aires, Entre Ríos, Santa Fe y Córdoba entre los años 1947-1961. Observaron que prevalece la actividad granicera durante las horas vespertinas y nocturnas con un máximo entre las 16 y 18hs. y un mínimo entre las 6 y 8hs. Los meses de mayor actividad fueron entre Septiembre y Noviembre y los de mínima entre Febrero y Abril. Además encontraron que los eventos poseen una fluctuación entre mayor y menor actividad de aproximadamente 2 o 3 años.

A nivel regional, en su tesis doctoral, Lassig (2006) estudió las precipitaciones de granizo en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén y la influencia en la fruticultura de la región. Instaló una red de 100 granizómetros y su evaluación del impacto económico muestra que, en promedio, en la región hay una pérdida anual de entre 6 y 8 millones de dólares. Con respecto a las particularidades de los eventos de granizo en la región se registran la mayor cantidad de casos durante Febrero y Marzo con un promedio de 7,5 días de granizo por año.

En un trabajo sin publicar, Hoffmann y otros estudiaron las granizadas ocurridas en nuestro país a partir de las estadísticas meteorológicas realizadas entre las décadas del 30 y 90 y datos de libretas meteorológicas de 40 estaciones. Analizaron las frecuencias mensuales y anuales de todo el país en el período 1951/1990. Encontraron que hay una disminución de los eventos en el período 1981-1990 y plantean que se necesita extender el monitoreo climático a este fenómeno debido a la problemática del Cambio Climático.

### **1.3. Motivación y Objetivos**

Los últimos años se han caracterizado por la ocurrencia de granizo en grandes ciudades que perjudicaron y condicionaron las actividades cotidianas. Esto llevó a preguntar qué estuvo sucediendo con esta variable aleatoria que es el granizo. El análisis

del mismo es complejo debido a dicha aleatoriedad y a la forma puntual en que se realiza la observación.

El propósito principal de este trabajo es el de realizar una completa climatología de los eventos de granizo en Argentina. Para ello se plantean los siguientes objetivos:

- Recopilación y armado de una completa base de datos de eventos de granizo de todo el país.
- Analizar el comportamiento del granizo en forma espacial y temporal. Estudiar la distribución espacial de los promedios anuales, de las frecuencias mensuales y estacionales, frecuencias horarias, etc.
- Encontrar las tendencias por regiones.
- Analizar la relación de la ocurrencia de eventos de granizo con las variables de gran escala. Estudiar la circulación atmosférica con las anomalías de alturas geopotenciales, los perfiles de temperatura y los perfiles de viento.

## **Capítulo 2. Datos y metodología**

### **2.1. Observaciones de eventos de granizo**

Las observaciones de eventos de granizo se realizan en todas las estaciones meteorológicas y están a cargo del observador meteorológico responsable de cada estación. Es una observación puntual que está sujeta a cierta incertidumbre debido a la metodología que se aplica en la realización de la misma.

La observación del evento debe ser registrada en la libreta meteorológica y en las planillas de granizo y a su vez debe ser enviada a través de mensajes SYNOP. Los eventos de granizo que se anotan en la libreta meteorológica pueden figurar tanto en el área de observaciones como en el casillero que contiene un triángulo (Fig. 5), símbolo del fenómeno “granizo”. Depende de cada observador que quede registrada, en la sección “Observaciones”, la hora del evento como así también el tamaño del granizo o la duración del fenómeno. En los reportes SYNOP de tiempo presente la observación de eventos de granizo está claramente indicada por los códigos mencionados en la Tabla 1. Sin embargo, los mensajes SYNOP no contemplan en su código el reporte de granizo ocurrido en tiempo pasado. Por lo tanto en este tipo de mensaje si el evento no estaba ocurriendo cuando se tomó la medición, el mismo no se tiene en cuenta en el tiempo pasado y por ende es omitido.



Fig. 5. Casilleros en los cuales se indica la presencia de granizo en la estación.

Tabla 1. Tabla de tiempo presente del código SYNOP.

CÓDIGO	TIEMPO PRESENTE
27	chaparrón(es) de granizo
87	chaparrón(es) débil(es) de granizo
88	chaparrón(es) moderado(s) o fuerte(s) de granizo
93	Tormenta durante la hora precedente, pero no en el momento de la observación, con nieve o granizo débil en el momento de la observación
94	tormenta durante la hora precedente, pero no en el momento de la observación, con nieve o granizo moderado o fuerte en el momento de la observación
96	tormenta en el momento de la observación débil o moderada con granizo
99	tormenta fuerte con granizo

El tercer lugar donde se registra el evento es en las planillas de granizo que contienen la siguiente información: hora y duración del evento, intensidad, si el fenómeno fue continuo o tuvo interrupciones, la superficie de suelo cubierta con granizo, tamaño, forma, dureza, tiempo de conservación en el suelo, precipitación de agua líquida y dirección y velocidad del viento (Fig. 6). Esta información acompaña a la que se registra en la libreta meteorológica.

Fig. 6. Planillas de granizo de la estación meteorológica San Rafael.

Tanto la información enviada a través de los mensajes SYNOP, como la registrada en las libretas meteorológicas y las planillas de granizo son archivadas en la sede central del Servicio Meteorológico Nacional. Sin embargo, la base de datos de esta institución, en lo que respecta a la variable granizo, se encontraba incompleta y sin el análisis de control de calidad necesario. Por lo tanto, la recopilación de la información de las libretas meteorológicas y las planillas de granizo para el armado de la base de datos de granizo y su posterior consistencia, fueron fundamentales para la realización de este estudio.

## **2.2. Datos de eventos de granizo utilizados**

Se utilizaron datos diarios de eventos de granizo de 93 estaciones meteorológicas de Argentina del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). En la Tabla 1 del Anexo se detallan las estaciones y el período comprendido por cada una de las mismas mientras que en la figura 7, se presenta la ubicación de dichas estaciones.

Inicialmente la base de datos diaria de eventos de granizo del SMN que se obtuvo del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos comprendía el período 1960-1990. El SMN facilitó datos del período 1930-1960 de estaciones meteorológicas ubicadas en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba, La Pampa y Corrientes y datos de todo el país del período 1990-2008.

### **2.2.1. Controles de calidad de los datos observados**

Realizar el control de calidad a los datos diarios de eventos de granizo fue un proceso complejo. La base de datos original provista por el SMN poseía solo los días en

que hubo y no hubo eventos, es decir, no presentaba los días en los cuales no se había realizado la observación. Por ende se procedió a completar con un número arbitrario los días que faltaban en la base cruda para poder calcular los datos faltantes en cada una de las estaciones meteorológicas.

En la figura 8 se observa un ejemplo para la estación Tres Arroyos luego de completar los datos faltantes. En la última columna el valor 1 indica que ese día hubo evento de granizo, el valor 6 corresponde al código de dato faltante, mientras que el 0 señala que ese día no hubo evento.

Una vez completadas todas las series con esta codificación, se analizó la cantidad de datos faltantes por estación. Se descartaron todas las estaciones que presentaron más del 20% de dato faltante.

Quedaron 93 estaciones meteorológicas de las cuales, el 76% presentaron menos del 5% de datos faltantes; el 18% entre 5 y 10% de faltantes; el 2% entre el 10 y 15% y el 4% de las estaciones presentó entre 15 y 20% (Fig. 9).

Se encontró que algunas estaciones presentaban largos períodos de datos diarios sin eventos. Por eso se procedió a verificar en las libretas meteorológicas aquellas estaciones en las cuales se encontraron 8 años o más sin la observación de granizo ya que al ser un fenómeno aleatorio se crea la incertidumbre si la falta de eventos fue natural o se trató de una falla en la observación.

En este sentido, se verificaron las libretas meteorológicas de Pergamino desde 1988 hasta 1999 y se encontraron 3 registros que no estaban en la base original. En Dolores el período sin observaciones fue 1978-1998 y al verificar con las libretas se agregaron 3 datos. De la estación Coronel Suárez se analizaron los períodos 1966-1973 y 1984-1999 y se incorporaron 2 registros. Se agregaron 37 datos de Junín del período 1938-1959; de la estación Nueve de Julio se observaron las libretas del período 1950-1958 y se anotaron 4 eventos.

En la provincia de Córdoba, se completó el período 1950-1955 de la estación Pilar y se agregaron 33 datos y el período 1950-1960 de la estación Laboulaye.



Fig. 7. Ubicación de las 91 estaciones meteorológicas utilizadas.

10490	1965	1	6
10490	1965	1	7
10490	1965	1	8
10490	1965	1	9
10490	1965	1	10
10490	1965	1	11
10490	1965	1	12
10490	1965	1	13
10490	1965	1	14
10490	1965	1	15
10490	1965	1	16
10490	1965	1	17
10490	1965	1	18
10490	1965	1	19
10490	1965	1	20
10490	1965	1	21
10490	1965	1	22
10490	1965	1	23
10490	1965	1	24
10490	1965	1	25
10490	1965	1	26
10490	1965	1	27
10490	1965	1	28
10490	1965	1	29
10490	1965	1	30
10490	1965	1	31
10490	1965	2	1
10490	1965	2	2
10490	1965	2	3

Fig. 8. Ejemplo de la base de datos diaria de granizo.

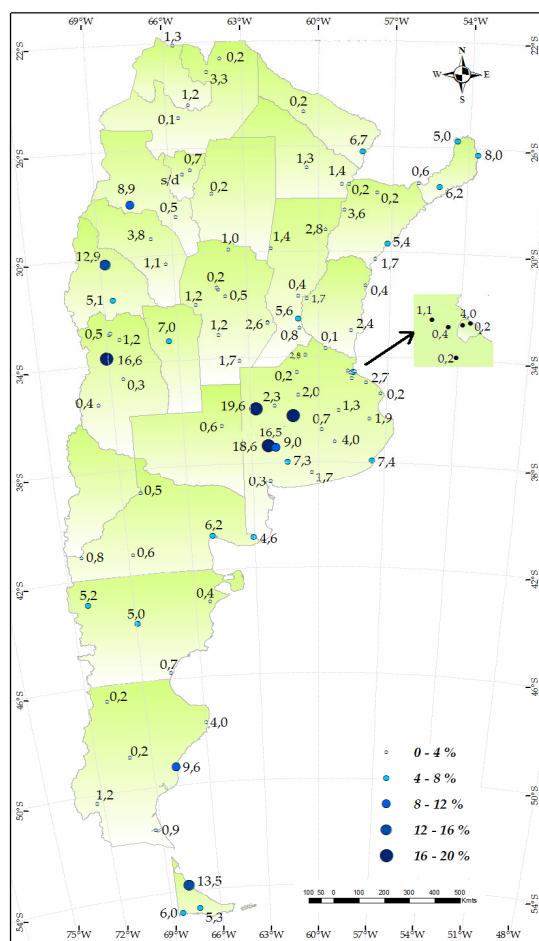


Fig. 9. Porcentaje de datos faltantes por estación meteorológica.

A su vez se incorporaron 66 registros de la estación Paraná Aero del período 1931-1959, 64 de la estación Paraná en el período 1932-1959 y de Santa Rosa 59 registros del período 1939-1955, mientras que para la estación Rosario se observó el período 1950-1959 y se agregaron 36 datos.

Hubo estaciones con períodos sin observaciones a los cuales no se les incorporó información. Esto fue el caso de la estación Tres Arroyos donde se revisaron libretas del período 1983-1988; Nueve de Julio en la década del 90; Pigué en el período 1989-1999 y Rosario en el período 1980-1986. Se observaron microfichas de Santa Rosa del período 1931-1936 pero no se encontraron eventos. En ninguna de estas estaciones se encontraron eventos que no estuvieran ya registrados.

También se encontró que en algunas estaciones después del año 2000 el evento fue codificado con un número 2, 3 o 4. Los mismos representaban la intensidad de mismo, siendo leve, moderado o fuerte respectivamente. Se verificó que estos valores correspondieran a eventos y no fueran errores y se los agregó nuevamente a la base con la codificación explicada previamente.

### **2.2.2. Cambio de ubicación de las estaciones meteorológicas**

Las estaciones meteorológicas trasladadas a los aeropuertos comenzaron a realizar observaciones a partir de la década de 1960. Para extender la serie se buscaron datos del período 1940-1956 en los libros pluviométricos mensuales y diarios (Fig. 10), los cuales también registran los eventos de granizo mediante la anotación del símbolo  $\Delta$ . Las estaciones utilizadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas, período y cantidad de datos agregados a la base de eventos de granizo encontrados en los libros pluviométricos

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	PERÍODO DE DATOS	CANTIDAD DE EVENTOS REGISTRADOS Y AGREGADOS
Tandil (FCS)	-37.31	-59.13	1940-1952	22
Tandil (Aero)	-37.23	-59.25	1955-1956	4
Obs. Central Bs. As.	-34.58	-58.48	1939-1956	55
Bolívar (FCS)	-36.25	-61.10	1940-1953	12
Bahía Blanca (FCS)	-38.73	-60.25	1939-1944	10
Bahía Blanca (Met.)	-38.73	-60.25	1945-1955	26
Trenque Lauquen (FCS)	-35.96	-62.73	1939-1944	7
Trenque Lauquen (Met.)	-35.96	-62.73	1945-1956	14

Para completar el período 1957-1959 se recurrió a las libretas meteorológicas de las mismas estaciones y se encontraron los siguientes datos.

- Observatorio Central Buenos Aires: Marzo a Diciembre de 1957, Enero a Agosto de 1958, Enero a Abril y de Julio a Diciembre de 1959: 1 registro.
- Trenque Lauquen: Enero a Junio de 1957, Diciembre de 1958 y de Enero a Diciembre de 1959: 5 registros.
- Tandil: Enero a Diciembre de 1957, Enero a Diciembre de 1958: 6 registros.
- Bolívar: Enero a Diciembre 1957, Enero a Julio y Diciembre de 1958 y Enero a Diciembre de 1959: ningún registro.
- Bahía Blanca: Enero a Diciembre de 1957, Enero a Diciembre de 1958 y Enero a Diciembre de 1959: 2 registros.

DIRECCION DE METEOROLOGIA, GEOFISICA E HIDROLOGIA

**OBSERVACIONES PLUVIOMETRICAS**

ZONA IV.      mes de... Noviembre ..... de 1943 -      Form. H. 736      173

DIA	Buchardo Cba. 250 . FCP.	Bruzone Nicolás Cba. 251 . FCP.	Baguaí S. Luis. 252 . FCO.	Balde S. Luis. 253 . FCP.	Batavia S. Luis. 254 . FCP.	Beazley S. Luis. 255 . FCP.	Buena Esperanza S. Luis. 256 . FCP.	Bernasconi Pampa. 258 . FCS.	Boeuf Pampa. 259 . FCO.	Brandzen Cnel. Bs. As. 260 . T.P.	Berniejo S. Juan. 261 . FCCNA	Bowen Mza. 262 . FCO.	Buena Nueva Mza. 263 . FCP.	DIA
1														1
2														2
3	(7,0) 10,0			1,0	3,0		6,0				11,0			3
4	(1,0) 5,0						2,0							4
5														5
6														6
7														7
8	(7,0) 12,0 24,0	4,0	11,0	7,0	2,0	26,0		14,0 13,0		13,0	15,0			8
9								18,0		4,0				9
10										4,0		14,0		10
11														11
12														12
13														13

18/04/2008

Fig. 10. Libro de observaciones pluviométricas del año 1943. Se marca con un círculo rojo cómo se registraron los eventos de granizo.

Las estaciones meteorológicas que cambiaron de lugar durante el período de estudio fueron Roque Sáenz Peña, Oberá, San Juan, Azul, Ushuaia, San Antonio Oeste, Mar del Plata, Tres Arroyos, Junín, Bolívar, Pigué y Coronel Suárez. Debido a la aleatoriedad del fenómeno y a la pequeña distancia que tuvieron las reubicaciones se consideró que los datos de cada estación fueron homogéneos. Los períodos de cada una de dichas estaciones fueron:

- Roque Sáenz Peña I (1939-1998). Roque Sáenz Peña II (1999-2008)
- Oberá I (1961-1989). Oberá II (1990-2008)
- San Juan I (1960-1965). San Juan II (1970-2008)
- Junín I (1938-1958). Junín II (1958-2008)
- Bolívar I (1960-1984). Bolívar II (1990-1997)

- Azul I (1934-1990), Azul II (1995-2008)
- Mar del Plata I (1931-1949), Mar del Plata II (1950-2008)
- Tres Arroyos I (1932-1961), Tres Arroyos II (1964-2008)
- Ushuaia I (1960-1988), Ushuaia II (1990-2008)
- San Antonio Oeste I (1960-1986), San Antonio Oeste II (1989-2008)

En el caso en que coexistieran dos estaciones en localidades cercanas se conservó el dato de la más reciente.

### **2.2.3. Estaciones meteorológicas con más de 75 años de datos**

Con el fin de realizar un examen exhaustivo de series históricas, se procedió a digitalizar datos de eventos de granizo de las localidades de Río Cuarto, Pergamino y Tres Arroyos. De este modo se obtuvieron series completas en el período 1908-2008, 1912-2007 y 1920-2008 respectivamente

En Río Cuarto se obtuvieron los datos a partir de observaciones en libretas meteorológicas en papel y en microfichas y se anotaron 74 registros desde 1908-1930, salvo el año 1912 donde los datos estaban ilegibles. Cabe destacar que en Río Cuarto se encontraron libretas meteorológicas en microfichas desde el año 1875.

La estación meteorológica Pergamino presentaba el período 1948-1990 por lo que se solicitó información de eventos de granizo del período 1991-2007 directamente a la estación a través del INTA. Los datos del período 1912-1929 se encontraron en microfichas y se digitalizaron 26 registros. Solo faltaron libretas meteorológicas desde Marzo a Diciembre de 1927. Y el período 1930-1947 estaba en libretas y se agregaron 38 registros.

Para la estación Tres Arroyos también se transcribieron datos de libretas en papel y en microfichas, período 1920-1929, y se agregaron 7 registros. Asimismo, se verificaron libretas del período 1931-1947 encontrando 63 eventos de granizo.

De este modo se obtuvo una serie de 101 años de datos para la estación Río Cuarto, 96 años para la estación Tres Arroyos y 89 años para la estación Pergamino.

#### **2.2.4. Estaciones meteorológicas solicitadas al INTA**

Se observó que una de las zonas que poseía baja densidad de estaciones meteorológicas era el noreste de Buenos Aires. Por ende se concurrió a la estación experimental INTA San Pedro para completar la base de datos. En esa estación los registros de granizo fueron muy buenos ya que se transcribieron eventos desde 1967 hasta la actualidad sin faltantes de libretas, como así también la hora, el tamaño y eventos de granizo de los alrededores. En total se obtuvieron 36 registros en la estación San Pedro para el período 1967-2008.

También se solicitó a la estación experimental INTA Famaillá los eventos de granizo para compararlos con los datos de Tucumán Aero la cual presentaba una baja ocurrencia de eventos y se dudaba de sus datos. Se recibieron 27 datos del período 1967-2008 y se los incorporó a la base.

#### **2.3. Datos obtenidos a partir de las planillas de granizo**

Las observaciones registradas en las planillas de granizo comprendían el período 1977-2006 y se encontraban sin digitalizar, por lo que se necesitó transcribir los datos que se encontraban en papel a formato electrónico. Se digitalizaron todos los datos de las estaciones meteorológicas pertenecientes a las provincias de Buenos Aires, Córdoba, La Pampa y Mendoza debido a que presentaban la mayor densidad de datos.

Al comparar los eventos observados de la base de datos original con los nuevos obtenidos de las planillas de granizo se encontró que muchos de estos últimos no estaban en los registros originales. Por ende también se observaron las planillas del resto

del país y se las comparó con los datos originales para agregar los que faltaban. En el período 1977-2006 se encontraron un total de 352 registros que no estaban en la base de datos original, lo cual significó un 6,3% del total de eventos. La cantidad de registros transcritos por estación meteorológica se puede observar en la Tabla 2 del Anexo.

Además se utilizaron los datos de hora y duración del evento, tamaño, intensidad, tiempo de conservación del granizo en el suelo y si el evento estuvo o no acompañado por lluvia. Se analizó solo la frecuencia horaria diurna, de 9 a 00hs., debido a la falta de mediciones en la madrugada. Para analizar estos registros, debido a la poca cantidad de datos se procedió a realizar un análisis regional y se consideraron tres zonas o regiones (Tabla 3).

Tabla 3. Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de variables obtenidas de las planillas de granizo

REGIÓN	ESTACIONES METEOROLÓGICAS
Córdoba	Pilar y Río Cuarto
Buenos Aires y La Pampa	Pergamino, Junín, Nueve de Julio, Trenque Lauquen, Azul, Bolívar, Las Flores, Tres Arroyos, Bahía Blanca y Santa Rosa
Capital	Obs. Central Buenos Aires, Aeroparque

#### 2.4. Frecuencia de observación diaria

La forma y la cantidad de observaciones diarias varía según la estación meteorológica y esto genera una gran incertidumbre en cuanto a eventos aislados y puntuales como son los de granizo. Por este motivo se buscaron los planes de labor de las estaciones utilizadas. Se encontró que el SMN posee un registro del mismo desde 1994 en formato digital. Antes de ese año es posible que en la base de datos del SMN las

estaciones meteorológicas que no pertenecen a los aeropuertos sólo tengan digitalizadas 4 observaciones por día. El problema de los distintos planes de labor se planteará en el Capítulo 3 cuando se analicen los promedios anuales.

Sin embargo, según se cita en el trabajo de Hoffmann y otros (sin publicar) el texto de Estadísticas Climatológicas 1961-1970 (1981) dice:

“Al considerar un período cualquiera, hay casos en que las estaciones que efectúan solamente 3 registros diarios observan casi con la misma exactitud como las estaciones de servicio permanente, mientras que en otras estaciones apenas se registra la ocurrencia de los fenómenos de granizo, tormentas o niebla. Entre estos dos extremos existen todos los matices posibles”. Es decir, la aleatoriedad del fenómeno hace que la cantidad de mediciones no garanticen la correcta medición y registro del evento.

## **2.5. Estadísticas de los datos**

En esta sección se presentan las distintas metodologías empleadas en la elaboración y análisis de la climatología del granizo de la República Argentina utilizando la base de datos descripta arriba. Se calculó para cada estación meteorológica el promedio anual, la cantidad de eventos por mes y por estación del año de eventos de granizo

### **2.5.1. Frecuencia anual de eventos de granizo**

Se estudió el período 1960-2008 ya que en 65 estaciones el mismo se encontraba completo. En aquéllas donde esto no ocurría se realizó la siguiente consideración: en 15 estaciones se tomó el período 1970-2008; en 5 el período 1960-2000; en 6 el período 1990-2008; 1 observó en 1960-1970 y otra en el período 1984-2008.

Para representar los promedios anuales se eligió realizar un mapa interpolado. Si bien como se ha marcado anteriormente el reporte del fenómeno del granizo indica lo

que ocurrió puntualmente sobre la estación meteorológica, se consideró importante mostrar en forma “regional” lo que sucede con la problemática siempre teniendo en cuenta que la falta de zonas altamente pobladas de estaciones genera una incertidumbre difícil de solucionar sin la presencia de otras metodologías de medición.

Para determinar la mejor forma de realizar esta interpolación espacial se estudiaron los métodos de interpolación Kriging e Inversa de la distancia al cuadrado.

El método Kriging se basa en modelos estadísticos, es decir, utiliza herramientas estadísticas para analizar la relación espacial de las variables. Kriging produce mapas grillados que tienen óptimas propiedades estadísticas. El método asume que la distancia o dirección entre los puntos refleja una correlación espacial que puede ser utilizada para explicar la variación en la superficie. El grado de continuidad espacial se puede explicar con un Semivariograma, es decir, un gráfico de la semivarianza en función de la distancia. Si la forma del Semivariograma puede estimarse con un modelo apropiado, entonces de este modo es posible determinar el valor de la superficie en cualquier punto.

La semivarianza es una medida del grado de dependencia espacial entre observaciones. Se asume que el espaciamiento de la muestra es regular, es decir, las observaciones están uniformemente espaciadas a lo largo de líneas rectas. Si el espaciamiento entre observaciones a lo largo de una línea es una distancia  $\Delta$ , la semivarianza se estima para distancias que son múltiplos de  $\Delta$ :

$$\gamma_h = \sum_i^{\frac{n-h}{h}} \frac{(x_i - x_{i+h})^2}{2n} \quad (1)$$

La ecuación 1 indica que  $x_i$  es una medida de la variable  $X$  en el punto  $i$  y  $x_{i+h}$  es otra medida de la variable tomada luego de  $h$  intervalos. Por ende se está encontrando la suma de diferencias cuadradas entre pares de puntos separados por una distancia  $\Delta h$ . El número de puntos es  $n$ , por lo tanto el número de comparaciones entre pares de puntos es  $n-h$ . Para  $h=1$ , la semivarianza se calcula comparando cada uno de los valores

con los de su vecino. Para  $h=2$ , cada punto se compara con otro ubicado a dos espacios de distancia y sucesivamente para valores más grandes de  $h$ .

Si la distancia  $\Delta h$  es pequeña los puntos a comparar tienden a ser parecidos y la semivarianza tendrá un valor chico. A medida que la distancia  $\Delta h$  aumenta, va disminuyendo la relación entre los puntos y las diferencias aumentan, incrementando los valores de la semivarianza. En cierto momento los puntos se encuentran tan lejanos que ya no se relacionan y su diferencia cuadrada se vuelve igual en magnitud a la varianza alrededor del valor medio. La semivarianza ya no crece más sino que permanece constante y se produce una región llamada meseta. La distancia donde la semivarianza se asemeja a la varianza se denomina alcance de la variable (Fig. 11).

Como sólo se conoce el Semivariograma en puntos discretos que representan distancias  $\Delta h$  debe ser modelado con una función continua para que pueda ser evaluado a cualquier distancia deseada. Los modelos de ajuste más comunes son el esférico y el exponencial (Davis 2002).

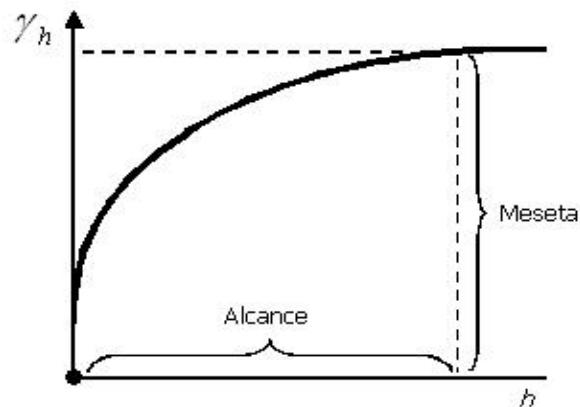


Fig. 11. Modelo teórico de un Semivariograma con sus principales componentes.

El método Inversa de la Distancia interpola los datos de una muestra dándole mayor peso a los valores que se ubican más cerca y menos a los lejanos. Por ende se

considera que el peso de cada muestra ( $v$ ), es inversamente proporcional a la distancia (d) desde el punto que está siendo estimado.

