

“ENFOQUE CIENTÍFICO DEL RIESGO – EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE TORNADOS EN ARGENTINA”

*Trabajo ganador del Premio Academia Nacional de Ciencias de
Buenos Aires 2015, acto que se llevó a cabo en la
Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires,
6 de diciembre de 2017*



**Anticipo de
ANALES DE LA ACADEMIA NACIONAL
DE CIENCIAS DE BUENOS AIRES**
Buenos Aires - Año 2017

Balbi, Mariano

Enfoque científico del riesgo : evaluación del potencial de tornados en Argentina / Mariano Balbi ; Pablo Barbieri. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires, 2018.

Libro digital, EPUB

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-537-154-5

1. Actividad Científica. I. Barbieri, Pablo II. Título

CDD 551.553

Fecha de catalogación: 12/2018

Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires

Premio Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires 2015.

El presente trabajo se encuentra disponible sólo en versión electrónica

© Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires

Av. Alvear 1711, 3º piso – 1014 Ciudad de Buenos Aires – Argentina

www.ciencias.org.ar

correo-e: info@ciencias.org.ar

La publicación de los trabajos de los Académicos y disertantes invitados se realiza bajo el principio de libertad académica y no implica ningún grado de adhesión por parte de otros miembros de la Academia, ni de ésta como entidad colectiva, a las ideas o puntos de vista de los autores.

ISBN: 978-987-537-154-5

ENFOQUE CIENTÍFICO DEL RIESGO – EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE TORNADOS EN ARGENTINA

MARIANO BALBI¹
PABLO BARBIERI²

Resumen

Los tornados constituyen un fenómeno climático severo que pueden acarrear serias consecuencias humanas, económicas y ambientales. En el presente trabajo se revisan las métricas empleadas para la caracterización de este tipo de eventos, se desarrolla una base de datos actualizada sobre la ocurrencia de tornados en el territorio de la República Argentina, se propone una metodología para la evaluación del riesgo en blancos puntuales y se analizan diversos escenarios comparando la información disponible con las publicaciones reglamentarias y estudios previos. Los resultados obtenidos son analizados a la luz de la concepción del riesgo en la sociedad moderna y de los procesos de toma de decisiones asociados.

Abstract

Tornados are a severe weather phenomena that can have dire consequences in terms of human, economic and environmental loss. The present work reviews the metrics employed in the characterization of this type of events, develops an updated tornado database for the Argentinian territory, proposes a methodology for hazard evaluation for point targets and analyzes different scenarios comparing them with the available information from official publications and previous studies. These results are discussed in the light of the conception of risk in the modern society and the decision-making process involved.

¹Mgtr. Ing; Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.;
Balbi.mariano@gmail.com;

²Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
pbarbieri@fi.uba.ar;

Índice

1. Introducción	6
2. Naturaleza y clasificación de los fenómenos en estudio.....	8
2.1. Clasificación de los tornados	13
2.1.1. La escala de Fujita.....	13
2.1.2. Escala de Fujita – Pearson.....	19
2.1.4. La escala de Fujita mejorada	22
2.1.5. Relación entre la escala de Fujita y el largo del sendero de un tornado	25
3. Estudio estadístico de los tornados en Argentina	35
3.1. Estudio general.....	35
3.2. Estudio para la provincia de Buenos Aires	40
4. Naturaleza del riesgo.....	42
4.1. La definición del riesgo.....	42
4.1.1. El concepto de probabilidad.....	42
4.2. Definición y cuantificación del riesgo en la Ingeniería 44	
4.3. El concepto de riesgo aplicado a fenómenos naturales	48
4.4. La percepción social e individual del riesgo	50
4.5. El riesgo de tornados en la República Argentina.....	53
5. Evaluación del riesgo por tornados	55
5.1. Modelo probabilístico del riesgo	55
5.1.1. Proceso aleatorio de ocurrencia de tornados	56
5.2. Modelo de impacto de tornados	57
5.2.1. Impacto de punto objetivo.....	58

5.2.2.	Campo de velocidades	60
5.3.	Evaluación del riesgo.....	62
5.3.1.	Consideración de incertidumbres	62
5.3.2.	Método de simulación de tornados	64
5.4.	Resultados.....	69
6.	Conclusiones	75
7.	Agradecimientos	78
	Bibliografía.....	79
A.	Indicadores de daño de la escala de Fujita mejorada	85
B.	Tornados registrados en el territorio de la República Argentina	87
B.1.	Base de datos de tornados	87
B.2.	Mapas de tornados.....	100
C.	Probabilidad de excedencia de la velocidad del viento	107
C.2.	Percentiles de la probabilidad de excedencia del viento	113

1. Introducción

Los fenómenos climáticos severos constituyen una fuente de riesgo para la sociedad que puede acarrear severas consecuencias humanas, económicas y ambientales. Es por ello que el estudio de este tipo de sucesos y su debida caracterización es fundamental para la sociedad y los procesos de toma de decisiones que se dan en la misma. En el presente trabajo se aborda el caso de la ocurrencia de tornados en el territorio de la República Argentina, haciendo foco en la provincia de Buenos Aires.

Para que estos procesos tengan lugar se debe contar con una cuantificación adecuada el riesgo, la cual requiere de una serie de componentes. En términos generales los mismo son:

- Un debido conocimiento del fenómeno en estudio que permita desarrollar métricas a emplearse en el estudio de riesgo. En última instancia se necesita tener un método de caracterización de los tornados que permita su cuantificación para poder emplear la misma en la evaluación del riesgo. Como toda clasificación de un fenómeno natural, la misma estará sujeta a diversas fuentes de incertidumbre las cuales deberán ser debidamente consideradas en el estudio de riesgo. En el caso de los tornados, la métrica que se emplea es la escala de intensidad de daño de Fujita, conocida como escala F. Su definición y evolución, así como la incertidumbre asociada a la misma son estudiadas en detalle en el Capítulo 2.

- Se requiere de una base de datos de ocurrencias de fenómenos que alimente el estudio de riesgo. De lo contrario, las evaluaciones realizadas y los resultados obtenidos se transforman en un mero ejercicio matemático. En el Capítulo 3 se repasan los datos existentes sobre la distribución de los tornados en el territorio argentino junto con una base de datos relevada para el estudio.

- Una definición de riesgo. Es necesario poseer una clara definición de cómo se cuantificará el riesgo. De lo contrario, las partes interesadas pueden incurrir en severos errores de comunicación, que se impactan sobre los procesos de toma de decisión, debido a interpretaciones confusas de la información disponible. En el presente trabajo se emplea el período de retorno de la excedencia de la velocidad del viento debido a la ocurrencia de un tornado.

- Un modelo probabilístico robusto que permita modelar los procesos que se están estudiando cuantificando debidamente las diversas fuentes de incertidumbre y reflejando las mismas en los resultados obtenidos. El mismo se encuentra descrito en detalle en el Capítulo 5.

2. Naturaleza y clasificación de los fenómenos en estudio

Un tornado es una columna de aire que gira violentamente en contacto con la superficie, colgante de una nube cumuliforme, y a menudo (pero no siempre) visible como una nube embudo. A escala local, es el más destructivo de todos los fenómenos atmosféricos. Para que un tornado sea visible se debe producir un embudo de condensación. Este fenómeno se da cuando se condensa la humedad de la atmósfera debido a la baja presión presente en la zona cercana al centro del vórtice.

Las nubes cumuliformes se caracterizan por poseer un desarrollo vertical en forma de aumento de los montículos, cúpulas o torres. En particular, el cumulonimbus es un tipo de nubes excepcionalmente denso y desarrollado verticalmente, que se produce en forma de nubes aisladas o como una línea o en la pared de nubes con partes superiores separadas.

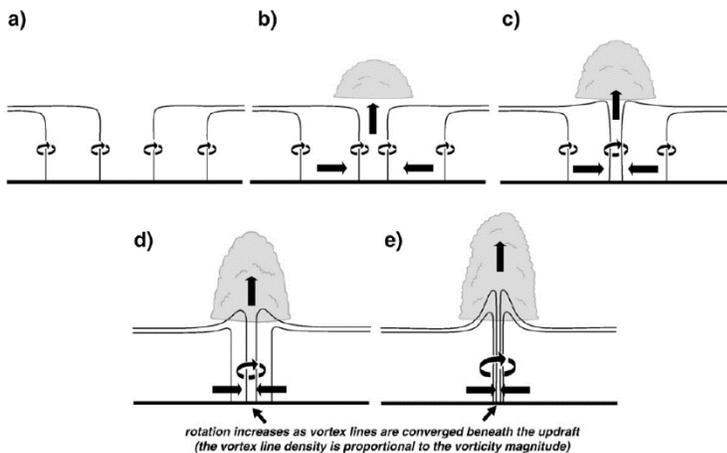


Figura 1: Mecanismo de formación de tornados a partir de vórtices verticales donde la presencia de una corriente ascendente amplifica la convergencia de las líneas de vórtice a nivel superficial (1).

Para que pueda haber un tornado se deben dar una serie de condiciones básicas en la atmósfera que permitan su proceso de formación. Dentro de ellas es fundamental la presencia de una gran vorticidad vertical cerca del terreno. Se entiende por vorticidad

vertical la presencia de vórtices cuyo eje es perpendicular a la superficie terrestre. Si esta vorticidad no está presente, entonces debe provenir por la inclinación de la vorticidad horizontal debido a la presencia de corrientes ascendentes. Este segundo tipo de vorticidad se da cuando los vórtices poseen un eje paralelo a la superficie terrestre y su existencia se debe al cambio de dirección del viento con la altura. Cada tipo de vorticidad está asociada a un proceso de formación de tornados diferente (1).

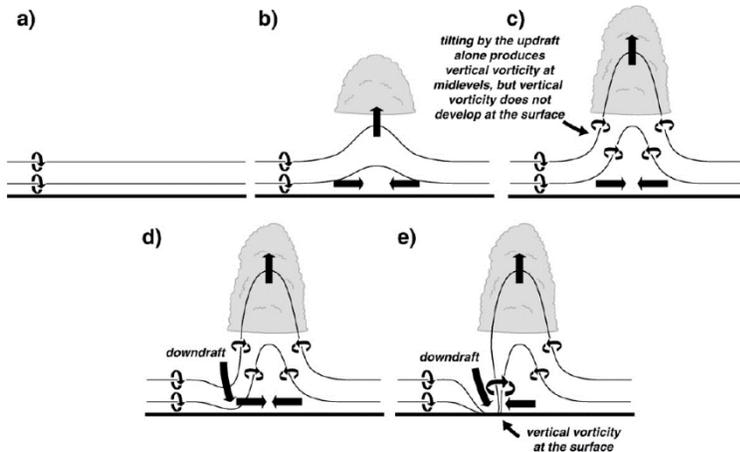


Figura 2: Mecanismo de formación de tornados a partir de vórtices horizontales. “De (a) a (c) se observa la evolución de la inclinación de las líneas de vorticidad horizontal como consecuencia de la acción de una corriente ascendente. En (d) y (e) se evidencia la posible evolución de las líneas de vorticidad como consecuencia de la formación de una corriente descendente. [...]” (1).

En el caso de haber vorticidad vertical, la presencia de la ráfaga ascendente genera una corriente convergente de viento a nivel de la superficie. Como se puede apreciar en la Figura 1 dicha corriente fuerza la unión de las líneas de vorticidad dando lugar al tornado.

Para que se genere un tornado a partir de líneas de vorticidad horizontal primero se debe producir una corriente ascendente que incline dichas líneas. Sin embargo, esto no es suficiente dado que las líneas de vorticidad, ahora verticales, siguen estando dispersas. Para que efectivamente se dé un tornado es necesaria la acción de una corriente descendente que aglutine las líneas de vorticidad. Este proceso es mostrado en la Figura 2.

Se entiende por tormenta a cualquier estado perturbado de la atmósfera, en especial aquellos que afectan la superficie de la tierra y que implican un clima destructivo y desagradable. Las tormentas varían en escala desde tornados y tormentas eléctricas a ciclones tropicales y ciclones extratropicales.

Los tornados ocurren durante las tormentas más severas en presencia de un alto contenido de humedad en la atmósfera y de un fuerte gradiente vertical de temperaturas. Este tipo de tormenta se produce cuando se encuentran un frente cálido con un frente frío. La diferencia de temperatura y densidad del aire en estos frentes generan las fuertes corrientes ascendentes necesarias para dar lugar a los tornados. Dado que en las latitudes medias entran en contacto masas de aire frío provenientes de las regiones polares con masas de aire cálido proveniente de la región ecuatorial, estas zonas son especialmente propensas a la ocurrencia de este tipo de fenómenos. Esto se puede apreciar a simple vista en un mapa de la distribución global de tornados, como el de la Figura 3.

Este mapa de ocurrencia de tornados se condice con los resultados de la misión satelital para medición de tormentas tropicales (TRMM por sus siglas en inglés) que identificó las zonas con mayor concentración de tormentas severas en el planeta (2). Esta misión permitió por primera vez una observación a escala global de las tormentas severas entre 1998 y 2004. Entre los resultados obtenidos se muestra que la zona en estudio es una de las de mayor actividad del mundo: “[...] mostramos que los “puntos calientes” [...] están de hecho poblados de eventos genuinamente intensos, notablemente en los Estados Unidos y el sureste de Suramérica.” (2)

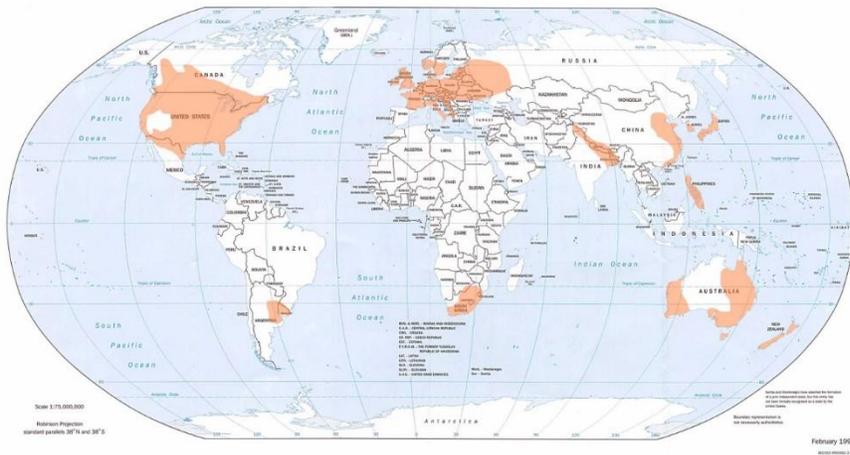


Figura 3: Regiones del mundo con una probabilidad elevada de experimentar tornados, fuente: National Climatic Data Center <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/severeweather/tornados.html>.

A su vez, los tornados se producen en una etapa particular de la tormenta. En su estudio de la estructura de las tormentas, Byers y Roscoe (3) demostraron que las mismas evolucionan en tres etapas. Durante la primera etapa, denominada etapa de formación, la presencia de fuertes corrientes ascendentes fusiona diferentes cúmulos en una única célula. A nivel de la superficie esto se traduce como una corriente de viento radial convergente en el punto central. A medida que se desarrolla la celda, la humedad cargada por la corriente ascendente se condensa formando las gotas de lluvia. Cuando la acumulación de agua llega a un valor límite las gotas empiezan a precipitarse dando lugar a la segunda etapa de la tormenta.

Esta segunda etapa, denominada estadio maduro, se caracteriza por la presencia de corrientes ascendentes y descendentes. La presencia de las corrientes descendentes es consecuencia de la caída de la lluvia que arrastra y enfría la masa de aire. A medida que el agua cae y se encuentra con aire más cálido, en la medida que pueda seguir evaporándose, lo satura y enfría, aumentando la masa de aire descendente. La presencia de lluvia a nivel de la superficie indica que hay más agua de la necesaria para saturar y enfriar todo el aire que se encuentra en su recorrido descendente. Los tornados se

producen durante el estadio maduro de una tormenta dado que requieren de las corrientes ascendentes y descendentes.

La tercera y última etapa de una tormenta se produce cuando la dispersión de la corriente descendente se expande por la base de la tormenta hasta hacer despreciable la corriente ascendente. Eventualmente toda la masa de aire circula en sentido descendente, situación que no puede prolongarse indefinidamente, dando lugar al fin de la tormenta.

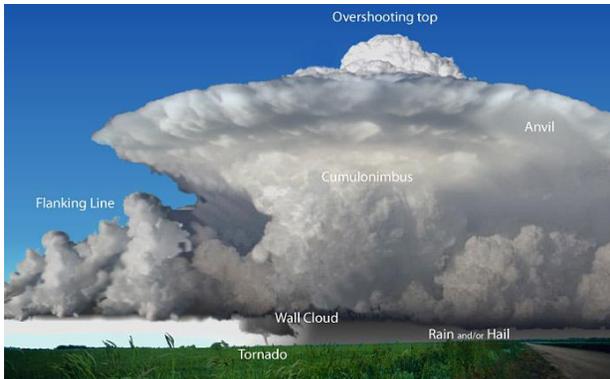


Figura 4: Tormenta supercelda y sus componentes, fuente: <http://www.srh.noaa.gov>.

La mayoría de los tornados son producidos por un tipo en particular de tormenta denominado tormenta de supercelda, ver Figura 4. Este tipo de tormenta se caracteriza por poseer un mesociclón. Un mesociclón es una región de la escala de una tormenta, comúnmente entre 3 y 10 kilómetros de diámetro. La circulación del mesociclón cubre un área mucho más grande que la del tornado que pueda llegar a generar. El mesociclón no es un fenómeno observable a simple vista, sino que se requiere de un radar Doppler para detectarlo. Su duración se puede ser superior a una hora y dentro del mismo se pueden registrar vientos superiores a los 100 km/h.

Por su naturaleza el flujo de aire dentro de una supercelda es más organizado, lo que permite una mayor duración de la tormenta y, por ende, de los tornados que produce. Los tornados producidos por este tipo de tormentas se generan a partir de líneas de vorticidad horizontal, mientras que los tornados producidos a partir de líneas de vorticidad vertical no se deben a mesociclones y son en general de menor intensidad llegando a lo sumo, y raras veces, a ser F3 (4).

Es importante desatacar que investigaciones recientes muestran que la probabilidad de que una tormenta de supercelda genere tornados es menor a la tradicionalmente aceptada (5). Este factor es fundamental a la hora de estimar el riesgo de ocurrencia de un tornado. Dado que muchos de los tornados no son debidamente registrados, ver (6) y (7), el uso de la presencia de mesociclones como un estimador de ocurrencia de los mismos es muy común.

2.1. Clasificación de los tornados

2.1.1. La escala de Fujita

Desde el punto de vista meteorológico, una clasificación ideal de los tornados debería estar basada en las velocidades de viento registradas durante su ocurrencia junto con otros parámetros atmosféricos. Sin embargo, este tipo de categorización es altamente inviable debido a la dificultad para registrar la información requerida. En primer lugar, las estaciones meteorológicas usuales no son capaces de resistir el paso de un tornado, por lo que no permiten registrar la velocidad máxima. Los radares comunes, si bien capaces de detectar la presencia de algunos tornados, son incapaces de medir la velocidad del viento atmosférico. Para ello es necesario emplear radares Doppler, que por su naturaleza, son de un alcance limitado y su uso es muy específico, por lo que no se cuenta con una cobertura adecuada.

La forma más extendida de clasificación de los tornados es la escala de Fujita (F#). Originalmente introducida en 1971 por T. Fujita (8), fue actualizada en 1973 para tener en cuenta el ancho y longitud del sendero del tornado dando lugar a la escala Fujita-Pearson (FPP) (9).

La escala de Fujita clasifica a los tornados en intensidad entre F0, los menos severos, a F5. Originalmente se pretendía que la escala funcionase como una escala de intensidad de vientos a partir del nivel de daño observado. Es por ello que la escala se extiende teóricamente hasta F12, equivalente a Match 1, la velocidad del sonido en la atmósfera a 3°C. Fujita estableció las categorías, cada una de las cuales representa un rango de velocidades de viento, describiendo el daño que probablemente se podría observar como consecuencia de dicha velocidad. La relación entre la escala de Fujita y la velocidad del viento de cuarto de milla, definida a continuación, está dada por la siguiente ecuación:

$$V = 6.30 (F + 2)^{1.5} \quad (1)$$

Siendo F la escala de Fujita y V la velocidad del viento en m/s. La relación propuesta entre la escala de Fujita y la velocidad permite relacionarla con escalas de medición de intensidad de viento, como se puede apreciar en la Figura 5. Si bien se han propuesto otras escalas basadas en la intensidad del viento para la clasificación de tornados (10) la mayoría de la información disponible está bajo la escala de Fujita, por lo que hasta el momento las otras escalas no han prosperado. Existen además diversas razones técnicas por las que la escala de Fujita sigue siendo conveniente, que se analizarán a continuación.

Otro aspecto importante a la hora de implementar la escala de Fujita es definir qué se entiende por velocidad del viento. Las estaciones meteorológicas habituales registran el promedio de la velocidad del viento durante 10 minutos o 1 minuto³. Una ráfaga de viento de un tornado que produce daños evidentes, e inclusive importantes, puede tener una duración temporal mucho menor que 1 minuto, por lo que relacionar el daño con las velocidades mencionadas carece de sentido. El período de viento sostenido requerido para alcanzar un determinado nivel de daño parece ser inversamente proporcional a la velocidad del viento, lo que sugiere fuertemente que la velocidad de viento asociada a un nivel de daño debe ser definida como la máxima velocidad dado una longitud de sendero del tornado (8). Cuando la longitud seleccionada es de una milla⁴, la magnitud de viento se denomina el máximo viento en una milla. Por lo general, se requieren longitudes de sendero mucho menores a una milla para desarrollar vientos que puedan producir daños considerables a árboles y estructuras, por lo que se trabaja con el máximo viento en un cuarto de milla, o viento $\frac{1}{4}$ de milla.

3 Si bien la tecnología actual permite mediciones mucho más precisas de velocidad de viento, no se debe perder de vista que el grueso de la base de datos de los tornados data de una época en donde dicha tecnología no estaba disponible.

4 El empleo de unidades por fuera del sistema métrico se debe a que en el momento en que Fujita propuso su escala no estaba extendido el uso del sistema internacional en EE.UU., ni siquiera para aplicaciones cinético-técnicas

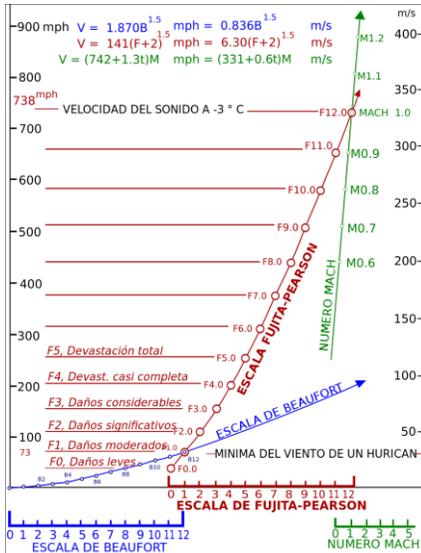


Figura 5: Relación entre la escala de Fujita, la escala de Beuford y la escala de Mach (8).