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (2)$$

En la ecuación 2 a medida que  $p$  disminuye, los pesos que se les da a la muestra se vuelven más similares y cuando  $p$  aumenta los mismos presentan mayor diferencia. Las muestras más alejadas reciben una proporción mejor del peso total mientras que las más cercanas obtienen mayor influencia. Cuando  $p=5$  las muestras cercanas reciben un 71% del peso total mientras que las más alejadas casi no reciben peso.

A medida que  $p$  se aproxima a cero y todos los pesos son más similares, la estimación inversa de las distancias se acerca a un simple promedio de los valores mas cercanos. Cuando  $p$  tiende a infinito la estimación se aproxima a una estimación por polígonos dándole todo el peso a la muestra más cercana (Isaks y Srivastava, 1989).

Se utilizaron ambas metodologías sobre los promedios anuales de eventos de granizo de Argentina, con lo cual se analizó el Semivariograma de estos datos con el programa ArcGis 9.2 (ESRI 2007). Se analizaron las tendencias espaciales de los datos y luego se aplicó la interpolación Ordinary Kriging.

En cuanto al método Inversa de las Distancias, tradicionalmente se elige el valor de  $p=2$  y es el que se utilizó en este estudio para realizar la interpolación.

Finalmente se evaluó el método Kriging extrayendo los valores puntuales de la interpolación de cada estación meteorológica y se la comparó con el promedio calculado.

### **2.5.2. Frecuencia mensual y estacional**

Para analizar la frecuencia mensual y estacional de eventos de granizo se realizó la suma de eventos por mes en cada estación meteorológica para el período 1960-2008. Se eligió este período de tiempo debido a que fue el que presentó mayor cantidad de datos.

En el estudio de la frecuencia mensual se procedió a dividir el país en regiones. En este sentido, se calcularon las correlaciones lineales de las series anuales de todas las estaciones. De este análisis quedaron 8 regiones en las cuales se calcularon las frecuencias porcentuales por mes. Las mismas fueron Patagonia Sur, Patagonia Norte, Sur de Buenos Aires y La Pampa, Cuyo, Córdoba, Norte de Buenos Aires y Litoral, Noreste y Noroeste.

Se realizaron mapas interpolados con el método Kriging para analizar la variabilidad estacional (Verano, Otoño, Invierno y Primavera) en todo el país la cual se calculó como una frecuencia porcentual.

## 2.6. Tendencias

Debido a las variaciones climáticas que se han observado últimamente en nuestro país se decidió estudiar la tendencia en los eventos de granizo para ver si dichos eventos han sido afectados. En este sentido, se calcularon las tendencias de los eventos de granizo en cada estación meteorológica y se analizaron brevemente primero en forma puntual y luego a nivel regional.

Las tendencias regionales se calcularon en las mismas regiones determinadas para el análisis estacional. En cuanto a los períodos de tiempo considerados en este análisis se utilizó:

- i) 1960-2008 en las regiones Noroeste, Noreste, Patagonia Norte, Patagonia Sur;
- ii) 1951-2008 para la región de Cuyo y
- iii) 1931-2008 para Córdoba, Litoral y Norte de Buenos Aires y Sur de Buenos Aires.

Asimismo, en las regiones se calculó la media anual de eventos teniendo en cuenta la cantidad de estaciones que se tenían en cada año.

De los radiosondeos de Ezeiza se calculó la altura de isoterma de 0°C en forma diaria y luego el promedio anual desde 1980 hasta 2006 para poder compararla con las tendencias.

Se utilizó el test no paramétrico de Mann Kendall para analizar el nivel de significancia de las tendencias de eventos de granizo y de la variación de la altura de la isoterma de 0°C.

## 2.7. Circulación Atmosférica

Finalmente, se pretendió establecer una relación entre la circulación atmosférica y la ocurrencia de eventos de granizo. Para ello, se consideró el período 1980-2006 para el análisis de la circulación atmosférica durante los casos con eventos de granizo. Dentro de este período se determinaron 51 fechas donde hubo registro de granizo en la región Pampeana en al menos 2 estaciones meteorológicas para analizar casos de convección generalizada. Sólo se consideraron los eventos registrados desde Septiembre hasta Febrero debido a que durante esos meses es cuando se observa la mayor frecuencia en la región Pampeana. Utilizando los reanálisis del NCEP/NCAR (Kalnay y otros 1996) se analizó la composición de los campos de anomalías para las 51 fechas de las alturas geopotenciales de 1000 y 500 hPa, del espesor 1000/500 hPa, del viento meridional en 925hPa., del viento zonal en 250hPa. Además también se observaron para las mismas fechas los campos medios del espesor 1000/500hPa., del viento zonal en 250hPa y del viento meridional en 925hPa.

Asimismo se analizó el perfil vertical de la temperatura utilizando un corte latitudinal y un promedio longitudinal entre 62°O y 57°O para determinar si las variaciones en los campos de temperatura han afectado los eventos de granizo y se

realizó un índice de temperatura definido como se indica en la ecuación 3 para analizar la estabilidad vertical.

$$\text{Indice} = T_{925} - T_{250} \quad (3)$$

Donde  $T_{925}$  es la temperatura en el nivel de 925hPa. y  $T_{250}$  es la temperatura en el nivel de 250hPa. Se analizó el campo de anomalías de este índice para las 51 fechas con eventos de granizo mencionadas previamente y la serie anual 1971-2008, solo considerando los meses cálidos desde Septiembre hasta Febrero, en 32,5°S y 60°O.

## **Capítulo 3. Estudio de métodos de interpolación**

Con el objeto de analizar la distribución de frecuencia de ocurrencia de eventos de granizo sobre la Argentina se calcularon los promedios anuales para cada una de las estaciones meteorológicas para el período 1960-2008. Por otro lado, como se discutió en el capítulo anterior, para representar los promedios anuales de las frecuencias de ocurrencia de granizo se eligió realizar un mapa interpolado. Si bien el reporte del fenómeno del granizo simboliza lo que ocurrió puntualmente sobre la estación meteorológica, se considera importante mostrar en forma “regional” lo que sucede con la problemática, teniendo presente que la falta de zonas altamente pobladas de estaciones genera una incertidumbre difícil de solucionar sin la presencia de otras metodologías de medición. Con el fin de realizar los mapas interpolados de dichos promedios se utilizaron los métodos Kriging e Inversa de la Distancia.

### **3.1. Método Kriging**

Para la aplicación del primero de los métodos mencionados se comenzó con el análisis de la correlación espacial que dio como resultado el Semivariograma de la figura 12.

Se observan claramente valores altos de semivarianza a distancias cortas (menores a 400km) que se deben a los datos anuales de Bernardo de Irigoyen y La Quiaca los cuales poseen un valor medio de 4,8 y 4,5 eventos por año respectivamente. Es decir a distancias cortas, los promedios anuales de esas dos estaciones tienen baja correlación espacial con estaciones cercanas. También se puede observar que este Semivariograma se aparta de uno teórico ya que los valores de semivarianza tienen una gran dispersión y se apartan del origen rápidamente lo cual estaría demostrando la baja correlación

espacial entre los promedios anuales de granizo debido a lo puntual y aleatorio del fenómeno.

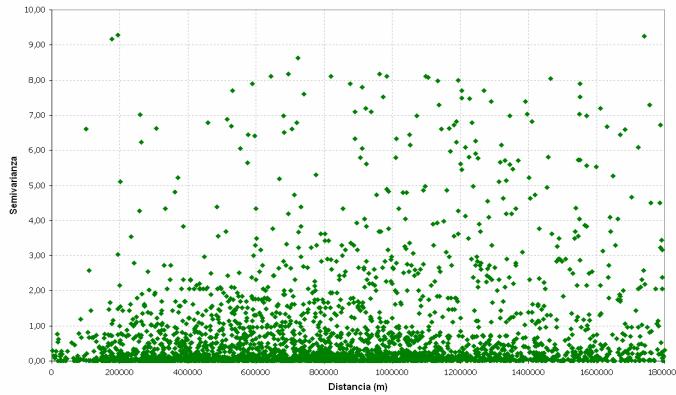


Fig. 12. Semivariograma experimental de los promedios anuales de eventos de granizo.

Para realizar el semivariograma teórico se utilizaron 12 intervalos (lags) de 150km. En la figura 13 se observa el ajuste realizado mediante una función esférica. Nuevamente los valores extremos de las mencionadas estaciones meteorológicas quedan fuera del ajuste con semivarianza mayor a 1. Los promedios se ajustan bien a distancias cortas pero a medida que la misma aumenta comienza a observarse mayor dispersión al igual que se mostraba en la figura 12.

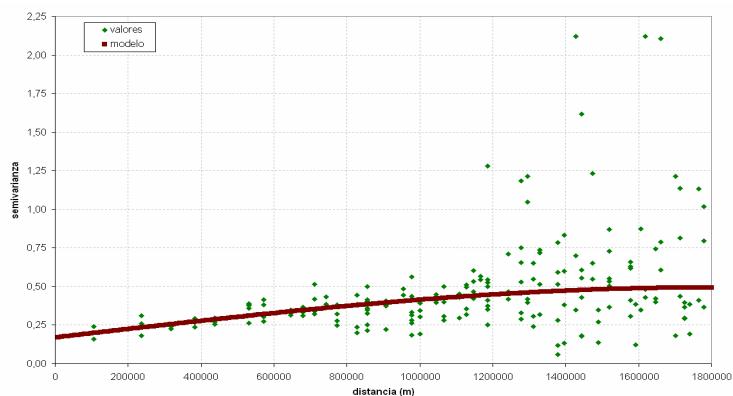


Fig. 13. Semivariograma teórico con un ajuste esférico.

Los promedios anuales de Bernardo de Irigoyen y La Quiaca se ubican en el último percentil de la serie de datos (Fig. 14) y quedan fuera del rango outlier mostrando de este modo su carácter de valores extremos.

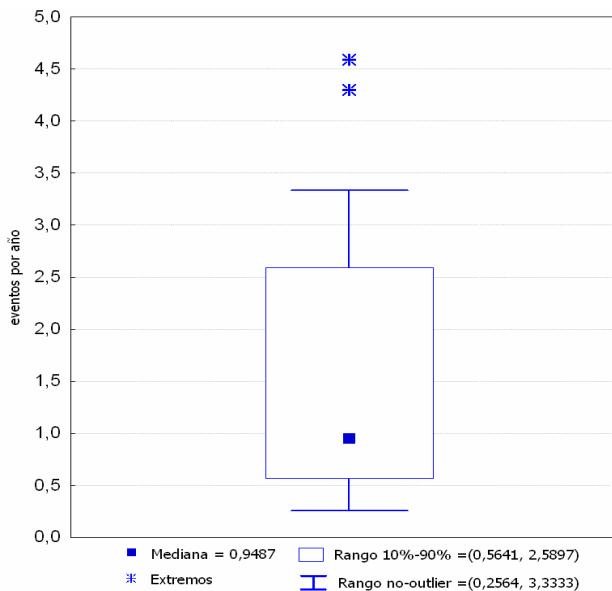


Fig. 14. Boxplot de promedio de promedios anuales de eventos de granizo.

La figura 15 muestra como son las tendencias espaciales de la muestra de promedios anuales. Se observa que claramente hay una tendencia positiva desde el Este hacia el Oeste y desde el Norte hacia el Sur. Los mayores valores de promedios de eventos de granizo por año se ubican sobre Mendoza y sobre la costa Patagónica y son lo que están marcando estas tendencias. Cuando se realizó la interpolación para el método Kriging se removió esta tendencia con un polinomio de orden 2.

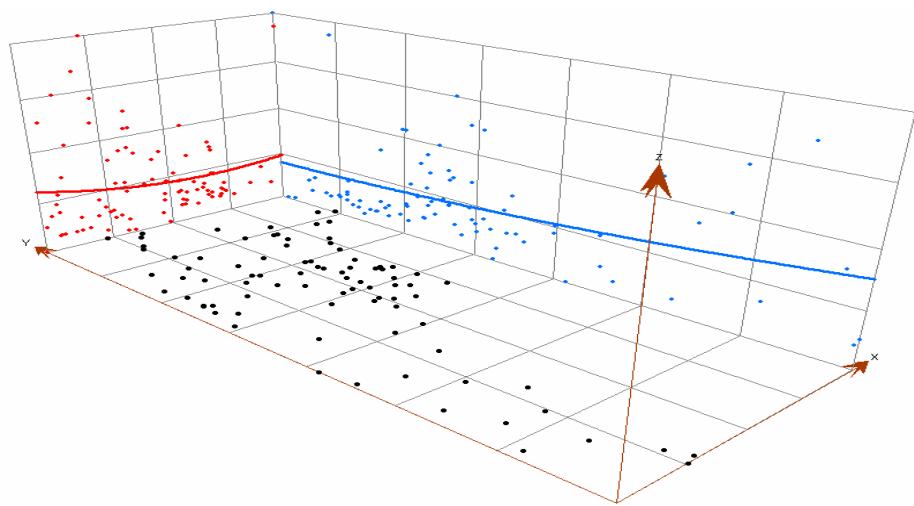


Fig. 15. Tendencias espaciales de los promedios de eventos de granizo sobre Argentina.

En rojo se muestra la tendencia de Oeste a Este y en azul la tendencia de Norte a Sur.

Se analizó la calidad del ajuste extrayendo los valores que se obtuvieron con el método interpolador Kriging en cada estación meteorológica. Se encontró que el método sobreestima los valores bajos, menores a 1,5 eventos por año aproximadamente y claramente subestima los valores más altos, mayores a 1,5 eventos por año (Fig. 16). Especialmente se puede ver que los promedios que sufren un mayor desajuste son los valores extremos de Bernardo de Irigoyen y La Quiaca.

Este desajuste esta dado por la metodología Kriging la cual tiende a suavizar los datos de los extremos de la distribución y además, teniendo en cuenta que la mediana se ubica en 0,95 eventos por año, el otro 50% de la muestra concentra los valores entre 0,95 y 4,8 eventos por año y presenta una mayor dispersión de datos.

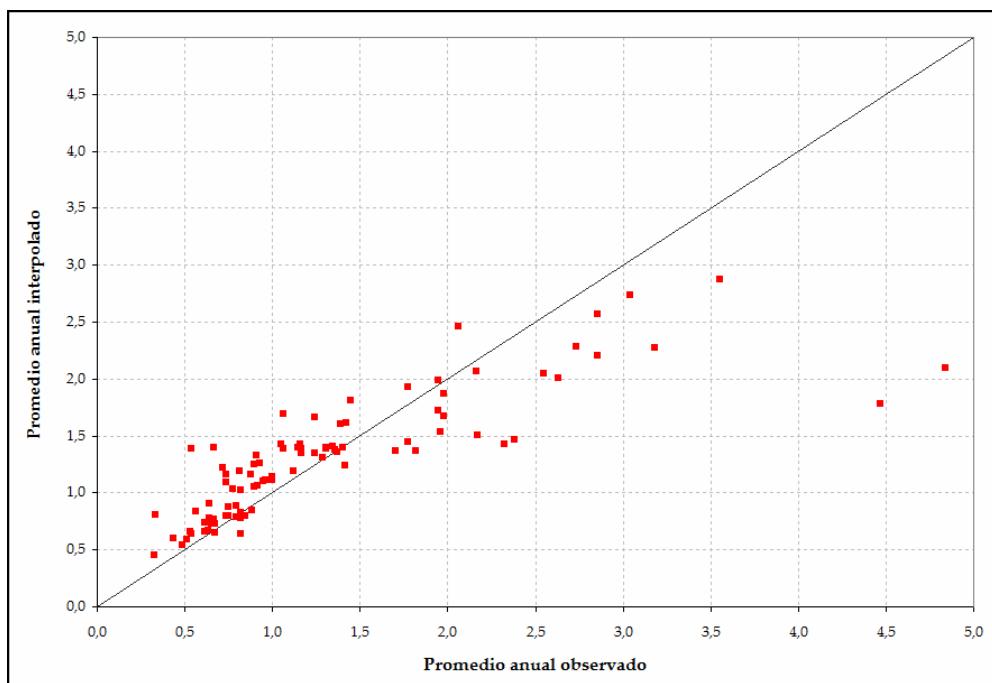


Fig. 16. Resultado de la verificación del ajuste para el método Ordinary Kriging.

### 3.2. Mapas interpolados

Los mapas de los promedios anuales de granizo y de frecuencias estacionales se generaron con los métodos de interpolación Ordinary Kriging e Inversa de la Distancia. Ordinary Kriging genera un resultado mas suavizado de la variable en estudio (Fig. 17). El método Inversa de la Distancia (IDW) que se muestra en la figura 18 tiende a generar el efecto cluster u ojos de buey en especial cuando los valores son altos respecto a los vecinos más cercanos, efecto que Kriging tiende a mitigar. Las mayores diferencias se observan sobre la provincia de Buenos Aires donde la variabilidad espacial es mayor. IDW mantiene los valores más bajos por ejemplo, los mínimos de las estaciones Coronel Suárez y Pigüé en el Sudoeste y los más altos, como son los máximos de Tres Arroyos y Pergamino en el Sur y en el Norte respectivamente. Mientras que el método Kriging observa levemente el mínimo sobre Coronel Suárez y genera una zona de mayor frecuencia anual sobre el Norte pero completamente suavizada. Los valores extremos

discutidos anteriormente de La Quiaca y Bernardo de Irigoyen no se ven con el método Kriging en absoluto y si se observan con IDW donde recibe mayor peso la puntualidad. En el resto del país la variabilidad espacial es menor por lo que ambos métodos son eficaces en resolver la escala regional.

Dado el escaso número de estaciones con distribución irregular y el ruido de la aleatoriedad del fenómeno del granizo, IDW estaría representando mejor esta variabilidad puntual que presenta este tipo de variable. Y con el fin de estudiar de forma correcta la variabilidad regional el método Kriging es el más acertado en ese caso.

La observación detallada del mapa resultante del método Ordinary Kriging comparado con los valores medios y suma total de las series de datos históricos de frecuencia consideradas para este estudio permite ver que está sujeta a la alta aleatoriedad de la ocurrencia del granizo.

Por lo tanto es válido a una escala regional el uso del interpolador Kriging dado que al proveer información espacialmente suavizada y gradual puede ser utilizado para estimar tendencias geográficas relativas al riesgo de ocurrencia.

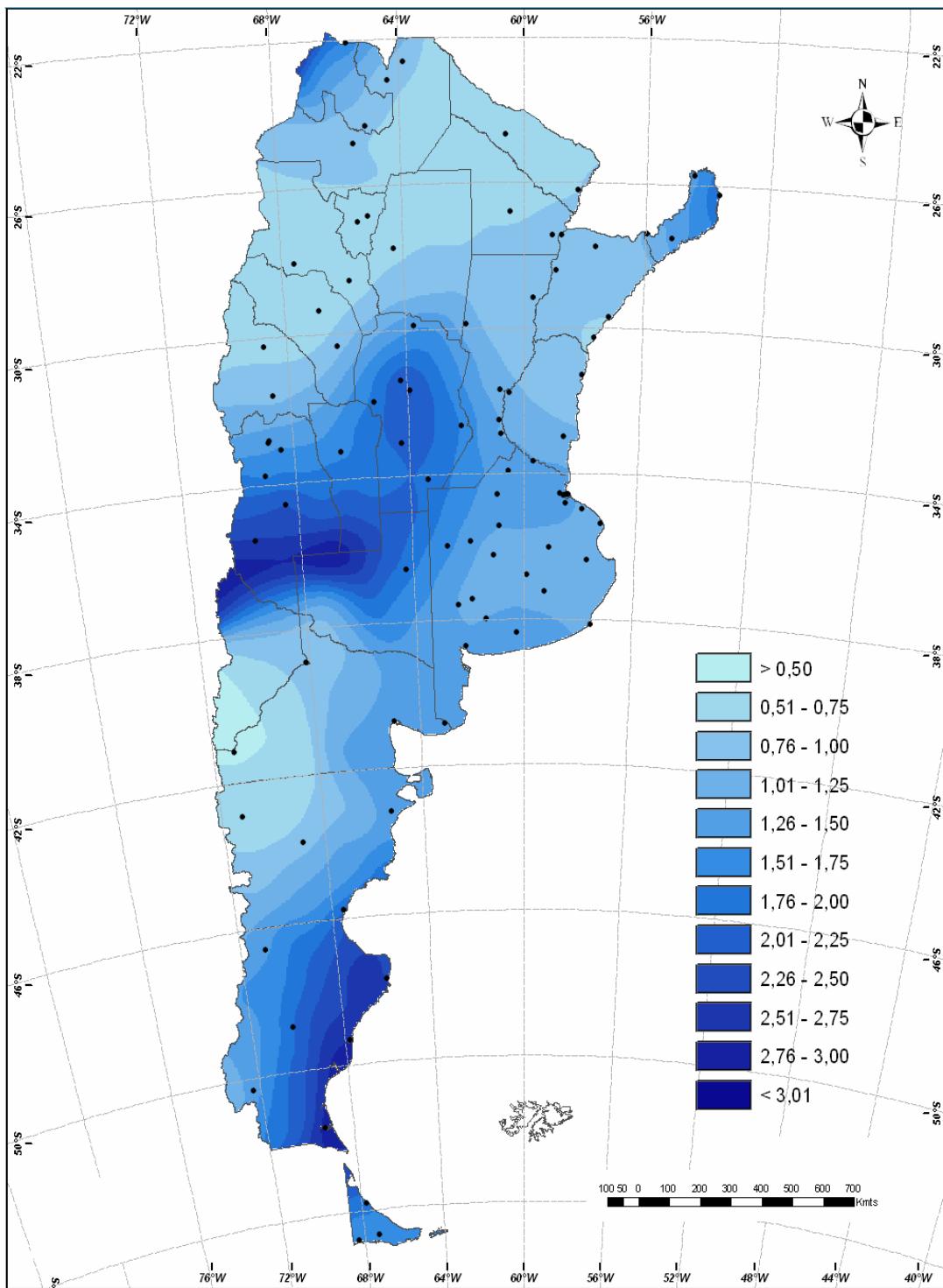


Fig. 17. Promedio anual de eventos de granizo interpolado con el método Ordinary Kriging.

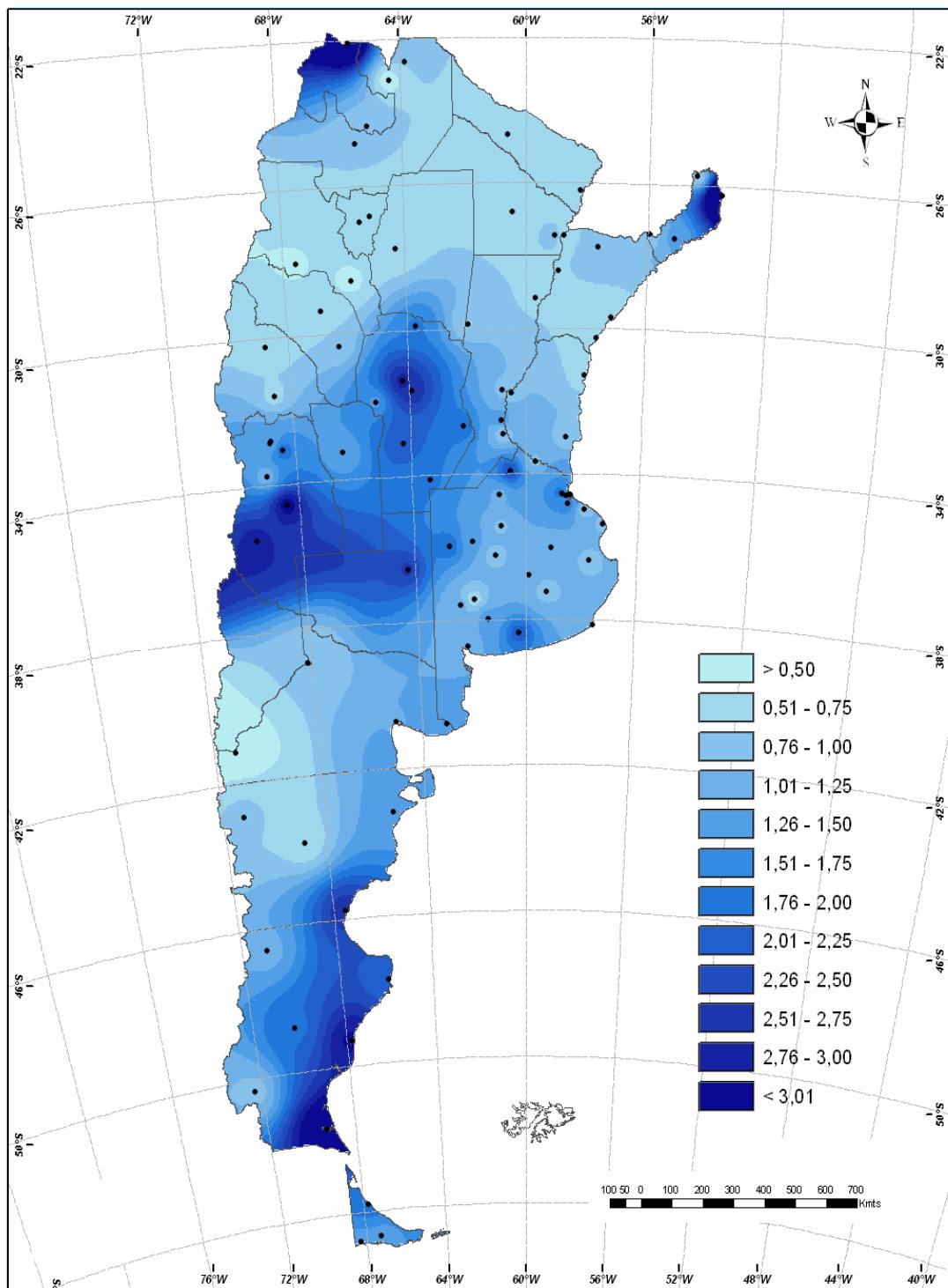


Fig. 18. Ídem figura 17, pero para el método Inversa de la Distancia.

## **Capítulo 4. Climatología de eventos de granizo en Argentina**

La bibliografía muestra que en la Argentina hay regiones y épocas del año que se ven más afectadas por la ocurrencia de eventos de granizo. En particular se han estudiado regiones donde distintos tipos de cultivos se ven perjudicados por este fenómeno. Sin embargo, no existe en la literatura un análisis detallado de las características de la distribución de la ocurrencia de granizo, tanto a nivel espacial como temporal.

Este capítulo intenta abordar este problema presentando la climatología de la frecuencia de eventos de granizo analizada tanto a nivel anual como estacional para todo el país.

### **4.1. Promedios anuales**

La figura 18 presenta la distribución espacial de los promedios anuales de la frecuencia de ocurrencia de eventos de granizo luego de haber sido interpolados espacialmente aplicando el método Inversa de la distancia discutido en el capítulo anterior.

En ella se observan claramente dos regiones de máxima ocurrencia de eventos de granizo por año. Una abarca las provincias de Mendoza, La Pampa y Córdoba; y la otra contiene a la zona costera del Centro y Sur de la Patagonia.

En la provincia de Mendoza se observa un patrón Norte-Sur en el cual la mayor cantidad de eventos por año se registra en San Rafael donde el promedio anual es de 3,2 y va disminuyendo hacia el Norte donde la estación Mendoza Observatorio registra 1,3 eventos por año.

El Oeste de la provincia de La Pampa y Sur de San Luis presentan una zona carente de estaciones meteorológicas, y consecuentemente no hay información disponible para calcular los promedios. Por ende, aunque el método de interpolación genera una zona de aproximadamente 2,5 eventos por año, la misma presenta gran incertidumbre y no se podría tomar como válida. Sin embargo, en el Este de La Pampa, la estación Santa Rosa presenta 2,6 eventos por año en promedio lo cual podría suponer que la región tiene un patrón Oeste-Este similar a lo que estima la interpolación. Además el movimiento de las tormentas con génesis sobre la cordillera hacia el Este hace suponer que la existencia de esa región de altos valores de media anual no sea ficticia.

Sobre la provincia de Córdoba se observan diferencias en las frecuencias observadas al Este de las Sierras respecto a lo que ocurre al Oeste de las mismas. Hacia el Oeste, Villa Dolores presenta 1,4 eventos por año mientras que, al Este, Córdoba Observatorio y Pilar presentan en promedio 2,9 y 2,7 eventos por año respectivamente. La estación Río Cuarto también registra un valor alto en su promedio anual ya que se observan 2,2 eventos. Los promedios por año van disminuyendo hacia el Este y hacia el Sur con 1,8 eventos en Laboulaye y 1,9 eventos en Marcos Juárez.

En la provincia de San Luis la media anual es similar a lo que ocurre en Villa Dolores con 1,2 eventos por año.

Este patrón se puede asociar con la mayor actividad convectiva que se origina en la región de sierras y luego avanza hacia el Este ya que al Oeste de las mismas, en Villa Dolores y San Luis la media anual de eventos es menor que al Este y además la zona más baja de Córdoba también presenta menores valores que en las regiones más elevadas. La altura proporciona los mecanismos necesarios para la generación de convección y por ende la cantidad de eventos aumenta en la región al Este de las sierras de Córdoba al igual que ocurre en la cordillera Mendocina.

Otra región con máximos en el promedio anual de eventos es el Centro y Sur Patagónico. En Santa Cruz los eventos van aumentando hacia la región costera y de

Norte a Sur. La estación Río Gallegos presenta 3,6 eventos por año en promedio de reportes de granizo, San Julián 3, Puerto Deseado 2,1 y Gobernador Gregores, en el centro de la provincia, 1,9. En Chubut la distribución espacial es similar dado que los eventos también aumentan hacia la costa con un máximo sobre Comodoro Rivadavia de 2,6 eventos por año en promedio.

En Tierra del Fuego hay tres estaciones meteorológicas las cuales presentan valores medios por año entre 1,4 y 1,9 eventos de granizo.

Es posible que los eventos que se reporten en la región Patagónica correspondan tanto a granizo como así también a graupel. Las nubes celulares que ocasionan chaparrones asociadas a la llegada de aire frío deben ser los responsables de la cantidad elevada de eventos de granizo que se reportan en la región.

Los promedios por año más altos se observan en La Quiaca, provincia de Jujuy y en Bernardo de Irigoyen, provincia de Misiones. Presentan en promedio durante el año 4,5 y 4,8 eventos de granizo respectivamente. Los eventos de la estación La Quiaca están fuertemente relacionados con la altura de la estación dado que se encuentra a 3459 metros sobre el nivel del mar. Las tormentas que se originan allí, principalmente en la estación de verano, tienen una gran generación de granizo debido a la orografía.

En Bernardo de Irigoyen la altura también es un factor importante. La provincia de Misiones está dividida de Oeste a Este por las sierras de Misiones o Central. La estación Bernardo de Irigoyen se ubica a 815 metros sobre el nivel del mar, mientras que Iguazú en el Oeste, a 270 metros sobre el nivel del mar. En Brasil, Marcelino y otros (2004) estudiaron los eventos de granizo en el Estado de Santa Catarina durante el período 1980-2003 y encontraron que en Sao Jose do Cedro, una localidad contigua a Bernardo de Irigoyen en Argentina, hay un máximo y la media anual es de aproximadamente 5 eventos por año. También relacionan este máximo con la elevación del terreno en el lado brasileño.

En la región del Noroeste Argentino y Norte de Cuyo la ocurrencia de granizo es baja ya que los valores oscilan entre los 0,4 y 0,8 puntualmente. Es posible que en zonas cordilleranas la frecuencia sea mayor pero la falta de estaciones meteorológicas en la región provoca nuevamente una incertidumbre difícil de comprobar sin otro tipo de medición. Se recurrió a datos proporcionados por estaciones meteorológicas del INTA para compararlos con los del SMN y se obtuvieron resultados similares por lo que en el llano es posible que la frecuencia anual sea baja.

En el Noreste del país el comportamiento es homogéneo y se observa baja variabilidad espacial. Los promedios anuales en Corrientes, Formosa y Chaco oscilan entre 0,6 y 0,8, mientras que en la provincia de Misiones hay diferencias entre el Este y el Oeste. Las estaciones Posadas e Iguazú presentan 0,6 y 0,8 eventos por año en promedio respectivamente en el Oeste. En el Este los promedios por año ascienden a 1,3 eventos de granizo en Oberá y en Bernardo de Irigoyen se presenta el ya mencionado máximo de 4,8 eventos de granizo por año.

En las provincias de Santa Fe y Entre Ríos los promedios anuales de eventos de granizo rondan entre 0,7 y 1.

La provincia de Buenos Aires presenta la mayor variabilidad espacial. Se observan tres claros máximos en las estaciones Tres Arroyos, Trenque Lauquen y Pergamino con una media anual de eventos de 2,2, 2,0 y 2,4 respectivamente. En el Centro de la provincia sobre Azul y Bolívar los promedios descienden a los 1,1 y 0,8 eventos por años. En la zona de sierras en el Sudoeste se ubican tres estaciones meteorológicas: Coronel Suárez, Pigué y Coronel Pringles que presentan 0,5, 0,6 y 1,4 eventos de granizo por año respectivamente. Por último en la costa, en Mar del Plata se registran en promedio 1 evento por año al igual que en Bahía Blanca.

En la Ciudad de Buenos Aires y el Gran Buenos Aires se registran en promedio por año 1,7 eventos en Observatorio Central Buenos Aires, 1,2 en Aeroparque, 1,8 en Ezeiza y alcanzan un máximo de 2,3 en San Miguel.

Para analizar la gran variabilidad en la provincia de Buenos Aires se buscaron las frecuencias de observación de cada estación utilizada para ver si la menor ocurrencia de eventos se relaciona con la falta de observaciones. Las estaciones que presentaron menores valores en la media anual durante los últimos 15 años tuvieron mediciones trihorarias y sólo diurnas. Esto sugiere que puede haber una subestimación en el valor medio debido a falta de datos producto del plan de labor de observación. Esto es lo que se observa principalmente en las estaciones Pigüé y Coronel Suárez.

Por lo tanto la distribución espacial de eventos de granizo en Argentina está ligada principalmente a la orografía con máximos al Este de las sierras cordobesas y en la cordillera de Mendoza. En Canadá, Etkin y otros (2001) también encontraron que el efecto orográfico de las Montañas Rocallosas provoca un aumento de los eventos de granizo en la región. Lo mismo ocurre en China (Zhang y otros 2008) donde el Plateau Central Tibetano produce que se registren una mayor cantidad de eventos de granizo.

El ingreso de masas de aire frío produce nubosidad de tipo celular que puede provocar chaparrones de granizo en la zona costera de la Patagonia aumentando la cantidad de eventos en dicha región. Estos casos al igual que numerosos eventos de Invierno es posible que se relacionen con granizo pequeño o graupel aunque no se tuvieron datos de tamaño en dicha región para verificar.

Los eventos disminuyen hacia el Noreste del país posiblemente por una atmósfera más homogénea térmicamente y por la presencia de masas de aire de origen tropical. En la provincia de Buenos Aires se observa la mayor variabilidad espacial. Los máximos se registran en el Sur y en el Oeste y los valores más bajos se observan en el Centro.

#### **4.2. Frecuencia estacional**

Los porcentajes de ocurrencia de eventos de granizo durante el Verano, Otoño, Invierno y Primavera se muestran en las figuras 19, 20, 21 y 22 respectivamente. De las mismas se desprende claramente que existe un marcado patrón estacional en la Argentina.

Sobre la Cordillera, desde la región de Cuyo hacia el Noroeste Argentino, los eventos de granizo se registran mayormente en el Verano con porcentajes de ocurrencia entre el 50 y 65%, siendo los máximos sobre San Juan y La Rioja y los más bajos en Jujuy. En esta misma región, la Primavera también tiene un alto porcentaje de ocurrencia ya que en Mendoza entre un 25 y 35% de los eventos se registran en esa época. En La Rioja y San Juan se observan 20% de eventos y en Catamarca, Salta, Tucumán y Jujuy los porcentajes de ocurrencia en Primavera ascienden hasta el 40%. Es decir, entre la Primavera y el Verano en toda la región cordillerana del Centro y Norte del país se registran entre el 80 y 90% de los eventos totales del año. El Otoño refleja gran variabilidad en la región dado que los porcentajes de ocurrencia oscilan entre el 5 y 20% con máximos en el Sur mendocino y mínimos sobre Salta y Jujuy. El Invierno presenta la menor cantidad de eventos con menos del 5% de ocurrencia.

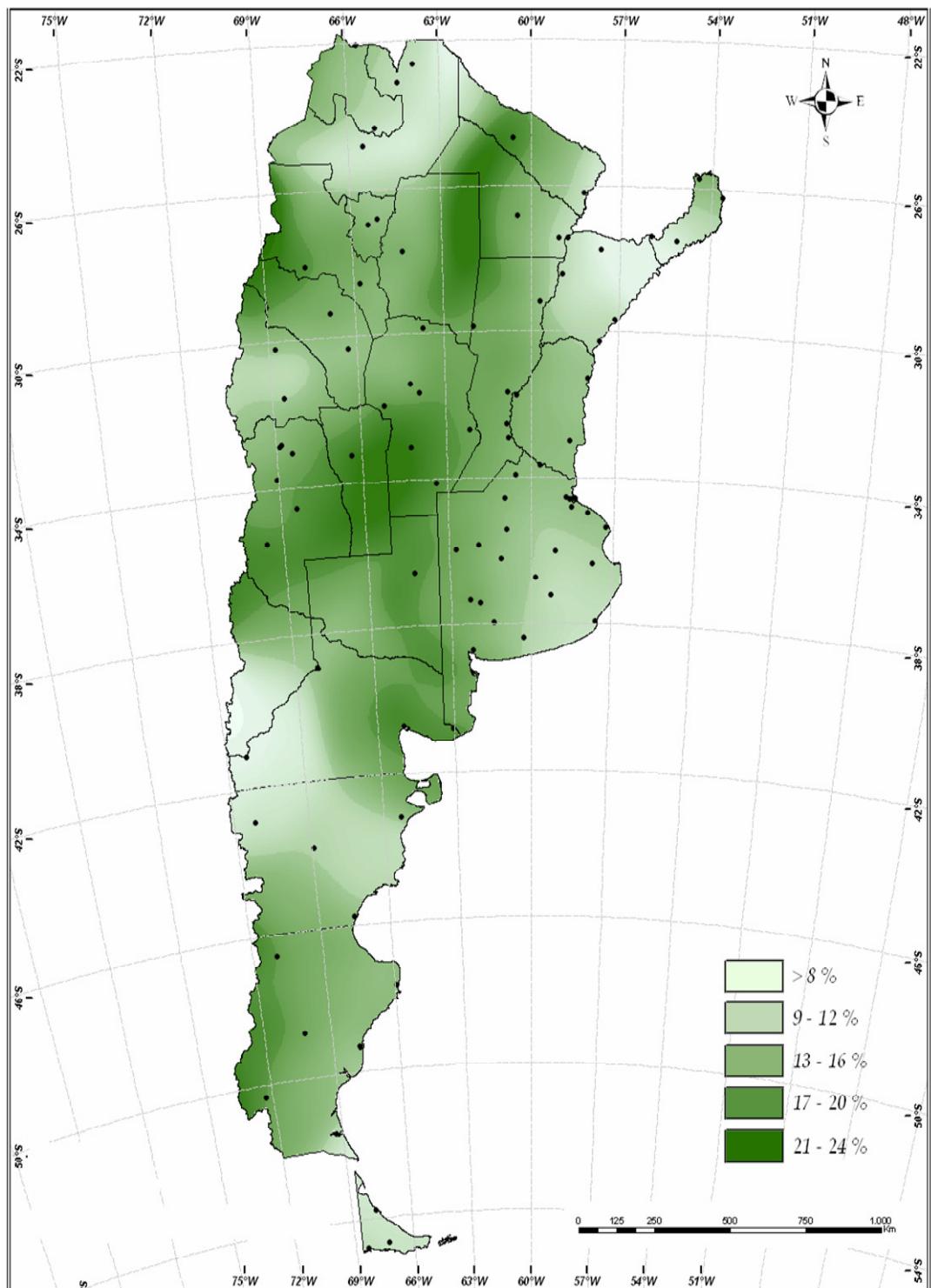


Fig. 20. Ídem figura 19, pero para el Otoño.

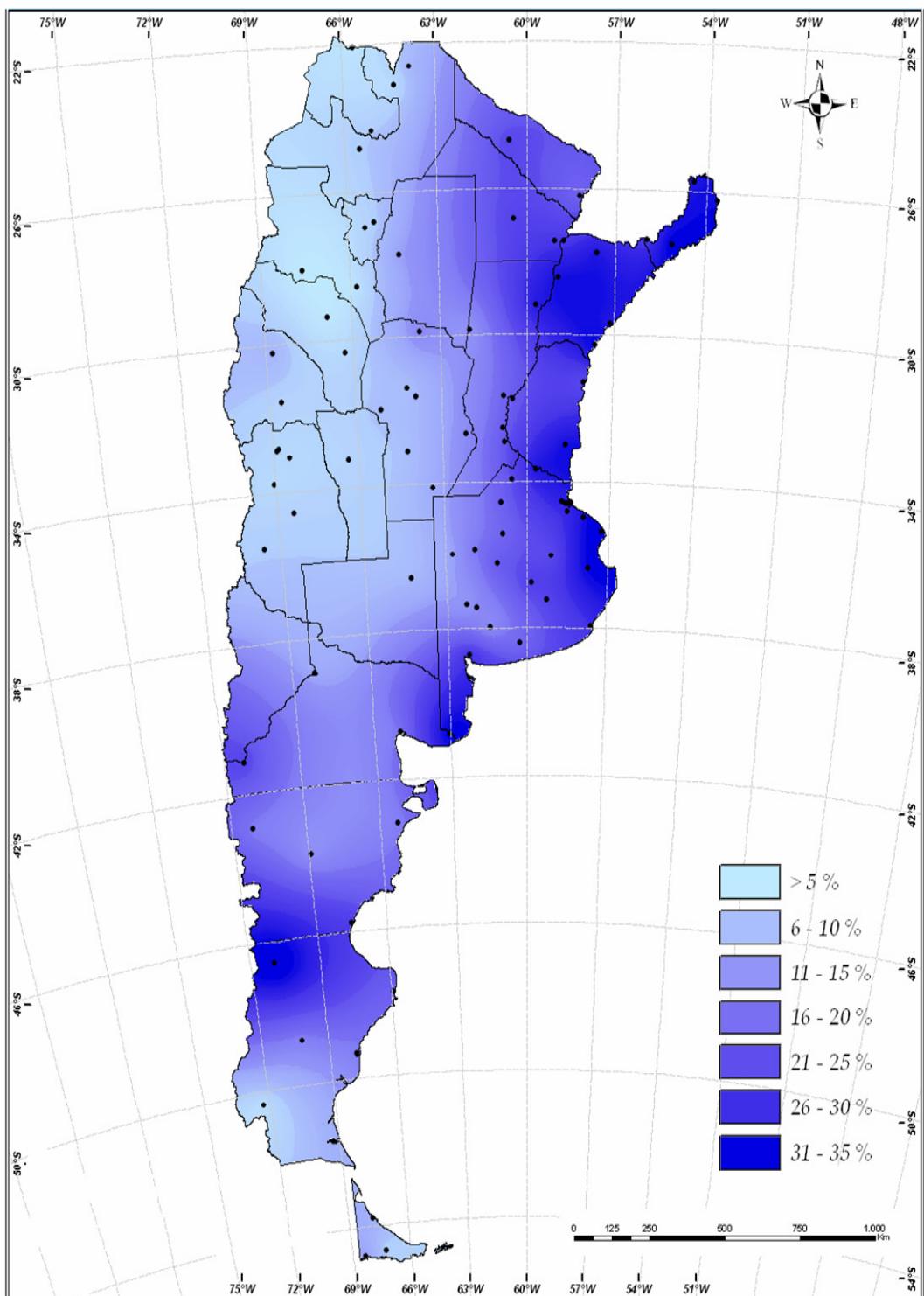


Fig. 21. Ídem figura 19, pero para el Invierno.

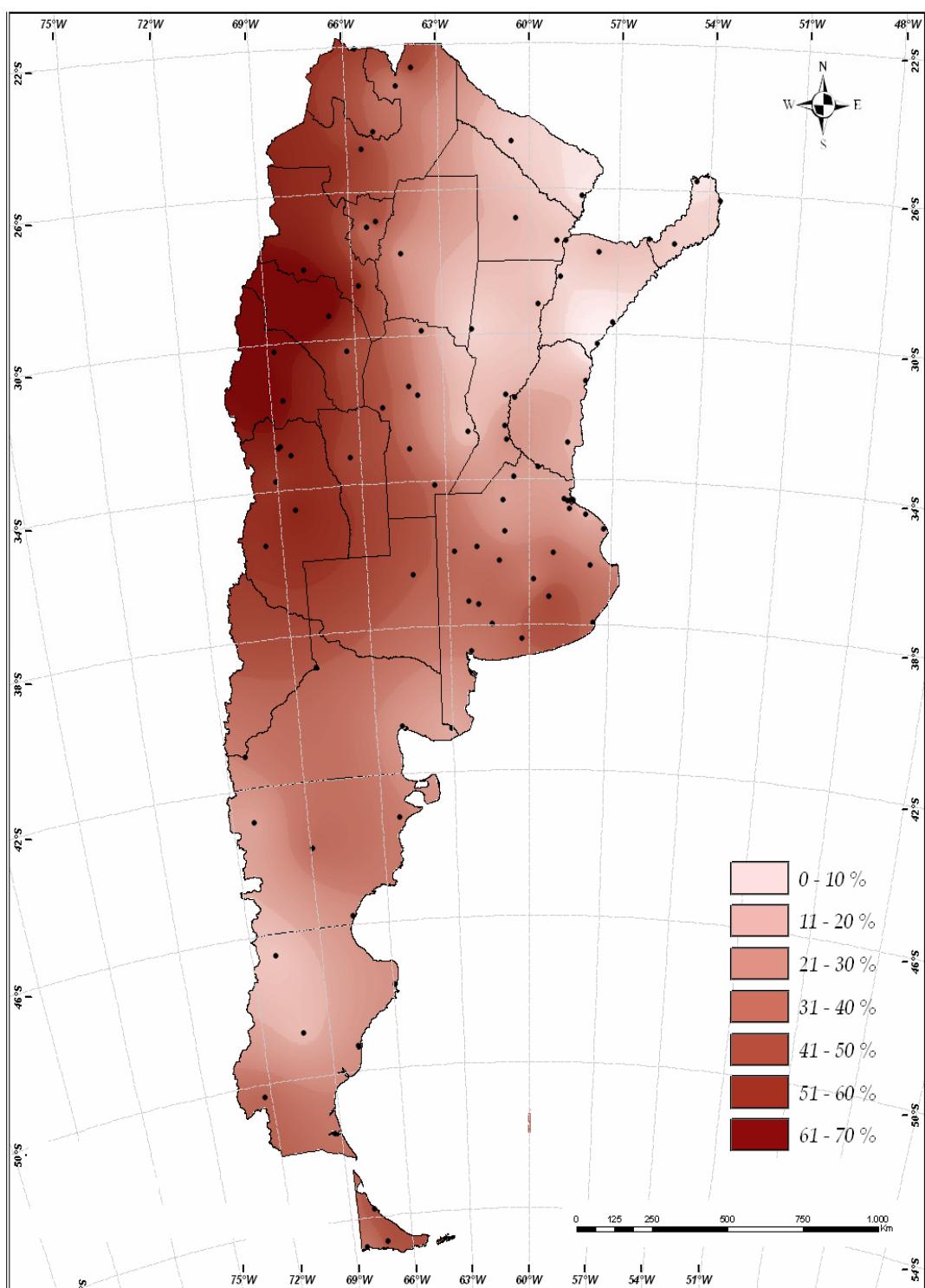


Fig. 19. Frecuencia Porcentual de eventos de granizo en Verano.

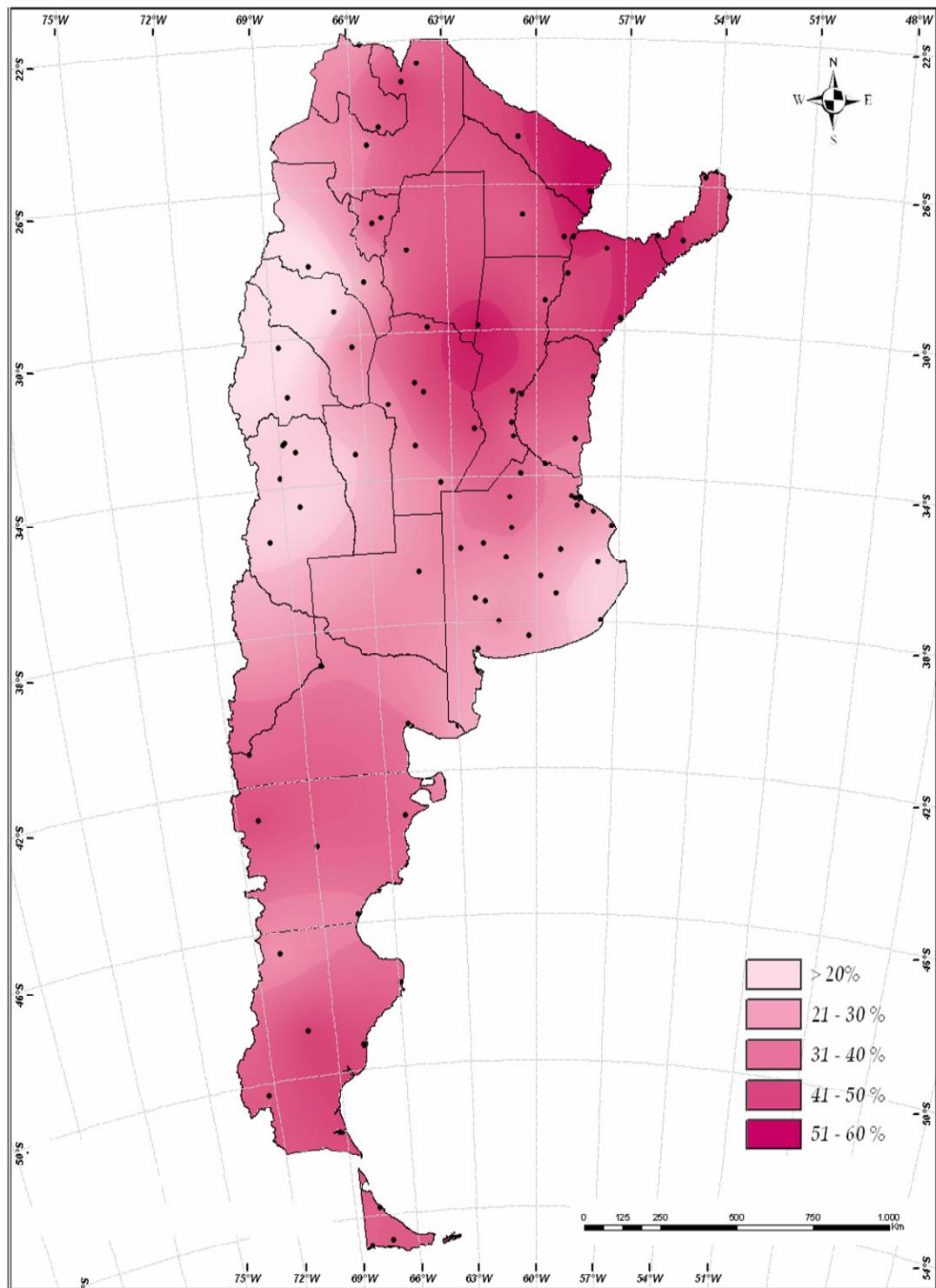


Fig. 22. Ídem figura 19, pero para el Primavera.

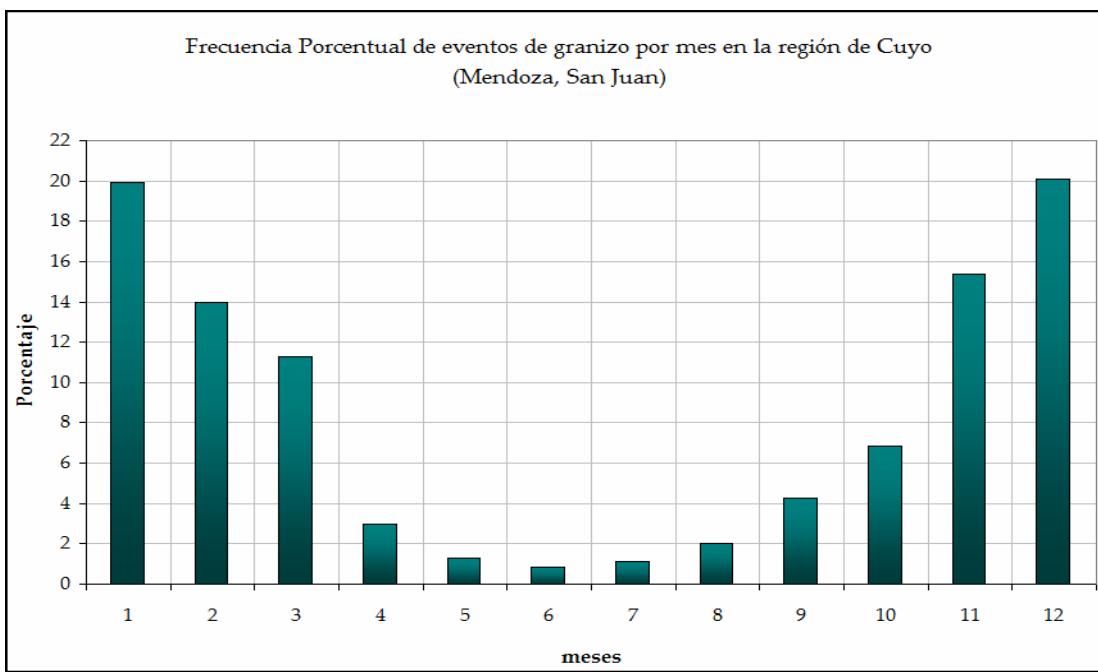


Fig. 23. Frecuencia de eventos por mes en la región de Cuyo (período 1960-2008).