Junto con la velocidad de cuarto de milla se emplea la velocidad de ráfaga de 3 segundos para indicar la intensidad de viento. Por el momento, las velocidades pico registradas por el instrumental del National Weather Service (Servicio Meteorológico Nacional de EE.UU.) son el valor promedio de 3 segundos. Por lo tanto, la escala emplea este valor (11).

Dado que en la actualidad la escala de Fujita no es interpretada como una escala de velocidad de viento sino de intensidad de daño (12) (7), los trabajos más recientes (13) relacionan estadísticamente la longitud de la traza de un tornado con la intensidad de daño observada en la misma. En el trabajo citado se ajustan los datos recopilados de los tornados sucedidos en EE.UU a distribuciones de probabilidad de Weibull. El elevado nivel de correlación observado permite emplear estas distribuciones como herramientas de predicción, por lo que son empleadas en el Capítulo 5 para la evaluación de riesgo.

La necesidad de interpretar a la escala de Fujita como una escala de daño y no de velocidad del viento resulta evidente si se aprecia que en la Figura 5 el mínimo valor de la escala de Fujita (F0) no se condice con una velocidad de viento nula, como si es el caso de la escala de Beuford. La razón de ello se debe a que una clasificación F0

no indica la ausencia de viento, sino que es el mínimo viento necesario para que se produzca algún tipo de daño (9).

Si bien el nivel de daño percibido está fuertemente correlacionado con la intensidad del viento, la relación no está libre de ambigüedades. En primer lugar, pocas veces un tornado encuentra en su camino una estructura diseñada por un ingeniero. Las estructuras proyectadas bajo criterios ingenieriles están diseñadas para resistir una cierta velocidad del viento. Por lo tanto, si la estructura no resistió el tornado se tiene un límite inferior de la máxima velocidad en el emplazamiento. En cambio, si la estructura no se vio afectada por el tornado, se tiene un límite superior. Pero, en todo caso, no se puede determinar con precisión la verdadera velocidad máxima.

Inclusive cuando un tornado encuentra una estructura diseñada bajo criterios ingenieriles y la estructura fue dañada, el daño no es una indicación directa de la velocidad del viento. Si bien la estructura está diseñada para una cierta velocidad de viento, y se pueden realizar verificaciones para determinar si el diseño era adecuado, el hecho de que la estructura no haya resistido no es una garantía de que se haya superado la velocidad del viento de diseño. Esto se debe a que la estructura puede haber sido debilitada por el impacto de algún misil generado por el tornado, reduciendo su resistencia a las presiones generadas por el viento y causando eventualmente el colapso (6).

La escala F está basada en un único indicador: el nivel de daño sufrido por una casa bien construida. Por casa bien construida se entiende una casa que cumple con ciertos criterios en cuanto a su diseño y construcción. Se debe tener en cuenta que la escala fue diseñada para ser implementada en Estados Unidos, por lo que el criterio aplica a la técnica y usos de dicho país. En particular, la casa bien construida apunta a casas de madera (frame houses), mucho más comunes en Estados Unidos que en Argentina. La elección de Fujita por este indicador de daño se debe a que es prácticamente ubicuo en toda la extensión de Estados Unidos.

El hecho de que la escala se halle basada en los daños posee la ventaja adicional de permitir realizar una clasificación retrospectiva de los tornados ocurridos antes de su implementación por medio de los registros gráficos o el relato de quienes los experimentaron. De esta forma, fue posible extender la base estadística con la que se cuenta. Es importante notar que este trabajo fue subvencionado por la Nuclear Regulatory Commission (Comisión de Regulación Nuclear de EE.UU.) durante la década del 60 justamente por la construcción de centrales nucleares en zonas propensas a este tipo de fenómeno climático (12).

Sin embargo, los resultados obtenidos por este método no están libres de discusión.

Tabla 1: Escala de Fujita

Escala	Velocidad del viento [km/h]	Daño observado
F0	64-116	Daño liviano: algún daño a chimeneas, ramas arrancadas de los árboles, árboles de raíces poco profundas arrancados, señales y carteles dañados
F1	117-180	Daño moderado: arrancamiento de la superficie de los techos, casas móviles arrancadas de la fundación o volteadas, autos en desplazamiento volados.
F2	181-253	Daño significativo: techos arrancados de las casas de madera, casas móviles demolidas, vagones de carga cerrados volcados, árboles de gran porte arrancados de raíz o volteados, generación de misiles a partir de objetos livianos, autos levantados del terreno.
F3	254-332	Daño severo: techos y algunas paredes arrancados de casas bien construidas, trenes tumbados, la mayoría de los árboles de los bosques arrancados, automóviles pesados levantados del terreno y arrojados
F4	333-418	Daño devastador: casas bien construidas arrasadas, estructuras con fundaciones débiles levantadas y desplazadas, automóviles arrojados y generación de misiles de gran porte.
F5	419-512	Daño increíble: casas de madera desarraigadas arrancadas de la fundación y Misiles del tamaño de un automóvil vuelan más de 100 m,

2.1.2. Escala de Fujita – Pearson

La escala de Fujita-Pearson fue introducida por Fujita y Pearson luego de las campañas de observación de 1971 y 1972 para tomar en cuenta el ancho y longitud del sendero del tornado (14). La escala FPP considera estos dos factores adicionales para tomar en cuenta las características mencionadas. Sin embargo, estudios posteriores demostraron una correlación no tan elevada entre la intensidad de los tornados, deducida a partir de los daños registrados, y el tamaño del sendero del tornado.

Tabla 2: Escala de Fujita-Pearson

Escala	Velocidad del viento [km/h]	Daño observado	Longitud del sendero [km]	Ancho del sendero [m]
F0	64-116	Liviano	0.5-1.5	5-15
F1	117-180	Moderado	1.6-5.0	16-51
F2	181-253	Significativo	5.1-16.0	52-160
F3	254-332	Severo	16.1-50.7	161-508
F4	333-418	Devastador	51.0-160.0	509-1608
F5	419-512	Increíble	161.0-508.0	1609-4538

2.1.3. Fuentes de incertidumbres en la implementación de la escala de Fujita

La implementación de la escala de Fujita constituyó un hito fundamental en el estudio estadístico de los tornados. Si bien en Estados Unidos existió un registro de tornados desde principios del siglo XX, este solo se limitaba a indicar la ocurrencia de los mismos sin ninguna información adicional. Por lo tanto, su capacidad como una herramienta de análisis estadístico de ocurrencia de estos fenómenos estaba fuertemente limitada (15). Sin embargo, la escala de Fujita no está libre de inconvenientes. Este apartado tiene por objetivo ver el impacto de dichas limitaciones en las estadísticas de los

tornados registrados y su posible impacto en la incertidumbre en la determinación del riesgo.

El primer factor a considerar es que la escala depende un parámetro que es evaluado por individuos cuya subjetividad entra en juego, lo que se traduce en un sesgo de la información estadística generada. Las consecuencias de esta situación quedan en evidencia si se analiza el porcentaje de una cierta categoría de tornados sobre el total registrados en cada año. Como se muestra en la Figura 7, hay períodos de cambios abruptos y períodos relativamente estables. Por ejemplo, la estabilidad observada durante la década de 1990 es coincidente con la implementación por parte de la NWS (National Weather Service, Servicio Nacional Meteorológico de EE.UU.) de una guía formal para la realización de estudios de daños por tornados que fue incluida en cursos obligatorios (6).

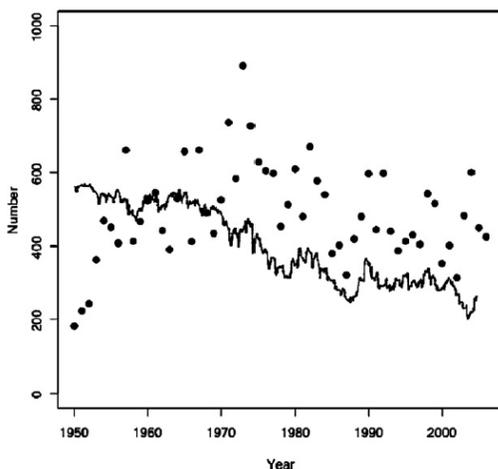


Figura 6: Recuento anual de tornados de categoría F1 o mayor (F1+) en Estados Unidos entre 1950 y 2006 (puntos sólidos) y tornados categoría F2 o mayor (F2+) cada 1000 tornados F1+ (línea sólida) (6).

Brooks y Doswell (7) analizan para diferentes años la distribución de los tornados según escalas. Los autores llegan a la conclusión de que, con independencia de la cantidad de tornados registrados, los datos se ajustan a una distribución log-normal. A su vez, destacan 4 aspectos que pueden ser fuentes de desvíos en la distribución:

1. En las bases de dato estadísticas existen períodos de tiempo donde muchos de los tornados que han sucedido no han sido registrados. Este período depende de cada país, pero está presente en todos.

2. Los tornados de baja intensidad tienden a ser omitidos en los reportes porque por lo general tienen una duración reducida y un sendero de longitud acotada.

3. Dado que la asignación de una escala F depende de que haya estructuras en el sendero de un tornado para que puedan ser dañadas, tornados de alta intensidad tienden a ser subestimados debido a que se dan en zonas escasamente pobladas.

4. Existe un error aleatorio en la asignación de la escala debido a la falta de un conocimiento adecuado de las estructuras dañadas.

El primer factor, si bien afecta a la cantidad total de tornados registrados, en lo que respecta a la distribución de los mismos esta no se ve afectada dado que tornados de todas las escalas están ausentes. El segundo y tercer tipo de errores mueven tornados de los extremos de la distribución hacia el centro de la misma. Finalmente, el error aleatorio no actúa de forma pareja. Si se considera que la mayoría de los tornados son F0, dado que no hay una escala menor, el error aleatorio tiende a sobreestimar estos tornados. El conocimiento de este tipo de desvíos será fundamental a la hora de interpretar la información estadística y realizar la evaluación del riesgo.

El aspecto más interesante del trabajo de Brooks y Doswell (7) es su comparación de los tornados en diferentes lugares del mundo. Para poder llevar a cabo esta comparación se debe compensar el hecho de que Estados Unidos es el país que registra la mayor cantidad de tornados junto con los más violentos, habiendo muy pocos casos de tornados F5 registrados en otras partes. Es importante notar que Argentina es uno de los lugares fuera de Estados Unidos donde sí han sucedido tornados F5 (16).

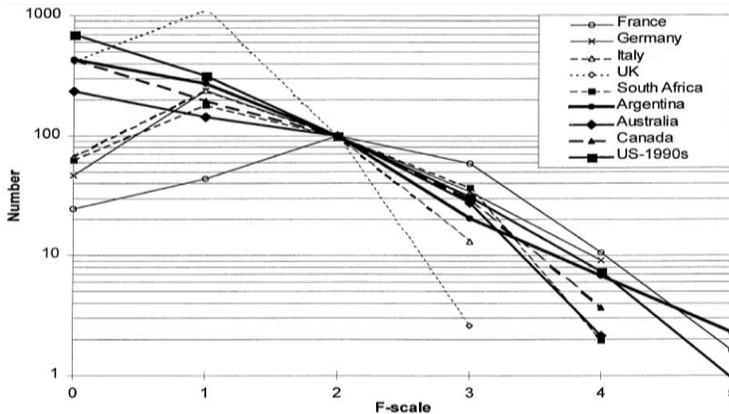


Figura 7: Distribución de tornados según su categoría F en distintos países escaladas de forma tal que en todos los casos se hubieran producido 100 tornados F2. (7)

Para compensar esta situación los autores proponen considerar que, cualquiera haya sido el número de tornados en un país dado, se la escale de forma tal que haya habido 100 tornados F2 registrados. De esta forma se obtiene las distribuciones que se aprecian en la . De las conclusiones que se pueden obtener de dicho análisis, la más importante a los fines del presente trabajo es la fuerte coincidencia de las distribuciones de Argentina y Estados Unidos. Evidentemente la diferencia entre estos países radica en la disparidad de eventos que se dan en cada año. Sin embargo, como destacan los autores del trabajo, la semejanza de las curvas, sobre todo para tornados de mayor intensidad, resulta especialmente útil para determinar la probabilidad de ocurrencia de fenómenos extremos (7).

2.1.4. La escala de Fujita mejorada

En el año 2007 la escala de Fujita fue actualizada por el America National Weather Service (Servicio Climático Nacional de América, correspondiente a EE.UU.). La comunidad de la ingeniería llegó a la conclusión que la escala original subestimaba los daños producidos por una cierta velocidad de viento, de forma tal que tornados categoría F3 por su velocidad eran calificados como F4 o F5. La escala fue ajustada dando lugar a la escala de Fujita mejorada (EF por sus siglas en inglés, Enhanced Fujita Scale).

Damage f scale	Little Damage	Minor Damage	Roof Gone	Walls Collapse	Blown Down	Blown Away	
	f0	f1	f2	f3	f4	f5	
Windspeed F scale	17 m/s	32	50	70	92	116	142
	F0	F1	F2	F3	F4	F5	
	40 mph	73	113	158	207	261	319
To convert f scale into F scale, add the appropriate number							
Weak Outbuilding	-3	f3	f4	f5	f5	f5	f5
Strong Outbuilding	-2	f2	f3	f4	f5	f5	f5
Weak Framehouse	-1	f1	f2	f3	f4	f5	f5
Strong Framehouse	0	F0	F1	F2	F3	F4	F5
Brick Structure	+1	-	f0	f1	f2	f3	f4
Concrete Building	+2	-	-	f0	f1	f2	f3

Fig. 2.4-1 The Fujita tornado scale (F scale) pegged to damage-causing windspeeds. The extent of damage expressed by the damage scale (f scale) varies with both windspeed and the strength of structures.

Figura 8: Escala de Fujita modificada para tener en cuenta la diferencia de resistencia entre varios tipos de construcción. La tabla debe ser interpretada como que un daño f0 en un edificio de hormigón equivale a un tornado F2 en la escala de Fujita (9).

Otro de los factores que se tuvieron en cuenta con la modificación de la escala fue que la definición de casa bien construida es relativamente vaga. También se tuvo en consideración que este indicador de daño está limitado a las técnicas y costumbres constructivas de EE.UU. A su vez consideró el hecho de que el empleo de un único indicador de daño limita la escala severamente al necesitar la presencia del mismo en la traza del tornado. Fujita, entendiendo estas limitaciones, propuso en sus memorias un cuadro de conversión para tener en cuenta las diferencias entre diversos tipos de construcciones y el daño producido en ellas por un mismo tornado (9).

Dentro de los aspectos que influyeron en la actualización es que la escala de Fujita presenta serias limitaciones a la hora de considerar factores como, la orientación de la estructura respecto a la dirección del viento, la duración del viento, la aceleración del viento o la presencia de otras estructuras cercanas.

A diferencia de la escala original que emplea un único indicador de daño, la escala mejorada emplea 28 indicadores a los que clasifica al menos en 8 niveles de daño, ver Apéndice A. De esta forma se reduce la probabilidad de sobreestimar la clasificación de un

tornado, incrementa las chances de que un tornado encuentre alguno de los indicadores de daño y es más factible de ser generalizada fuera de los Estados Unidos.

A su vez, la diversidad de indicadores de daño permite dar una clasificación adecuada a tornados que antes eran categorizados como F0 por no dañar alguna estructura civil. Para ello la escala EF se basa en un trabajo interdisciplinario. Por ejemplo, se recurrió a biólogos para generar indicadores de daño confiables a partir del estado de los árboles luego del paso de un tornado, teniendo en cuenta cuestiones como el tipo de madera. Sin embargo, aún quedan aspectos por resolver, como considerar la evidente correlación entre el daño y el diámetro de un árbol (17).

Otro de los efectos positivos de emplear un número elevado de indicadores de daño (18) es que permite tener una mejor definición de la traza de un tornado. La escala está pensada para hacer uso de la misma en conjunción con sistemas de información geográfica y software que permita el mapeo en tiempo real durante el relevamiento de datos, así como el empleo de imágenes satelitales de alta precisión. Estas herramientas incrementan sustancialmente la información disponible y la capacidad de analizar la misma.

Como se puede observar en la Tabla 3, las velocidades de viento para un mismo nivel de daño difieren entre la escala de Fujita y la escala de Fujita mejorada. Esto debe a que las investigaciones realizadas en túneles de viento y la observación de los daños producidos por tornados permitió concluir que la escala original de Fujita sobreestimaba la velocidad del viento necesaria para producir un cierto nivel de daño. La escala mejorada fue diseñada con el objetivo de ser una continuación de las estadísticas anteriores a su implementación. Es decir, los niveles de daño de ambas escalas son idénticos, pero no las velocidades de viento asociadas a ellos. Este hecho constituye en sí mismo una afirmación de que la escala de Fujita no es una escala de intensidad del viento, sino de daño.

Tabla 3: Escala de Fujita mejorada (17)

F	Original – vel ¼ milla. Mph (m/s)	Propuesta– 3s gust Mph (m/s)	Adoptada– 3s gust Mph (m/s)
0	40-72 (18-32)	65-85 (29-38)	65-85 (29-38)
1	73-112 (33-50)	86-109 (38-49)	86-110 (38-49)
2	113-157	110-137	111-135

	(51-70)	(49-61)	(50-60)
3	158-206 (71-92)	138-167 (62-75)	136-165 (61-74)
4	207-260 (93-119)	168-199 (75-89)	166-200 (74-89)
5	261-318 (117-142)	200-234 (89-105)	>200 (>89)

Si bien la reciente aplicación de la escala de Fujita mejorada dificulta la comparación con la base estadística precedente, existen diversos trabajos que abordan el tema (18). La pregunta central de ellos es si los niveles de daño de ambas escalas son equivalentes o no. Como se puede apreciar en se ha registrado una variación en la distribución de los tornados en la escala luego de la adopción de la escala mejorada, pero la misma está dentro de las variaciones estacionales que ya se habían observado en la escala de Fujita original.

Tras tres años de aplicación de la escala EF en 2010 se realizó una evaluación de los resultados de su implementación en EE.UU. (17). Una de las intenciones fundamentales de la escala EF es que sea una continuación de la escala F en cuanto a indicador de daño, y por ende, para la predicción de riesgo. Esto se centra en la necesidad de poder combinar la información de ambas bases de datos. Si bien el periodo de tiempo de aplicación de la nueva escala es muy reducido como para aventurar conclusiones, no existen datos que evidencien una desviación con respecto a la escala F en lo referente al daño.

Otro de los aspectos a considerar es la generalidad de la escala a la hora de aplicarla en otros países teniendo en cuenta la diversidad de técnicas constructivas. Si bien la escala EF, al considerar una diversidad mayor de indicadores de daño, es un paso en la dirección correcta, varios de los indicadores siguen estando asociados a la realidad de EE. UU. Existen serias dudas de que realmente se pueda desarrollar una escala de naturaleza global, siendo que el daño siempre está asociado a la idiosincrasia constructiva local.

2.1.5. Relación entre la escala de Fujita y el largo del sendero de un tornado

Poder relacionar la intensidad de un tornado con el área cubierta por el mismo es esencial para poder realizar una estimación de riesgo. El primer intento de hallar una relación de este tipo se

puede atribuir a Fujita y Pearson dando como resultado la mencionada escala FPP. Sin embargo, la introducción de dicha relación en 1973, solo dos años después de que Fujita presentara la escala F, resultó ser demasiado prematura. El contraste de los valores previstos en la escala FPP con los datos estadísticos que se iban recopilando demostró que existía una baja correlación entre ambos, por lo que la escala cayó en desuso. Más recientemente, Brooks (13) propuso emplear distribuciones de Weibull para relacionar la intensidad de un tornado con los parámetros que describen su traza, obteniendo resultados satisfactorios.

En primer lugar, se debe definir qué se entiende por el área de la traza de un tornado. No resulta sorprendente que la primera definición de la misma fuese dada por Fujita como parte de su método para estimar el riesgo de tornado denominado DAPPLE (Damage Area Per Path Length, Área de daño por unidad de longitud en español). Este método fue desarrollado a pedido del DOE (Departamento de Energía de EE.UU.) y en el mismo se definen las variables de las que se desprende la escala FPP. En esencia la escala FPP es una simplificación de los resultados que se obtienen de calibrar DAPPLE con los datos estadísticos que poseía Fujita en 1979. Si bien tanto el método DAPPLE como la escala FPP han caído en desuso en la actualidad, los conceptos en los que se basan no y siguen siendo fundamentales para comprender el proceso de estimación del riesgo. Es por ello que se los describe a continuación.

El área de la traza no es una variable meteorológica, sino que está definida a partir la intensidad de daño. Al igual que la escala F, el área podrá ser relacionada con ciertos valores de velocidad de viento, pero esta relación adolece de las mismas limitaciones que la escala. La intensidad de daño de un tornado durante su desarrollo no es constante, sino que varía a lo largo de su traza, por lo general creciendo gradualmente al comienzo y menguando al final. Por lo tanto, a fin de estimar el riesgo no solo es útil conocer el área total de la traza, sino en área en que se observan daños asociados a cada nivel de la categoría F.

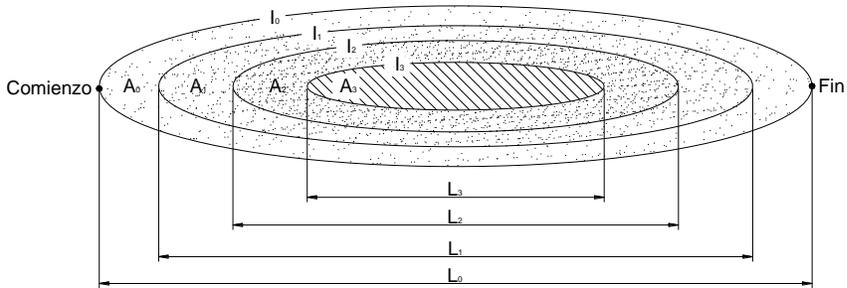


Figura 9: Esquema de curvas de isovelocidad y áreas de intensidad de daño para un tornado F3 presentado por Fujita en (19).