La distribución mensual de esos eventos se pueden observar en la figura 23 para la región de Cuyo y en la figura 24 para la región del Noroeste Argentino. En Mendoza y San Juan el 40% de los eventos ocurre entre Diciembre y Enero; el porcentaje de ocurrencia comienza a disminuir marcadamente a partir del mes de Abril hasta alcanzar un mínimo en Junio y Julio con menos del 2% de ocurrencia. Durante la Primavera, Noviembre es el mes en el cual se registra la mayor cantidad de eventos. En el Noroeste la distribución es similar aunque en los meses de Mayo, Junio y Julio el porcentaje de ocurrencia de eventos disminuye a menos del 0,4% y no se encontraron eventos en toda la región en el mes de Junio; mientras que Noviembre, Diciembre y Enero registran el 53% de los eventos.

En las provincias del Noreste Argentino (Fig. 25) los eventos mayormente se registran durante el Invierno y la Primavera. Entre un 68 y 40% de los casos de granizo ocurren en la Primavera con el máximo sobre Formosa y Corrientes y van disminuyendo hacia Misiones. El Invierno registra entre un 35 y 30% en Misiones y en

Corrientes y entre un 20 y 25% en Formosa y Chaco. Por lo tanto, considerando la Primavera y el Invierno se observan en toda la región entre el 80 y 85% del total de eventos. Verano y Otoño son las estaciones que presentan la menor cantidad de eventos aunque los porcentajes de ocurrencia tienen gran variabilidad y oscilan entre los 5 y 15%. Los meses en los cuales hay mayor cantidad de eventos son Septiembre y Octubre con un porcentaje de ocurrencia del 40% seguidos por Agosto y Noviembre, es decir el 62% de la ocurrencia anual ocurre entre Agosto y Noviembre. Entre Diciembre y Junio la distribución de eventos por mes es homogénea con 4% de ocurrencia en cada mes aproximadamente.

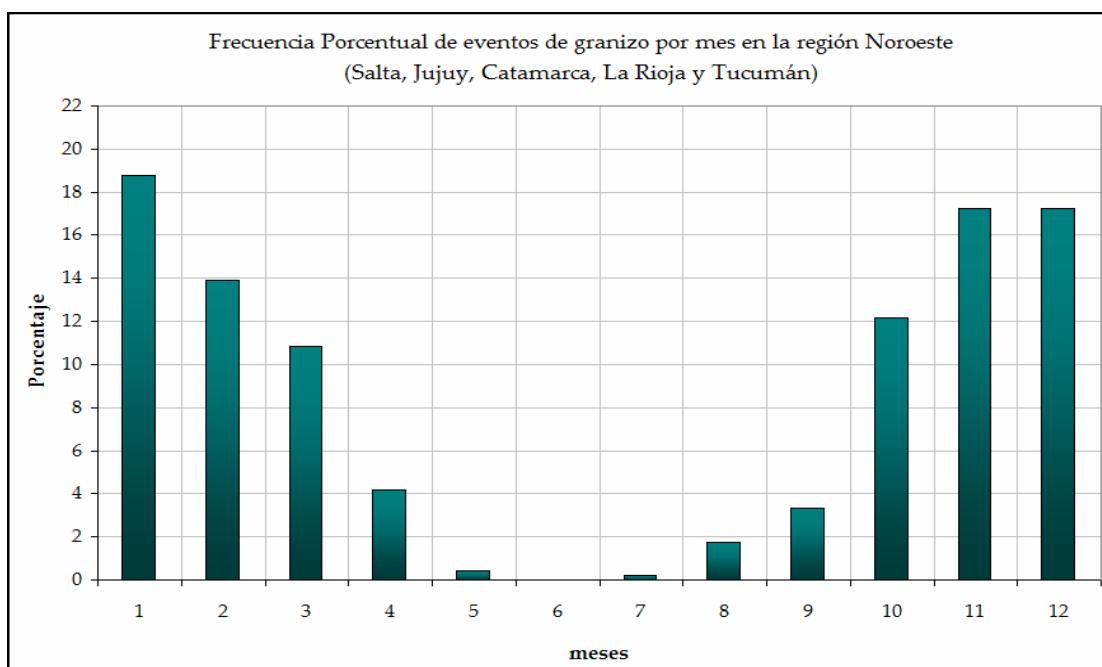


Fig. 24. Ídem figura 23, pero para la región Noroeste.

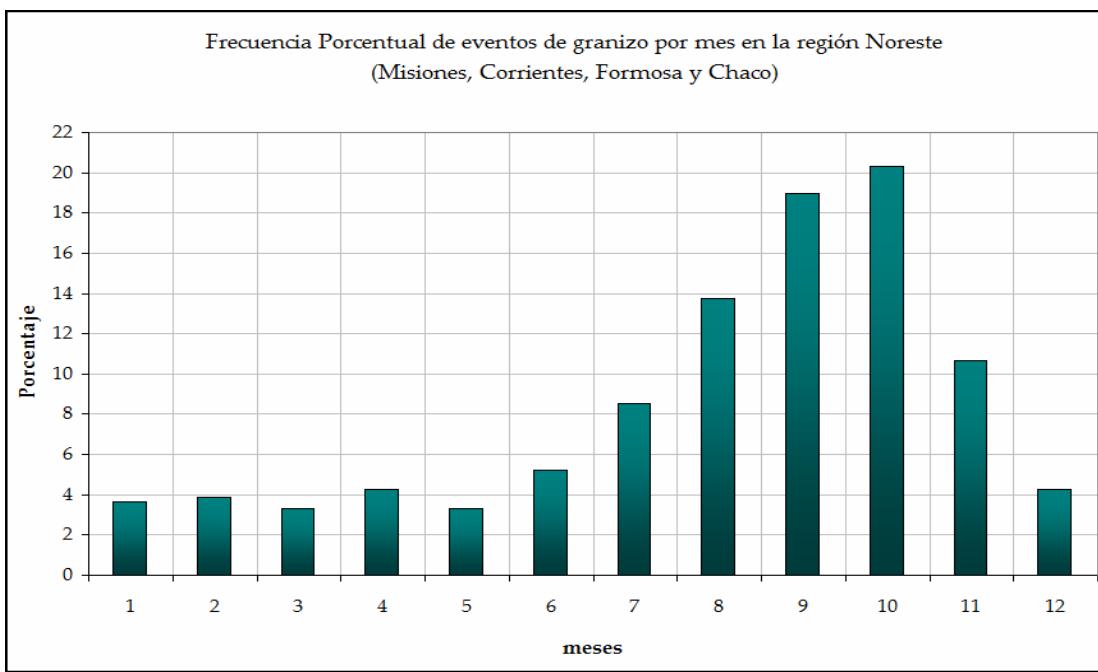


Fig. 25. Ídem figura 23, pero para la región Noreste.

En el centro del país, sobre la provincia de Córdoba (Fig. 26) la distribución estacional de eventos tiene un patrón Oeste-Este. Los mayores porcentajes de ocurrencia se distribuyen entre la Primavera y el Verano, disminuyen en Otoño y se reducen notablemente en el Invierno. En el Este de la provincia, Marcos Juárez presenta un 58% de los eventos en la Primavera y tan solo 12% en el Verano. En el centro, en Córdoba Obs. el 48% de los eventos se observan en la Primavera y el 37% en Verano; finalmente, al Oeste de las Sierras, en Villa Dolores los eventos se registran mayormente en Verano, con una ocurrencia del 42% y Primavera con el 29% de eventos. El análisis de la distribución mensual en la provincia muestra que los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre son los que presentan la máxima cantidad de eventos, alcanzando un 54% de ocurrencia, mientras que hay un claro mínimo desde Mayo hasta Agosto.

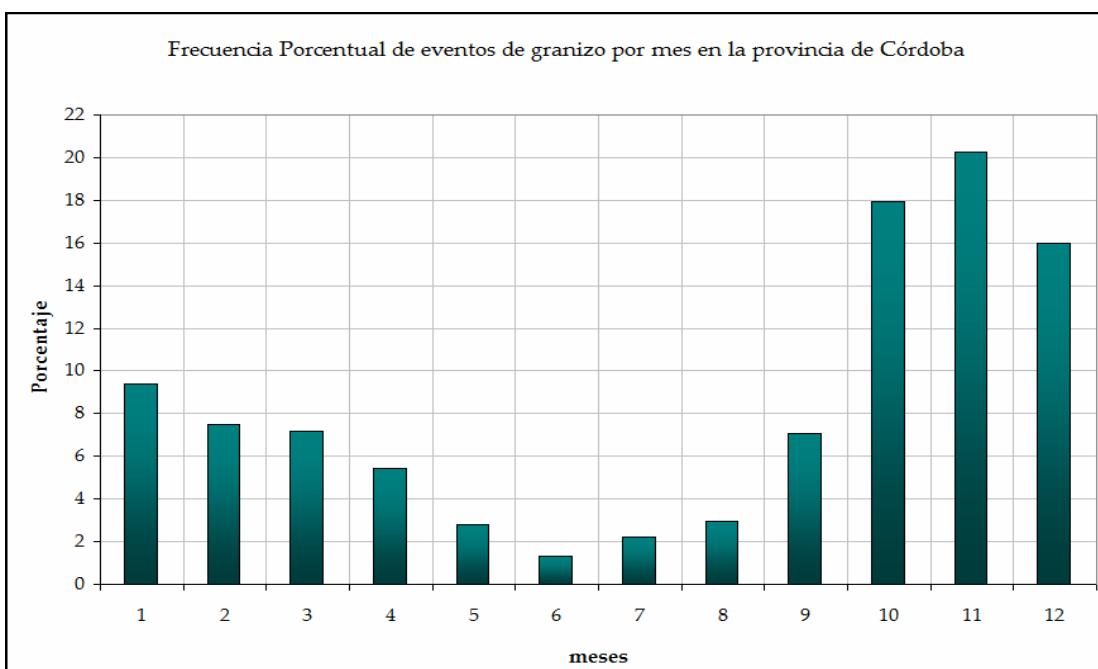


Fig. 26. Ídem figura 23, pero para la provincia de Córdoba.

El Sur del Litoral y Norte de Buenos Aires (Fig. 27) presenta una mayor ocurrencia de eventos en Primavera con porcentajes que oscilan entre los 36 y 52% en las provincias de Santa Fe y Entre Ríos y entre 36 y 46% en el Norte de Buenos Aires (al Norte de la estación Pehuajo). En dicha región en el Verano la frecuencia porcentual se ubica entre los 17 y 24%, por lo tanto entre un 65 y 75% de los eventos de granizo ocurre en las estaciones cálidas.

En el Sur de Buenos Aires, al sur de la estación Bolívar (Fig. 28), los porcentajes en la Primavera y el Verano son similares salvo en el extremo Sur y en la zona costera donde el máximo se observa en Verano; asimismo hay un máximo secundario en los meses de Invierno. Los mismos rondan el 30% de ocurrencia en cada estación del año.

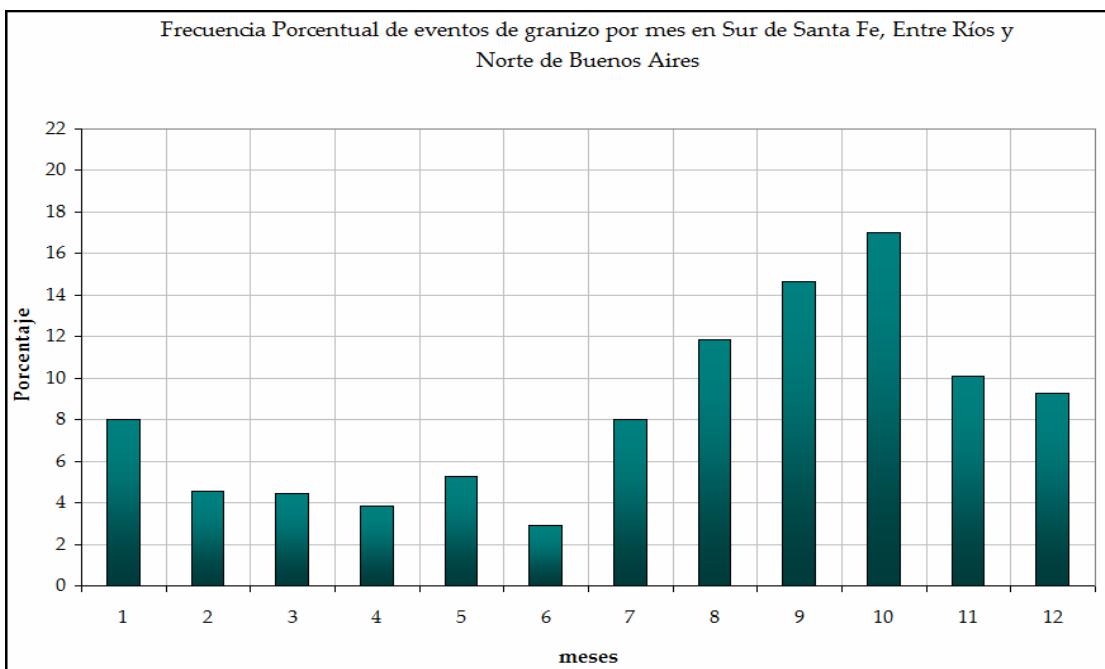


Fig. 27. Ídem figura 23, pero para la región Sur de Santa Fe, Entre Ríos y Norte de Buenos Aires.

La distribución mensual en ambas regiones muestra que en el Norte de Buenos Aires y Sur del Litoral los meses de máxima ocurrencia son Septiembre y Octubre los cuales presentan un 32% de los eventos, seguidos por Agosto, Noviembre y Diciembre completando así el 63% de la ocurrencia anual. En cambio, en el Sur de Buenos Aires los máximos se observan en los meses de Diciembre y Enero con una distribución homogénea en los meses desde Agosto a Noviembre y un aumento de los casos desde Julio especialmente dados en las estaciones Mar del Plata, Dolores y Bahía Blanca. Estos eventos posiblemente se generen por la presencia de chaparrones de granizo con la llegada de aire polar al continente y la formación de nubosidad de tipo celular.

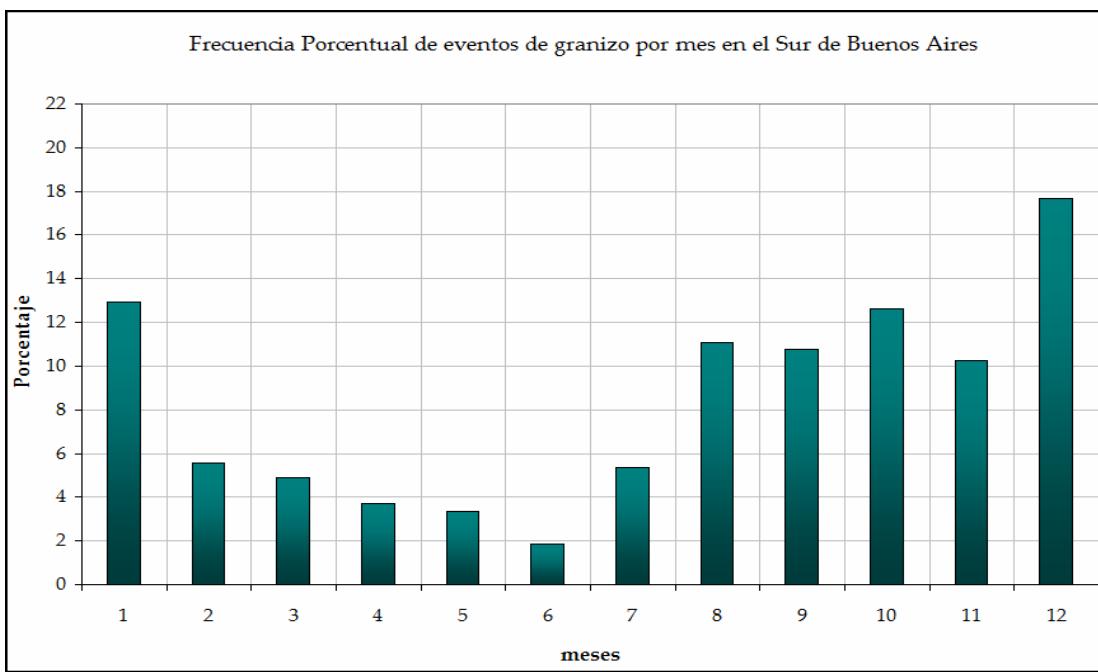


Fig. 28. Ídem figura 23, pero para la región Sur de Buenos Aires.

Por último en la región Patagónica también la mayor cantidad de eventos se registra en la Primavera y al comienzo del Verano. La frecuencia porcentual de eventos oscila entre los 41 y 55% en la Primavera con un máximo sobre Santa Cruz mientras que en Tierra del Fuego los eventos ocurren de igual modo en la Primavera como en el Verano ya que se observan un 40% de ocurrencia en ambas estaciones aproximadamente. Las estaciones Viedma, Perito Moreno y Bariloche presentan la mayor cantidad de eventos en el Invierno con un porcentaje de ocurrencia de entre el 25 y 30%. Con respecto al análisis de la ocurrencia mensual, se dividió a la región en Patagonia Norte y Patagonia Sur (Fig. 29 y 30 respectivamente). Sobre el Norte los meses de mayor cantidad de eventos son Septiembre y Octubre y contabilizan casi el 30% de los eventos, mientras que en Noviembre y Diciembre se observa el 24% y en los meses de Invierno presentan un total del 19% de ocurrencia. En la región Sur los máximos se observan en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre y alcanzan aproximadamente el 41% de

casos. En los meses de Invierno se registran menos eventos que en la región Norte, sólo el 11% del total anual.

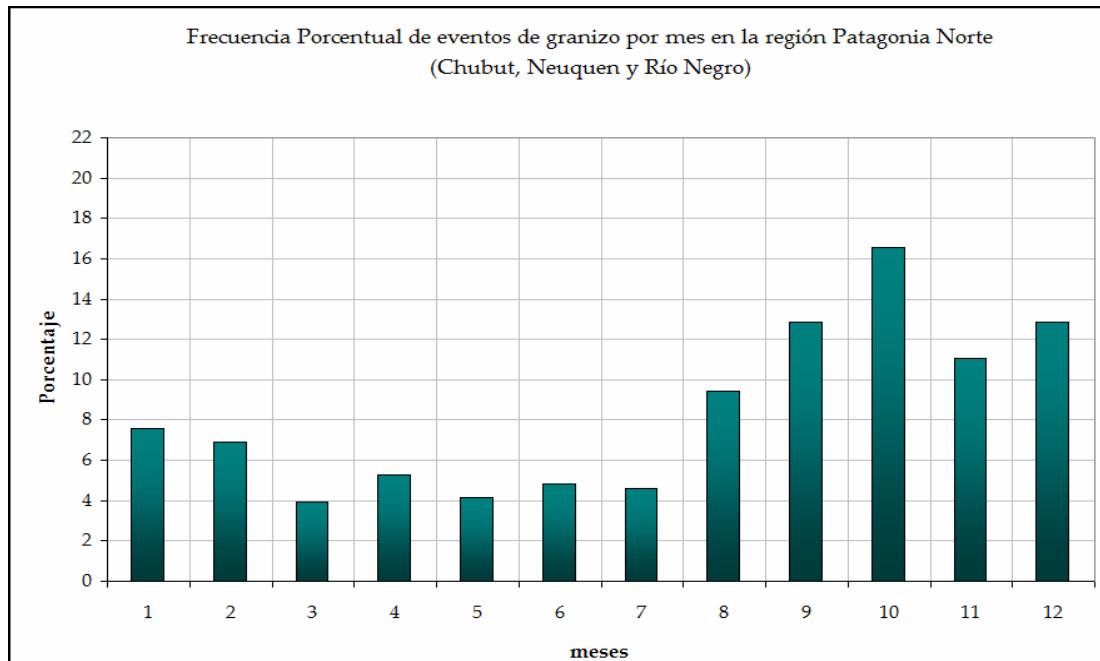


Fig. 29. Ídem figura 23 pero para la región Patagonia Norte.

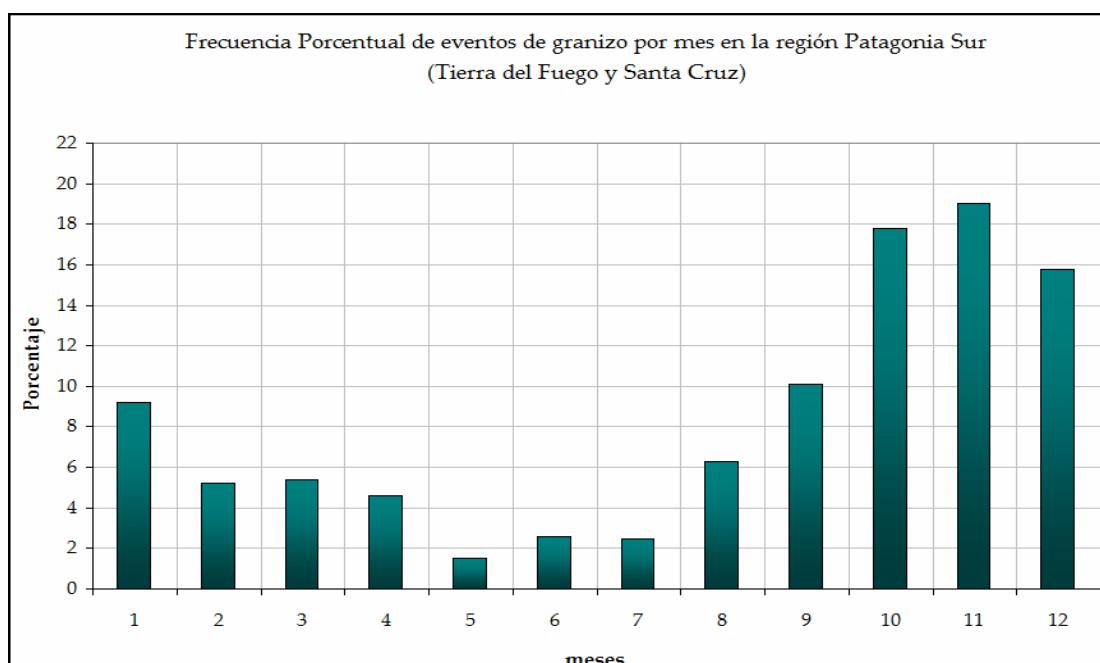


Fig. 30. Ídem figura 23 pero para la región Patagonia Sur.

#### 4.3. Información de las planillas de granizo

Las figuras 31, 32 y 33 muestran la frecuencia horaria entre las 09 y 00 hs. de ocurrencia de granizo en Buenos Aires y La Pampa, en la Ciudad de Buenos Aires y en Córdoba respectivamente. Se observa que en La Pampa y Buenos Aires y en la Ciudad de Buenos Aires la hora de máxima ocurrencia es entre las 16 y 17 hs. y entre las 15 y las 19 ocurre el 45% de los eventos diurnos. Además se observa una disminución de los mismos en las horas nocturnas y al comienzo de la mañana en Buenos Aires y La Pampa. En la Ciudad de Buenos Aires hay mayor variabilidad aunque entre las 19 y 22 hs. se podría decir que los eventos disminuyen. Saluzzi y Nuñez (1975) muestran que en horas de la madrugada, entre las 3 y las 7 hs., se observa el mínimo de eventos y coinciden con la ocurrencia del máximo entre las 16 y 18 hs. En la provincia de Córdoba la distribución es claramente diferente dado que se registra un 18% de eventos entre las 19 y 20 hs la cual es la hora de mayor ocurrencia y casi el 50% de los mismos se observa entre las 17 y 20 hs.

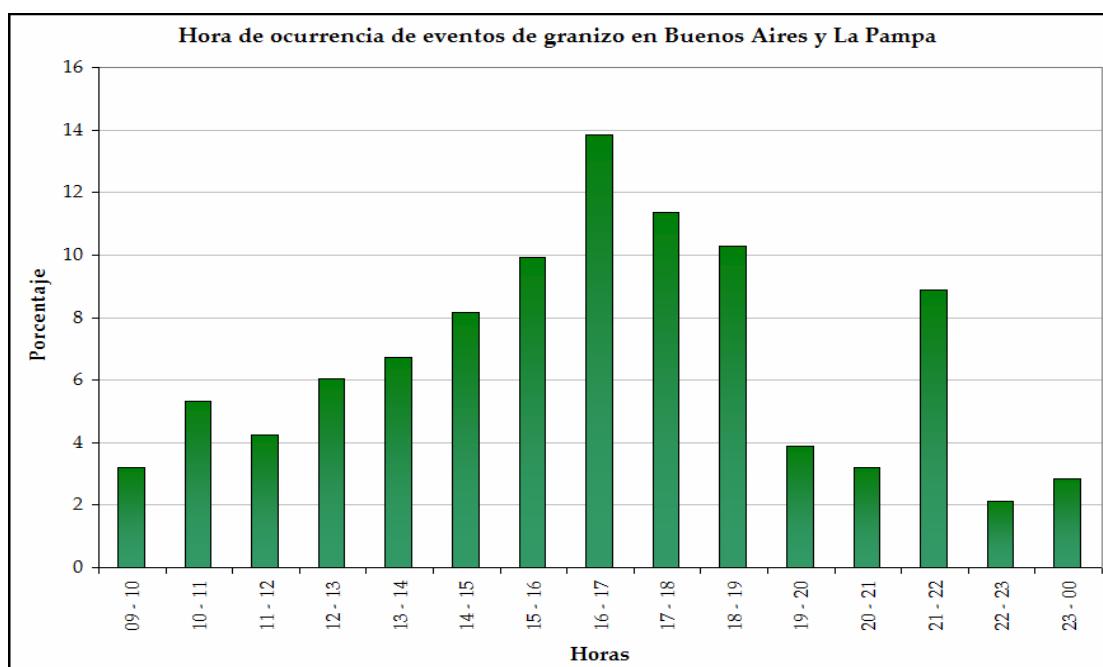


Fig. 31. Hora de ocurrencia de eventos de granizo en Buenos Aires y La Pampa.