Fujita definió como curvas de isovelocidad a los puntos sobre el terreno en los que se registró la misma velocidad máxima de viento. En realidad, estas curvas son trazadas a partir del nivel de daño que se aprecia. Por ejemplo, la curva de isovelocidad para $V=64\text{km/h}$ (la velocidad mínima para un F0) se determina mediante los puntos a partir de los cuales se comienza a apreciar un nivel de daño asociado con el nivel 0 de la escala F. De forma análoga, la curva de isovelocidad para $V=117\text{ km/h}$ (la velocidad mínima para un F1) encierra la zona donde el daño observado corresponde a un tornado categoría F1 o mayor. Las curvas de isovelocidad son entonces curvas de intensidad de daño constante. Se las identifica de I0 a I5 correspondientemente con los puntos donde se comienza a observar la intensidad de daño asociada a cada nivel de la escala F.

La longitud del sendero L_i del tornado se define como la distancia entre los puntos extremos de la curva de isovelocidad I_i en la dirección de desplazamiento del tornado, como se aprecia en la Figura 9. El área dentro de cada curva de isovelocidad se designa A_i siendo el valor de i la intensidad correspondiente. El ancho medio de la traza se define como:

$$W_i = \frac{A_i}{L_i} \quad (2)$$

En forma genérica, en la bibliografía se habla de ancho y largo de la traza, refiriéndose por los mismos a L_0 y W_0 .

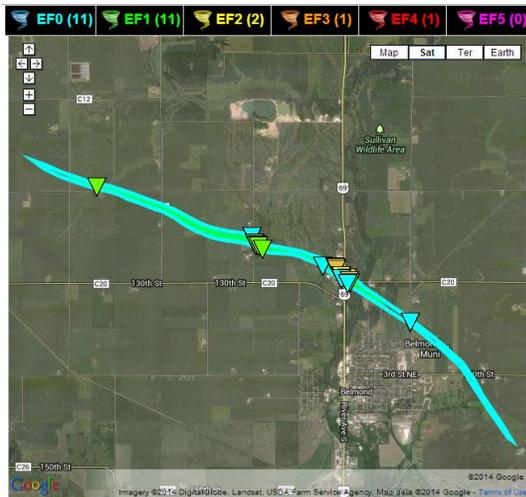


Figura 10: Ejemplo del sendero de un tornado relevado en EE.UU. Este caso particular se trata de un tornado F3 que sucedió en 12/06/2013 en Belmont Iowa. Fuente: <http://www.crh.noaa.gov/dmx/?n=iators2013#maptop>.

En la Figura 10 se puede apreciar los datos relevados para un tornado F3 ocurrido en Belmont, Iowa, EE.UU el día 12 de Junio de 2013. Se observa como en los extremos y laterales de la traza la intensidad es menor que en el centro. A su vez, es importante notar el ancho variable de la traza.

Por lo general, para determinar la geometría de la traza de un tornado se recurre a la evaluación de fotografías aéreas de la zona afectada, como la que se muestra en la Figura 11. La combinación de las fotos con información recopilada en el terreno permite delinear las distintas áreas de intensidad.



Figura 11: Vista aérea de la traza del tornado F4 sucedido en Tuscaloosa-Birmingham el 27 de abril de 2011. Fuente: http://www.srh.noaa.gov/bmx/?n=event_04272011tuscobirm

Como señala McCarthy (20) la escala FPP ajusta los valores de ancho y longitud de la traza en función de la intensidad mediante distribuciones log-normales. Sin embargo, el ajuste de esta escala a los datos observados no es satisfactorio. Los resultados que se obtienen de analizar la base de datos disponibles para EE.UU (21) demuestran que si bien hay una tendencia general a que tornados de mayor intensidad posean trazas más largas, no se puede apreciar una clara discriminación por intensidad. Esto indica en primer lugar que no se puede usar la longitud del sendero como sustituto de la observación de daño para determinar la clasificación en la escala F. La inversa también es válida, siendo que la escala no es un indicador directo de la longitud de la traza.

Modelos físicos simplificados, como el vórtice de Rankine, demuestran que existe una correlación entre en ancho del embudo del tornado y la máxima velocidad del viento, y por ende la intensidad de daño. Sin embargo, estos modelos descansan sobre hipótesis simplificadoras demasiado generosas. Si bien en general tornados de mayor intensidad tienden a poseer un diámetro mayor, la información recopilada muestra que el ancho del tornado, y por ende del sendero, no es una indicación directa de la intensidad de daño. Este comportamiento se puede apreciar claramente en la Figura 12. Es por ello que a partir de 1994 el NWS (National Weather Service) modificó su manual de operaciones estableciendo que se debe indicar el ancho

máximo del sendero del tornado. Si bien es más difícil relacionar el ancho máximo del sendero con el área de la traza, la correlación entre este y la intensidad es mejor, como se puede apreciar en la Figura 12. No obstante, no hay una relación suficientemente marcada como para poder indicar la escala F a partir del ancho máximo del sendero.

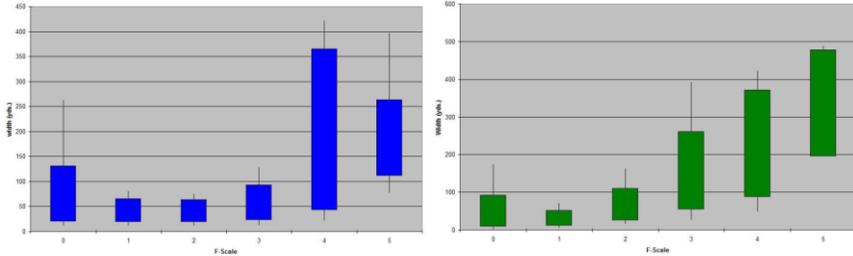


Figura 12: Ancho medio (izq.) y máximo (der.) del sendero en función de la intensidad F. Las áreas sólidas representan el percentil del 25 a 75 de los registros, mientras que las líneas negras el percentil de 10 a 90 (20).

El área de la traza no es simplemente el producto de la longitud media de la misma por la longitud media (21). El modelo de Fujita descrito con anterioridad asume que se puede emplear la longitud de la traza como indicador del área de la misma. Este no es el caso, dado que la información estadística recopilada demuestra que no existe una correlación fuerte entre ancho medio y longitud.

En conclusión, la información estadística de la geometría de la traza de los tornados muestra que no existe una relación biunívoca entre la intensidad F y el ancho o largo de la traza y área. Por lo tanto, se requiere de un modelo más sofisticado que la escala FPP para poder estimar el área en función de la intensidad. El empleo de distribuciones de Weibull Brooks (13) permite hallar niveles de correlación elevados entre el modelo propuesto y la base de datos recopilada. Este modelo sigue empleando el concepto de que el área de la traza de un tornado se subdivide en áreas de distinta intensidad en función del daño observado y sigue empleando los conceptos de longitud y ancho de traza.

La distribución de densidad de probabilidad de Weibull está definida por:

$$f_x(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (3)$$

Donde α y β son los parámetros de forma y escala de la distribución. Como su nombre lo indica, el parámetro de forma α determina el comportamiento general de la distribución. Si $\alpha < 1$ entonces la distribución es una función estrictamente decreciente con un comportamiento similar a una función hiperbólica, como se aprecia en la Figura 13. Para $\alpha = 1$ la distribución sigue siendo estrictamente decreciente pero ya no diverge en el origen, mientras que para $\alpha > 1$ la distribución es similar a una log-normal. En todos los casos el parámetro β no altera la forma sino la dispersión.

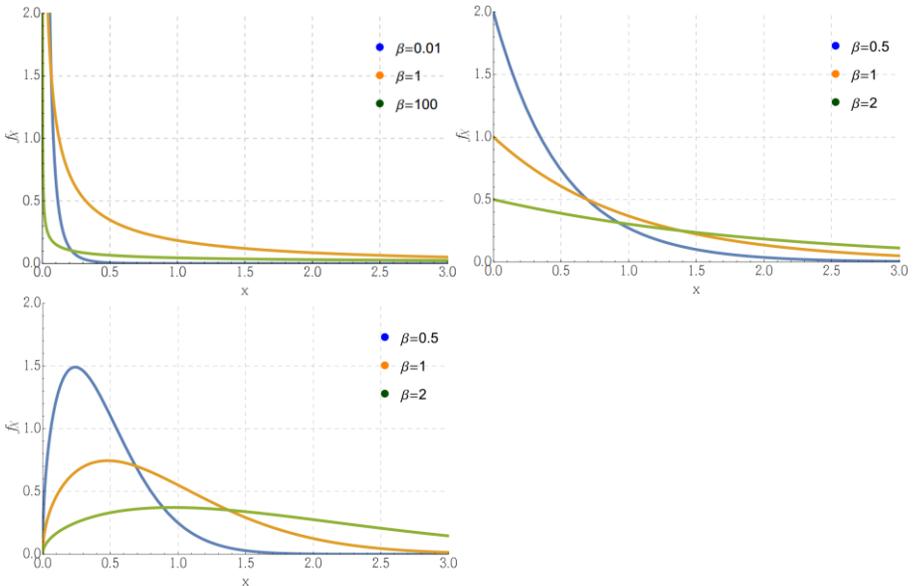


Figura 13: Distribuciones de densidad de probabilidad de Weibull para factor de forma $\alpha = 0.5$, $\alpha = 1$ $\alpha = 1.5$.

El valor medio y variancia de la distribución de Weibull está dado por:

$$\begin{aligned} \mu &= \beta \Gamma(1 + 1/\alpha) \\ \sigma &= \beta^2 [\Gamma(1 + 2/\alpha) - \Gamma^2(1 + 1/\alpha)] \end{aligned} \quad (4)$$

La función de probabilidad acumulada es:

$$F_X(x) = 1 - \exp[-(x/\beta)^\alpha] \quad (5)$$

Brooks (13) realizó un ajuste los parámetros α y β de la distribución de Weibull con los datos estadísticos recopilados para EE.

UU. entre 1950 y 2001. Los resultados de este estudio para la longitud y ancho del sendero de los tornados se pueden consultar en la Tabla 4. Las densidades de probabilidad resultantes de aplicar dicha tabla se pueden apreciar en la Figura 14. En lo que respecta al ancho de sendero, las densidades de probabilidad se presentan en la Figura 15.

Tabla 4: Parámetros de la distribución de Weibull para el ancho y largo del sendero

F	N	Ancho del sendero			Largo del sendero		
		α	β	μ	α	β	μ
0	16441	0.94	27.2	28.4	0.65	0.9	1.4
1	14450	0.85	57.7	64.0	0.62	3.1	4.7
2	7503	0.79	107.4	125.9	0.64	7.5	10.7
3	1967	0.84	240.2	263.6	0.83	20.4	22.5
4	469	1.00	461.1	406.7	1.01	43.9	43.6
5	51	1.71	620.5	555.5	1.20	57.7	54.6

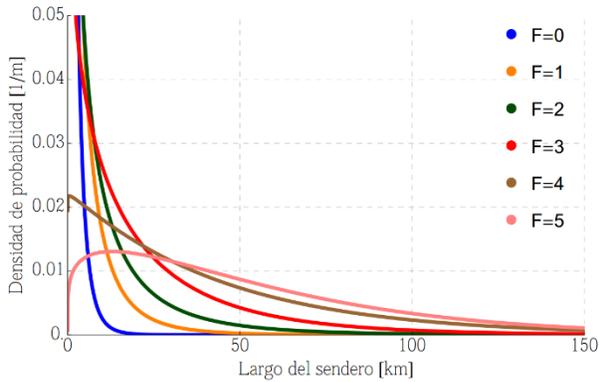


Figura 14: Densidad de probabilidad de la longitud de sendero del tornado para distintos niveles de la escala F en función de los datos de la Tabla 4.

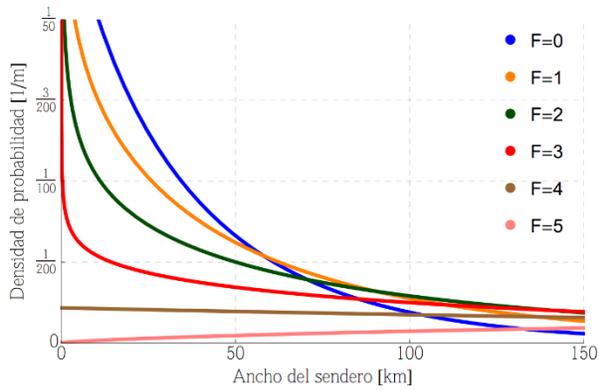


Figura 15: Densidad de probabilidad de la longitud de sendero del tornado para distintos niveles de la escala F en función de los datos de la Tabla 4.

3. Estudio estadístico de los tornados en Argentina

3.1. Estudio general

El tornado más severo que tuvo nuestro país fue el 10 de enero de 1973, en San Justo, provincia de Santa Fe, con una intensidad F5, estimándose vientos superiores a los 420 km/hr. Fueron 7 minutos que costaron más de 50 vidas (algunos hablan de casi 70 muertos) y más de 500 heridos, cambiando para siempre la fisonomía de la ciudad y la vida de sus habitantes. Fue el tornado más fuerte registrado en Sudamérica y probablemente uno de los más intensos observado fuera de los Estados Unidos.

Según estudios meteorológicos, la región comprendida por la llanura pampeana, el litoral y el sur de Brasil, es el segundo lugar en el mundo en donde se producen más fenómenos de este tipo después del “Corredor de los tornados”, en Estados Unidos. Los especialistas comenzaron a nombrar a la zona como el “Pasillo de los tornados”, ver Figura 16.



Figura 16: Pasillo de los tornados en Sudamérica. Fuente: <http://tormentasdebuenosaires.blogspot.com/>.

Si bien la ocurrencia de fenómenos climáticos severos en el territorio de la República Argentina era conocida, el estudio sistemático de los mismos se inició a mediados de la década de 1970 con los trabajos de la doctora Altinger de Schwarzkopf. El trabajo

realizado por la doctora y su equipo consiste en la investigación de los registros periodísticos precedentes al inicio de su labor para relevar los tornados ocurridos hasta la fecha y el relevamiento de los tornados que han sucedido desde entonces.

A la hora de contemplar la información de la que se dispone se debe tener en cuenta una serie de factores:

- La República Argentina carece de un programa de investigación y relevamiento de tornados. Por lo tanto, solo son relevados aquellos que han producido daños considerables.

- El servicio meteorológico nacional carece de un registro sistemático de tornados, tormentas severas y ráfagas descendentes.

En vistas de la situación, no es de extrañar que la información con la que se cuenta sea fragmentada y en muchos casos confusa. Sin embargo, esto no impide que se puedan obtener conclusiones relevantes a partir de la misma.

En el Apéndice B se adjuntan los mapas desagregados por nivel de la escala F de los tornados que se pueden apreciar en la Figura 17. Para recopilar dicha lista se ha recurrido a los trabajos de la doctora Schwarzkopf (16) y a la documentación complementaria al reglamento de cargas de viento CIRSOC (22) así como a los análisis de riesgo de tornado realizados para instalaciones que por su naturaleza requieren de un adecuado grado de protección:

- Central Nuclear de Embalse Río Tercero (23)
- Puente Rosario Victoria (24)

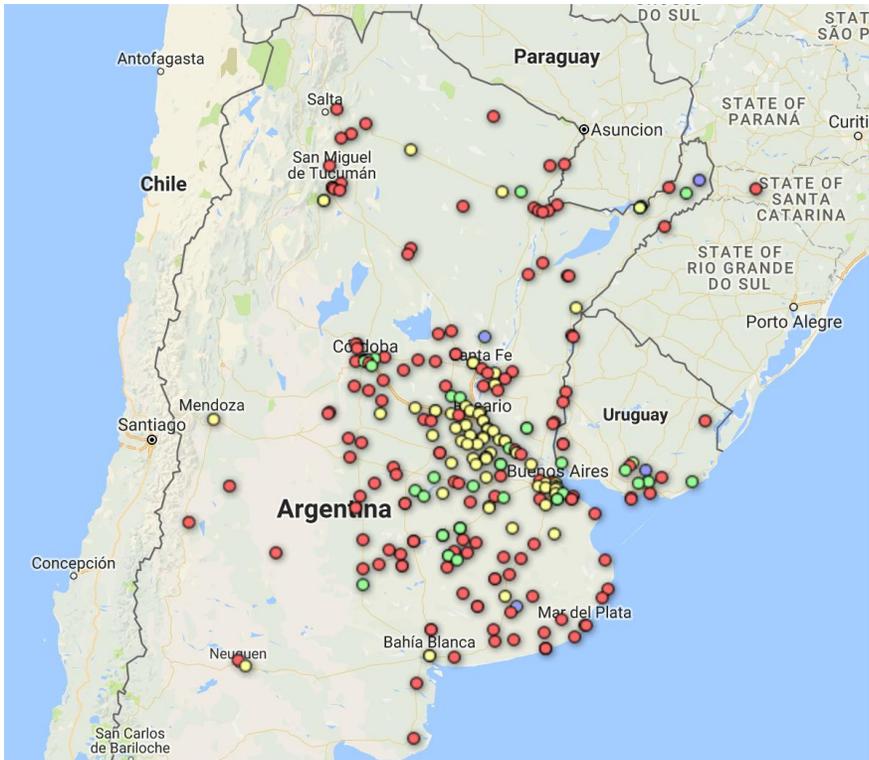


Figura 17: Recopilación de los tornados registrados en la República Argentina y la República Oriental del Uruguay. Puntos rojos: sin clasificación; puntos amarillos: F0, puntos verdes: F1, puntos azules: F2.

La Figura 18 presenta la distribución espacial de la frecuencia de tornados sobre la República Argentina, corregida por la influencia de la distribución geográfica de la densidad de población. La región A es la de mayor ocurrencia de tornados donde se estima una frecuencia de $2 \cdot 10^{-4} (\text{yr km}^2)^{-1}$ (25). Las regiones B y C tienen frecuencias de ocurrencia estimadas en 0.5 y 0.25 de las de la región A, respectivamente.

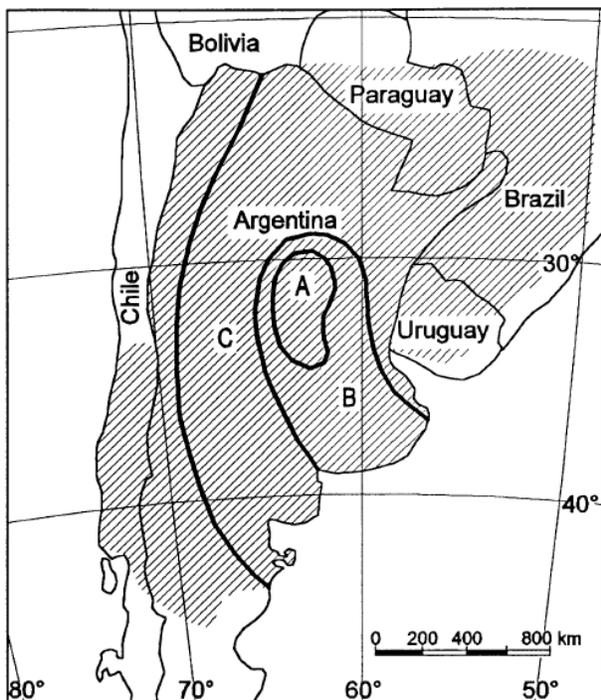


Figura 18: El mapa corresponde al reglamento CIRSOC (22). Se adoptó la versión presente en Goliger y Milford (25) debido a la mejor calidad.

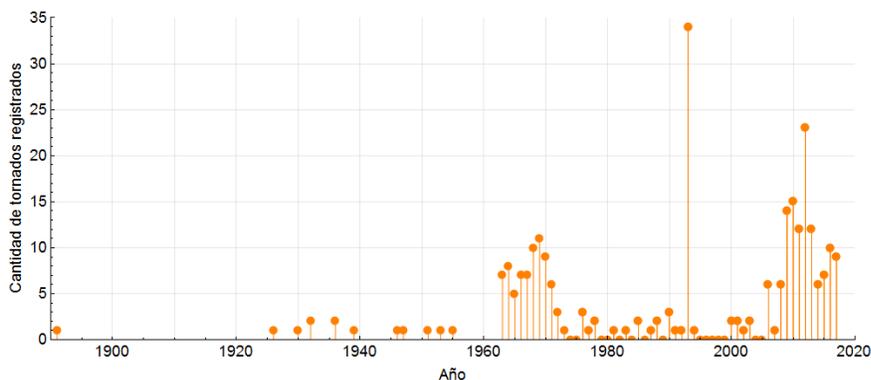
A partir de la información recabada se puede obtener las siguientes conclusiones de carácter general:

- La frecuencia de ocurrencia de tornados al oeste del meridiano de 65° (frontera entre las provincias de Córdoba y San Luis) es mucho menor que al este. Esta división es coincidente el desarrollo del sistema serrano de Comechingones. Es de suponer que la presencia de este sistema afecta las condiciones atmosféricas que dan lugar a la formación de tornados. Es importante considerar que en la región de Cuyo (Mendoza, San Juan y San Luis) se cuenta con un estudio detallado de los sistemas de tormentas para la prevención del granizo debido a la actividad vitivinícola que se desarrollan en la zona.
- Es evidente que al este del meridiano de 65° la densidad de tornados registrados es coincidente con la densidad poblacional (16). Por lo tanto, resulta lógico suponer que ciertos vacíos que se observan en el mapa no son representativos de la

distribución real de estos fenómenos, sino que se deben a que en áreas despobladas pasan desapercibidos.

- Los fenómenos registrados se encuentran concentrados en las zonas densamente pobladas. Esta particularidad de la distribución espacial de los registros es de especial interés en la zona norte de la provincia de Buenos Aires. Dado que las características geográficas y climáticas de la región son uniformes, es de esperar que la distribución espacial de tornados también lo sea. Por lo tanto, se concluye que gran cantidad de tornados simplemente no han sido registrados dado que han ocurrido en zonas rurales apartadas de los centros urbanos.

En la Figura 19 se aprecia la distribución temporal de los tornados con los que se cuenta en la base de datos. Es notorio el incremento de fenómenos a medida que pasa el tiempo y en especial durante la última década. Las posibles razones de este comportamiento en el registro están relacionadas al cambio climático (no se desarrollará esto en este trabajo). El pico correspondiente a 1993 se debe a que en abril de dicho año se produjo un fenómeno denominado como “tornado outbreak”. El mismo consiste en la ocurrencia de múltiples tornados (más de diez) debido a la presencia de condiciones particularmente favorables para la formación repetida de los mismos en un sistema de escala sinóptica ⁵. Si bien todavía no hay un consenso sobre qué parámetros se deben considerar para que una serie de tornados se clasifique como outbreak, el fenómeno de 1993 cubre con creces todos criterios propuestos.



⁵ Se entiende en meteorología por escala sinóptica a aquellos sistemas meteorológicos que varían en escala desde algunos cientos de kilómetros a algunos miles de kilómetros

Figura 19: Cantidad de tornados por año registrados en la base de datos confeccionada.

3.2. Estudio para la provincia de Buenos Aires

En la Figura 20 se pueden apreciar tres regiones S de análisis ubicadas en el norte de la zona pampeana. Es importante notar la correspondencia de los tornados registrados con las zonas densamente pobladas. Esta particularidad de la distribución espacial de los registros es de especial interés en la zona norte de la provincia de Buenos Aires donde las características geográficas y climáticas son relativamente uniformes, por lo que es de esperar que la distribución espacial de tornados también lo sea.

Los datos relevados indican que:

1. La región de estudio 1 (250km de lado) centrada en Rosario que cuenta con 55 tornados, lo que equivale a una tasa de ocurrencia de de $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ (yr km}^2\text{)}^{-1}$

2. La región de estudio 2 (250km de lado) centrada en Zárate que cuenta con 65, que se corresponde con las zonas más densamente pobladas, la cual posee una tasa de de $1.8 \cdot 10^{-5} \text{ (yr km}^2\text{)}^{-1}$

3. La región de estudio 3 (100km de lado) centrada en Capital Federal que cuenta con 27 tornados, para la que corresponde una tasa de $4.7 \cdot 10^{-5} \text{ (yr km}^2\text{)}^{-1}$.

Para calcular estas tasas se despreciaron los años previos a 1960 por la baja cantidad de tornados registrados, ver Figura 19.

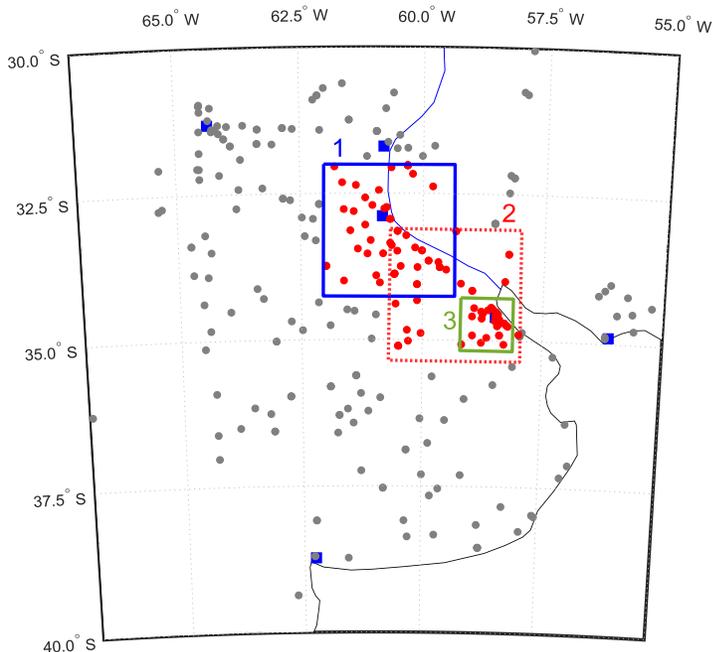


Figura 20: Regiones de estudio en el presente trabajo.

La comparación de las zonas 1 y 2 permite ver como la inclusión del área más densamente poblada incrementa notoriamente la tasa de tornados registrados. Como se ha discutido, la densidad poblacional en el área de estudio es el principal factor que impacta sobre la probabilidad de detección de un tornado cuando este ocurre, especialmente para fenómenos de baja a moderada intensidad. Finalmente, el área de análisis 3 es coincidente con la zona de mayor detección de tornados. Se puede apreciar que la tasa es 2.6 veces superior a la zona 2 y 3.13 veces la de la zona 1. Asumiendo que la zona 1 es representativa de la densidad poblacional promedio que se puede hallar sobre el corredor de tornados cuando se excluye el conurbano bonaerense, este dato indica que al menos 1 de cada 3 tornados no es registrado. Más interesante aún, la densidad de tornados indicada por en la documentación del CIRSOC (16) es, de acuerdo a la Figura 18, de $5 \cdot 10^{-5} (\text{yr km}^2)^{-1}$. Valor casi idéntico al calculado.

4. Naturaleza del riesgo

4.1. La definición del riesgo

La percepción, evaluación y manejo del riesgo son tareas que todos los individuos realizan a diario, en muchos casos de manera inconsciente, y por lo general resultando en un amplio espectro de respuestas frente a una misma situación. No es de extrañar entonces que haya una noción intuitiva del concepto de riesgo en las personas, que paradójicamente, se torna extremadamente opaca cuando se trata de darle una definición formal (26).

En el ámbito profesional, las distintas ramas de las ciencias e ingeniería suelen tener su propia definición de riesgo funcional al tipo de problemas que en cada una se encara. De modo general, el riesgo se puede definir como “la contingencia de un daño” (27). Esta definición implica inmediatamente que, para medir el riesgo, necesitamos medir la probabilidad de que un daño ocurra. Por su parte, (26) propone una definición acorde a los lineamientos de la institución de Ingenieros Químico (IChemE), en la que se entiende por riesgo a la probabilidad de que un determinado evento indeseado ocurra dentro de cierto período de tiempo o en determinadas circunstancias. Ambas definiciones son análogas y sirven de base para definir un modelo teórico que permita asignar valores cuantificables a la noción de riesgo.

Las definiciones presentadas del riesgo son fuertemente dependientes del concepto de probabilidad, pudiendo apreciarse en ambos casos una estructura común que combina dos componentes. En primer lugar, se define una circunstancia denominada *daño* para Solari o *hazard* para Hayns, siendo esta última una situación física con el potencial de producir lesiones, pérdidas de vidas, daños a la propiedad o el ambiente, o cualquier combinación de estos eventos (26). La segunda componente del riesgo es la valuación que se hace sobre la ocurrencia del daño o hazard, siendo esta de carácter probabilístico. Por lo tanto, el significado de aquello que se entienda por probabilidad es trasladado al concepto de riesgo. No podemos entonces hablar de riesgo sin definir primero a la probabilidad.

4.1.1. El concepto de probabilidad

Existe evidencia en la literatura hindú que en el siglo IX se había desarrollado una ciencia de las apuestas y un concepto de probabilidad aplicado a problemas tan diversos como estimar la cantidad de hojas en un árbol o los libros actuariales (28). Sin embargo, en lo que respecta a occidente, el concepto de probabilidad como se lo conoce hoy emerge a mediados del siglo XVII. Las razones por las cuales surgió en ese momento particular, o bien por las que no se desarrolló previamente, no son enteramente claras. En el mejor de los casos, se puede citar una lista de factores convergentes que incluyen las necesidades de un capitalismo en expansión, la consolidación de los estados, la capacidad de modelación y potencia aritmética de los números arábigos y una sociedad crecientemente secular, entre otros.

El concepto de probabilidad que surge en la Europa del siglo XVII es de naturaleza dual, estando integrado por dos nociones. Por un lado, se encuentra la concepción frecuentista de la probabilidad, la cual hace referencia a que, si un sistema presenta un comportamiento variable, inclusive hasta caótico, de todas formas las configuraciones que adopta se repiten con cierta regularidad. Luego, la probabilidad es entendida como la frecuencia asociada a cada posible configuración del sistema. El ejemplo clásico es el dado, donde la probabilidad es la frecuencia con que se registra cada posible valor (configuración del sistema). La otra noción de probabilidad entiende a la misma como una medida de la confianza de una persona de que el sistema en estudio adquiera una cierta configuración.

Múltiples autores han asignado diversos nombres a cada una de las nociones de probabilidad. En el presente trabajo se ha optado por denominarlas frecuentista y epistémica. Es importante notar que en diferentes ámbitos técnicos y científicos hay definiciones extremadamente precisas de que se entiende por cada caso, llegando a estar normalizado como en el estudio de la incertidumbre en la medición (29).

En principio parecería que la noción epistémica constituye un concepto más débil o endeble de probabilidad. No es de sorprender entonces que a lo largo de los siglos varios autores aseveren que solo la concepción frecuentista es la única válida. Sin embargo, también hay razones de peso para considerar lo contrario. Se suele argumentar que el método inductivo desarrollado por Hume descansa esencialmente sobre la base de una noción epistémica de la probabilidad. Cada vez que se realiza un experimento para poner a prueba una teoría se obtiene una muestra extremadamente limitada de un universo, que, en la práctica, es infinito. Una tirada de un dado,

o un millón de tiradas de un dado, no alcanzan para poder afirmar cual es el valor de la frecuencia de cada cara. Harían falta conocer los resultados de las infinitas tiradas de dados para poder conocer las probabilidades en un sentido frecuentista. De la misma manera, haría falta desarrollar un experimento en los infinitos puntos del universo en cada instante para validar una hipótesis. Luego, realizar el experimento una vez, o un número elevado de veces, inclusive cuando se obtenga siempre el mismo resultado es un indicio de la validez de la hipótesis evaluada. Algunos filósofos argumentan que el método científico es el procedimiento que permite establecer a la comunidad científica un nivel de confianza sobre las hipótesis en estudio. En este sentido, el conocimiento científico en su conjunto puede ser entendido bajo la óptica de la vertiente epistémica de la probabilidad.

4.2. Definición y cuantificación del riesgo en la Ingeniería

Cuantificar el riesgo implica cuantificar la probabilidad de un daño dentro de un intervalo de tiempo determinado. Luego, el riesgo en el marco de la ingeniería deberá ser interpretado de acuerdo al concepto de probabilidad empleado por esta. Entendiendo que la ingeniería aspira a dar una respuesta satisfactoria a un problema concreto dentro de los márgenes y condiciones impuestos por la realidad, en la práctica esto se traduce en que puede valerse de tantas nociones y conceptos de probabilidad como le sean necesarios en la medida que demuestren que le son útiles a fin que se propona y no se pierda de vista el concepto que se quiere reflejar. En palabras de Benjamin y Cornell (30).

«el ingeniero que aplica la probabilidad a sus modelos debe estar absolutamente seguro del significado de los valores asignados, dado que los resultados de un análisis probabilístico de un problema de ingeniería solo pueden ser de ayuda si los datos de entrada son significativos».

Un ejemplo de análisis de riesgo desarrollado por la ingeniería y ampliamente extendido en la sociedad es el análisis PERT (Project Execution Review Technique, por sus siglas en inglés). El PERT fue desarrollado en la década de 1950 para estimar la probabilidad de pagar punitivos por retrasos en la construcción del primer misil nuclear de la armada norteamericana (31). La complejidad técnica del proyecto, la necesidad de coordinar múltiples tareas en paralelo con interdependencias mutuas y la escala de los costos involucrados

escapaban a cualquier proyecto privado emprendido hasta la fecha. Estos factores impulsaron la necesidad de desarrollar un método simple de evaluar la probabilidad de que se materialice una amenaza (el retraso) a la cual se le podía asignar consecuencias cuantificables (punitivos). La facilidad de implementación combinada con el hecho de que prácticamente todas las ramas de la industria necesitaban de una herramienta de análisis de riesgo orientada al éxito de proyectos generalizaron rápidamente la adopción del análisis PERT. Al día de hoy, su extensión y generalización es tal que los resultados de este análisis se han transformando en un estándar interpretado de forma intuitiva, sin la necesidad de recurrir a un trasfondo probabilístico riguroso, sino que basándose en el know how sustentado en la experiencia adquirida.

El sustento probabilístico de un análisis PERT consiste en descomponer al proyecto en tareas individuales cuya duración es modelada mediante una variable aleatoria con distribución Beta (32). El uso de variables aleatorias parece indicar un concepto netamente frecuentista de la probabilidad. Sin embargo, los límites del intervalo en el que está definida la distribución y el valor esperado son obtenidos en base a la experiencia de los especialistas involucrados en el Proyecto. Estas distribuciones así definidas son una síntesis de las dos nociones mencionadas de probabilidad. La combinación de la relación de dependencia entre las tareas y su duración modelada mediante variables aleatorias permite expresar a la duración total del Proyecto como una variable aleatoria y calcular la probabilidad de excederse en los plazos.

Otro aspecto destacable del análisis PERT es que las organizaciones privadas y civiles que los llevan a cabo este tipo de proyectos suelen, con el transcurso del tiempo, recabar una base de datos de los tiempos efectivamente consumidos en las tareas de los proyectos. Esta base de datos es empleada para actualizar los tiempos asignados a cada tarea en base a la experiencia previa, es decir, una actualización Bayesiana de las probabilidades condicionales en base al conjunto de muestras disponibles. De esta forma, el límite entre una probabilidad de naturaleza frecuentista o epistémica se torna cada vez más borroso. El desarrollo de la teoría PERT sigue vigente hoy en día, donde se continúan proponiendo metodologías y formas de modelación alternativas (32).

Otro de los ejemplos clásicos de análisis de riesgo en el ámbito de la ingeniería es el estudio del riesgo sísmico. La naturaleza severamente destructiva de este tipo de fenómenos y su alto grado de variabilidad temporal, espacial y de intensidad, impulsó el desarrollo

de técnicas de análisis probabilístico (33) en primer lugar para infraestructuras críticas como centrales nucleares y embalses (26), y en la actualidad para toda la superficie del planeta⁶.

El estado del arte en la determinación de la amenaza sísmica incluye una combinación de técnicas probabilísticas con el fin de cuantificar la incertidumbre. Los análisis de amenaza sísmica tienen por objetivo determinar la tasa de ocurrencia de sismos de una cierta magnitud. Estos estudios están sujetos a dos fuentes de incertidumbre (34). Por un lado, se tiene la incertidumbre aleatoria producto de la variabilidad natural del fenómeno en estudio, la cual es cuantificada por los modelos probabilísticos empleados. La otra componente de la incertidumbre, denominada epistémica, cuantifica la incapacidad del modelo de efectivamente reflejar la realidad debido a las simplificaciones impuestas por las hipótesis adoptadas.

Un elemento central del estudio de amenaza sísmica es el modelo de atenuación, cuyo objetivo es estimar la distribución de probabilidad asociada a una medida de intensidad sísmica (la aceleración pico por ejemplo) en función de la magnitud del evento, la distancia y profundidad del epicentro, el tipo de fuente sísmica, el plano de falla, etc. En la última década el PEER (Pacific Earthquake Engineer Research) ha liderado el desarrollo de modelos de atenuación en base a un catálogo mundial de sismos (35). Si bien algunos de los modelos de atenuación desarrollados incorporan conceptos de modelos sismogénicos, todos están centrados en el ajuste de distribuciones de probabilidad a los datos estadísticos disponibles. Se trata entonces, de modelos de naturaleza frecuentista ajustados mediante estimación bayesiana a los datos estadísticos disponibles. Estos modelos están fuertemente condicionados por el conjunto de datos empleados en su generación. Cualquier sesgo u omisión del conjunto de registros sísmicos empleados para el ajuste del modelo se traduce en un sesgo del propio modelo. La relativa escasez de registros disponibles, en especial de sismos de gran intensidad, y su concentración espacial en países desarrollados que han invertido en redes sismológicas, induce sesgos inevitables cuando se desea modelar regiones pobremente instrumentadas. Esta incertidumbre epistémica producto de la incapacidad de los modelos de atenuación de reflejar la realidad debe ser incorporada al análisis, de lo contrario, se obtendrían resultados sesgados y con una dispersión irrealistamente baja que conduce a una subestimación de la probabilidad de sismos de elevada intensidad. Para ello, el estado de la práctica recomienda

⁶ <http://www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP/>

hacer uso de un árbol lógico de donde se combinan los resultados pesados de los modelos empleados (36) (37). Por lo general, los pesos atribuidos a cada rama del modelo son expresiones netamente epistémicas de probabilidad, producto del consenso de la comunidad de especialistas. También se han propuesto técnicas cuantitativas de pesado en la que los factores de peso son en parte determinados por los registros sísmicos disponibles para la región en estudio (38).

En muchos casos a la ingeniería se le presenta la necesidad de modelar fenómenos que, por su naturaleza, deben ser modelados de forma frecuentista mediante una distribución de probabilidad. Sin embargo, el conjunto de datos disponibles para alimentar la estimación de dicha distribución es nulo o insuficiente, por lo que se debe recurrir al juicio experto de aquellas personas que se encuentran familiarizadas con el problema. Existen diversos métodos disponibles para extraer esta información, considerando no solo la aleatoriedad propia del fenómeno, sino la incertidumbre propia de la estimación por el experto. Una de estas técnicas consiste en realizar una estimación bayesiana de los parámetros de la distribución. En primer lugar, se le solicita a la persona que estime las probabilidades de excedencia para valores límites (un mínimo y un máximo) de la variable a modelar y un grado de confianza sobre su estimación. Asumiendo que la variable a modelar sigue una distribución de Weibull, en base a la confianza expresada por el experto sobre la estimación de los valores límites, se puede establecer una distribución de probabilidad para los parámetros de la distribución de Weibull que refleje esta incertidumbre (39).

Como hemos visto en estos ejemplos, el estado de la práctica ingenieril entiende al riesgo como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento y las consecuencias del mismo, estando definido mediante variables aleatorias. De acuerdo con las metodologías modernas de cuantificación del riesgo, se debe caracterizar tres variables aleatorias: la exposición, la ocurrencia y el impacto (40). La exposición es una medida relacionada con la variable expuesta al daño (número de estructuras en el área sujeta a una amenaza climática, por ejemplo). La ocurrencia (o probabilidad de ocurrencia) define los valores esperados de “eventos indeseados” capaces de generar daño. Es importante aclarar que exposición y ocurrencia deben estar definidos de manera consistente: si es un complejo industrial expuesto a la amenaza, la probabilidad de ocurrencia debe referirse a todo el conjunto expuesto. Estas dos primeras variables en conjunto definen el concepto de “amenaza”, la cual es generalmente expresada mediante un período medio de

recurrencia. Por último, el impacto es una variable que describe el daño ocasionado de acuerdo a algún modelo que relacione la amenaza (la exposición más la ocurrencia) con las consecuencias potenciales que deben ser debidamente cuantificables. Es sencillo suponer que, así como la amenaza está definida por un tiempo medio de recurrencia, también lo estará el riesgo. De esta manera, es posible fijar límites de riesgo aceptables mediante valores admisibles de ocurrencia, siendo esta una decisión que escapa al ámbito técnico e involucra a la sociedad toda (27). Este enfoque del riesgo está incluido en los códigos modernos de diseño en ingeniería, ciencias, finanzas, etc., y se aplica incluso en litigios (26).

EL presente trabajo busca modelar la amenaza de un fenómeno climático severo, con especial énfasis en la modelación de la probabilidad de ocurrencia considerando un caso sencillo de exposición como se detalla más adelante. Para completar un marco teórico riguroso deberían estudiarse además los potenciales daños o pérdidas ocasionadas.

4.3. El concepto de riesgo aplicado a fenómenos naturales

El concepto de riesgo aplicado a eventos naturales adquiere una dimensión más amplia debido a las características propias de estos fenómenos. Dado que se trata eventos no manufacturados por el hombre, las condiciones que propician o mitigan su ocurrencia se encuentra casi por completo fuera de control. Si bien fenómenos como el cambio climático indican que la civilización humana ha alcanzado un grado de desarrollo en el que su accionar tienen serias consecuencias sobre la ocurrencia de fenómenos naturales, en términos generales, el hombre no ha adquirido un nivel de conocimiento que le permita el control de la naturaleza para la modificación sistemática y planificada del peligro. Tampoco es seguro que una civilización poseedora de tal conocimiento fuera a elegir un camino de acción que, a la luz de nuestro actual estado de desarrollo, pareciera el más favorable.

Los fenómenos naturales operan en escalas espaciales y temporales mucho mayores que los riesgos manufacturados. A su vez, los riesgos asociados a la actividad humana se encuentran limitados al ámbito donde esta se llevan a cabo ciertas actividades. Luego, una técnica muy simple y efectiva de reducción de riesgos manufacturados es la restricción de las actividades admitidas en el territorio. Esto tiene dos efectos beneficiosos: no solo se reduce drásticamente la exposición del público en general, sino que permite condensar las

medidas de mitigación. A su vez, la contención espacial del peligro permite dejar claramente delimitada la zona de exposición al mismo, forzando a los individuos a tomar conscientemente la decisión de exponerse o no. Es decir, hay una clara percepción de la presencia del peligro cuando ha sido circunscripto a ámbitos específicos. Para riesgos asociados a fenómenos naturales esta técnica de mitigación del riesgo no suele ser posible.

Finalmente, la escala temporal en la que operan los fenómenos naturales excede ampliamente la vida de las personas. Solo en los últimos siglos, con el avance sistemático de las ciencias naturales, hemos podido contemplar la verdadera magnitud del período de recurrencia asociado a estos eventos. Los niveles aceptables de riesgo actualmente requeridos por nuestra sociedad implican que los intervalos temporales asociados a los fenómenos a considerar para el diseño superan en al menos un orden de magnitud la duración de la vida humana. Por ejemplo, el reglamento argentino de acciones de viento sobre las estructuras (41), inclusive cuando no contempla fenómenos extremos, estima como valor de diseño la velocidad de viento con un período de retorno de 50 años, lo que equivale a una probabilidad anual de ocurrencia del 2%. Por su parte, el reglamento sísmico argentino (42) considera para el diseño de edificios de vivienda un evento sísmico con un período de retorno de 450 años, lo que equivale a un 10% de probabilidad de ser alcanzado o superado en 50 años. Evidentemente, frente a esta situación, la percepción intuitiva del riesgo producto de la evolución de nuestra especie queda fuertemente desactualizada y, como se verá, no ofrece un marco de referencia válido

Finalmente, los riesgos derivados de fenómenos naturales tienen una componente política y social inherente en la medida en que requieren de la acción coordinada de individuos e instituciones en una escala que solo puede ser comprendida por el estado. No obstante, es importante destacar que en las últimas décadas se ha incrementado notoriamente la participación de organizaciones civiles en las discusiones asociadas a los riesgos manufacturados, generalmente a partir del interés por la preservación del medio ambiente en relación a las actividades asociadas a la industria nuclear, minería y, recientemente, la producción agropecuaria. La necesidad de consensuar medidas de naturaleza política introduce en la evaluación y control del riesgo el componente de la percepción pública del mismo. Se impone entonces un sistema de manejo de riesgos que determina las medidas de mitigación y control, y por ende el grado de vulnerabilidad frente a los fenómenos naturales. En este sistema, la

percepción del riesgo por parte del público en general termina siendo un factor determinante en el verdadero grado de exposición que presenta la sociedad.