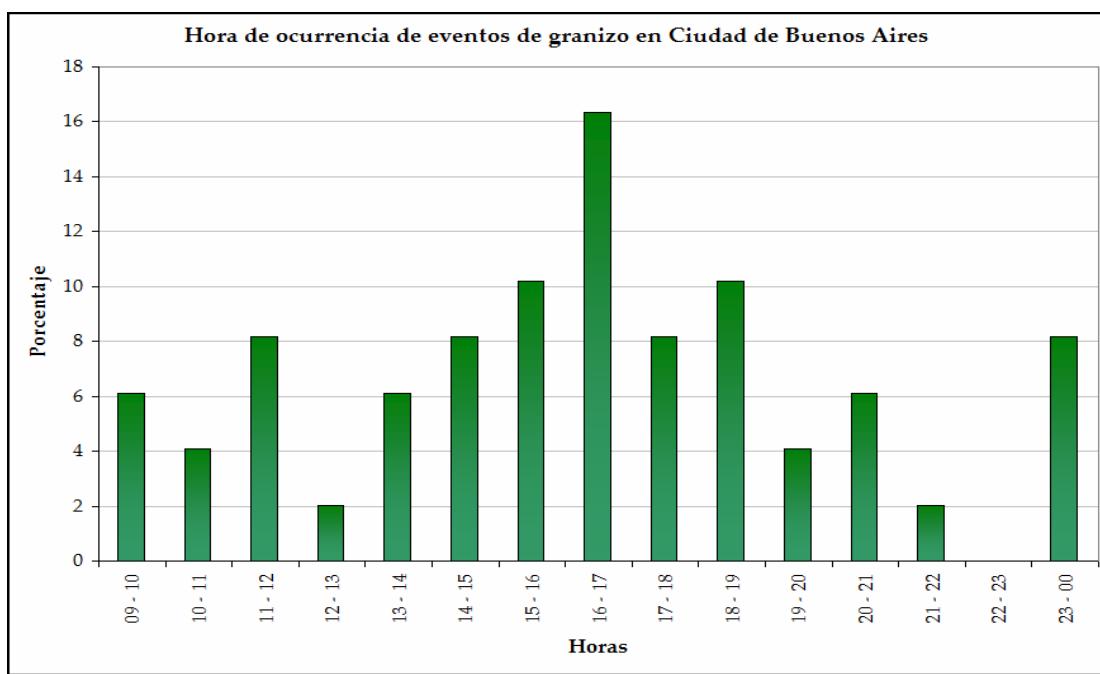


Fig. 32. Ídem figura 31, pero para Ciudad de Buenos Aires.

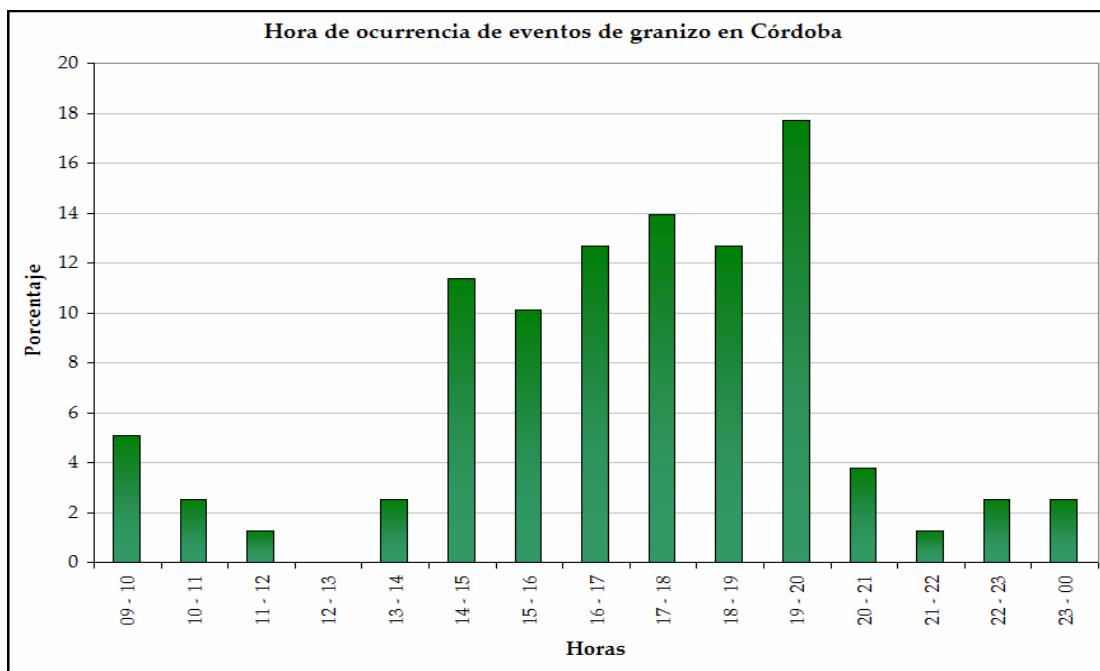


Fig. 33. Ídem figura 31, pero para Córdoba.

La duración de la ocurrencia de estos eventos en Buenos Aires y La Pampa, la Ciudad de Buenos Aires y Córdoba se observan en las figuras 34, 35 y 36 respectivamente. Nuevamente se observan diferencias entre Buenos Aires y La Pampa y Córdoba. En las primeras el 55% de los eventos de granizo tienen una duración de menos de 4 minutos y va disminuyendo el porcentaje cuando aumenta la duración. Se encontraron 29 eventos de más de 10 minutos de duración aunque se registra en la planilla que 9 de los mismos tuvieron interrupciones.

Si bien en la Ciudad de Buenos Aires (Fig. 35) se observan eventos de larga duración, el 50% de los mismos sufrieron interrupciones por lo que no se puede determinar con exactitud la duración predominante.

En la provincia de Córdoba la duración predominante es la de más de 10 minutos con un 36% de ocurrencia de eventos. De los mismos, 28 corresponden a duraciones entre 11 y 20 minutos de los cuales 11 tuvieron interrupciones. Además un 23% de los eventos tiene una duración de entre 5 y 6 minutos.

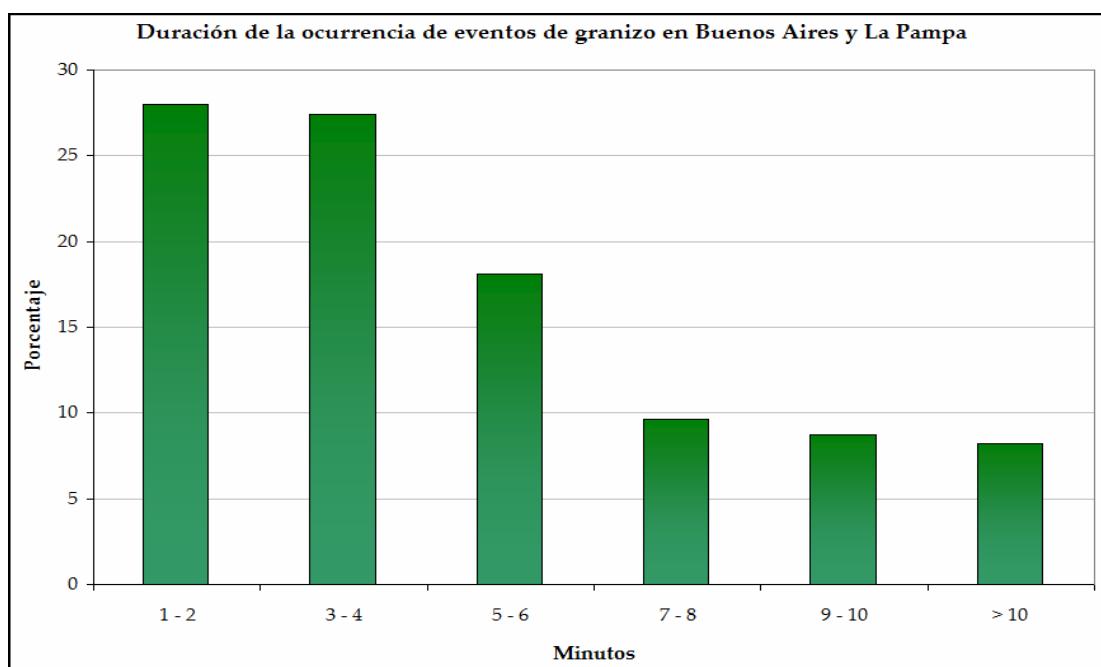


Fig. 34. Duración de la ocurrencia de eventos de granizo en Buenos Aires y La Pampa.

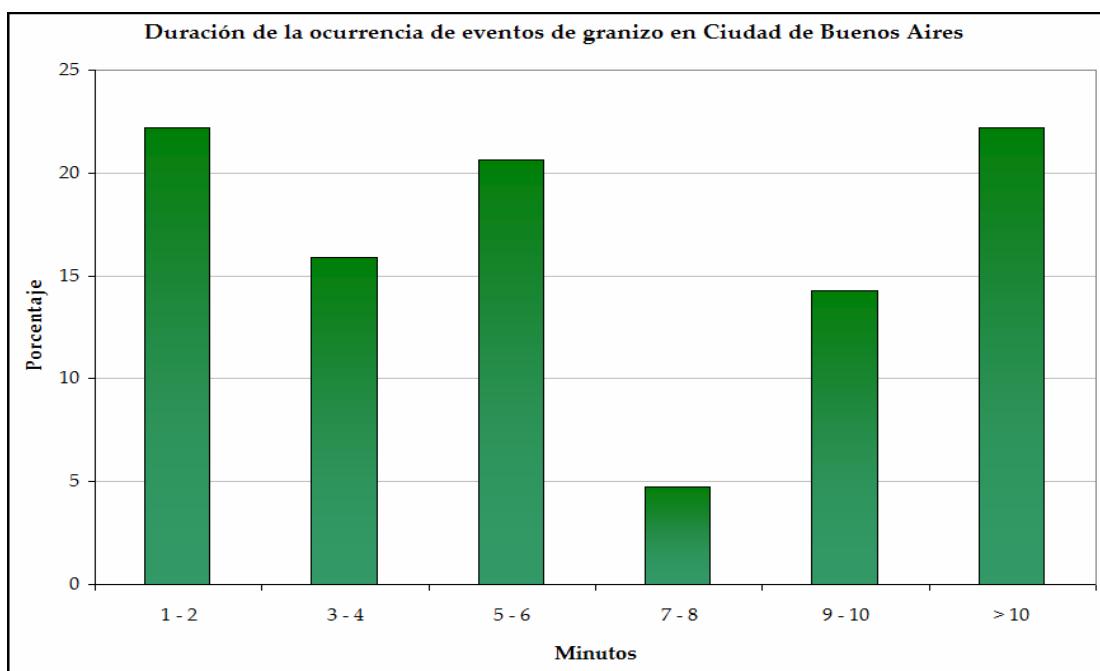


Fig. 35. Ídem figura 34, pero para Ciudad de Buenos Aires.

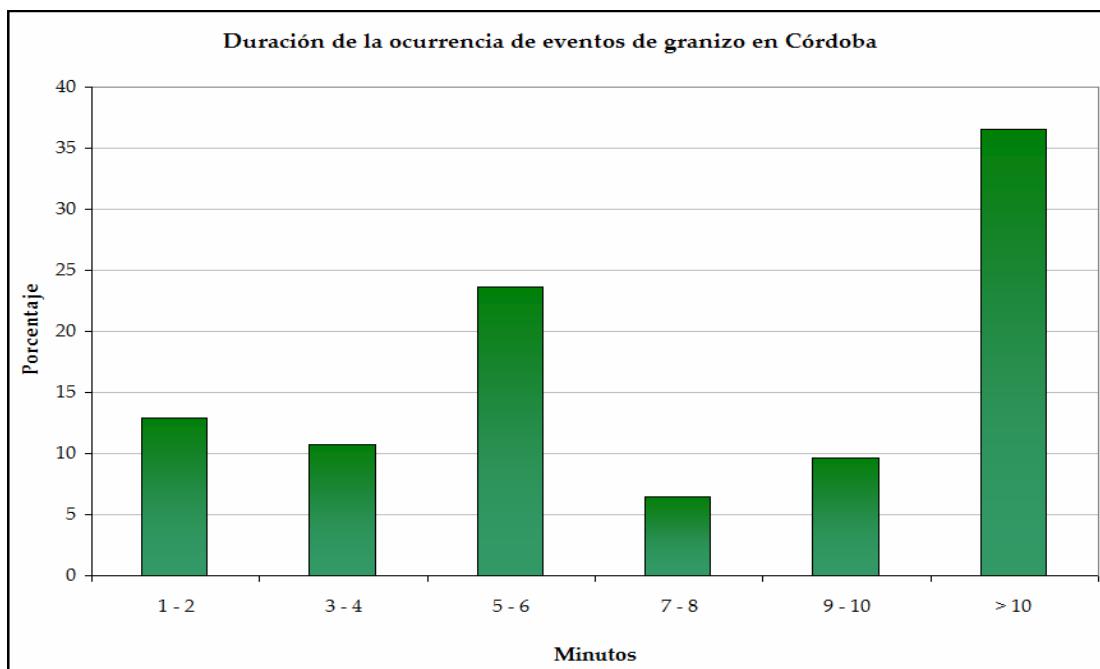


Fig. 36. Ídem figura 34, pero para Córdoba.

Cuando se analiza la intensidad de la precipitación de granizo se tiene en cuenta el tiempo que duró el fenómeno y la cantidad de granizo caído. En el caso de las provincias de Buenos Aires y La Pampa (Fig. 37) cuando el evento de granizo es fuerte también viene acompañado por lluvia fuerte (el 72% de los casos) mientras que cuando la intensidad del granizo es débil se puede producir con lluvia moderada o lluvia fuerte. Solo el 11% de los eventos de granizo ocurre en presencia de lluvia débil. Y analizando solamente la intensidad del granizo el 61% fue débil, el 30% moderado y el 9% fuerte (Fig. 38).

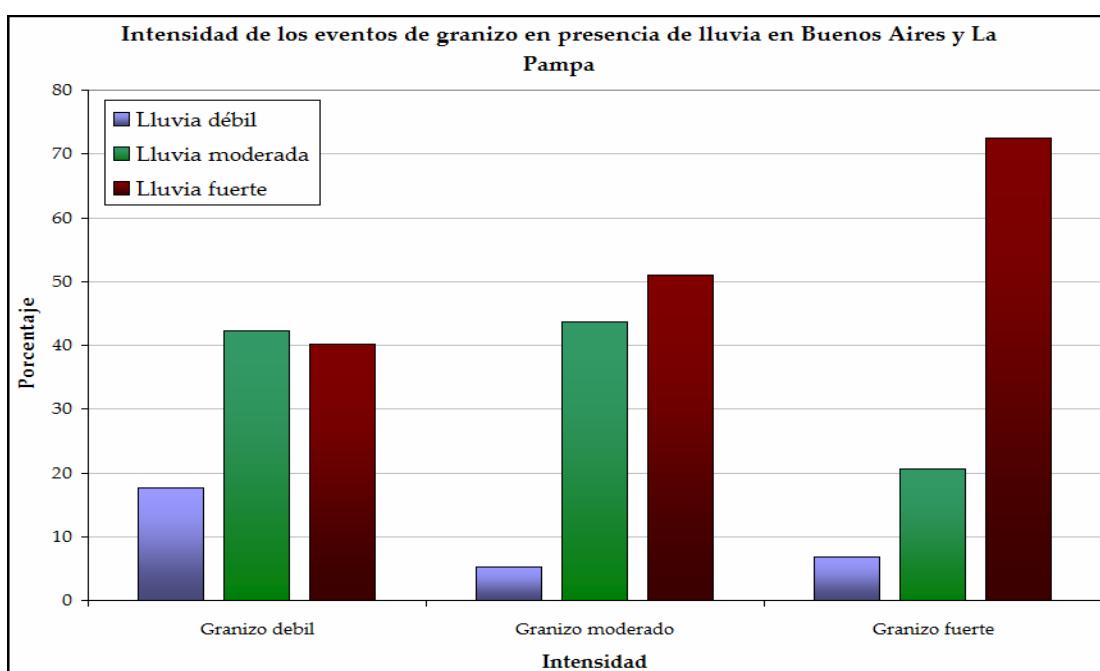


Fig. 37. Intensidad de los eventos de granizo en presencia de lluvia en Buenos Aires y La Pampa.

Analizando lo que ocurre en Córdoba, las precipitaciones de granizo de intensidad fuerte también se registran con lluvias fuertes (el 53% de los casos) como se observa en la figura 39 y cuando se registran precipitaciones de granizo de intensidad débil, en el 52% de los casos se observa lluvia moderada. Si se observa solamente lo que ocurre con

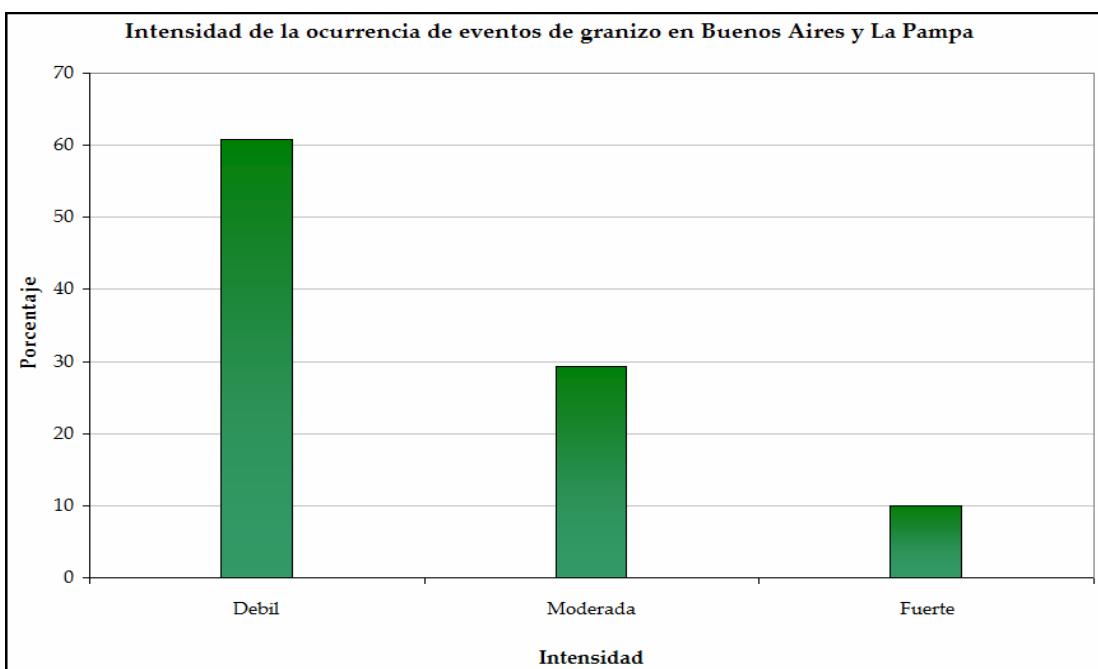


Fig. 38. Intensidad de la ocurrencia de eventos de granizo en Buenos Aires y La Pampa.

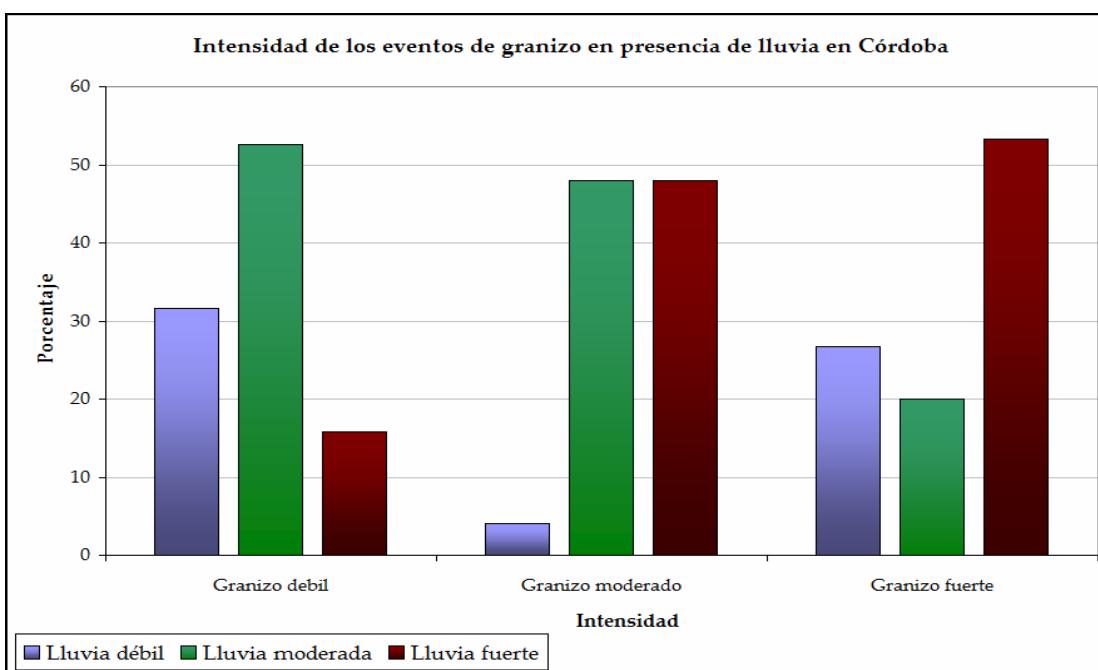


Fig. 39. Ídem figura 37, pero para Córdoba.

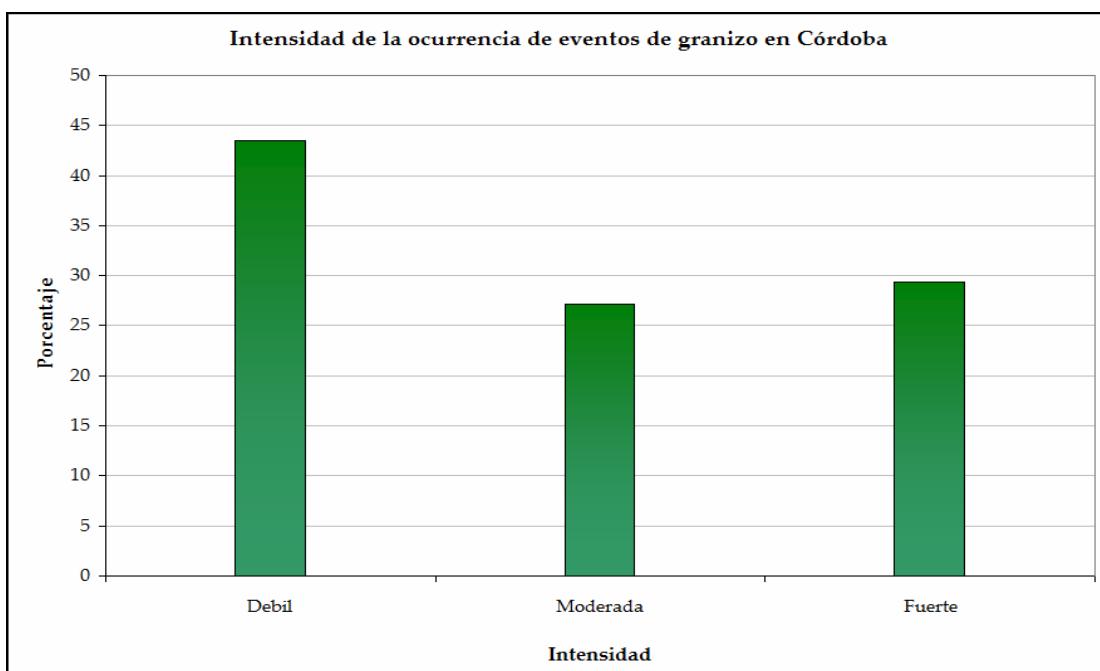


Fig. 40. Ídem figura 38, pero para Córdoba.

la intensidad de eventos de granizo, el 44% de los eventos son débiles y el 29% son fuertes (Fig. 40).

El tamaño del granizo es claramente mayor en la provincia de Córdoba que en Buenos Aires y La Pampa (Fig. 42 y 41 respectivamente). El tamaño que predomina en Buenos Aires y La Pampa es menor a 0,5cm con una frecuencia del 78% mientras que en Córdoba también son frecuentes los granizos entre 0,5 y 2cm con un 25% de ocurrencia. Con respecto al tamaño de granizo grande que predomina y el máximo hallado, en Buenos Aires y La Pampa se encontraron 2 eventos con granizo predominante de más de 3cm, 12 eventos con granizo que tuvieron como máximo tamaños entre 3 y 4cm y 9 casos que tuvieron como máximo tamaños de más de 4cm.

En la provincia de Córdoba los casos con tamaño grande de granizo, de más de 3cm fueron 4 que equivalen a un 5% de los eventos mientras que los máximos tamaños hallados fueron: 9 entre 3 y 4cm lo cual corresponde a un 10% de los datos y 8 de más de 4cm que corresponde a un 9% de los datos.

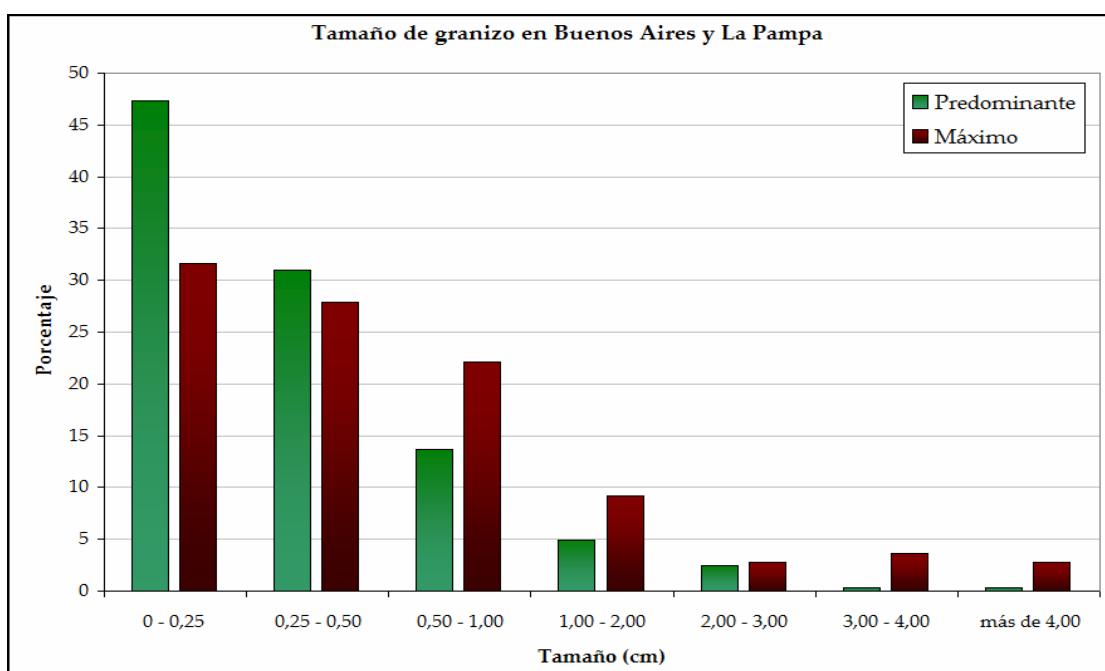


Fig. 41. Tamaño de granizo en Buenos Aires y La Pampa.