4.4. La percepción social e individual del riesgo

Diversos estudios demuestran que, en general, el criterio de decisión de las personas frente al riesgo no se ajusta al modelo de decisión racional, sino que se encuentra fuertemente influenciado por las características del proceso mediante el cual la persona adquirió la noción del riesgo. Weber (43) indica que las personas procesan la información por medio de dos sistemas diferentes. Por un lado, el hombre comparte con los demás animales un sistema afectivo de procesamiento de información que funciona sobre la base de la asociación espacial y temporal y la similitud. Bajo este sistema, una situación se juzga en base a su similitud con situaciones similares experimentadas por el individuo. El segundo sistema opera sobre la base de algoritmos y reglas. En comparación, este segundo sistema es más lento, requiere que el individuo sea consciente de su uso y posea el control necesario para llevarlo a cabo, no es innato, sino que se adquiere mediante la enseñanza requiriendo de una considerable práctica para su desarrollo y no necesariamente resulta evidente la necesidad de emplearlo en una determinada situación. Las valuaciones del riesgo realizadas por cada uno de estos sistemas suelen ser marcadamente diferentes y, por lo general, resulta predominante la valuación realizada mediante el sistema afectivo.

No solo influye el mecanismo de evaluación del riesgo, sino que la evidencia demuestra que las decisiones que toman los individuos se encuentran fuertemente influenciadas por cómo han adquirido la información de la presencia del riesgo. En particular, para eventos de baja probabilidad de ocurrencia, hay una marcada diferencia en las decisiones de riesgo tomadas en base información del riesgo obtenida a partir de la experiencia personal o a partir de una descripción estadística. En esencia, la percepción del riesgo bajo condiciones de muestreo repetido parece seguir el modelo clásico de aprendizaje reforzado en el que las impresiones iniciales son constantemente actualizadas de forma tal que los eventos más recientes poseen un mayor peso. Dado que es poco probable que eventos altamente infrecuentes hayan ocurrido recientemente, o haya sido experimentado en absoluto, estos eventos tienen un peso menor sobre las decisiones del que su probabilidad de ocurrencia justifica. En forma complementaria, cuando el evento ocurre, su peso sobre las

decisiones resulta sobredimensionado. Otro efecto negativo de este comportamiento es cuando se llevan a cabo medidas que no tienen ningún efecto beneficioso. Como la decisión está generalmente seguida de un resultado aparentemente positivo, producto en realidad de que no se ha materializado el riesgo debido a la baja probabilidad de ocurrencia, se refuerza incorrectamente la idea de que la decisión tomada es correcta. Esto no solo induce una falsa sensación de protección, sino que además dilapida recursos que, generalmente son escasos.

Inclusive cuando en lugar de tomar decisiones en base a la experiencia previa, las personas son directamente informadas sobre la probabilidad asociada a un cierto evento, las decisiones no son están libres de condicionantes. En economía se define al modelo de decisión racional aquel en el que las posibles opciones son comparadas por medio del producto entre la probabilidad de ocurrencia y la posible ganancia (positiva) o pérdida (negativa). Bajo la noción frecuentista de probabilidad, si las decisiones son tomadas bajo este modelo eligiendo siempre la opción que maximiza las ganancias o minimiza las pérdidas, a la larga el efecto acumulado maximiza los beneficios. Los fenómenos ya descritos indican que la forma en que los individuos asimilan y procesan los riesgos no se ajusta a este paradigma. Pero, lo que puede resultar aún más desconcertante es que inclusive cuando se solicita a los individuos que tomen una decisión luego de haber sido informados de la probabilidad de ocurrencia de las diversas opciones y las consecuencias entre las alternativas presentes, los resultados siguen siendo fuertemente influenciados por factores externos apartándose del modelo de decisión racional. Eiser (44) presenta la bibliografía que sustenta el hecho de que las preferencias en la toma de decisiones pueden ser sensiblemente alterada por el mero hecho de alterar la forma en que es descrito el problema. Frente a una decisión que involucra dos posibles opciones, cualquiera de ellas puede ser formuladas en términos de ganancia o de pérdidas. La forma en que enuncian las opciones influye en cuál de ellas es elegida, pese a que esto no afecta la ganancia o pérdida intrínseca de asociada a cada una de las alternativas.

		RESPUESTA COMO	
		PELIGROSA	SEGURA
SITUACIÓN REAL	PELIGROSA	ACIERTO	FALSA ALARMA
	SEGURA	ERROR	ACIERTO

Figura 21: Combinaciones de decisión-riesgo y resultados.

Los aspectos mencionados sobre el sistema intuitivo de percepción y manejo del riesgo innato en las personas son producto del hecho de que este no evolucionó para responder a los escenarios que plantea la civilización actual. Estamos esencialmente equipados con un conjunto de herramientas de adquisición y procesamiento del riesgo que han probado ser sumamente exitosas para su manejo a una escala de desarrollo mucho menor, pero que no se han adaptado a las nuevas circunstancias de la condición humana. Esto queda en evidencia cuando se analiza los distintos tipos de influencias conocidas sobre las decisiones que toman los individuos:

- Por lo general, eventos en un futuro lejanos son construidos en términos abstractos, mientras que eventos cercanos son expresados de forma concreta mediante asociación y, por ende, desencadenan respuestas emocionales
- Existe evidencia que indica que la percepción del riesgo está fuertemente influenciada por la cultura a la cual pertenecen las personas.
- La familiaridad o cotidianidad de un cierto riesgo provoca en general que las personas tiendan a menospreciarlo.

Finalmente, se debe considerar las consecuencias de las acciones tomadas en relación al riesgo, en especial teniendo en cuenta que el público en general reacciona de acuerdo al modelo de aprendizaje reforzado. El escenario que se le presenta a los individuos a cargo de tomar las decisiones puede ejemplificarse mediante el diagrama de la Figura 21. Frente a indicios que sirvan de advertencia de que se va a materializar un riesgo se debe decidir si se actúa como si la situación fuera segura o peligrosa. A su vez, la situación puede ser efectivamente peligrosa o segura. Cuando se trata de una situación peligrosa y se actúa de forma acorde se está frente a un

acierto. En cambio, cuando se actúa como si la situación fuera segura, se está frente a un error. Si la situación era segura y se la trata como peligrosa se está frente a una falsa alarma, mientras que una situación segura tratada como tal también implica un acierto del sistema. Los individuos a cargo de la toma de decisiones deben adoptar algún criterio que establezca el nivel deseado de aciertos y falsas alarmas. Por lo general, reducir las falsas alarmas conlleva un incremento de los errores y viceversa. El incremento de las falsas alarmas conlleva el riesgo de que la población se acostumbre a las mismas y deje de responder de forma acorde al riesgo que se pretende prevenir, en cambio, un nivel elevado de errores corroe la confianza del público. En general, no existe ningún criterio que sea intrínsecamente mejor que otros sobre el grado de falsas alarmas y fallos aceptables.

4.5. El riesgo de tornados en la República Argentina

El riesgo se ha transformado en uno de los ejes centrales en torno a los cuales se organizan la vida en sociedad. Esto es producto, en parte, del nivel creciente de complejidad e interdependencia de las actividades humanas, combinado con las capacidades recientemente adquiridas para la transformación del medio ambiente y los riesgos derivados de las tecnologías desarrolladas por el hombre. A su vez, el desarrollo económico, político y social experimentado desde la revolución industrial ha elevado los estándares de vida de la población en general, y consecuentemente, reducido significativamente los riesgos aceptables. Por ejemplo, si tomamos como criterio de aceptación para un diseño tecnológico (una presa, una central nuclear, un auto, etc...) que la probabilidad de muerte como consecuencia del mismo sea del mismo orden, o menor, que la probabilidad de muerte por causas naturales, el incremento de la esperanza de vida en los últimos siglos se traduce en una reducción el nivel de riesgo aceptable. Por ejemplo, para una sociedad con una tasa de mortalidad infantil de principios del siglo XIX, la disminución del riesgo producto de emplear un asiento adecuado para el automóvil es ridícula. En términos relativos, el costo de oportunidad frente a otras mejoras es negativo.

En este contexto, una cuantificación adecuada del riesgo en una herramienta central para la planificación a mediano y largo plazo. En particular, cuando estos riesgos tienen una componente político-social determinante, como es el caso de los fenómenos naturales, se requiere de un tratamiento claro y sistemático que evite o minimice la influencia negativa de los sesgos cognitivos. El primer

paso en esta dirección consiste en contar con una estimación del riesgo clara y rigurosa, basada en la información disponible y abierta a la sociedad para su discusión. Solo en base a dicha herramienta se puede desarrollar un debate informado sobre las medidas a tomar. En este contexto, el ingeniero tiene un doble rol que cumplir. Su trabajo no debe limitarse a la mera estimación del riesgo, sino que es necesaria una tarea de docencia para la correcta interpretación de los resultados por parte de la sociedad.

La ocurrencia de tornados en la República Argentina es fenómeno escasamente estudiado y en general desconocido, que no pasa de una noticia de interés general que se produce con cierta frecuencia. El potencial destructivo de estos eventos requiere de un análisis de riesgo adecuado y una discusión acorde sobre las medidas a tomar. El desarrollo que se presenta a continuación pretende proporcionar las herramientas para dar comienzo a esta tarea proponiendo un marco teórico para su análisis. Para ello se busca modelar la amenaza de la ocurrencia de tornados, con especial énfasis en la modelación de la probabilidad de ocurrencia considerando un caso sencillo de exposición. Un marco teórico de mayor rigurosidad debería incluir además el estudio los potenciales daños o pérdidas ocasionadas.

5. Evaluación del riesgo por tornados

El objetivo del estudio de riesgo consiste en determinar la probabilidad de excedencia de la velocidad del viento debido a la ocurrencia de tornados. Para ello se ha definido un marco probabilístico robusto que permita abordar el problema y una metodología numérica que cualifique la probabilidad de ocurrencia del evento aleatorio ocurrencia de tornado y el potencial daño sobre un objetivo a evaluar.

A los fines del presente trabajo el riesgo queda definido por el período de retorno asociado a la excedencia de un cierto nivel de velocidad del viento debido a un tornado. Los reglamentos de cargas Cirsoc [Cirsoc102-2005] definen la sollicitación sobre las estructuras debida a la acción del viento a partir de velocidades básicas de diseño. Por lo tanto, la definición del riesgo adoptada permite cuantificar de forma directa la probabilidad de que se superen los niveles de carga de diseño, sin estar asociados a una tipología estructural en particular. A su vez, la velocidad del viento suele ser el indicador asociados a otros tipos de daños, como los causados por el vuelo de misiles generados por tornados, daños sobre elementos no estructurales como ser cosechas o árboles. Por lo tanto, al emplear la velocidad del viento se deja abierta la posibilidad de que los resultados del presente estudio puedan aplicarse a diversas áreas.

5.1. Modelo probabilístico del riesgo

En el presente estudio el riesgo será cuantificado mediante la probabilidad de excedencia de la velocidad del viento debido al tornado $P(V \geq v)$. Dado que las estructuras civiles se encuentran diseñadas bajo reglamento para resistir determinados niveles de velocidad del viento, se puede cuantificar el riesgo a partir de la velocidad misma. En el caso que se desee adaptar el modelo desarrollado para un caso en particular, basta con considerar una distribución de probabilidad del colapso en función de la velocidad del viento.

De esta forma, el riesgo está definido por la sucesión simultánea de dos eventos: la ocurrencia de tornados en la región en estudio, y el daño ocasionado por el tornado. Si se conoce la

probabilidad de ocurrencia de cada uno de estos eventos por separado, y se asume que ambos son estadísticamente independientes, la probabilidad de que sucedan ambos es el producto de las dos probabilidades. Por lo tanto, el riesgo asociado a un tornado resulta:

$$P(V \geq v \cap N_T = 1) = P(V \geq v/N_T = 1) P(N_T = 1) \quad (6)$$

Donde $P(N_T = 1)$ es la probabilidad de que se produzca un tornado en el tiempo de estudio T y $P(V \geq v/N_T = 1)$ es la probabilidad de que dicho tornado impacte en el blanco superando con una velocidad mayor a v . Para considerar la ocurrencia de múltiples tornados se recurre al teorema de la probabilidad total teniendo:

$$P(V \geq v) = \sum_{n=0}^{\omega} P(V \geq v \cap N_T = n) = \sum_{n=0}^{\omega} P(V \geq v/N_T = n) P_T(N = n) \quad (7)$$

De esta forma, se ha separado el problema en dos: a) por un lado la probabilidad de ocurrencia de eventos en el tiempo de análisis y b) la probabilidad de que ocurrido el evento se produzcan en el blanco en consideración vientos de velocidad V superior a un cierto valor v . La primera parte está definida por un modelo de ocurrencia de eventos en el tiempo como proceso aleatorio, y la segunda estará definida por un modelo estadístico de la naturaleza física del fenómeno analizado.

5.1.1. Proceso aleatorio de ocurrencia de tornados

El modelo probabilístico más utilizado en la predicción de este tipo de fenómenos es el proceso de Poisson (homogéneo). Las principales hipótesis de dicho modelo son que las ocurrencias de eventos en distintos periodos de tiempo son independientes entre sí, y que la tasa de ocurrencia se mantiene constante en el tiempo. Según este modelo, la probabilidad de ocurrencia de N eventos en un intervalo de tiempo T está dada por:

$$P(N = n) = \frac{(v T)^N}{N!} e^{-v t} \quad (8)$$

Donde v es la tasa media de ocurrencia de tornados en el tiempo. Reemplazando esta distribución en la formulación de probabilidad total, tenemos:

$$P(V \geq v, T) = \sum_{N=0}^{\infty} P(V \geq v/N = n) \frac{(vT)^n e^{-vT}}{n!} \quad (9)$$

El primero de los factores de la sumatoria define la probabilidad de excedencia de velocidad en el punto objetivo, dado que ocurrieron N sucesos climáticos. Si asumimos que la excedencia de la velocidad es independiente entre eventos climáticos diferentes, puede reescribirse este factor según,

$$P(V \geq v/N = n) = 1 - [1 - P(V \geq v \cap N = 1)]^n \quad (10)$$

Reemplazando esta igualdad en la probabilidad total, y por la propiedad de expansión de funciones en series, la expresión anterior puede escribirse como (45):

$$\begin{aligned} P(V \geq v, T) &= \sum_{N=0}^{\infty} (1 - [1 - P(V \geq v \cap N = 1)]^n) \frac{(vT)^n e^{-vT}}{n!} \\ &= 1 - e^{-vP(V \geq v \cap N = 1)T} \end{aligned}$$

Donde $P(V \geq v \cap N = 1)$ es la probabilidad de que en un tornado se supere la velocidad v en el punto objetivo.

5.2. Modelo de impacto de tornados

De acuerdo a lo desarrollado en el punto anterior, la implementación del modelo de Poisson para la ocurrencia de tornados permite computar la probabilidad de excedencia de la velocidad del viento para un período de exposición T , $P(V \geq v, T)$, en función de la probabilidad de que la velocidad v sea superada en un único evento, $P(V \geq v \cap N = 1)$.

Para la evaluación de la probabilidad de ocurrencia del evento $V \geq v$ dado que ha ocurrido un tornado en la región de análisis (S) se recurre nuevamente a la formulación de probabilidad total. Se desagrega y condiciona el evento por las distintas intensidades de tornado que se pueden registrar según la escala de Fujita mejorada (enhanced Fujita scale):

$$P(V \geq v) = \sum_{k=0}^5 P(V \geq v/F = F_k) P(F = F_k) \quad (12)$$

Donde $P(F = F_k)$ es la probabilidad de que ocurra un evento de intensidad F_k , y $P(V \geq v/F = F_k)$ Es la probabilidad de que ocurra el fenómeno $V \geq v$ en un evento de intensidad F_k .

La distribución de probabilidades de intensidades de tornado debe obtenerse a partir de datos estadísticos obtenidos en la región S. Una revisión de estos datos fue realizada en el capítulo anterior. También pueden utilizarse los trabajos realizados anteriormente en la zona (24) o en otras regiones de características similares (11). En el siguiente gráfico se ve una comparación de esta distribución obtenida a partir de los datos recabados para el presente trabajo, como se explicó en el capítulo anterior, y los mostrados en trabajos previos.

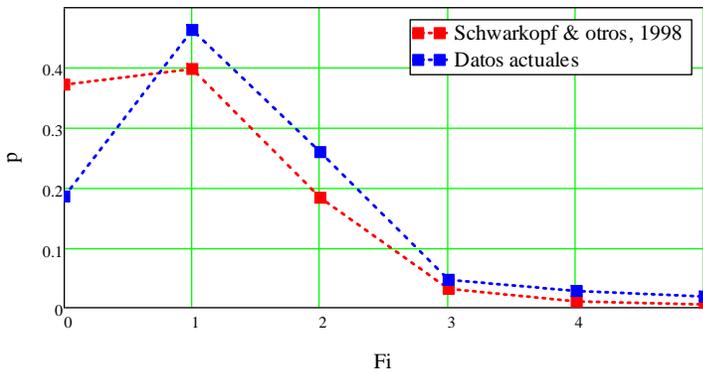


Figura 22: Comparación entre frecuencias relativas de intensidades de tornado $P(F = F_k)$, entre fuente actual de datos y trabajos previos

Para la obtención de valores numéricos en este trabajo se utilizará la curva de probabilidad de intensidades dada en (24) la curva roja de la Figura 22.

El cálculo del factor $P(V \geq v/F = F_k)$ requiere que, dada la ocurrencia de un tornado de intensidad F_k en la región de estudio, este impacte en el punto y objetivo y que la velocidad del viento supere el valor v . Se necesita entonces determinar la probabilidad de que el tornado impacte el punto objetivo y la probabilidad que, dado el impacto sobre el punto, la velocidad del viento exceda v .

5.2.1. Impacto de punto objetivo

Determinar la probabilidad de que un tornado impacte el punto objetivo, dado que se generó dentro del área de análisis, implica hallar la probabilidad que un área afectada por la traza de un tornado contenga al punto en cuestión (46). Al asumir de que los puntos de generación de tornados se distribuyen uniformemente dentro de la región S , la probabilidad de impacto para un tornado puede expresarse como la relación entre el área afectada por un tornado sobre el área total de la región de análisis S . Esto equivale a considerar que la probabilidad de impacto es la relación entre el área de todos los puntos donde debería generarse un tornado para impactar el punto objetivo, y el área total de análisis.

$$P(\text{impacto}) = \frac{A_0}{S} \quad A_0 \leq S \quad (13)$$

Donde A_0 es el área de la zona afectada por el tornado, a la cual se asume rectangular y es en sí misma una variable aleatoria. En general, se la modela como el producto de dos variables aleatorias: el largo de la traza (L) y el ancho (W).

$$A_0 = W L \quad (14)$$

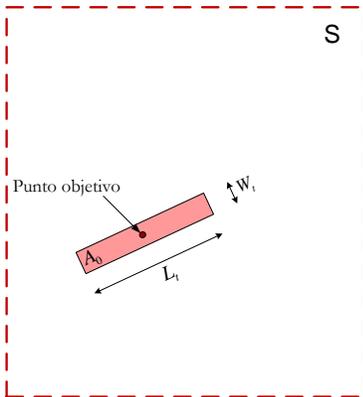


Figura 23: Probabilidad de impacto, relación de áreas.

Como se expresó en el Capítulo 2, las variables geométricas de la traza del tornado son variables aleatorias cuya distribución dependen de la intensidad del mismo. Por lo tanto, la estimación de la probabilidad de impacto requiere del conocimiento de las distribuciones condicionales $P(L/F_k)$ y $P(W/F_k)$. Una estimación de los rangos de valores de estas variables fue propuesta en la escala de Fujita-

Pearson. Sin embargo, el presente trabajo hace uso de un estudio mucho más reciente y exhaustivo realizado en los EE. UU., donde se ajustaron curvas de distribución del tipo Weibull a los registros estadísticos de ancho y largo de tornados en todo el territorio (13). Los parámetros de ajuste de estas distribuciones para cada intensidad se pueden consultar en la Tabla 4.

5.2.2. Campo de velocidades

En el punto anterior se determinó el procedimiento para calcular la probabilidad de impacto de un tornado de determinada intensidad F_k que se genera en un punto aleatorio (uniforme) de la región de análisis S. Resta entonces calcular la probabilidad de que la velocidad en el punto de impacto supere un determinado valor v^* . La velocidad varía fuertemente a lo largo y ancho de su traza, y en general, los valores picos son alcanzados durante unos pocos segundos del fenómeno.

La distribución de velocidades dentro de un tornado depende de la distribución tridimensional de presiones, de la cantidad de vórtices que se generen dentro de la traza, y otras variables físicas y climáticas. Se han propuesto diversos modelos de campos de velocidades asumiendo ciertos perfiles de velocidades o fórmulas empíricas, aunque ninguno llegue a modelar explícitamente todas las variables que intervienen. En (46) puede verse un análisis resumido de los perfiles de viento a lo ancho del tornado, y además una estimación de la variación de la intensidad del tornado a lo largo de su recorrido.

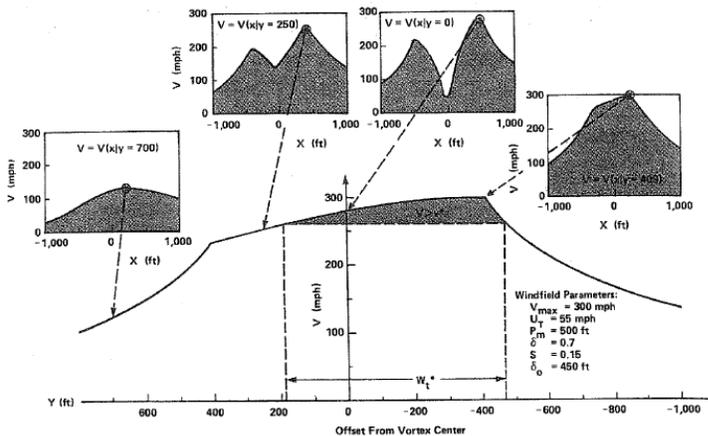


Figura 24: Distribución de velocidades de viento en la traza de un tornado (46).

En este trabajo se hace uso en el enfoque determinístico propuesto en el estudio del Pacific Northwest National Laboratory (11) donde, basándose en datos estadísticos recopilados durante numerosos tornados y modelos de tornado, se estimó la variación de los máximos vientos a lo largo y ancho de la traza del tornado. Estos resultados pueden ser resumidos en una matriz que representa las fracciones de área correspondientes a distintos rangos de velocidades (identificados con una dada intensidad de Fujita) dentro de un tornado de intensidad máxima cualquiera.

Tabla 5: Distribución de áreas de intensidad de velocidades para distintas intensidades máximas según (11).

Velocidad real		Intensidad de tornado registrada					
EF	km/h [mph]	F0	F1	F2	F3	F4	F5
0	104.6-136.8 [65-85]	1	0.772	0.616	0.529	0.543	0.538
1	138.4-177 [86-110]	0	0.228	0.268	0.271	0.238	0.223
2	178.6 - 217.2 [111-135]	0	0	0.115	0.133	0.131	0.119
3	218.8 - 265.5 [136-165]	0	0	0	0.067	0.056	0.07
4	267.1 - 321.8 [165-200]	0	0	0	0	0.035	0.033
5	>321.8 [>200]	0	0	0	0	0	0.017

Esta tabla indica, leyendo por columna de abajo hacia arriba, que dado un tornado de intensidad máxima F_2 , solo un 11.5% del área afectada por dicho tornado será alcanzada por velocidades de viento correspondientes a dicha escala; en el 26.8% las velocidades corresponderán a una intensidad F_1 y en el restante 61.6% a una F_0 . En otras palabras, esta matriz transforma áreas basadas en eventos de registro de tornado (al tornado se lo registra según su intensidad máxima) en áreas basadas en intensidad de los mismos (velocidad de viento).

Por lo tanto, la probabilidad de excedencia dada una determinada intensidad será la probabilidad de impacto, pero con una intensidad dada de velocidades de viento.

$$P(V \geq v_i / F = F_k) = P(\text{impacto}) E_{ik} = \frac{W_k L_k}{S} E_{ik} \quad (15)$$

Donde v_i corresponde a la velocidad mínima para la intensidad de tornado i según escala de Fujita, y E_{ik} es el coeficiente de la matriz de la Tabla 8.

Reemplazando en la ecuación (8) se obtiene que la probabilidad de excedencia de una determinada velocidad (en este caso se consideran las velocidades mínimas de cada intensidad en la escala de Fujita) dada la ocurrencia de un tornado en la región de análisis.

$$P(V \geq v) = \sum_{k=0}^5 \frac{W_k L_k}{S} E_{ik} P(F = F_k) \quad (16)$$

Entonces, la probabilidad de excedencia en un período de tiempo T para un punto objetivo está dada por,

$$P(V \geq v, T) = 1 - \exp \left[-v T \sum_{k=0}^5 \frac{W_k L_k}{S} E_{ik} P(F_k) \right] \quad (17)$$

Como puede verse de la expresión para la probabilidad de excedencia, esta depende de los valores W_k y L_k que son a su vez variables aleatorias. Esto implica que la probabilidad de excedencia es, a su vez, otra variable aleatoria cuyas propiedades estadísticas deben determinarse.

5.3. Evaluación del riesgo

Una vez planteado el modelo probabilístico de riesgo, como se hizo en los puntos anteriores, es necesario definir un método mediante el cual se puedan obtener valores numéricos de las probabilidades de excedencia. Los métodos analíticos parecen presentar serias limitaciones al analizar las expresiones de excedencia ya vistas, por lo que se propone un método de simulación

5.3.1. Consideración de incertidumbres

Todo modelo probabilístico tiene como objetivo primordial poder cuantificar y acotar las incertidumbres inherentes a la interpretación humana de todo fenómeno físico. Estas incertidumbres se pueden clasificar en tres tipos según Haldar (47):

1. Incertidumbre aleatoria: Es la asociada a la incertidumbre inherente en la predicción de todo fenómeno físico. Esto es, mediciones repetidas de la misma magnitud física no entregan el mismo valor, debido a numerosas fluctuaciones en el medio ambiente, el procedimiento de muestreo, los instrumentos, el observador, etc. Esta incertidumbre no puede ser reducida indefinidamente mediante un mayor muestreo de datos, o modelo de análisis. En el caso de estudio, se sabe que las velocidades de viento dentro de un tornado, su intensidad, el número de ocurrencias en el área de estudio, entre muchos otros factores, son todos componentes de la incertidumbre aleatoria del fenómeno analizado. Este tipo de incertidumbre es modelado de manera directa en el modelo probabilístico a través de las funciones de distribución de probabilidad utilizadas para los distintos parámetros. Por ejemplo, en el modelo de Poisson utilizado para modelar la ocurrencia de tornados, la distribución de Weibull utilizada para definir el ancho y largo de la traza del tornado, etc.

2. Incertidumbre estadística: Es la asociada al modelo y a los datos de entrada del modelo. Esta incertidumbre incluye errores en la estimación de las distribuciones de las variables a partir de una cantidad limitada de datos: tasa media de ocurrencia de tornados, velocidades de viento para cada intensidad de tornado, distribución de intensidades de tornado y la correlación entre las mismas.

3. Incertidumbre de modelado: Es la asociada al modelo físico - matemático utilizado para representar un fenómeno físico, que siempre incluirá aproximaciones y simplificaciones. Los modelos matemáticos, por complejos que sean, solo logran representar ciertos aspectos de un fenómeno físico convenientemente seleccionados. En el caso de estudio, la incertidumbre de modelado puede observarse, por ejemplo, al aproximar la traza del tornado por un rectángulo, o al asumir una distribución de velocidades dentro del tornado muy simplificada. La incertidumbre estadística y de modelado se cuantificarán de manera conjunta en el presente estudio a través de una variable aleatoria x , de media unitaria y desvió acorde a la magnitud de las incertidumbres, que según trabajos previos muestran desvíos

cercanos a uno (coeficiente de variación del orden del 100%). Ver (11), (46) y (22)

$$P(V \geq v, T) = 1 - \exp \left[-v T \sum_{k=0}^5 \frac{W_k L_k}{S} E_{ik} P(F_k) \right] \quad (18)$$

Otro método, presentado en (46) incorpora estas incertidumbres directamente a través de los inputs, considerando cotas inferiores y superiores de los mismos

Existe una componente adicional de la incertidumbre de modelado que no fue mencionada en el párrafo anterior, por tener un tratamiento distinto dentro del modelo propuesto. Es la asociada al método numérico utilizado para hallar las probabilidades buscadas. Esta depende, en general, de la complejidad del método y de la capacidad de representar las variables utilizadas. En el caso del método de simulación, este tipo de incertidumbre es de menor magnitud relativa, y está asociado al número de ciclos de simulación realizados. Se cuantifica mediante intervalos de confianza de los valores finales hallados, como se verá a continuación.

5.3.2. Método de simulación de tornados

La probabilidad de excedencia de la velocidad de viento en un punto es también una variable aleatoria (ya que W , L y ξ son variables aleatorias). Como tal, deben determinarse sus parámetros probabilísticos (por ejemplo, su media y su varianza). Para este trabajo se propone un método de simulación para obtener la media y el desvío de la probabilidad de excedencia, suponiendo conocidas las distribuciones de las demás variables aleatorias.

A continuación, se enumeran los pasos del método para el caso de los tornados:

1. Se simularán $N = 10^6$ tornados de cada intensidad. En total, se tendrán $N (F_{max} + 1)$ tornados simulados

2. Se genera el ancho y largo de traza para cada tornado simulado según funciones de distribución de Weibull $f_L(L/F_k) = Weibull(\alpha_k^L, \beta_k^L)$ y $f_W(W/F_k) = Weibull(\alpha_k^W, \beta_k^W)$.

Los parámetros que caracterizan estas funciones de densidad se obtienen de la Tabla 4.

3. Se obtiene el área de impacto de cada tornado $A_{f,i} = L_{f,i} W_{f,i}$ donde $f = 0, \dots, F_{max}$ e $i = 1, \dots, N$

4. Se obtiene la matriz de áreas ajustadas por intensidad de viento. Al área de impacto de cada tornado, correspondiente a cada intensidad, se la desagrega en distintas sub-áreas correspondiente a la distribución de velocidades $A_{f,i,k}^* = A_{f,i} E_{k,f}$ con donde $k = 0, \dots, F_{max}$.

5. Se genera una variable de incertidumbre aleatoria ξ según una distribución lognormal de media unitaria y desvío unitario, $f_{\xi}(\xi) \rightarrow LogNorm$. Se afecta a cada área obtenida en el punto anterior, con un valor de incertidumbre dado por la muestra de ξ generada:

$$A_{f,i,k}^{**} = \xi_{i,k} A_{f,i,k}^*.$$

6. Dividiendo A^{**} por la superficie de la región considerada $S = (205 \text{ km})^2$ se tiene la probabilidad de, dado que sucede un tornado, el blanco puntual esta expuesto a vientos comprendidos al rango asociado a cada nivel de la escala F. De esta forma, se obtiene para cada tornado $P(v_k \leq V \leq v_{k+1}/T = 1 \cap F = F_j)$. A partir de esta probabilidad se obtiene la probabilidad de excedencia de la velocidad de viento mediante:

$$P(V \geq v, T) = 1 - \exp \left[-v T \sum_{k=0}^5 \frac{W_k L_k}{S} E_{ik} P(F_k) \right] \quad (19)$$

Se cuenta con $N = 10^6$ estimaciones de la probabilidad de excedencia, por lo que se puede construir un histograma de frecuencias. Por ejemplo, en la se presenta el histograma de $P(V \geq v_5/T = 1 \cap F = F_5)$. Los gráficos restantes se pueden consultar en el Apéndice 3.

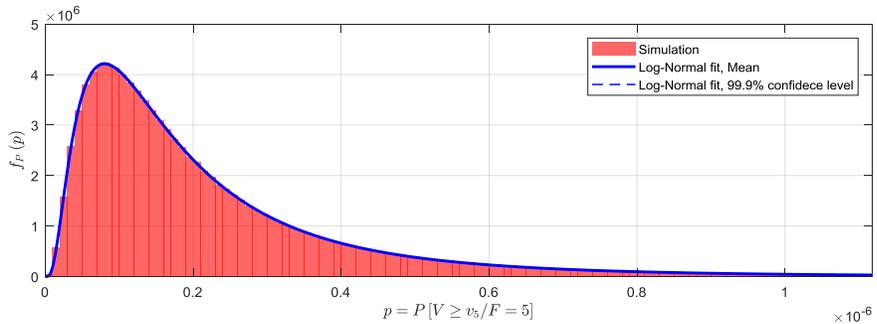


Figura 25: Probabilidad de excedencia $P(V \geq v_5)$ dado un tornado F5.

7. Con los datos obtenidos se realiza un ajuste por máxima verosimilitud a fin de obtener un estimador puntual de la probabilidad de excedencia. Los resultados obtenidos indican que las probabilidades de excedencia condicionadas a un cierto valor de la escala de Fujita

$P(V \geq v_i / T = 1 \cap F = F_k)$ presentan un buen ajuste con

distribuciones de Weibull, mientras que la probabilidad de excedencia total $P(V \geq v_i / T = 1)$ se comporta como una

distribución log-normal. En la FIG y las figuras del Apéndice 3 Anexo 3 se puede apreciar el ajuste medio y los límites del ajuste para un nivel de confianza del 95%. Se observa que la dispersión del intervalo es muy reducida, por lo que se

desprecia la incertidumbre propia del ajuste. Los parámetros resultantes del ajuste de máxima verosimilitud de

excedencia de la velocidad del viento en función de la escala F se puede consultar en la Tabla 8 y Tabla 9.

Tabla 6: Parámetro μ del ajuste de log-normal para la probabilidad de excedencia de la velocidad del viento en función de la escala F.

F	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
0	-12.54	-	-	-	-	-
1	-12.23	-13.70	-	-	-	-
2	-12.15	-13.11	-14.31	-	-	-
3	-11.78	-12.53	-13.39	-14.48	-	-
4	-11.39	-12.18	-12.91	-13.82	-14.84	-
5	-10.68	-11.45	-12.16	-12.89	-13.90	-15.64
Total	-12.12	-13.80	-15.39	-17.12	-18.57	-20.94

Tabla 7: Parámetro σ del ajuste de log-normal para la probabilidad de excedencia de la velocidad del viento en función de la escala F.

F	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
0	1.651	-	-	-	-	-
1	0.930	0.930	-	-	-	-
2	0.850	0.850	0.850	-	-	-
3	0.834	0.834	0.834	0.834	-	-
4	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	-
5	0.834	0.834	0.834	0.834	0.834	0.834
Total	0.721	0.575	0.568	0.543	0.620	0.834

8. Empleando el modelo de Poisson se determina la probabilidad de excedencia de la velocidad del viento para el tiempo de exposición $T = 50$ yrs.

$$P(V \geq v_i) = \left\{ 1 - \exp \left[-v T \sum_{k=0}^5 P(V \geq v_i/T = 1 \cap F = F_k) P(F = F_k) \right] \right\} \quad (20)$$

Se obtiene la tasa de excedencia y períodos de retorno del evento $V \geq v_i$ mediante:

$$\lambda_i = v \sum_{k=0}^5 P \left(V \geq v_i^* / T = 1 \cap F = F_k \right) P(F = F_k) \quad (21)$$

$$TR_i = \frac{1}{\lambda_i}$$

Como se puede apreciar en la Figura 25, se dispone de un estimador de las probabilidades de excedencia $P(V \geq v_i / T = 1 \cap F = F_k)$. Por ejemplo, en la Figura 26 se puede apreciar el valor medio y los percentiles 2.5% y 97.5% de la probabilidad de excedencia $P(V \geq v_i / T = 1 \cap F = F_5)$ para un tornado F5. Gráficos para los otros niveles de la escala de Fujita se presentan en el Apéndice C.

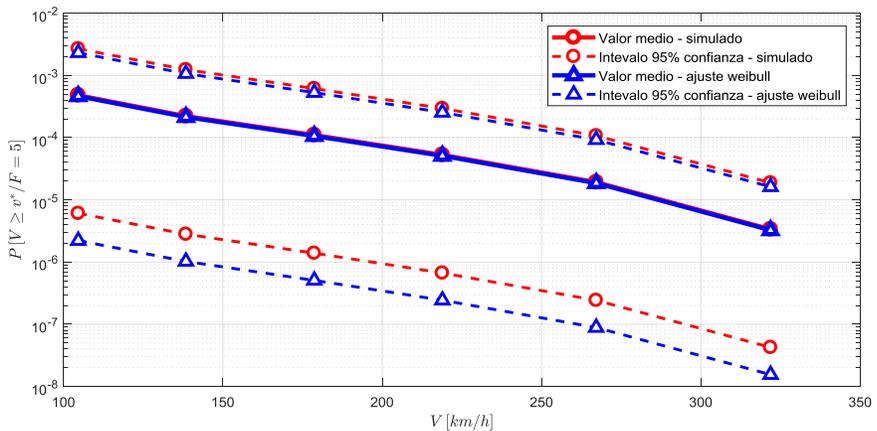


Figura 26: Probabilidad de excedencia para un tornado F5.

Esta dispersión se traslada a las probabilidades de excedencia totales $P(V \geq v_i)$, las tasas λ_i y los períodos de retorno TR_i . Cada una de las $N = 10^6$ simulaciones ofrece un estimador de $P(V \geq v_i / T = 1 \cap F = F_k)$ para todas las velocidades v_i en todo el rango F_k , por lo que

5.4. Resultados

Debido a las razones mencionadas en el punto 3.2, se consideran 3 tasas de ocurrencia de tornados. Para cada una de ellas se determina el período de retorno de la excedencia de la velocidad del viento asociada a cada nivel de la escala F. A su vez, se computa la tasa de excedencia y la probabilidad de excedencia. Los resultados correspondientes a la tasa de ocurrencia de tornados de acuerdo al CIRSOC se pueden apreciar en las Figura 27 a Figura 29.

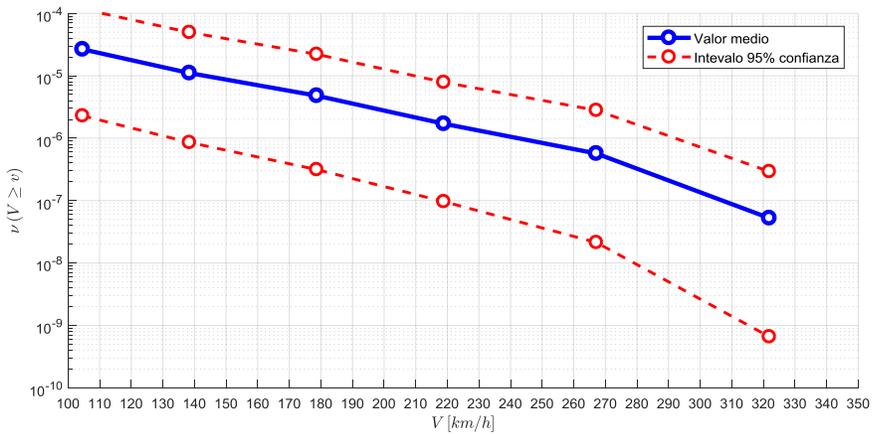


Figura 27: Tasa de excedencia de la velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados indicada por el CIRSOC (22).

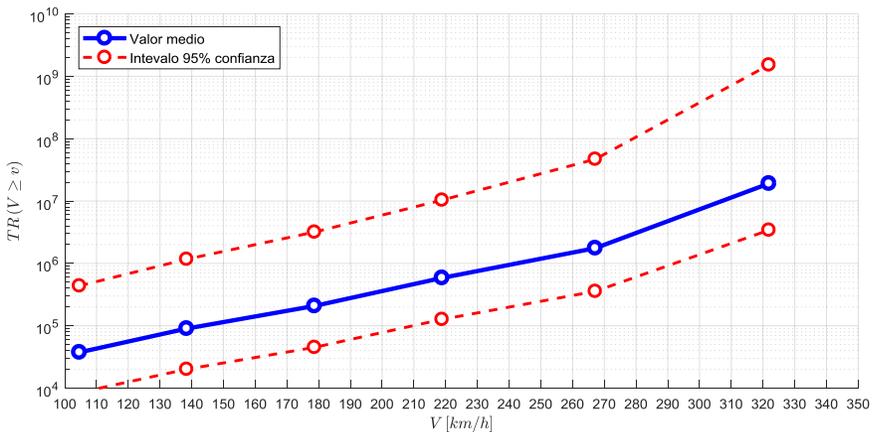


Figura 28: Período de retorno de la excedencia velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados indicada por el CIRSOC (22).

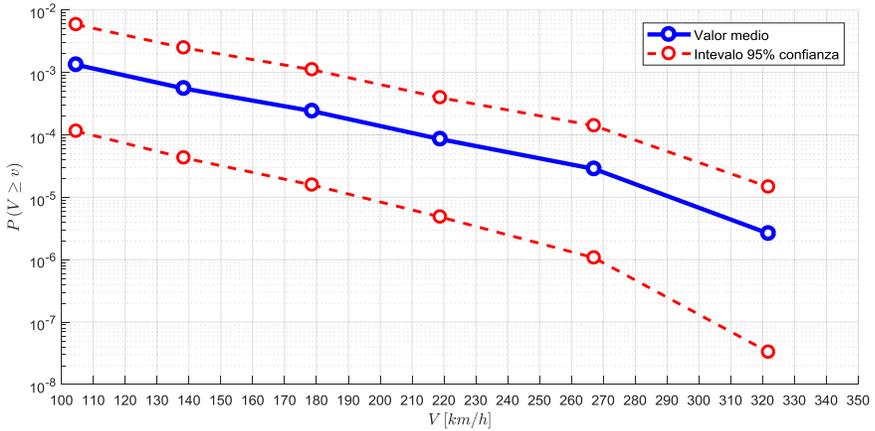


Figura 29: Probabilidad de excedencia de la velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados indicada por el CIRSOC (22).

Para las tasas de ocurrencia estimadas a partir del estudio estadístico realizado, los resultados obtenidos se pueden apreciar en las Figura 31 a Figura 38. Se aprecia claramente que la modificación de la tasa de ocurrencia de los tornados impacta fuertemente sobre la tasa de excedencia de la velocidad del viento.

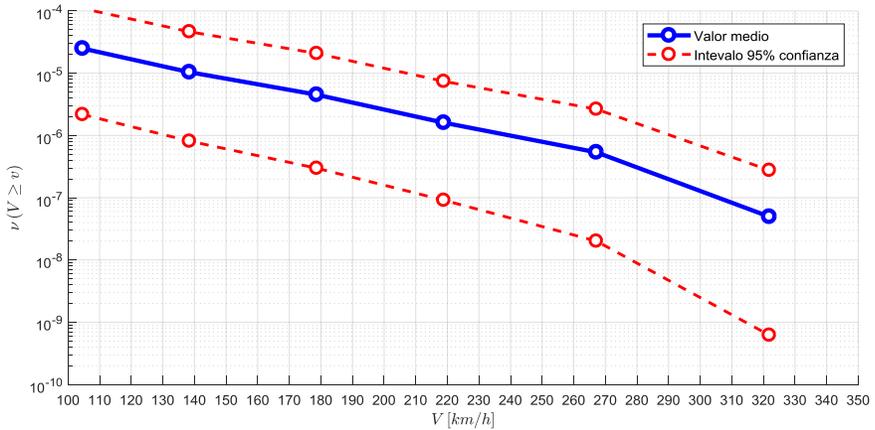


Figura 30: Tasa de excedencia de la velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados $\nu = 4.7 \cdot 10^{-5} (km^2 yr)^{-1}$.

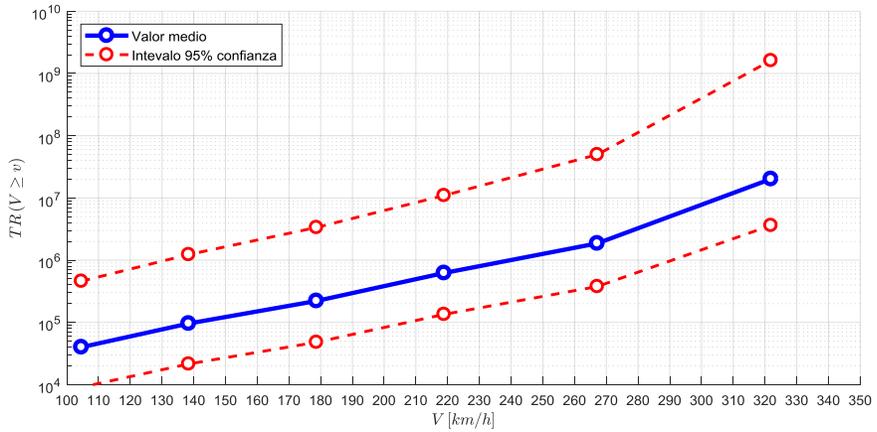


Figura 31: Período de retorno de la excedencia velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados $\nu = 4.7 \cdot 10^{-5} \text{ (km}^2 \text{ yr)}^{-1}$.