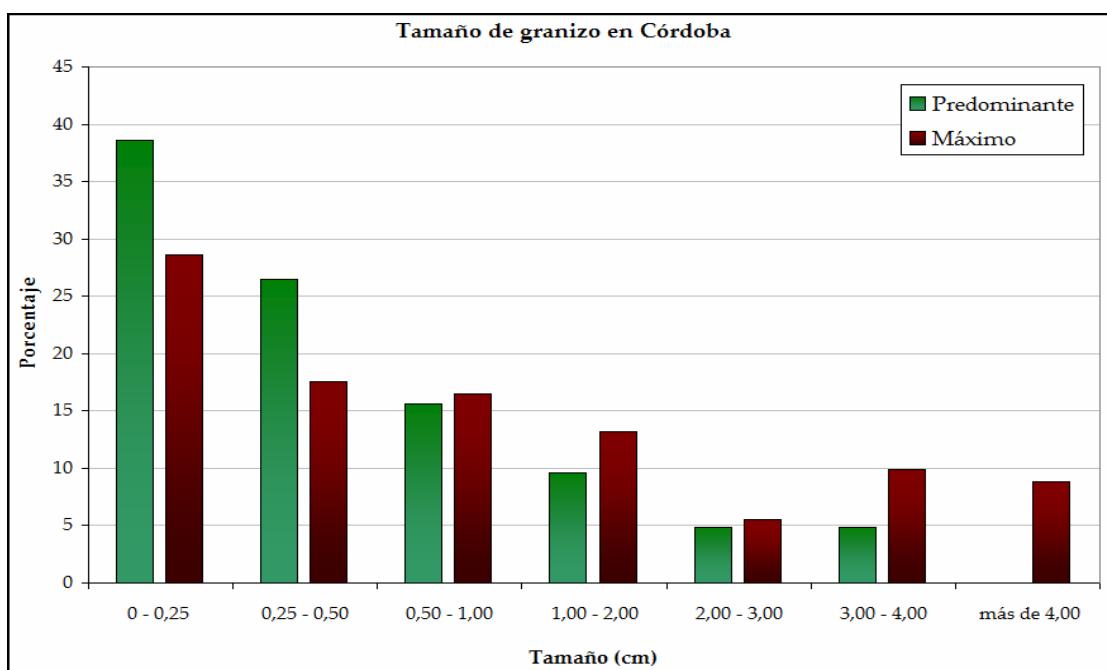


Fig. 42. Ídem figura 41, pero para Córdoba.

El tiempo de conservación en el suelo es más frecuente entre 1 y 4 minutos en Buenos Aires y La Pampa (Fig. 43) con un 48% de ocurrencia; va disminuyendo con los minutos aunque nuevamente se observa un aumento con las frecuencias de más de 16 minutos. Se encontraron 29 casos (8% del total de eventos registrados) en los cuales el granizo se conservó entre 16 y 30 minutos sobre el suelo y 9 casos en los cuales el granizo se conservó entre 40 minutos y 3 horas sobre el suelo.

En Córdoba los tiempos de conservación en el suelo son mayores (Fig. 44) debido a que, como ya se ha mencionado, el tamaño del granizo es mayor, por lo tanto tarda más tiempo en fundirse. Aproximadamente en 18% de los casos el granizo permanece en el suelo entre 5 y 6 minutos y un 39% lo hace por más de 16 minutos. En el 23% de los casos el granizo se conserva en el suelo entre 16 minutos y 1 hora y el 13%, entre 1 hora y 5 horas.

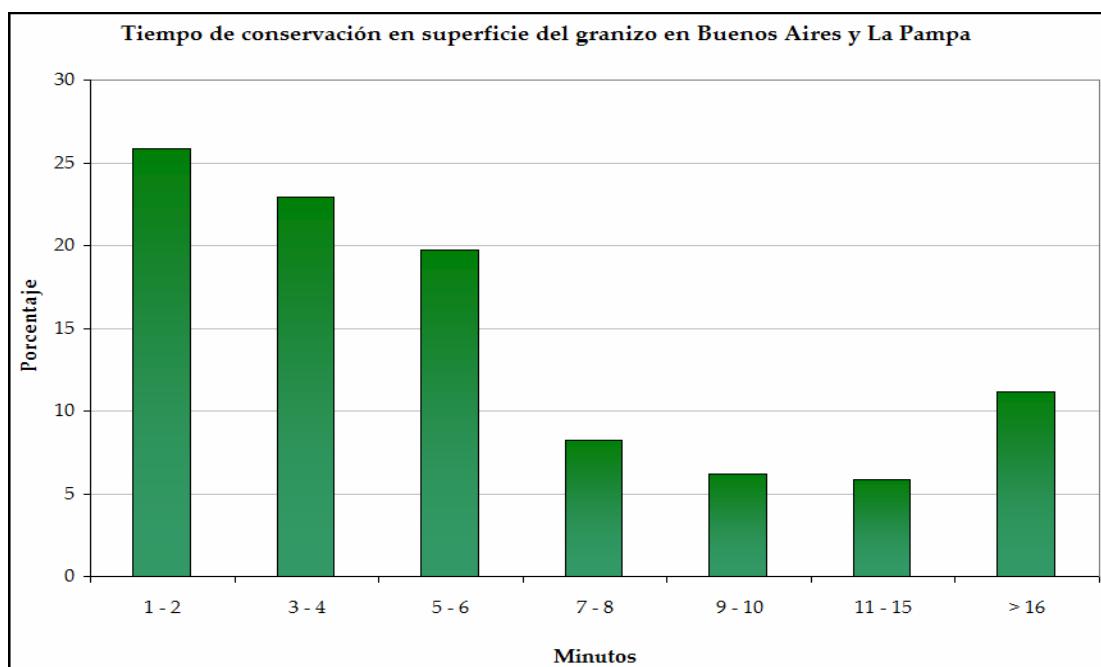


Fig. 43. Tiempo de conservación en superficie del granizo en Buenos Aires y La Pampa.

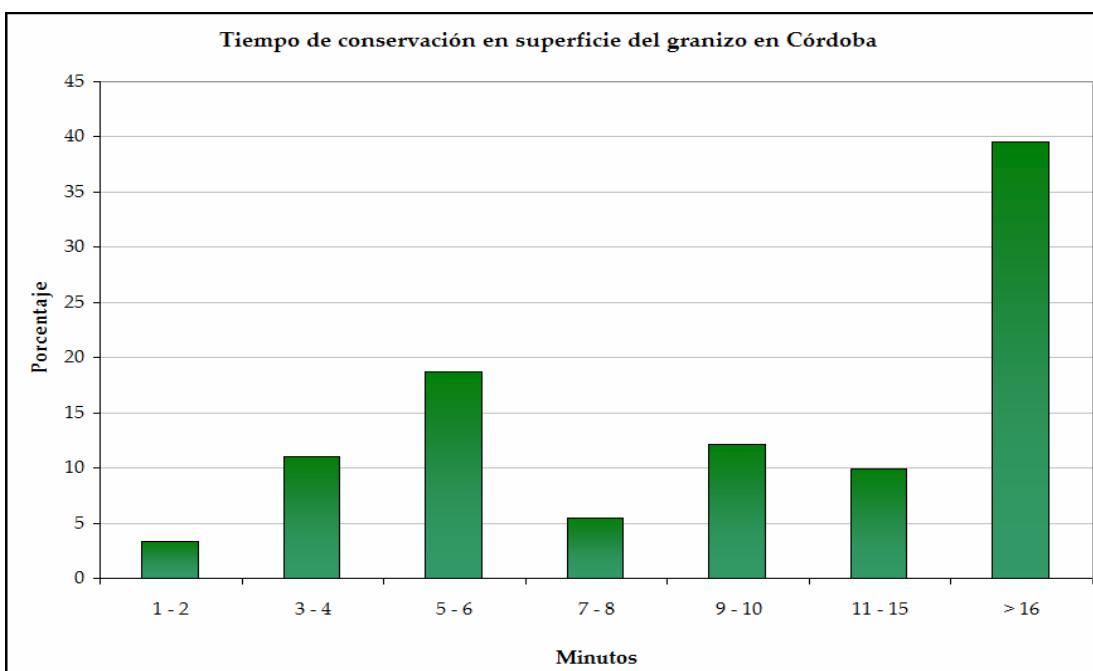


Fig. 44. Ídem figura 43, pero para Córdoba.

Comparando los fenómenos que se registran en Buenos Aires y La Pampa con los de Córdoba se observa que en esta última provincia son más intensos. Los tamaños de granizo son mayores en Córdoba alcanzando frecuentemente los 3cm o más (en un 19% de los casos contra 6% en Buenos Aires y La Pampa) y la duración del evento también es mayor con tormentas de granizo de más de 10 minutos (en un 36% de los casos). Estos factores hacen que la conservación del granizo en superficie sea más prolongada donde en algunos casos de la provincia de Córdoba el granizo ha permanecido en el suelo durante 5 horas.

## Capítulo 5. Tendencias

### 5.1 Tendencias por estación meteorológica

En la figura 45 se muestran las tendencias por estación y la significancia obtenida a partir del test de Mann Kendall durante los períodos mencionados en el capítulo 2. Se puede observar que son 25 las estaciones que presentan tendencias significativas al 95% crecientes o decrecientes lo cual representa el 27% del total de estaciones. Además, 5 estaciones presentan tendencias crecientes o decrecientes al 90% de significancia.

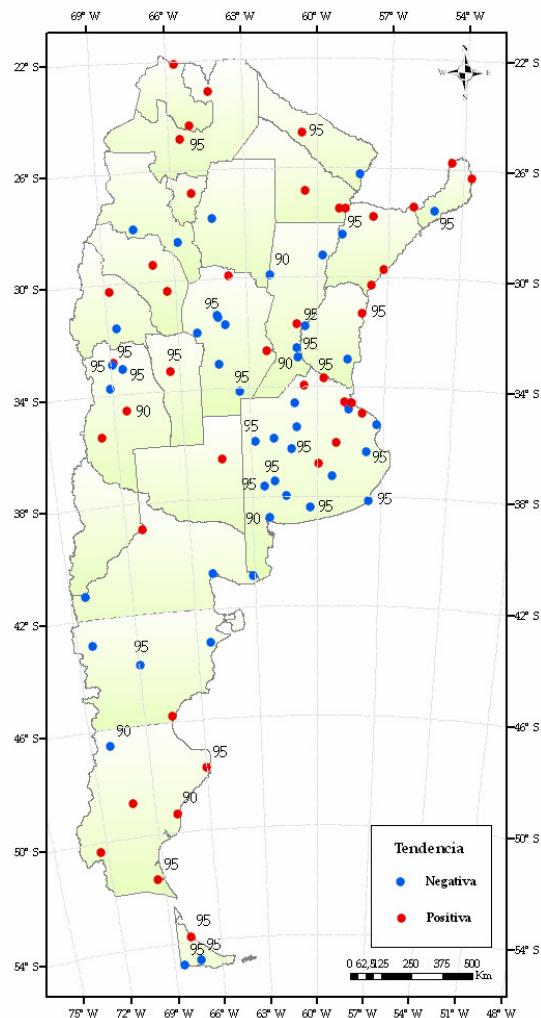


Fig. 45. Tendencias por estación meteorológica.

## **5.2 .Tendencias regionales**

Se analizaron las tendencias por regiones en todo el país. Para ello se graficaron las series anuales, obtenidas de promediar los valores anuales de cada estación que forma parte de una dada región, junto a la tendencia lineal y el promedio móvil centrado de 5 años. Estas tendencias difieren dependiendo de la región que se observe.

En el Sur del país, la Patagonia se dividió en la región Norte (Neuquén, Río Negro y Chubut) y en región Sur (Santa Cruz y Tierra del Fuego), y se consideró el período 1960-2008. Las figuras 46 y 47 muestran la región Patagonia Sur y Patagonia Norte respectivamente. En el Sur se observa una tendencia lineal positiva no significativa. El período de mayor ocurrencia de eventos comprende desde fines de la década del 90 y comienzos de la del 2000 con un máximo de 4 eventos en promedio en toda la región en el año 2000 y el de menor ocurrencia es a mediados de la década del 80 con un mínimo de 0,5 eventos en promedio en el año 1985.

En la región Patagonia Norte se observa una leve tendencia negativa pero claramente no significativa. Un máximo en la ocurrencia de eventos en la región se observa a comienzos de la década del 70 con un máximo en la media anual de 3 eventos en 1971 y al igual que en la región del Sur hay un leve aumento hacia fines de los 90. El valor más bajo se observa en 1989 cuando sólo se registró un evento de granizo en Viedma y otro en San Antonio Oeste, y el promedio anual en toda la región es de tan solo 0,25.

En el Noroeste del país durante el período 1960-2008 (Fig. 48) la tendencia lineal es positiva significativa al 90%. Se observan mínimos en los promedios anuales de granizo desde comienzos hasta mediados de la década del 80, aunque los valores más bajos se registraron en 1967 con 0,14 y en 1995 con 0,37 eventos por año en toda la región. Los valores más altos se observan al comienzo y hacia el fin de la serie ya que en el año 1964 se registraron en promedio en la región 2,83 eventos y en 2003, 2,62 eventos.

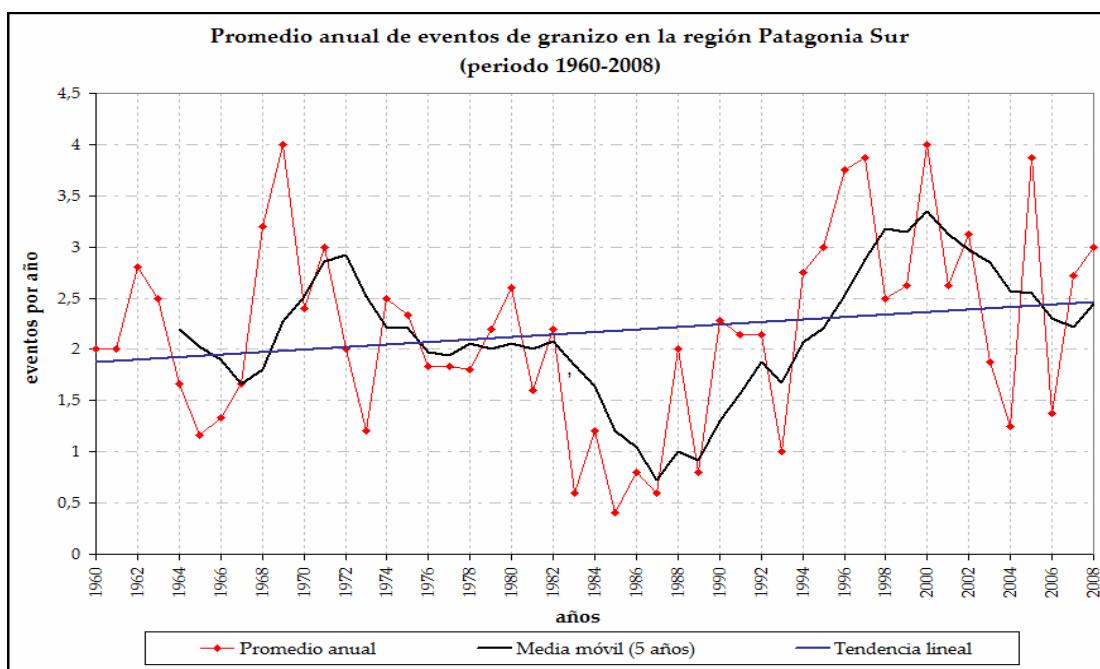


Fig. 46. Marcha anual de promedios de eventos de granizo en la región Patagonia Sur.

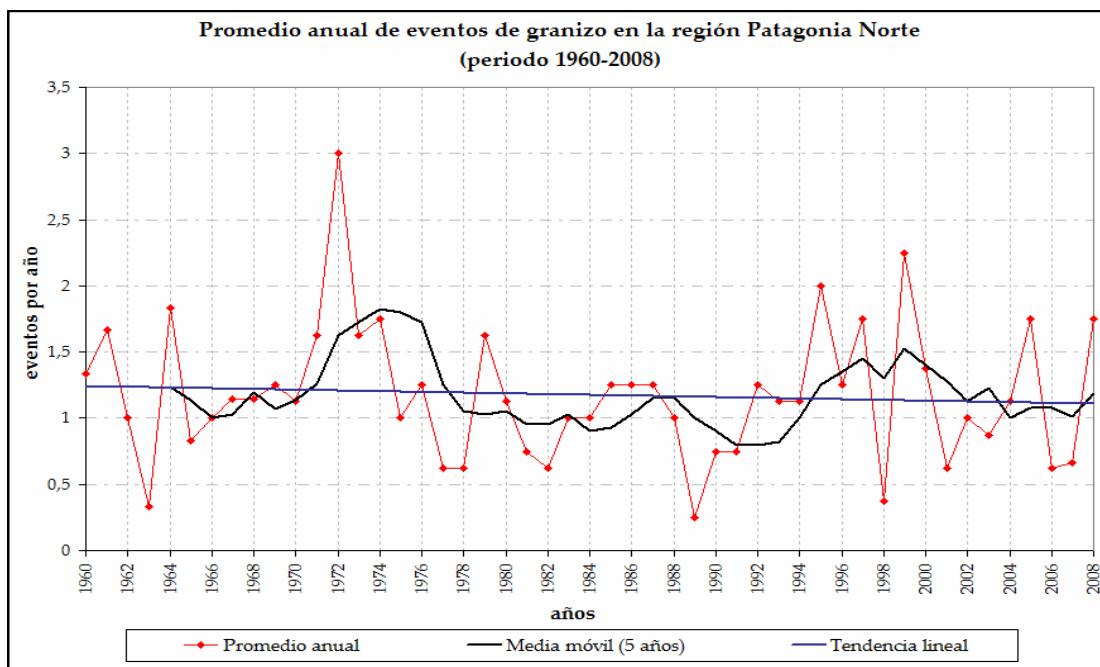


Fig. 47. Ídem figura 46, pero para la región Patagonia Norte.

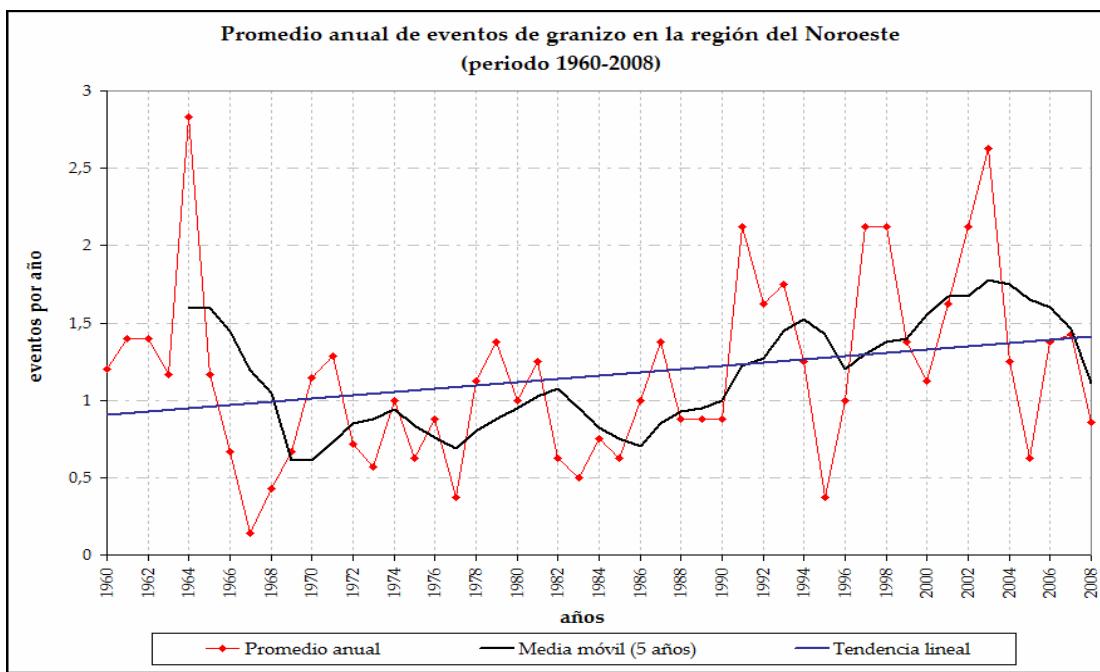


Fig. 48. Ídem figura 46, pero para la región Noroeste.

Al igual que en la región Noroeste, en el Noreste del país durante el período 1960-2008 (Fig. 49) la tendencia general lineal es positiva significativa al 90% con un mínimo en los promedios anuales en toda la región desde comienzos de los 80 hasta mediados de la misma década y un máximo desde mediados de los 90 hasta comienzos del 2000. El valor más bajo se observa en el año 1981 con 0,16 eventos en promedio en toda la región y los valores más altos se registraron en los años 1996 y 2002 con un promedio anual de eventos de 1,92.

La región de Cuyo (Fig. 50) durante el período 1960-2008 presenta una tendencia neutral (no significativa). Se observan 3 períodos de máxima ocurrencia de eventos, durante comienzo de la década del 60, fines de la del 70 y mediados de la década del 90; y 3 períodos de mínima ocurrencia a comienzos de la década del 70, fines de los 80 y los últimos años de la década del 2000. El valor más alto de los promedios anuales en la región se registró en 1963 con 3,73 eventos seguido por el promedio de 1997 con 2,67

eventos. Los valores más bajos se registraron en los años 1970 y 1982 con promedios anuales de 0,56 y 0,76 respectivamente.

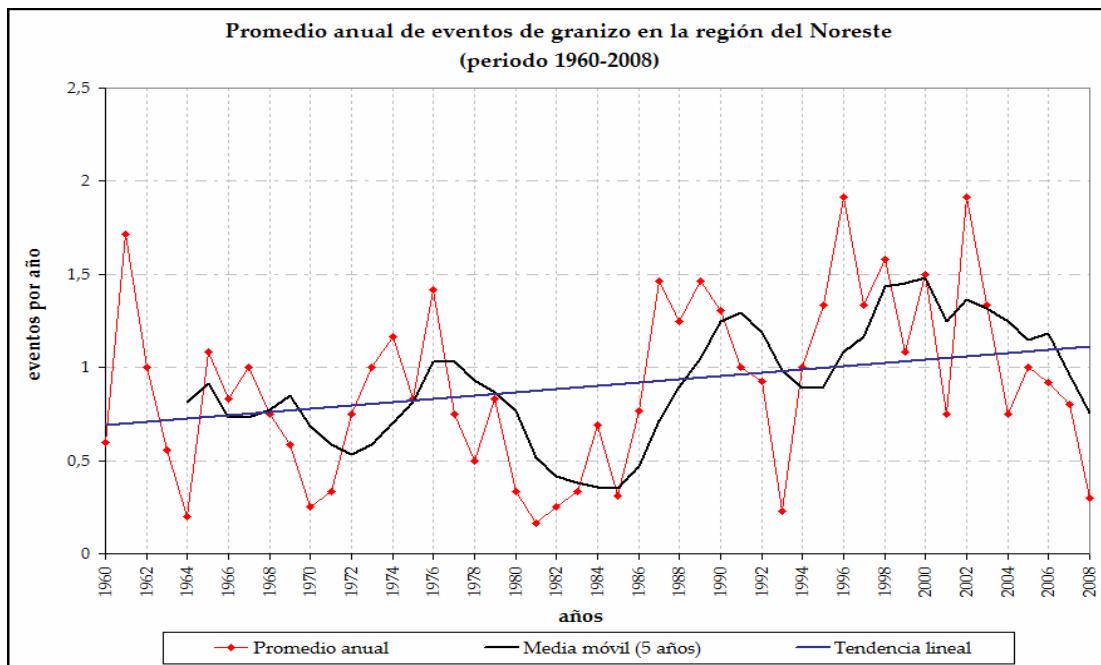


Fig. 49. Ídem figura 46, pero para la región Noreste.

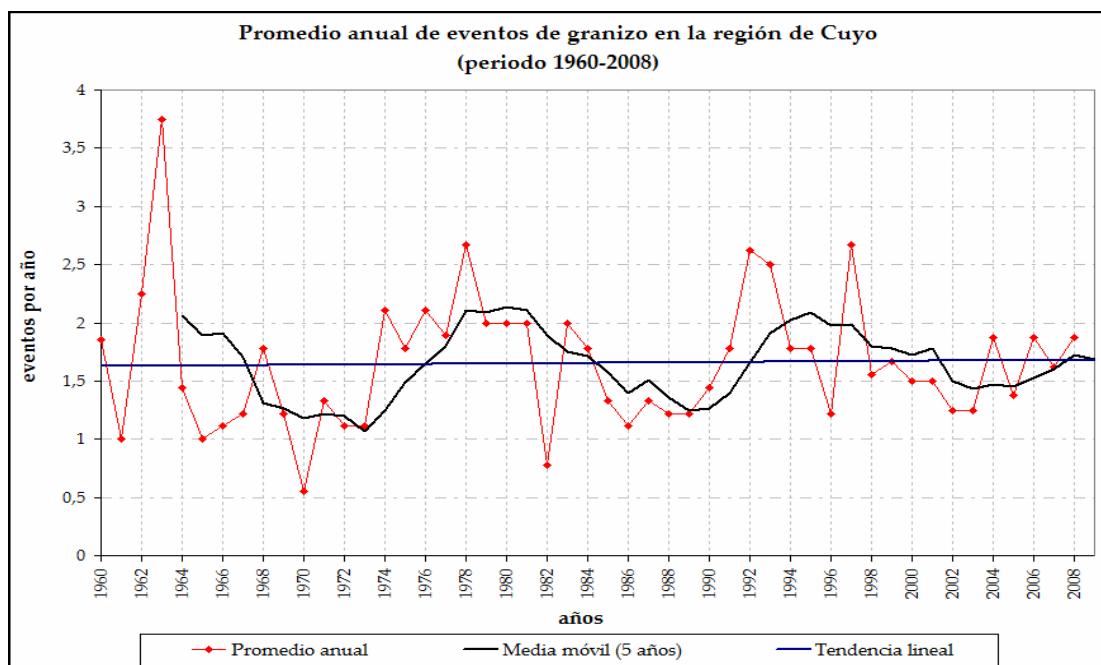


Fig. 50. Ídem figura 46, pero para la región de Cuyo.

En la provincia de Córdoba (Fig. 51) se analizó la tendencia para el período 1931-2008. La misma es negativa y significativa al 95% y presenta varias fluctuaciones en los promedios móviles de 5 años. Los valores más bajos se observan en los extremos de la serie dado que en 1933 se registraron en promedio en la provincia 0,33 eventos y en 2008, 0,77 eventos. El máximo en el promedio anual de eventos en la provincia se registró en el año 1951 con un valor de 5 eventos y en los últimos 20 años el valor más alto se registró en el año 2000 con un valor de 3,86 eventos. Al igual que en las otras regiones se observa un mínimo en la media anual de eventos a fines de la década del 80 y en particular en Córdoba los eventos disminuyen desde el 2000 hasta la actualidad. El período cuando se registraron los más altos valores en la media anual fue la década del 40.

En la región Sur de Buenos Aires (Fig. 52) se observa una clara tendencia negativa significativa al 95%. A fines de la década del 40 se registra un máximo en el promedio anual de eventos en la región y se registra un mínimo a fines de la década del 80. El promedio anual más alto se observó en 1932 con 4,5 eventos seguido por 3,45 en el año 1951. En los últimos 20 años el valor más alto se observó en el año 1997 con 2,27 eventos y el valor más bajo fue de 0,45 en 1998 aunque se registraron entre 1991 y 1993 3 años seguidos con tan solo 0,60 eventos por año en promedio en la región.