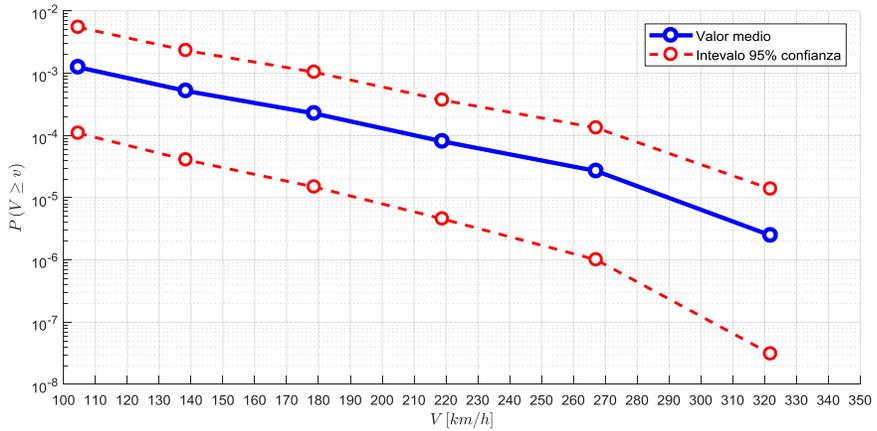


Figura 32: Probabilidad de excedencia de la velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados $\nu = 4.7 \cdot 10^{-5} \text{ (km}^2 \text{ yr)}^{-1}$.

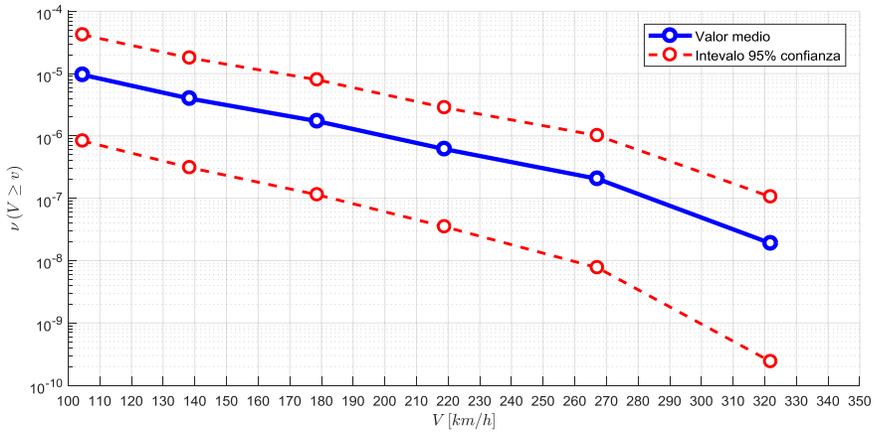


Figura 33: Tasa de excedencia de la velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados $\nu = 1.8 \cdot 10^{-5} (km^2 yr)^{-1}$.

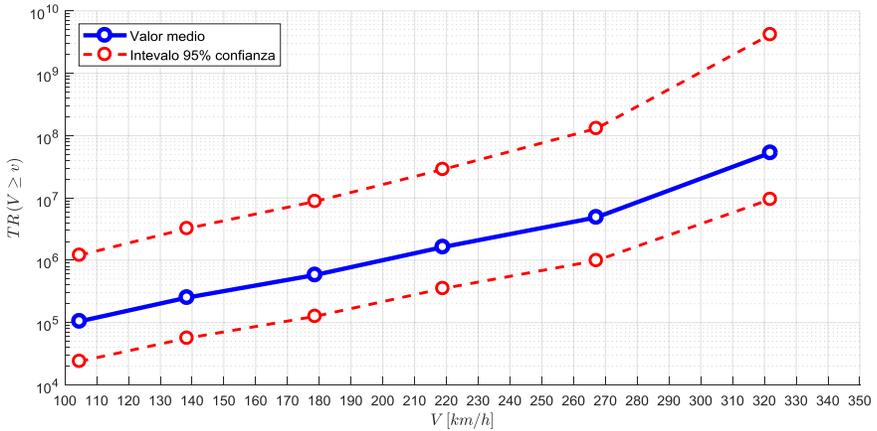


Figura 34: Período de retorno de la excedencia velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados $\nu = 1.8 \cdot 10^{-5} (km^2 yr)^{-1}$.

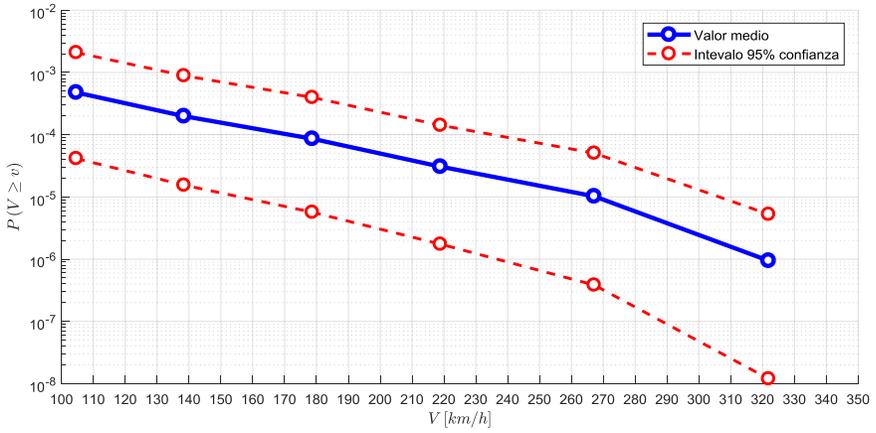


Figura 35: Probabilidad de excedencia de la velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados $\nu = 1.8 \cdot 10^{-5} (km^2 yr)^{-1}$.

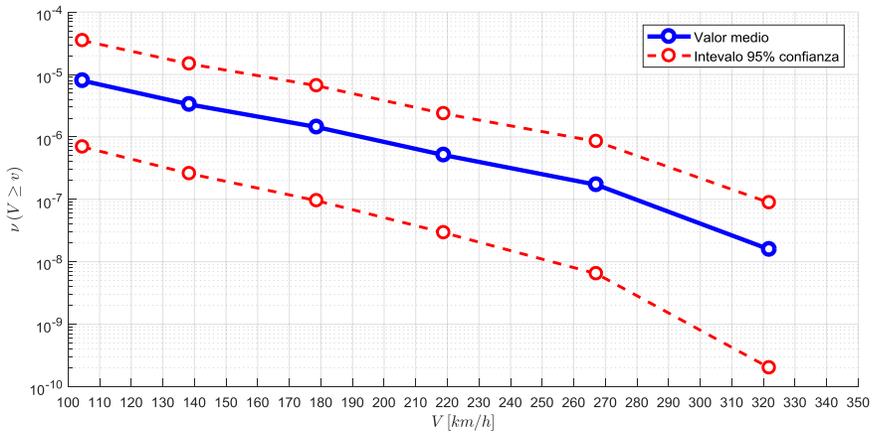


Figura 36: Tasa de excedencia de la velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} (km^2 yr)^{-1}$.

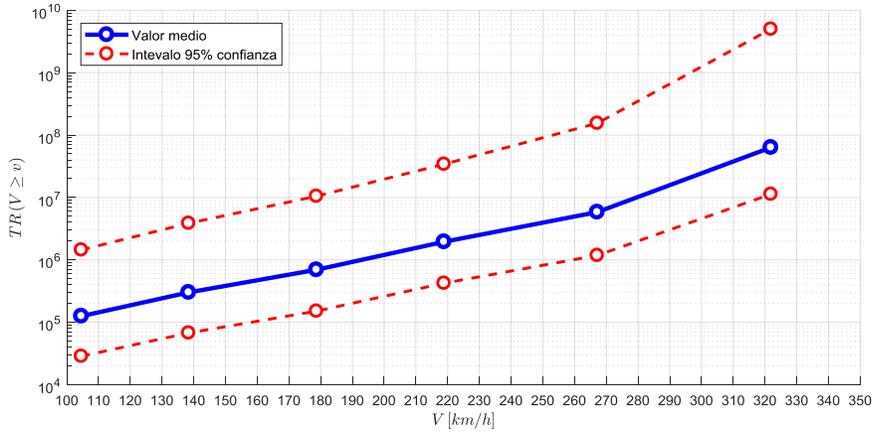


Figura 37: Período de retorno de la excedencia velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} (km^2 yr)^{-1}$.

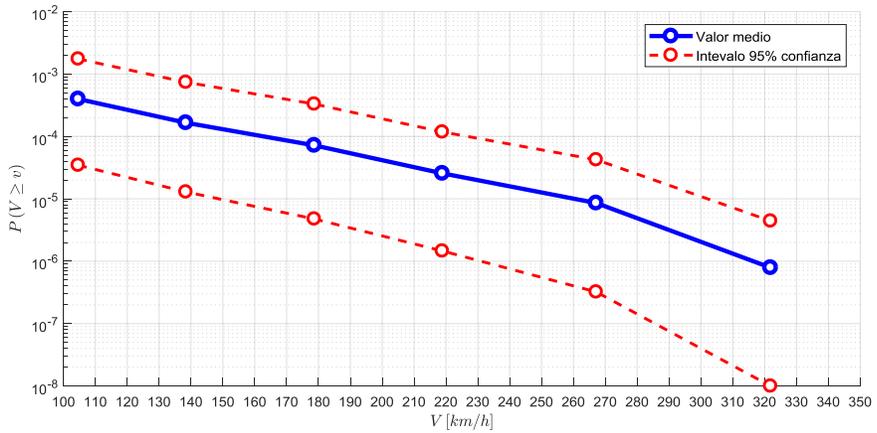


Figura 38: Probabilidad de excedencia de la velocidad del viento para una tasa de ocurrencia de tornados $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} (km^2 yr)^{-1}$.

6. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló un modelo probabilístico riguroso para la determinación del riesgo de impacto de tornados en el territorio de la República Argentina. A través de la recopilación de datos existentes en la región y la revisión de datos en otros países con este tipo de fenómenos atmosféricos, se cuantificó el riesgo de la ocurrencia de tornados para el área de la Provincia de Buenos Aires. Para ello se empleó el período de retorno de la excedencia de un cierto nivel de viento.

En lo referente a la ocurrencia de tornados, se puede afirmar que:

- La misma se encuentra seriamente subestimada, tanto por el público en general como por las distintas ramas profesionales y las autoridades. Más allá de la opinión que puedan presentar los autores sobre si es necesario o no considerar el riesgo asociado a este tipo de fenómenos, es fundamental que esta decisión se tome con un nivel de conocimiento adecuado.
- Como se puede apreciar en la Figura 54 a Figura 56, la principal fuente de incertidumbre no se encuentra en los modelos probabilísticos empleados o las técnicas de simulación, sino en la falta de un dato conciso y documentado sobre la tasa de ocurrencia de tornados en Argentina.
- Por lo tanto, se requiere de la elaboración de una base de datos estadísticos confiables sobre la ocurrencia de tornados. Si no es necesario desarrollar un seguimiento tan detallado como en EE.UU., actualmente el Servicio Meteorológico Nacional no realiza ninguna actividad oficial al respecto.

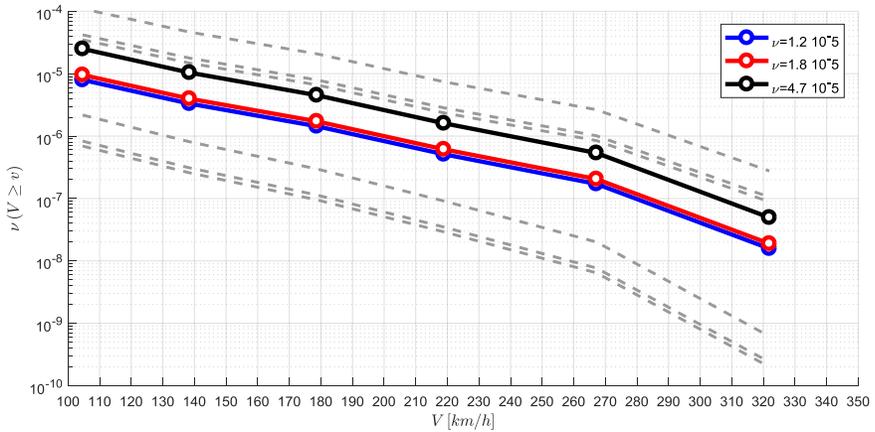


Figura 39: Comparación de los períodos de retorno asociados a la excedencia de la velocidad del viento obtenidos para distintas tasas de ocurrencia de tornados

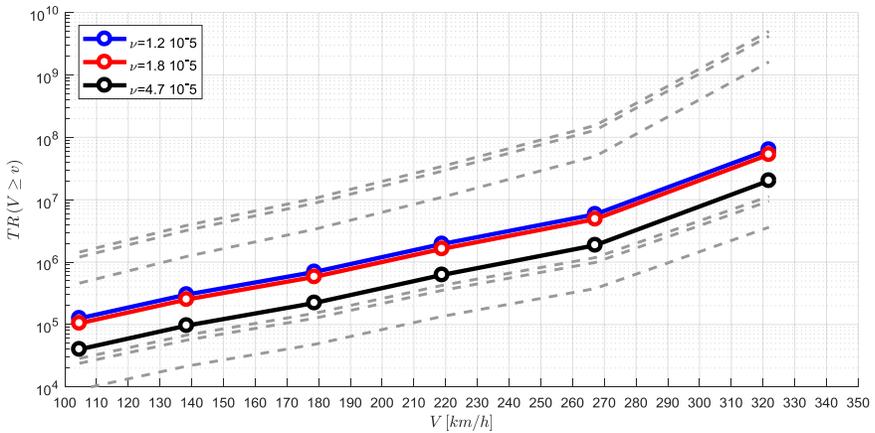


Figura 40: Comparación de del período de retorno de la excedencia de la velocidad del viento obtenidos para distintas tasas de ocurrencia de tornado.

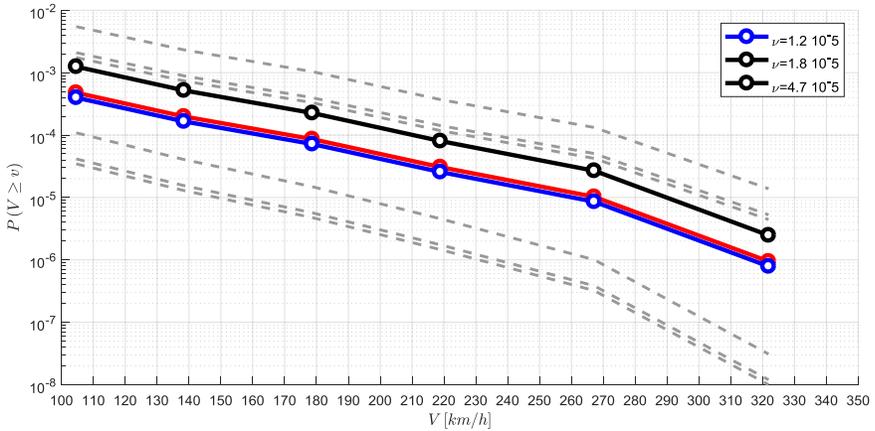


Figura 41: Comparación de la probabilidad de excedencia de la velocidad del viento obtenidos para distintas tasas de ocurrencia de tornado.

En los reglamentos de cálculo de estructuras, se diseña para una velocidad de viento asociada a un determinado periodo de retorno (que tiene determinada probabilidad de ser excedida en un periodo de tiempo dado). En el reglamento CIRSOC (41), esta velocidad es fijada considerando un periodo de retorno de 50 años, y se aclara explícitamente que no se considera la contribución de los vientos debido a tornados. A partir de las curvas de excedencia aquí obtenidas se puede observar que, para periodos de retorno mayores, la velocidad de los vientos originada por tornados es mayor a la correspondiente a los regímenes climáticos “normales”.

Cabe preguntarse entonces, ¿cuándo es necesario considerar el riesgo del impacto de tornados en el diseño estructural? Los métodos modernos de diseño estructural asignan niveles de desempeño en función del riesgo de falla que se considera aceptables para una estructura en función de su importancia y de las consecuencias de la falla. Para estructuras cuya falla es “poco grave” se acepta un riesgo de falla relativamente alto (un período de retorno relativamente bajo) y entonces no es necesario considerar la posibilidad del impacto de un tornado. En el caso de estructuras con consecuencias de falla graves, los períodos de retorno utilizados para el diseño serán mayores y entonces deberá hacerse un estudio riguroso de la probabilidad de impacto de tornados para la zona. Dentro de este esquema, la consideración del riesgo asociado a la ocurrencia de tornados es una abierto a discusión que requiere de mejores datos que alimenten futuras evaluaciones de riesgo.

7. Agradecimientos

Los autores del presente trabajo desean expresar su agradecimiento al Dr. Raul Bertero por motivarlos a llevar a cabo esta tarea y al equipo del Laboratorio de Dinámica de Estructuras de la Universidad de Buenos por el apoyo e interés demostrados.

Bibliografía

1. *Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research.*

Markowski, Paul M y Richardson, Yvette P. s.l. : Elsevier, 2009, Atmospheric Research, Vol. 93, págs. 3--10. 1.

2. *Where are the most intense thunderstorms on Earth?* **Zipser, Edward J, y otros.** 8, 2006, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 87, págs. 1057--1071.

3. *Thunderstorm structure and circulation.* **Byers, Horace R y Braham Jr, Roscoe R.** 1948, Vol. 5, págs. 71--86. 3.

4. *Non-supercell tornadoes.* **Wakimoto, Roger M y Wilson, James W.** 6, 1989, Monthly Weather Review, Vol. 117, págs. 1113--1140.

5. *A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones.* **Trapp, Robert J, Stumpf, Gregory J y Manross, Kevin L.** 4, 2005, Weather and Forecasting, Vol. 20, págs. 680--687.

6. *On the implementation of the enhanced Fujita scale in the USA.* **Doswell, Charles A, Brooks, Harold E y Dotzek, Nikolai.** s.l. : Elsevier, 2009, Vol. 93, págs. 554--563. 1.

7. *Some aspects of the international climatology of tornadoes by damage classification.* **Brooks, Harold y Doswell, Charles A.** 1, s.l. : Elsevier, 2001, Atmospheric Research, Vol. 56, págs. 191--201.

8. *Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity.* **Fujita, Tetsuya Theodore.** 1971.

9. *T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale.*

McDonald, James R. 1, 2001, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 82, págs. 63--72.

10. *Comparing the theoretical versions of the Beaufort scale, the T-Scale and the Fujita scale.* **Meaden, G Terence , y otros.** 2, s.l. : Elsevier, 2007, Atmospheric research, Vol. 83, págs. 446--449.

11. **Pacific Northwest National Laboratory.** *Tornado climatology of the contiguous united.* 2007.

12. *On some issues of United States tornado climatology.* **Doswell III, Charles A y Burgess, Donald W.** 1988, Monthly Weather Review, Vol. 116, págs. 495--501. 2.

13. *On the relationship of tornado path length and width to intensity.* **Brooks, Harold.** 2004, Weather and Forecasting, Vol. 19, págs. 310--319. 2.

14. *Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980.* **Fujita, T Theodore y Wakimoto, Roger M.** 7, 1981, Monthly weather review, Vol. 109, págs. 1438--1456.

15. *Significant tornadoes..... A 107 year perspective.* **Grazulis, Thomas P.** s.l. : Elsevier, 1990, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, págs. 131--151.

16. *Aspectos Estadísticos de la Ocurrencia de Tornados en la República Argentina.* **Altinger de Schwartzkopf, ML and Migliardo, RC.** 1976, Geoacta, Vol. 8, págs. 199--122.

17. *Tornado intensity estimation: Past, present, and future.* **Edwards, Roger, y otros.** 5, s.l. : American Meteorological Society, 2013, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 94, págs. 641--653.

18. *Possible impacts of the enhanced Fujita scale on United States tornado data.* **Edwards, Roger y Brooks, H E.** 2010. Preprints, 25th Conf. on Severe Local Storms, Denver, CO, Amer. Meteor. Soc. P. Vol. 8.
19. **Fujita,, T Theodore.** *Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications.* s.l. : Department of the Geophysical Sciences, University of Chicago, 1978.
20. *NWS tornado surveys and the impact on the national tornado database. Preprints.* **McCarthy, D W.** 2003. First Symp. on F-Scale and Severe-Weather Damage Assessment.
21. *The robustness of tornado hazard estimates.* **Schaefer, Joseph T, Schneider, Russell S y Kay, Michael P.** 2002. Third Symposium on Environmental Applications. págs. 35--41.
22. *Riesgo de tornados y corrientes descendentes en la Argentina.* **Altinger de Schwarzkopf, M L, Rosso, Luis César y Sorichetti, P.** 1993. Workshop of the Task Force on High Intensity Windson Transmission Lines, Buenos Aires, Argentina. págs. 19--23.
23. **Altinger de Schwarzkopf, Maria Luisa y Rosso, César Luís.** *Determinación del tornado básico de diseño para la central atómica de Embalse Córdoba.* s.l. : Facultad de ciencias exactas - Universidad de Buenos Aires, 1979.
24. **Altinger de Schwarzkopf, M L.** *Evaluación del potencial de riesgo por tormentas severas y tornados en el sitio de emplazamiento del puente rosario victoria.*
25. *A review of worldwide occurrence of tornadoes.* **Goliger, Adam M y Milford, R V.** s.l. : Elsevier, 1998, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, págs. 111--121.

26. *The evolution of probabilistic risk assessment in the nuclear industry.* **Hayns, M R.** s.l. : Elsevier, 1999, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 77, págs. 117--142. 3.
27. **Solari, Mario J. A.** *La Ingeniería en la sociedad del Riesgo.* Buenos Aires : academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires, 2010.
28. **Hacking, Ian.** *The emergence of probability: A philosophical study of early ideas about probability, induction and statistical inference.* s.l. : Cambridge University Press, 2006.
29. **TAG, ISO.** *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.* 1995.
30. **Benjamin, Jack R y Cornell, C Allin.** *Probability, statistics, and decision for civil engineers.* s.l. : Courier Corporation, 2014.
31. *Application of a technique for research and development program evaluation.* **Malcolm, Donald G, y otros.** 5, s.l. : INFORMS, 1959, Operations research, Vol. 7, págs. 46--669.
32. *Estimating the Mean and Variance of.* **Shankar, N Ravi , Rao, K Surya Narayana y Sireesha, V.** 18, 2010, International Mathematical Forum, Vol. 5, págs. 861--868.
33. *Engineering seismic risk analysis.* **Cornell, C Allin.** 5, s.l. : Seismological Society of America, 1968, Bulletin of the seismological society of America, Vol. 58, págs. 1583--1606.
34. *Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis.* **Kulkarni, R B, Youngs, R R y Coppersmith, K J.** 1984. Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering. págs. 263--270.