Muy similar al Sur de Buenos Aires es lo que ocurre en la zona comprendida por el Norte de Buenos Aires, Centro y Sur de Santa Fe y Entre Ríos (Fig. 53). Nuevamente se observa una marcada tendencia negativa significativa al 95%. Se observa un mínimo de eventos en promedio hacia fines de la década del 80 y los valores más altos se observan a comienzos de los años 40 y comienzos de la década del 50. Desde comienzos de los 90 hacia el 2000 los eventos van en aumento en la región y en los últimos 8 años van en disminución. El valor más bajo se registró en 1956 con un promedio de eventos de 0,44 seguido por 0,47 en 2004. El valor más alto se registró en 1945 con 3 eventos en promedio en la región. Además se observa un cambio en la media anual antes y después

de la década del 60 ya que antes de 1960 el promedio de eventos por año en toda la región era de 1,99 y después de ese año hasta 2008 la media anual disminuyó a 1,33 eventos.

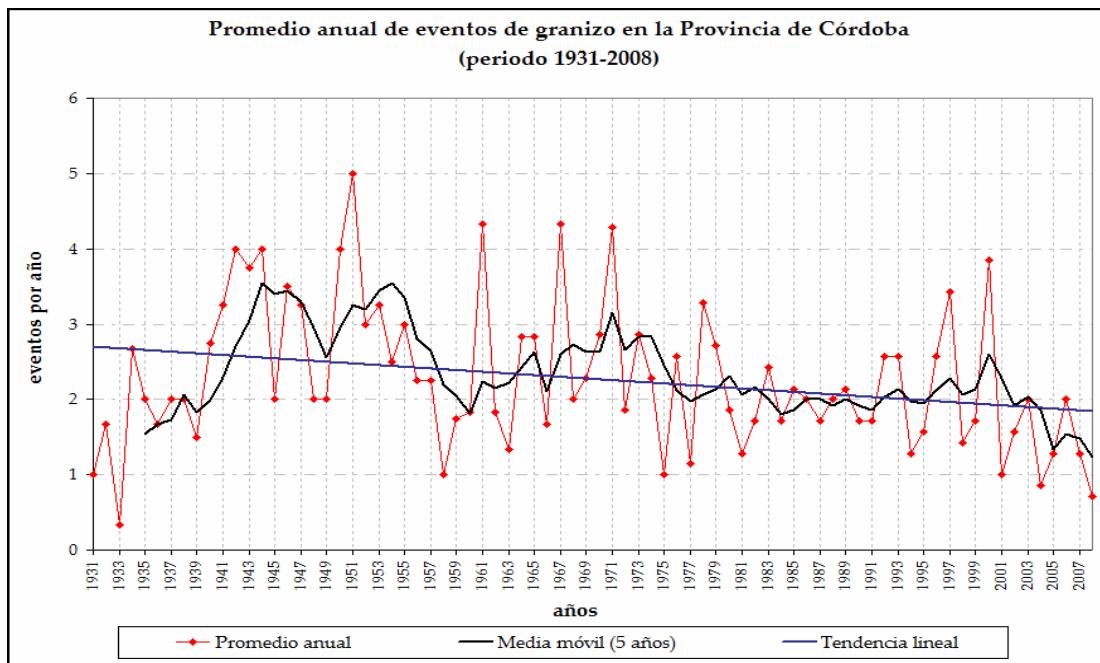


Fig. 51. Ídem figura 46, pero para la provincia de Córdoba.

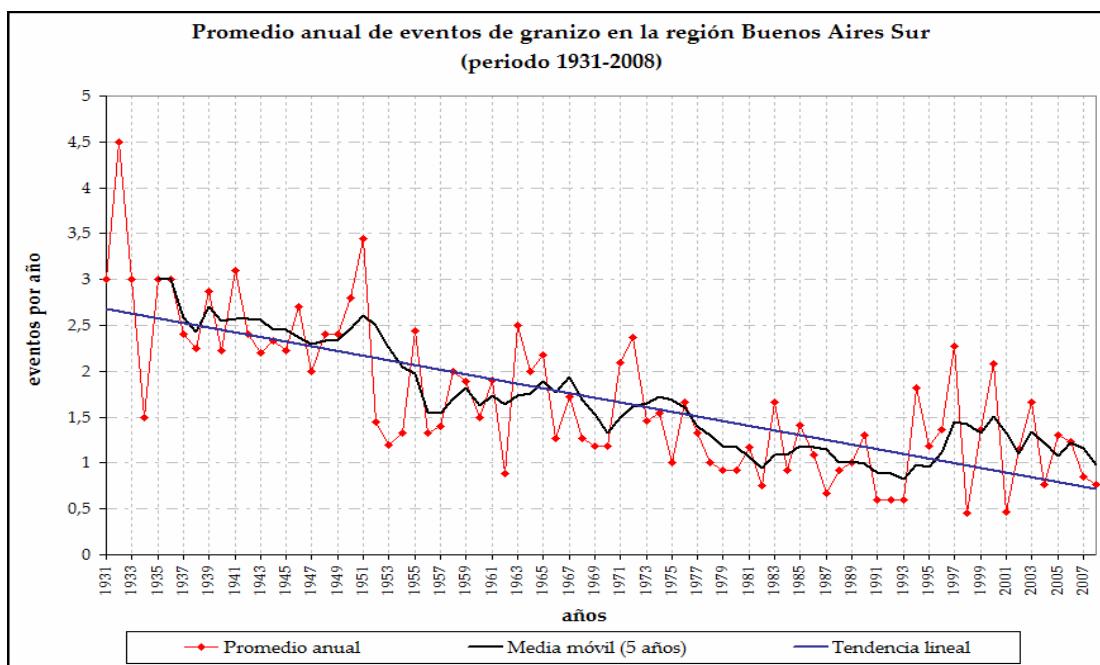


Fig. 52. Ídem figura 46, pero para la región Buenos Aires Sur.

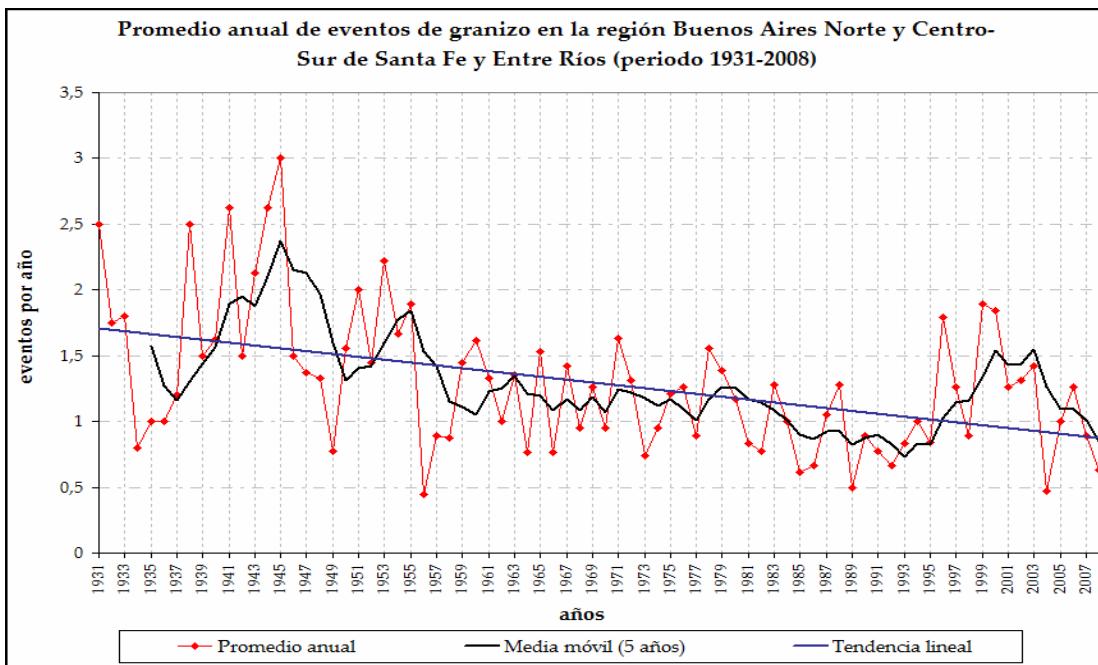


Fig. 53. Ídem figura 46, pero para la región comprendida por Buenos Aires Norte, Centro y Sur de Santa Fe y Entre Ríos.

Se encontró que en la mayor parte de las regiones hay una disminución considerable a fines de los años 80 y principios del 90 y salvo en la región de Cuyo y el Norte de la Patagonia, también los eventos de granizo diminuyen desde el año 2000. En la región comprendida por las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Santa Fe, Entre Ríos y Córdoba la mayor cantidad de eventos se observó antes de la década del 60. A su vez, los promedios móviles centrados en 5 años mostraron que hay una clara variabilidad decadental particularmente sobre el Centro y Norte del país.

Se muestra en la figura 54 la marcha anual de la altura de la isoterma de 0°C en la estación Ezeiza. Al igual que lo estudiado en China por Zhang y otros (2008), la altura de la isoterma de 0°C en Ezeiza aumenta durante el período 1980-2008, aunque según el test de Mann Kendall la tendencia es no significativa. Este incremento de la altura puede provocar disminución en los eventos de granizo porque desfavorece la formación del

mismo aunque debido a que el aumento es no significativo y además es de tan solo 70mts, no se puede afirmar que esta relación sea cierta en el caso de la región Pampeana.

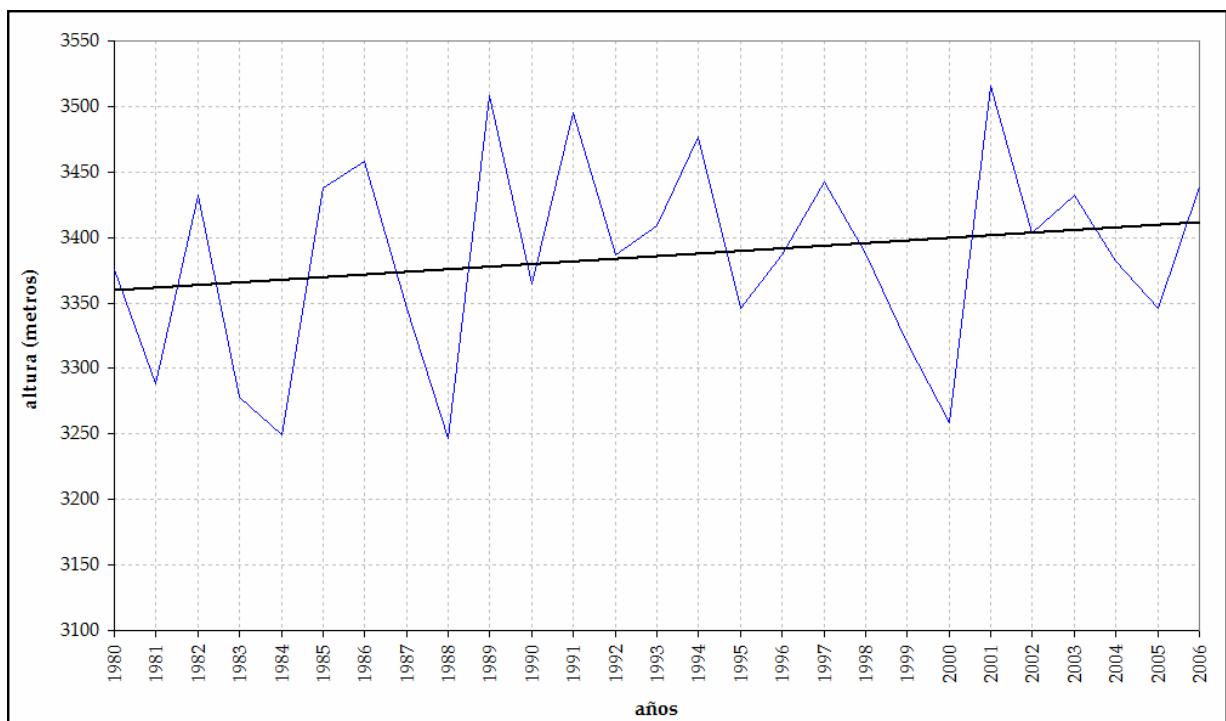


Fig. 54. Altura de la isoterma de 0°C en Ezeiza (período 1980-2006).

## **Capítulo 6. Circulación atmosférica asociada a la ocurrencia de eventos de granizo**

Para las 51 fechas en las que se registraron eventos de granizo en más de dos estaciones meteorológicas en la región Pampeana se analizó la circulación atmosférica asociada a la ocurrencia de granizo durante las estaciones cálidas (desde Septiembre hasta Febrero) del período comprendido por los años 1980-2006.

En las figuras 55 y 56 se muestran las anomalías de las alturas geopotenciales de 1000 y 500 hPa respectivamente. Es claro el patrón que se observa, una región de anomalías negativas en 500 hPa. asociadas a una amplia zona de bajas presiones en 1000 hPa. Es decir, cuando se registran episodios de granizo en 2 o más estaciones se observa una vaguada intensa con centro sobre las costas de Chile extendiéndose hacia la Patagonia Argentina en donde se observan anomalías de altura geopotencial de 500hPa. de hasta 100mgp. En superficie se observan dos regiones o centros de anomalías negativas; uno de 40mgp sobre el Centro-Norte de Argentina y otro de 30mgp sobre la Costa de Chile. El primero puede estar asociado a la presencia de un frente cálido en superficie o a la Baja del Noroeste Argentino. Sobre Chile el núcleo de anomalías negativas puede ser asociado con el avance de un frente frío en la región junto a la vaguada en altura que se observa en el nivel superior de 500hPa.

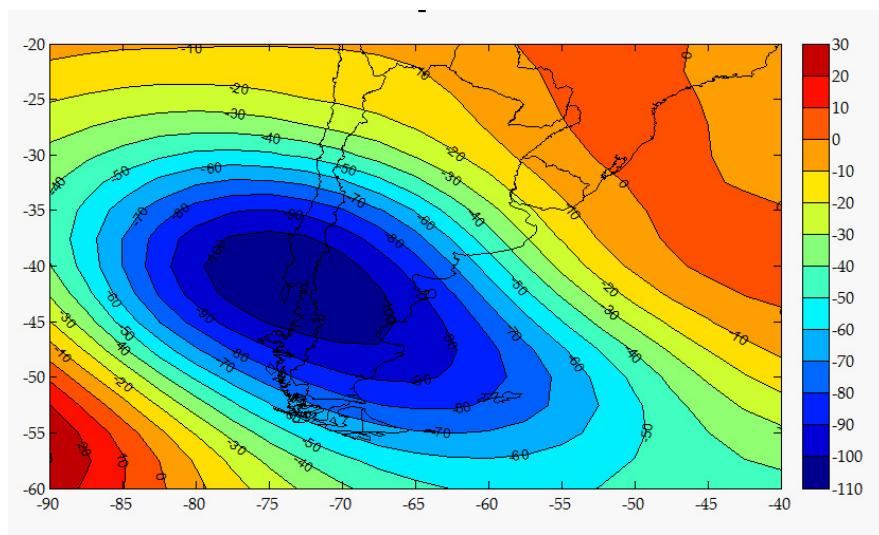


Fig. 55. Anomalía de altura geopotencial de 500 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

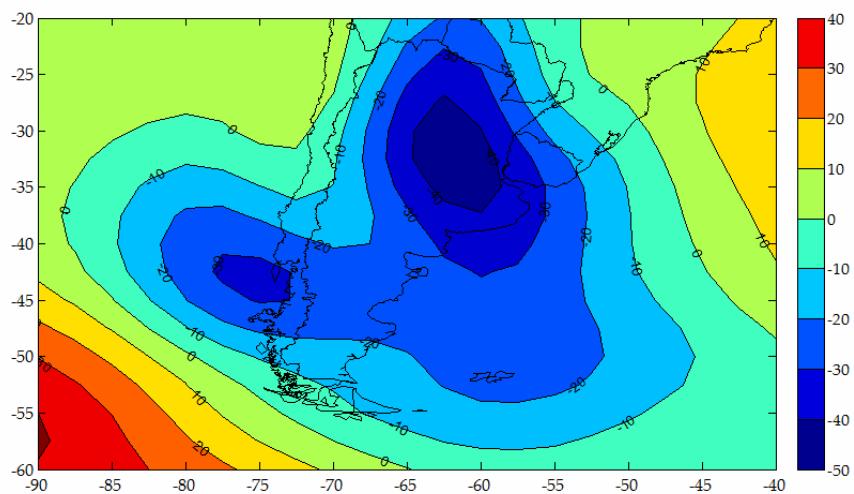


Fig. 56. Ídem figura 55, pero para el nivel de 1000hPa.

Este patrón favorable para que se registre granizo en superficie está acompañado también por la presencia de una masa de aire cálido. El campo medio de espesores 1000/500 hPa. se presenta en la figura 57 y el de anomalías en la figura 58.

Aproximadamente desde Entre Ríos y Córdoba hacia el Norte los espesores medios durante eventos de granizo son mayores a los 5700mgp y se observan sobre Paraguay valores mayores a 5800mgp. En la composición de las anomalías cuando se registran eventos de granizo se observa claramente un dipolo donde las anomalías negativas se ubican desde La Pampa hacia el Sur con un valor máximo de -80mgp sobre la costa de Chile mientras que las anomalías positivas tienen un máximo de 20mgp sobre el Noreste de Argentina. Cao (2008) realizó las anomalías entre los diez años con más eventos de granizo y los diez años con menos eventos en Ontario, Canadá y encontró anomalías entre 1 y 12mgp en los espesores 1000/500 hPa. confirmando que los años de mayor ocurrencia de eventos de granizo están asociadas con un ambiente más cálido y espesores más altos.

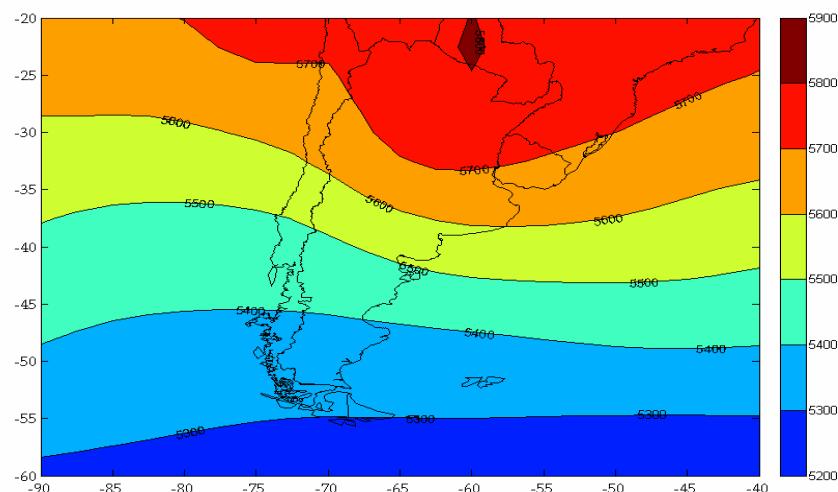


Fig. 57. Espesor medio 1000/500 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

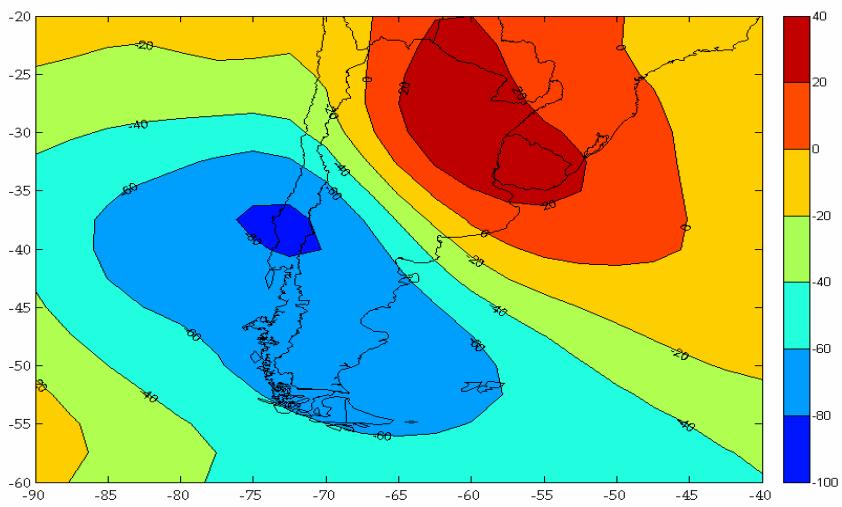


Fig. 58. Anomalía del espesor 1000/500 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

La cortante vertical del viento es un elemento fundamental para la formación de tormentas intensas capaces de producir granizo en superficie (Browning 1978). Por este motivo se calcularon los campos medios y de anomalías de viento zonal en 250hPa. y de viento meridional en 925hPa. En las figuras 59 y 60 se muestran los campos medios de viento zonal en 250hPa. y meridional en 925hPa. respectivamente. Se observa que sobre el centro de Argentina se ubica el jet de altura en 250hPa. con un máximo de 34m/s en promedio en los 51 casos con granizo que se analizaron, mientras que en niveles inferiores se observa el jet de capas bajas con un máximo en promedio de 8m/s ubicado sobre Paraguay. Las anomalías de viento zonal y meridional se observan en las figuras 61 y 62 y las mismas muestran que en los casos de eventos de granizo se registra una anomalía positiva de viento zonal, o sea un aumento de los vientos del Oeste en altura indicando como se observaba en el campo medio la presencia del jet de altura en 250hPa. Este patrón está claramente asociado a la presencia de un frente frío que se había señalado en los campo de superficie. En los niveles superiores, en 925hPa, las anomalías durante eventos de granizo muestran una intensificación del viento del sector Norte

sobre el Este de Argentina, Sur de Brasil y Uruguay denotando de este modo la presencia del jet de capas bajas en la región. La convección severa se ve favorecida por la presencia del jet de capas bajas (Salio y otros 2002) y por la cortante que se genera por la aparición del jet de altura.

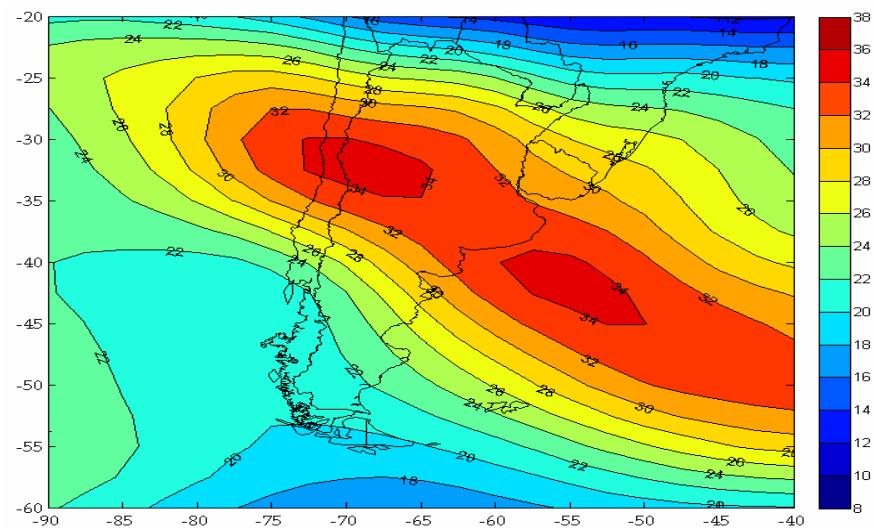


Fig. 59. Viento zonal medio en 250 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

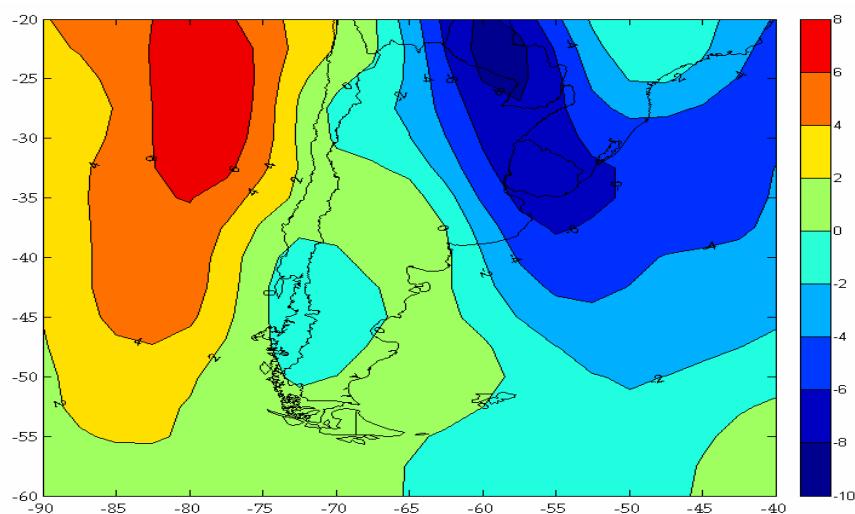


Fig. 60. Viento meridional medio en 925 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

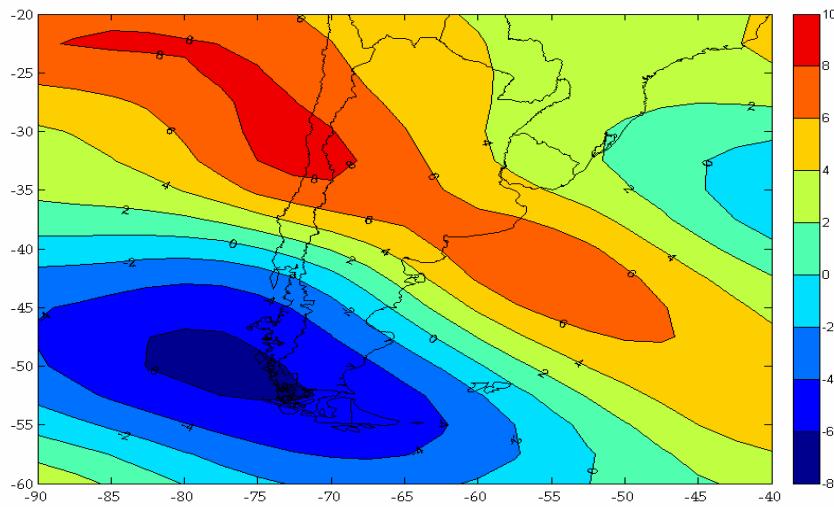


Fig. 61. Anomalía del viento zonal en 250 hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

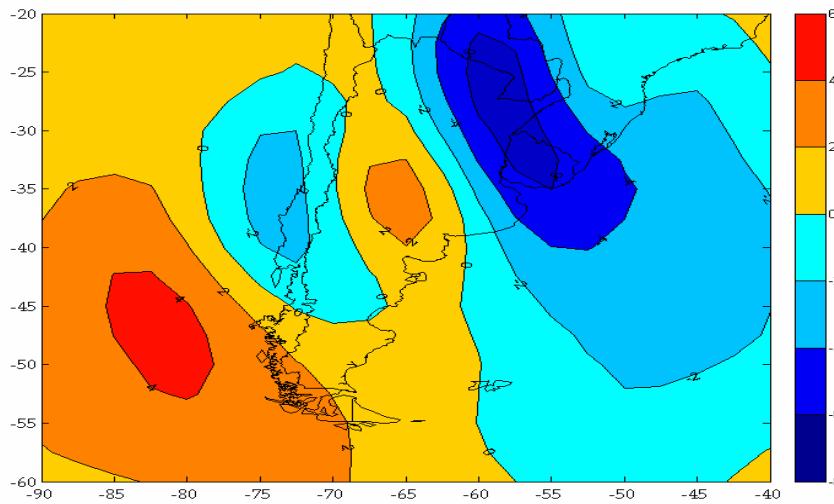


Fig. 62. Ídem figura 61, pero para el viento meridional en 925hPa.

Además se ha realizado un corte vertical latitudinal de las anomalías de temperaturas cuando se produce granizo en la región Pampeana (Fig. 63). Se observa un claro máximo de anomalías positivas desde Paraguay hasta el Norte de Santa Fe aproximadamente con un valor de  $2,5^{\circ}\text{C}$ , entre superficie y 900hPa, con centro en el

nivel 925hPa. Las anomalías positivas se extienden hacia el Sur hasta el Centro de la provincia de Buenos Aires y La Pampa, entre superficie y 600 hPa. En altura entre 350 y 200hPa se observa un núcleo de anomalías negativas de temperatura que alcanza los 1,5°C entre el Norte de Santa Fe y el Centro de Buenos Aires.

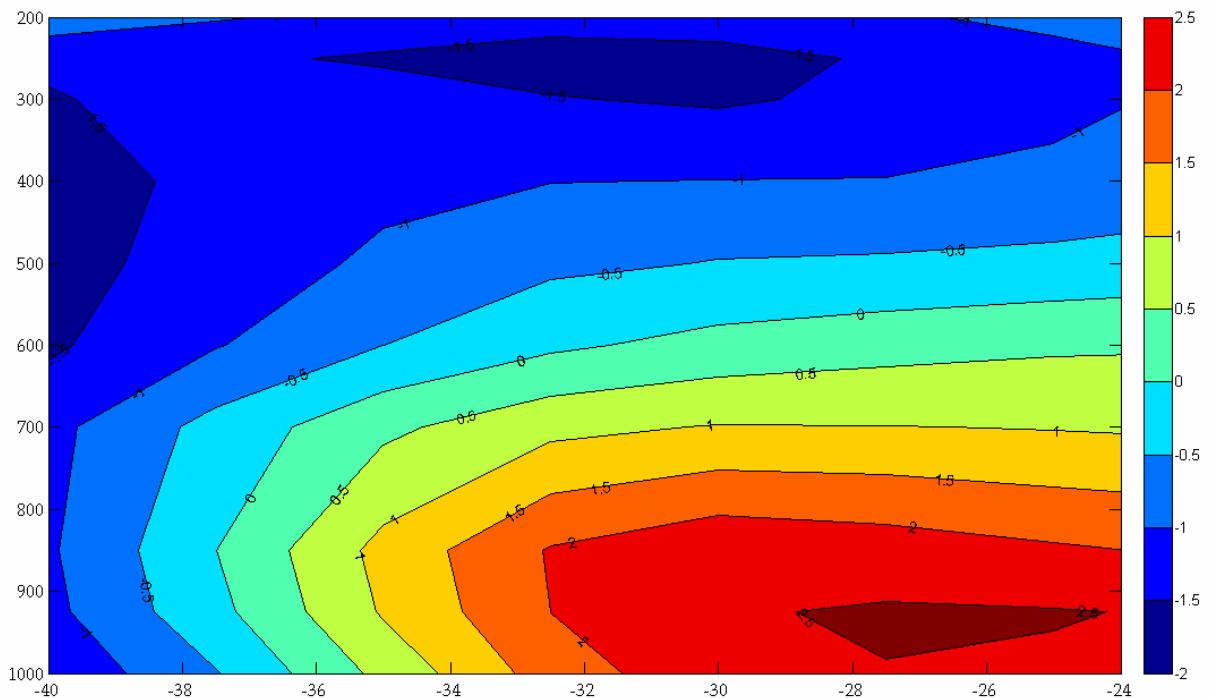


Fig. 63. Corte latitudinal de temperatura durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

El análisis del índice de temperatura definido en el capítulo 2 (Fig. 64) muestra que cuando se registran eventos de granizo sobre la región Pampeana se observa un calentamiento en el nivel de 925hPa. o un enfriamiento en el nivel de 250hPa. dado que se observa una anomalía positiva desde el Sur de Buenos Aires y La Pampa hacia el Norte con centro sobre la provincia de Chaco. Nuevamente al igual que se observaba en el corte latitudinal de la figura 63 indica que el calentamiento en niveles bajos en la

región Pampeana provoca inestabilidad necesaria para favorecer la ocurrencia de eventos de granizo en dicha región.

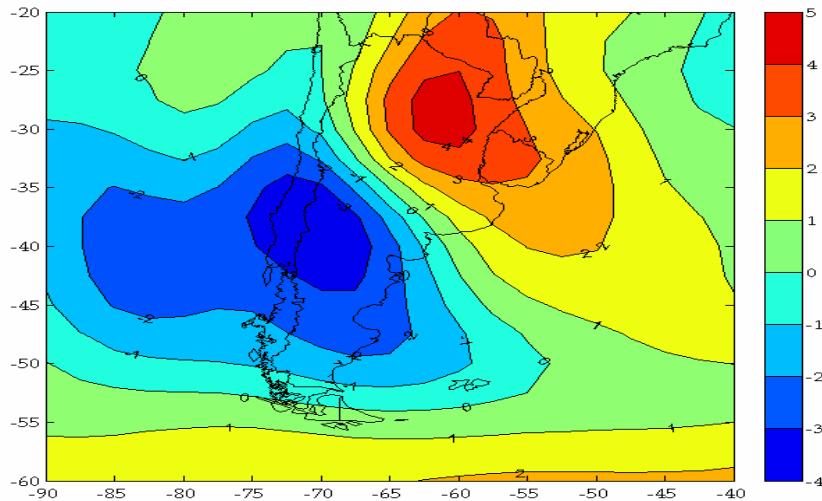


Fig. 64. Anomalía del índice de temperatura 925-250hPa. durante la ocurrencia de eventos de granizo en la región Pampeana.

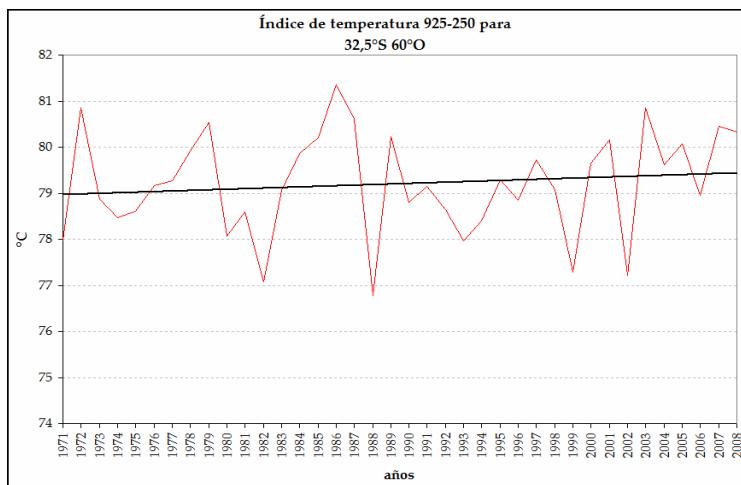


Fig. 65. Marcha anual del índice de temperatura 925-250hPa. en 32,5°S 60°O para el período 1971-2008, sólo considerando los meses desde Septiembre hasta Febrero.

Se realizó la marcha anual del índice (Fig. 65) sólo para los meses cálidos, es decir desde Septiembre hasta Febrero, para 32,5°S 60°O (sobre el Sur del Santa Fe) y se encontró que el mismo presenta una tendencia creciente no significativa. Esto estaría

indicando un aumento de la instabilidad lo que parece contrariar el criterio de que las tormentas de granizo se producen con valores altos del índice ya que según lo mencionado en el Capítulo 5 los eventos de granizo sobre Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba y Buenos Aires presentan una tendencia negativa.

El análisis de la circulación general cuando se producen eventos de granizo en la región Pampeana mostró que la presencia del jet de capas bajas es fundamental para el origen de tormentas de granizo sobre dicha región. Barros y otros (2008) estudiaron los modos de circulación asociados a precipitaciones en el Sudeste de Sudamérica en la parte estival del año y encontraron que en los últimos 40 años hay un movimiento hacia el Sur del sector Sudoeste del Anticiclón del Atlántico Sur. Esto resulta que el modo asociado al Jet de Capas Bajas presenta una tendencia en disminución mientras que el otro modo se incrementa. Por lo tanto la disminución del primer modo podría estar implicando que la región Pampeana sea menos favorable para la ocurrencia de eventos de granizo.

Por ende es necesario un mayor análisis para encontrar cual es el mecanismo que provoca la disminución o aumento de eventos de granizo en Argentina.

## Conclusiones

Se realizó una completa climatología de ocurrencia de eventos de granizo en Argentina. Para ello, se armó una base de datos recopilando información de diversas fuentes abarcando períodos, en algunas estaciones meteorológicas, de más de 70 años de datos.

Se estudiaron los métodos de interpolación Inversa de la Distancia y Ordinary Kriging y se encontró que dado el escaso número de estaciones con distribución irregular y el ruido de la aleatoriedad del fenómeno del granizo, IDW estaría representando mejor la variabilidad puntual que presenta este tipo de variable. Y con el fin de estudiar de forma correcta la variabilidad regional el método Kriging es el más acertado en ese caso.

La distribución espacial de eventos de granizo en Argentina está ligada principalmente a la orografía con máximos al Este de las sierras cordobesas y en la cordillera de Mendoza. El ingreso de masas de aire frío produce nubosidad de tipo celular que provoca chaparrones de granizo en la zona costera de la Patagonia aumentando la cantidad de eventos en dicha región. Estos casos al igual que numerosos eventos de Invierno es posible que se relacionen con granizo pequeño o graupel.

Los eventos disminuyen hacia el Noreste del país posiblemente por una atmósfera más homogénea térmicamente y por la presencia de masas de aire de origen tropical. En la provincia de Buenos Aires se observa la mayor variabilidad espacial. Los máximos se registran en el Sur y en el Oeste y los valores más bajos se observan en el Centro.

Los datos obtenidos a partir de las planillas de granizo mostraron que los fenómenos que se registran en Buenos Aires y La Pampa son menos intensos que en Córdoba. Los tamaños de granizo son mayores en Córdoba alcanzando frecuentemente los 3cm o más (en un 19% de los casos contra 6% en Buenos Aires y La Pampa) y la duración del evento también es mayor con tormentas de granizo de más de 10 minutos

(en un 36% de los casos). Estos factores hacen que la conservación del granizo en superficie sea más prolongada donde en algunos casos de la provincia de Córdoba el granizo ha permanecido en el suelo durante 5 horas.

El análisis de las tendencias regionales mostró que en el Norte del país los eventos están aumentando mientras que en el Centro del país, salvo en la región de Cuyo donde no se observan cambios, la tendencia es negativa. En la región Patagónica se observa que en el Norte no hay tendencias significativas mientras que en el Sur los eventos de granizo se están incrementando desde los años 60. Se encontró que en la mayor parte de las regiones hay una disminución considerable a fines de los años 80 y principios del 90 y salvo en la región de Cuyo y el Norte de la Patagonia, también los eventos de granizo diminuyen desde el año 2000. En la región comprendida por las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Santa Fe, Entre Ríos y Córdoba la mayor cantidad de eventos de observó antes de la década del 60.

Según el análisis realizado sobre la región Pampeana, las condiciones favorables para la ocurrencia de eventos de granizo es la presencia de una vaguada sobre las costas de Chile. Asociado a este sistema en altura, se observa un frente frío en superficie sobre la Patagonia, como así también un frente cálido sobre la región Pampeana o la Baja del Noroeste Argentino. En la región donde se registran los eventos de granizo se observa una masa de aire cálida que surge del análisis del espesor 1000/500hPa.

Se observa que la cortante vertical del viento es significativa con la presencia sobre el centro del país tanto del jet de capas bajas en el nivel de 925hPa. como del jet de altura en 250hPa. Se encontró que cuando se producen eventos de granizo en la región, el jet en 250hPa es intenso con anomalías que superan los 30km/h mientras que en niveles bajos, el Jet de Capas Bajas también presenta anomalías positivas y se extiende desde Paraguay, hacia el Noreste de Argentina y Uruguay.

El análisis de las temperaturas en la vertical mostró que existe un dipolo de anomalías positivo y negativo entre los niveles bajos y altos. Se observó un centro de

anomalías positivas desde el Sur de Buenos Aires hasta Paraguay entre superficie y los 600hPa con un máximo sobre 925hPa. Se analizó un índice de temperatura definido por los valores de temperatura en 250 y 925hPa., el cual mostró que cuando se registran eventos de granizo sobre la región Pampeana hay un calentamiento en niveles bajos y un enfriamiento en los niveles superiores.

Hace falta un mayor análisis para comprender cuál es el motivo de la disminución de los eventos sobre gran parte de las estaciones de la región Pampeana. El aumento de la altura de la isoterma de 0°C en Ezeiza podría ser un indicador de esta reducción al igual que la disminución del modo de Jet de Capas Bajas planteado en Barros y otros (2008) aunque es necesario encontrar otras relaciones como así también extender el análisis en las regiones donde se observan incrementos en la cantidad de eventos de granizo por año.

## Referencias

- Barros, V., M. Doyle y I. Camilloni, 2008. Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theor. Appl. Climatol.*, **93**, 19-33.
- Browning K., 1978. The Structure and Mechanisms of Hailstorms. *American Meteorological Society Monograph*, **38**, 1-39.
- Cao Z., 2008. Severe hail frequency over Ontario, Canada: Recent trend and variability. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L14803, doi:10.1029/2008GL034888.
- Changnon S., 1971. Hailfall Characteristics Related to Crop Damage. *J. Applied Met.*, **10**, 270-274
- Changnon S. y J. Ivens, 1981. History Repetead. The Forgotten Cannons of Europe. *Bull. Amet. Soc.* **62**. N°3. 368-375.
- Changnon S.; 1999. Data and Approaches for Determining Hail Risk in the Contiguos United States. *J. Applied Met.*, **38**, 1730-1739.
- Changnon S. y Chagnon D., 2000. Long-Term Fluctuations in Hail Incidences in the United States. *J. Climate*, **13**, 658-664.
- Davis, J., 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons. pp 254.
- Fraile. R, J. L. Sánchez, J. L. de la Madrid, A. Castro y J. L. Marcos, 1999. Some Results from the Hailpad Network in Leon (Spain): Noteworthy Correlations among Hailfall Parameters. *Theor. Appl. Climatol.* **64**, 105-117.
- Etkin D. y S. Brun, 2001. Canada's Hail Climatology: 1977-1993. Institute for Catastrophic Loss Reduction (ICLR) Research. Paper Series N°14
- ESRI. ArcGIS 9.2, 2007. [www.esri.com](http://www.esri.com)
- Estadísticas Climatológicas 1961-1970, 1981. Serie B, N°35, Buenos Aires.
- Flora S., 1928. The Widespread Menace of Hail. *Mon. Wea Rev.*, **56**, Issue 1. pp. 17-17 .
- Giaiotti D, S. Nordio y F. Stel, 2003. The Climatology of hail in the plain of Friuli Venezia Giulia. *Atmos. Res.* **67-68**, 247-259.

Herrera, R., 2000. Distribución espacial del granizo en el norte de la provincia de Mendoza, Argentina. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona [ISSN 1138-9788]. N° 71.

Hoffmann, J., J. Nuñez, E. Piacentini y M. Spreafichi. De las variaciones temporales de las granizadas y tormentas eléctricas en la Argentina. Enviado a Meteorológica, sin publicar.

Isaaks, E. y Srivastava R., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, Oxford pp 257.

Kalnay y otros, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-470.

Köppen, W., 1923. Die Klimate der Erde. Walter de Gruyter, Berlin.

Lassig J. Precipitaciones de granizo en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén, su influencia en la fruticultura regional. Buenos Aires, 2006, 172 p. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Makitov, V., 1999. Organization and Mail Results of the Hail Suppression Program in the Northern Area of the Province of Mendoza, Argentina. *J. Weather Mod.*, **31**, 76-86.

Marcelino, I., M. Mendonca y F. Rudorff, 2004. Ocorrências de granizo no estado de Santa Catarina. *Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais*, 1. Florianópolis. P. 795-805

Perez R. y E. Puliafito, 2006. Study of hailstorms cells producing big damages in Mendoza (Argentina). *4<sup>th</sup> European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2006)*. Barcelona, Spain. 18-22 Sept. 2006.

Re M. y V. Barros, 2009. Extreme rainfalls in South America. *Climatic Change*. En prensa.

Rusticucci M. y B. Tencer, 2008. Observed changes in return values of annual temperature extremes over Argentina. *J. Clim.*, **21**, 5455-5467.

Salio, P., M. Nicolini y A.C. Saulo. Chaco Low-Level Jet Events Characterization During the Austral Summer Season by ERA Reanalysis, 2002. *J. Geophys. Res.* **107**, Doi: 10.1029 / 2001JD001315

Saluzzi M. y J. M. Nuñez, 1975. Comportamiento de granizadas sobre diversas áreas cultivadas del país. *Geoacta*, **7**, n. 2, 77-90.

Saluzzi M. y J. M. Nuñez, 1983. The Behaviour of seeded Convective Clouds: an análisis.

Schaefer J, J.J. Levit, S. Weiss y D. McCarthy, 2004. The frequency of Large Hail over the Contiguous United States. *14th Conference on Applied Climatology. The 84th AMS Annual Meeting*. Seattle, WA.

Tuovinen J., J Teittinen, A. Punkka y H. Hohti, 2007. A Climatology of Large Hail in Finland. *4<sup>th</sup> European Conference on Severe Storms (ECSS 2007)*. Trieste, Italy. 10-14 Sept. 2007.

Tuovinen J., A. Punkka, J. Rauhala, H. Hohti y D. Schultz, 2009. Climatology of Severe Hail in Finland: 1930-2006. *Mon. Wea. Rev.* **137**, 2238-2249.

Vinet, F., 2001. Climatology of hail in France. *Atmos. Res.*, **56**, 309-323.

Xie B., Q. Zhang y Y. Wang. Trends in hail in China during 1960-2005. *Geophys. Res. Lett.* **35** L13801., doi:10.1029/2008GL034067.

Zhang C., Q. Zhang y Y. Wang, 2008. Climatology of Hail in China: 1961-2005. *J. Applied Met. And Clim.* **47**, 795-804.

## Anexo

Tabla 1. Listado de estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio de granizo en Argentina

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	ALTURA (m)	PERIODO	
				COMIENZO	FIN
RIO CUARTO AERO	-33,12	-64,23	421	1908	2008
PERGAMINO INTA	-33,93	-60,55	65	1912	2007
TRES ARROYOS	-38,38	-60,27	108	1920	2008
SALTA AERO	-24,85	-65,48	1221	1928	2008
BELLA VISTA INTA	-28,43	-58,92	120	1928	2007
PILAR OBS.	-31,67	-63,88	338	1929	2008
CERES AERO	-29,88	-61,95	88	1931	2008
MAR DEL PLATA	-37,93	-57,58	24	1931	2008
SAN LUIS AERO	-33,27	-66,35	713	1931	2008
VILLA MARIA DEL RIO SECO	-29,90	-63,68	341	1931	2008
MONTE CASEROS	-30,27	-57,65	54	1931	2007
PARANA AERO	-31,78	-60,48	78	1931	2007
VILLA DOLORES	-31,95	-65,13	569	1931	2007
NUEVE DE JULIO	-35,45	-60,88	76	1931	2005
DOLORES AERO	-36,35	-57,73	9	1933	2008
GUALEGUAYCHU AERO	-33,00	-58,62	49	1933	2007
AZUL AERO	-36,75	-59,83	132	1934	2008
CORONEL SUAREZ AERO	-37,43	-61,88	233	1936	2007
JUNIN	-34,58	-60,93	80	1938	2008
SANTIAGO DEL ESTERO AERO	-27,77	-64,30	199	1938	2008
SAN MIGUEL	-34,55	-58,73	26	1938	2006
BAHIA BLANCA AERO	-38,73	-62,17	83	1939	2008
BUENOS AIRES	-34,58	-58,48	25	1939	2008
ROQUE SAENZ PEÑA AERO	-26,82	-60,45	92	1939	2008
LABOULAYE AERO	-34,13	-63,37	137	1939	2007
ROSARIO AERO	-32,92	-60,78	25	1939	2007
SANTA ROSA AERO	-36,57	-64,27	191	1939	2007
TRENQUE LAUQUEN	-35,97	-62,73	95	1939	2006
TANDIL AERO	-37,23	-59,25	175	1940	2008
BOLIVAR	-36,25	-61,10	93	1940	1997
PEHUATO AERO	-35,87	-61,90	87	1948	2008
MENDOZA OBS.	-32,88	-68,85	827	1951	2008
SAN RAFAEL AERO	-34,58	-68,40	748	1951	2007
MENDOZA AERO	-32,83	-68,78	704	1951	2006
SAN MARTIN (MZA)	-33,08	-68,42	653	1951	2006

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	ALTURA (m)	PERIODO	
				COMIENZO	FIN
AEROPARQUE BUENOS AIRES	-34,57	-58,42	6	1960	2008
COMODORO RIVADAVIA AERO	-45,78	-67,50	46	1960	2008
CORDOBA OBS.	-31,40	-64,18	425	1960	2008
EL PALOMAR AERO	-34,60	-58,60	12	1960	2008
EZEIZA AERO	-34,82	-58,53	20	1960	2008
LA QUIACA OBS.	-22,10	-65,60	3459	1960	2008
MALARGUE AERO	-35,50	-69,58	1425	1960	2008
NEUQUEN AERO	-38,95	-68,13	271	1960	2008
PIGUE	-37,36	-62,23	304	1960	2008
PUERTO DESEADO AERO	-47,73	-65,92	80	1960	2008
RIO GALLEGOS AERO	-51,62	-69,28	19	1960	2008
SAN ANTONIO OESTE AERO	-40,73	-64,95	7	1960	2008
SAN JUAN AERO	-31,60	-68,55	630	1960	2008
USHUAIA AERO	-54,80	-68,32	14	1960	2008
GOBERNADOR GREGORES	-48,78	-70,17	358	1960	2007
LA RIOJA	-29,38	-66,82	1600	1960	2007
CORDOBA AERO	-31,32	-64,22	474	1960	2006
ORAN AERO	-23,15	-64,32	357	1960	2006
POSADAS AERO	-27,37	-55,97	125	1960	2006
TRELEW AERO	-43,20	-65,27	43	1960	2006
TUCUMAN AERO	-26,85	-65,10	450	1960	2006
LAGO ARGENTINO	-50,33	-72,30	220	1960	1970
MARCOS JUAREZ AERO	-32,70	-62,15	114	1961	2008
PASO DE LOS LIBRES	-29,68	-57,15	70	1961	2008
RECONQUISTA AERO	-29,18	-59,70	53	1961	2008
ESQUEL AERO	-42,93	-71,15	797	1961	2006
OBERA	-27,48	-55,13	343	1961	2006
RIO GRANDE	-53,80	-67,75	22	1961	2006
SAUCE VIEJO	-31,70	-60,82	18	1961	2006
JACHAL	-30,25	-68,75	1175	1961	1996
LA PLATA AERO	-34,97	-57,93	23	1962	2008
BARILOCHE AERO	-41,15	-71,17	840	1962	2006
SAN CARLOS (MZA)	-33,77	-69,03	940	1962	2006
OLIVEROS INTA	-32,55	-60,85	26	1962	1999
GENERAL PAZ	-27,75	-57,63	74	1962	1994
SAN JULIAN AERO	-49,32	-67,75	62	1963	2008

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	ALTURA (m)	PERIODO	
				COMIENZO	FIN
FORMOSA AERO	-26,20	-58,23	60	1963	2007
CHAMICAL	-30,37	-66,28	461	1963	2006
TINOGASTA	-28,07	-67,57	1201	1963	1999
CORRIENTES AERO	-27,45	-58,77	62	1964	2006
IGUAZU AERO	-25,73	-54,47	270	1965	2008
CONCORDIA	-31,30	-58,02	38	1965	2006
RESISTENCIA AERO	-27,45	-59,05	52	1965	2006
JUJUY AERO	-24,38	-65,08	905	1967	2008
SAN PEDRO	-33,68	-59,68	-	1967	2008
VIEDMA AERO	-40,85	-63,02	7	1967	2008
PASO DE INDIOS	-43,82	-68,88	460	1968	2006
FAMAILLA	-27,01	-65,42	363	1969	2008
LAS LOMITAS	-24,70	-60,58	130	1969	2006
MARCOS JUAREZ INTA	-32,68	-62,15	110	1969	2006
LAS FLORES	-36,03	-59,10	36	1974	2006
CATAMARCA	-28,60	-65,77	1700	1975	2008
BERNARDO DE IRIGOYEN AERO	-26,25	-53,65	815	1984	2007
PERITO MORENO	-46,60	-70,93	429	1990	2007
TOLHUIN	-54,70	-67,25	105	1990	2006
CORONEL PRINGLES	-37,98	-61,38	-	1994	2008
PUNTA INDIO B.A.	-35,37	-57,28	22	1994	2006
TARTAGAL AERO	-22,65	-63,82	450	1994	2005

Tabla 2. Registros agregados a la base de datos provenientes de las planillas de granizo (periodo 1977-2006).

Estación Meteorológica	Cantidad de registros	Estación Meteorológica	Cantidad de registros
Aeroparque	11	Observatorio Central	4
Azul	5	Oliveros	4
Bahía Blanca	7	Paraná	3
Bella Vista	3	Paso de Indios	1
Bernardo de Irigoyen	4	Paso de los libres	2
Bolívar	3	Pehuajo	2
Ceres	4	Pergamino	32
Chamical	3	Pilar Obs.	9
Comodoro Rivadavia	4	Posadas	3
Concordia	2	Puerto Deseado	1
Córdoba Aero	6	Reconquista	2
Córdoba Obs.	5	Resistencia	3
Corrientes	4	Río Cuarto	13
El Palomar	4	Río Gallegos	13
Ezeiza	2	Rosario	1
Formosa	1	Salta	3
General Paz	2	San Antonio Oeste	7
Gobernador Gregores	13	San Carlos	6
Gualeguaychu	1	San Juan	2
Iguazú	3	San Julián	2
Jachal	1	San Luis	2
Jujuy	3	San Martín	5
Junín	4	San Miguel	7
La Plata	4	San Rafael	19
La Quiaca	4	Sauce Viejo	2
La Rioja	2	Tandil	2
Las Flores	11	Tinogasta	4
Malargüe	5	Tolhuin	2
Mar del Plata	2	Trelew	2
Marcos Juárez	2	Trenque Lauquen	5
Marcos Juárez INTA	7	Tres Arroyos	9
Mendoza Aero	9	Tucumán	1
Mendoza Obs.	4	Viedma	3
Monte Caseros	3	Villa Dolores	4
Neuquén	2	Villa María del Río Seco	9
Nueve de Julio	5		
Oberá	8		