35. *Selection of a global set of GMPEs for the GEM-PEER Global GMPEs Project.* **Stewart, Jonathan P, y otros.** s.l. : PEER, 2012.
36. *On the use of logic trees for ground-motion prediction equations in seismic-hazard analysis.* **Bommer, Julian J, y otros.** 2, s.l. : Seismological Society of America, 2005, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, págs. 377--389.
37. *Composite ground-motion models and logic trees: methodology, sensitivities, and uncertainties.* **Scherbaum, Frank, y otros.** 5, s.l. : Seismological Society of America, 2005, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, págs. 1575--1593.
38. *Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective.* **Scherbaum, Frank, Delavaud, Elise y Riggelsen, Carsten.** 6, s.l. : Seismological Society of America, 2009, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, págs. 3234--3247.
39. *A simple procedure for Bayesian estimation of the Weibull distribution.* **Kaminskiy, Mark P y Krivtsov, Vasilii V.** 4, s.l. : IEEE, 2005, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 54, págs. 612--616.
40. **Condamin, Laurent , Louisot, Jean-Paul y Naim, Patrick.** *Risk quantification: management, diagnosis and hedging.* s.l. : John Wiley & Sons, 2007.
41. **CIRSOC.** *CIRSOC 102-Acción dinámica del viento sobre las construcciones.* 2005.
42. **INPRES-CIRSOC.** *Reglamento 103: Reglamento Argentino para Construcciones Sismoresistentes.* 2013.

43. *Experience-based and description-based perceptions of long-term risk: Why global warming does not scare us (yet)*. **Weber, Elke U.** 1, s.l. : Springer, 2006, Climatic change, Vol. 77, págs. 103--120.
44. *Risk interpretation and action: A conceptual framework for responses to natural hazards*. **Eiser, Richard J, y otros.** s.l. : Elsevier, 2012, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 1, págs. 5--16.
45. *Tornado risks and design wind speed*. **Wen, Yi-Kwei y Chu, Shih-Lung.** 12, s.l. : ASCE, 1973, Journal of the Structural Division, Vol. 99, págs. 2409--2421.
46. *Probabilistic analysis of tornado wind risks*. **Twisdale, Lawrence A y Dunn, William L.** 2, s.l. : American Society of Civil Engineers, 1983, Journal of Structural Engineering, Vol. 109, págs. 468--488.
47. **Haldar, Achintya y Mahadevan, Sankaran.** *Probability, reliability, and statistical methods in engineering design*. s.l. : John Wiley, 2000.

A. Indicadores de daño de la escala de Fujita mejorada

En la tabla que se presenta a continuación se pueden apreciar los indicadores de daño considerados para la evaluación de la categoría de un tornado de acuerdo a la escala de Fujita mejorada.

Tabla 8: Indicadores de daño – escala de Fujita mejorada

N^a	Indicador	Sigla
1	Small barns, farm outbuildings	SBO
2	One- or two-family residences	FR12
3	Single-wide mobile home	MHSW
4	Double-wide mobile home	MHDW
5	Apartment, condo, townhouse (3 stories or less)	ACT
6	Motel	M
7	Masonry apartment or motel	MAM
8	Small retail building (fast food)	SRB
9	Small professional (doctor office, branch bank)	SPB
10	Strip mall	SM
11	Large shopping mall	LSM
12	Large, isolated (“big box”) retail building	LIRB
13	Automobile showroom	ASR
14	Automotive service building	ASB
15	School: 1-story elementary (interior or exterior halls)	ES
16	School: junior or senior high school	JHSH
17	Low-rise (1–4 stories) building	LRB
18	Mid-rise (5–20 stories) building	MRB
19	High-rise (over 20 stories) building	HRB
20	Institutional building (hospital, government, or university)	IB

N^a	Indicador	Sigla
21	Metal building system	MBS
22	Service station canopy	SSC
23	Warehouse (tilt-up walls or heavy timber)	WHB
24	Transmission line tower	TLT
25	Free-standing tower	FST
26	Free-standing pole (light, flag, luminary)	FSP
27	Tree: hardwood	TH
28	Tree: softwood	TS

A.

B. Tornados registrados en el territorio de la República Argentina

B.1. Base de datos de tornados

En la tabla que se presenta a continuación se listan los tornados cuya ocurrencia ha podido ser confirmada. Si bien la base abarca desde 1981 hasta la actualidad, recién a partir de la década del 60 se cuenta con un registro regular. Los datos disponibles indican que la actividad del registro sufrió una merma significativa en las décadas del 80 y 90, ver Figura 19. El repunte a partir de la primera década del siglo XXI es debido a la ubicuidad de cámaras de fotos y la irrupción de internet.

Tabla 9: Base de datos de tornados

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
13/11/1889		Entre Ríos	Arroyo Seco	-33.155	-60.504
16/3/30	2	Santa Fé	Diego de Alvear	-27.340	-55.867
3/3/32	1	Santa Fé	Bombal	-34.373	-62.128
6/8/32	1	Santa Fé	Arroyo Seco	-33.457	-61.318
1/1/34	0	Córdoba	Unquillo	-33.156	-60.510
18/4/34	2	Córdoba	Los Chañaritos	-31.234	-64.316
6/1/35	1	Buenos Aires	Pergamino	-31.402	-63.333
6/1/36	1	Buenos Aires	Pergamino	-33.894	-60.571
1/11/36	1	Santa Fé	La Vanguardia	-33.889	-60.571
30/3/37	0	Buenos Aires	San Fernando	-33.358	-60.657
7/1/38	1	Córdoba	Luque	-34.445	-58.560
28/3/39	1	Santa Fé	Armstrong	-31.648	-63.344
21/9/45	2	Santa Fé	Gessler	-32.781	-61.603
3/2/46	2	Entre Ríos	Nogoyá	-31.875	-61.128
8/11/46	0	Santa Fé	Peyrano	-32.390	-59.793

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
5/2/47	2	Buenos Aires	Santa Eleodora	-33.539	-60.801
7/4/50	0	Santa Fé	Rincon Potrero	-34.692	-62.696
22/4/50	2	Entre Ríos	El Brillante	-32.183	-58.216
28/12/50	2	Córdoba	El Gateado	-31.324	-64.120
21/11/51	2	Córdoba	Pilar	-31.678	-63.878
22/11/51	2	Santa Fé	San Genrao	-32.370	-61.354
11/3/53	1	Santa Fé	Villa Cañas	-34.003	-61.606
16/10/54	3	Córdoba	Los Chañaritos	-31.402	-63.333
2/3/55	1	Santa Fé	Cepeda	-33.398	-60.625
18/6/59	2	Buenos Aires	Campana	-34.164	-58.960
9/10/59	2	Córdoba	Villa Quillinzo	-32.237	-64.514
4/1/63	2	Santa Fé	Rafaela	-31.252	-61.491
25/3/63	1	Santa Fé	Rosario	-32.951	-60.666
18/4/63		Buenos Aires	Tres Arroyos	-38.376	-60.278
1/5/63		Uruguay	Minas	-34.367	-55.233
3/5/63		Buenos Aires	Maldonado		
3/5/63		La Pampa	Miguel Cané	-36.167	-63.500
11/7/63		Tucumán	La Ramada	-26.687	-64.948
1/11/63	1	Córdoba	Mórrison	-32.592	-62.834
27/2/64	2	Buenos Aires	Pergamino	-33.884	-60.565
21/4/64	1	Buenos Aires	Ramallo	-33.486	-60.006
3/5/64		Río Negro	Cinco Saltos	-38.817	-68.067
3/5/64		Buenos Aires	Los Toldos	-34.995	-61.037
4/6/64		Entre Ríos	Gualeduaychú	-33.017	-58.517
26/10/64		Misiones	Puerto Rico	-26.808	-55.022
18/11/64		Misiones	San Javier	-31.449	-60.930
24/12/64		Santa Fé	Esperanza	-31.449	-60.930
3/1/65		Santa Fé	Rosario	-32.950	-60.650

3/3/65		Buenos Aires	San Isidro	-34.471	-58.529
Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
4/9/65		Santa Fé	Cañada de Gomez	-32.817	-61.400
24/9/65		Buenos Aires	Pilar	-34.459	-58.914
22/10/65	3	Córdoba	Sampacho	-33.384	-64.722
13/12/65		Chaco	Puerto Tirol	-27.380	-59.086
5/1/66		Buenos Aires	Coronel Mom	-34.844	-60.305
8/1/66		Formosa	Formosa	-26.183	-58.177
29/1/66		Córdoba	Río Tercero	-32.177	-64.112
16/2/66	0	Córdoba	San Fransisco	-31.425	-62.084
24/2/66		Uruguay	Montevideo	-34.884	-56.182
1/3/66	1	Córdoba	Hernando	-32.427	-63.730
4/3/66	1	Córdoba	La Falda	-31.087	-64.484
13/1/67		Salta	Coronel Olleros - Chañar Muyo	-25.100	-64.220
16/1/67		Santa Fé	Henderson	-31.449	-60.930
6/2/67		Buenos Aires	Claudio Molina	-38.100	-60.350
1/5/67		Córdoba	Melo - Villa Rosi	-34.299	-63.265
8/10/67		Córdoba	Monte Buey	-32.918	-62.456
8/10/67	4	Córdoba	Washington	-33.874	-64.686
31/10/67		Santa Fé	Roca	-33.754	-61.967
8/3/68	1	Santa Fé	Alcorta	-33.541	-61.121
8/4/68		Formosa	Misión Laishi	-26.244	-58.629
17/10/68		Santiago del Estero	Añatuya	-28.466	-62.834
24/10/68		Corrientes	Corrientes	-27.471	-58.840
9/11/68	3	Córdoba	San Basilio	-33.499	-64.315
14/11/68		Buenos Aires	San Pedro	-33.682	-59.665
15/11/68		Entre Ríos	Gualedguay	-33.150	-59.311
20/11/68	2	Santa Fé	Los Cardos	-32.323	-61.632

26/11/68	2	Córdoba	Oncativo	-31.913	-63.682
Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
30/11/68		Corrientes	Mercedes	-29.184	-58.074
14/1/69	1	Buenos Aires	Lima	-34.045	-59.196
17/1/69		Buenos Aires	Hilario Ascasubi	-39.376	-62.647
30/1/69		Buenos Aires	Deferrari	-38.342	-59.700
2/2/69		Formosa	Colonia La resistencia		
4/4/69		Salta	Campo Santo	-24.677	-65.105
7/11/69		Santa Fé	Las Palmeras	-30.631	-61.625
19/11/69		Buenos Aires	Tronquist	-38.098	-62.224
19/11/69		La Pampa	Santa Isabel	-36.227	-66.938
26/11/69		Entre Ríos	Ramón Parera	-31.694	-59.761
26/11/69	0	Entre Ríos	La Picada	-31.733	-60.300
27/11/69		Córdoba	Gral Lavalle	-31.390	-64.243
21/1/70		Córdoba	Sacanta	-31.663	-63.044
21/1/70		Córdoba	La Francia	-31.402	-62.632
23/3/70		Entre Ríos	Viale	-31.871	-60.006
21/4/70	4	Uruguay	Fray Marcos	-34.194	-55.742
1/10/70		Corrientes	Mercedes	-29.185	-58.074
1/10/70		Corrientes	Santa Ana	-27.455	-58.654
16/10/70		Entre Ríos	Colón	-32.225	-58.145
25/10/70		Buenos Aires	San Román	-38.741	-61.539
11/11/70		Salta	El Galpón	-25.381	-64.652
20/1/71		Buenos Aires	Pehuajó	-35.811	-61.896
13/3/71		Misiones	San Javier	-27.872	-55.139
8/6/71	0	Buenos Aires	Don Torcuato	-34.492	-58.626
19/10/71		Buenos Aires	Carlos Casares	-35.623	-61.360
11/11/71		Corrientes	9 de Julio	-28.841	-58.830
18/11/71		Buenos Aires	Cacharí	-36.379	-59.503

21/11/71	0	Buenos Aires	Carabelas	-34.036	-60.866
----------	---	--------------	-----------	---------	---------

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
1/1/72		La Pampa	Castex	-35.916	-64.295
7/1/72	1	Córdoba	Del Campillo	-34.379	-64.496
7/1/72	1	Córdoba	Del Campillo	-34.379	-64.496
15/1/72		Córdoba	Ferreyra	-31.463	-64.111
23/10/72		Buenos Aires	Baradero	-33.809	-59.505
25/10/72	2	Córdoba	Morrison	-32.592	-62.833
2/1/73	1	Santa Fé	Maciel	-32.456	-60.889
10/1/73	5	Santa Fé	San Justo	-30.790	-60.591
24/4/73	0	Córdoba	Estancia Holmberg	-33.200	-64.433
5/1/74	2	Buenos Aires	Bragado	-35.116	-60.488
5/1/74	3	Buenos Aires	M Fernandez		
1/5/74	2	Buenos Aires	Villa Lugano	-34.673	-58.477
23/10/74	1	Entre Ríos	Crespo	-32.031	-60.307
1/11/74	0	Buenos Aires	Domselaar	-35.073	-58.288
8/1/75	1	Córdoba	Vicuña Makena	-33.918	-64.390
13/1/76	3	Córdoba	Isla verde	-33.239	-62.402
13/10/76	0	Santa Fé	Ricardone	-32.771	-60.779
13/12/76	0	Santa Fé	Villa Constitución	-33.227	-60.330
25/12/76	0	Santa Fé	Villa Mugueta	-33.312	-61.055
7/2/77	1	Córdoba	Santa Rosa de Calamuchita	-32.066	-64.516
4/11/77	1	Córdoba	El tío	-31.385	-62.828
4/11/77	1	Córdoba	El tío	-31.385	-62.828
27/11/77	0	Santa Fé	Totoras	-32.584	-61.167
4/12/77	3	Córdoba	El Luque	-31.648	-63.344
12/1/78	0	Córdoba	Marcos Juarez	-32.690	-62.105
20/7/78	1	Buenos Aires	Bernal	-34.709	-58.281

28/10/78	1	Córdoba	La Paquita	-30.907	-62.216
Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
28/10/78	2	Córdoba	Morteros	-30.710	-62.004
28/10/78	1	Córdoba	Colonia Milesi	-30.835	-62.130
4/3/79	2	Córdoba	Villa María	-32.411	-63.245
1/10/79	0	San Luis	Lafinur	-32.067	-65.331
1/11/79	0	Córdoba	Pilar	-31.678	-63.878
8/12/79	1	Córdoba	Intiyaco	-28.676	-60.072
11/12/79	4	Córdoba	Villa Ciudad América	-31.792	-64.509
27/9/81	1	Buenos Aires	El Arbolito	-33.914	-60.941
6/11/81		Buenos Aires	Sobre el Río de la Plata		
21/10/82	0	Córdoba	Cruz chica	-30.964	-64.485
12/4/83	1	Buenos Aires	Las Chacras	-35.083	-59.168
23/9/83	1	Buenos Aires	Ezpeleta	-34.749	-58.237
17/11/83	1	Buenos Aires	Tolosa	-34.902	-57.983
20/12/83	1	Buenos Aires	Río Tala	-33.769	-59.638
29/10/84	1	Buenos Aires	CABA-Aeroparque	-34.559	-58.414
14/11/85	0	Entre Ríos	Gualedguaychú	-33.009	-58.521
21/11/85	2	Uruguay	Carmelo - Dpto de Colonia	-33.999	-58.284
17/12/85	1	Buenos Aires	Inés Indar	-34.398	-60.542
18/10/86	0	Buenos Aires	La Plata	-34.921	-57.954
18/10/86	1	Buenos Aires	La Plata	-34.921	-57.954
27/2/87		Buenos Aires	Hale	-35.999	-60.856
13/11/87		Entre Ríos	Colón	-32.225	-58.143
4/1/88	1	Santa Fé	Lucio V. Lopez	-32.713	-61.021
28/1/88	1	Santa Fé	Casilda	-33.048	-61.167
7/3/90	2	Buenos Aires	Gobernador Castro	-33.659	-59.868

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
7/3/90	2	Buenos Aires	Gobernador Castro	-33.659	-59.868
7/3/90	2	Buenos Aires	Pergamino	-33.886	-60.563
7/3/90	2	Buenos Aires	Perez Milan	-33.770	-60.094
8/3/90	1	Buenos Aires	Acevedo	-33.754	-60.439
3/11/90	1	Buenos Aires	San Miguel	-34.556	-58.734
1/1/91	1	Córdoba	La Granja	-31.022	-64.273
20/1/91	2	Santa Fé	Bernabé Molinas	-33.494	-60.511
20/1/91	1	Buenos Aires	Ramallo	-33.485	-60.005
6/5/92	4	Buenos Aires	Estación López	-37.552	-59.627
30/8/92	1	Santa Fé	Emilia	-31.058	-60.746
28/1/93	1	Tucumán	San Miguel de Tucumán	-26.808	-65.218
31/1/93	1	Buenos Aires	Sanchez	-33.436	-60.147
10/3/93	1	Buenos Aires	Necochea	-38.553	-58.739
13/4/93		Buenos Aires	Taplaqué	-36.356	-60.025
13/4/93		Buenos Aires	Tandíl	-37.317	-59.150
13/4/93	2	Buenos Aires	Mar del Plata	-37.979	-57.589
13/4/93		Buenos Aires	General Alvarado	-38.263	-57.867
13/4/93		Buenos Aires	Daireaux	-36.601	-61.749
13/4/93		Buenos Aires	Benito Juarez	-37.673	-59.805
13/4/93	3	Buenos Aires	Urdampilleta	-36.431	-61.420
13/4/93		Buenos Aires	Necochea	-38.555	-58.740
13/4/93		Buenos Aires	Pehuajó	-35.811	-61.895
13/4/93		Buenos Aires	Bolivar	-36.228	-61.108
13/4/93		Buenos Aires	General Lamadrid	-37.248	-61.261
13/4/93		Buenos Aires	Laprida	-37.545	-60.799
13/4/93		Buenos Aires	Trenque Lauquen	-35.974	-62.732
13/4/93		Buenos Aires	Lobería	-38.164	-58.782
13/4/93		Buenos Aires	Balcarce	-37.846	-58.256

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
13/4/93	3	Buenos Aires	Henderson	-36.299	-61.715
13/4/93		Buenos Aires	Carlos Casares	-35.623	-61.360
13/4/93		Buenos Aires	Olavarría	-36.891	-60.314
13/4/93		Buenos Aires	Azul	-36.775	-59.854
29/8/93	1	Santa Fé	San Lorenzo/Puerto San Martín	-32.750	-60.732
29/8/93	1	Santa Fé	San Lorenzo	-32.750	-60.732
11/10/93	1	Buenos Aires	General Pinto	-34.765	-61.890
16/10/93	1	Buenos Aires	Villa Ortuzar - Capital Federal	-34.580	-58.468
29/10/93	0	Buenos Aires	General Rodríguez	-34.602	-58.954
1/11/93	1	Córdoba	Toledo	-31.556	-64.006
5/11/93	1	Río Negro	Allén	-38.976	-67.830
6/11/93	1	Entre Ríos	Crespo	-32.031	-60.306
10/11/93	1	Buenos Aires	Trenque Lauquen	-35.973	-62.735
10/11/93	1	Córdoba	Toledo	-31.555	-64.009
14/11/93	1	Chaco	Machacai	-26.927	-60.052
3/12/93	0	Buenos Aires	Necochea	-38.554	-58.740
9/12/93	0	Córdoba	Colonia Italiana	-33.312	-62.178
9/5/94		Buenos Aires	Hortensia	-35.926	-61.261
16/10/94	0	Buenos Aires	Vicente Cáceres	-34.962	-58.648
16/10/94	1	Buenos Aires	Gándara	-35.450	-58.095
3/1/96	1	Buenos Aires	Flores-Capital Federal	-34.630	-58.463
6/11/96	0	Buenos Aires	Alberti	-35.031	-60.280
6/11/96	1	Entre Ríos	Crespo	-32.031	-60.307
6/11/96	1	Entre Ríos	Crespo	-32.031	-60.307
6/11/96	1	Entre Ríos	Crespo	-32.031	-60.307

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
29/1/97		Buenos Aires	Campana	-34.164	-58.960
10/2/97		Buenos Aires	Lanús este	-34.714	-58.373
21/10/00		Buenos Aires	María Lucila	-36.192	-61.539
26/12/00	3	Buenos Aires	Guernica	-34.917	-58.383
10/1/01	3	Buenos Aires	Guernica	-34.917	-58.383
3/2/01	1	Buenos Aires	Bahía Blanca	-38.711	-62.267
10/3/02	2	Uruguay	Dpto Canelones	-34.516	-55.948
11/11/03	2	Buenos Aires	Carlos Casares	-35.623	-61.360
26/12/03	3	Córdoba	Villa la Tela - Córdoba	-31.427	-64.253
7/1/06	2	Buenos Aires	Chivilcoy	-34.898	-60.019
13/4/06	1	Buenos Aires	Saladillo	-35.637	-59.779
16/11/06	2	Buenos Aires	Necochea	-38.552	-58.739
19/12/06		La Pampa	Parera	-35.146	-64.499
19/12/06	1	Buenos Aires	Laprida	-37.545	-60.799
26/12/06	1	Santa Fé	Esperanza	-31.449	-60.931
1/10/07		La Pampa	Santa Rosa	-36.619	-64.291
2/3/08	0	Buenos Aires	Sobre Río de la Plata	-34.517	-58.457
21/3/08	1	Buenos Aires	Cañuelas	-35.049	-58.759
11/8/08	2	Uruguay	25 de Mayo	-34.191	-56.342
13/10/08		Buenos Aires	Pellegrini	-36.268	-63.163
17/10/08		Uruguay	Florida	-34.100	-56.216
22/12/08	1	Córdoba	General Deheza	-32.756	-63.782
17/1/09		Tucumán	Trancas	-26.232	-65.281
30/1/09	2	La Pampa	Altaliva Roca	-37.029	-64.282
22/3/09	2	Córdoba	Monte Cristo	-31.345	-63.945
7/9/09	4	Misiones	San Pedro	-26.624	-54.110
16/10/09	2	Buenos Aires	Junín	-34.584	-60.949
29/10/09	2	Buenos Aires	Bragado	-35.119	-60.482

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
10/11/09	0	Misiones	Posadas	-27.366	-55.898
10/11/09	0	Misiones	Posadas	-27.366	-55.898
10/11/09	0	Misiones	Posadas	-27.366	-55.898
10/11/09	1	Misiones	Posadas	-27.366	-55.898
18/11/09		Buenos Aires	General Villegas	-35.032	-63.018
22/11/09		Corrientes	Goya	-29.144	-59.265
26/11/09	2	Chaco	Colonia Elisa	-26.931	-59.520
17/12/09		Mendoza	San Rafael	-34.613	-68.342
1/1/10		Tucumán	Los Ralos	-26.886	-65.006
6/1/10	2	Buenos Aires	Pehuajó	-35.811	-61.896
11/1/10		Buenos Aires	Quenumá	-36.568	-63.088
11/1/10		Buenos Aires	Quenumá	-36.568	-63.088
11/1/10	2	Entre Ríos	Gualedguay	-33.150	-59.310
12/1/10		Buenos Aires	Gahan	-34.338	-60.098
2/2/10		Tucumán	San Miguel de Tucumán	-26.810	-65.218
15/2/10		Santa Fé	Santa Fe	-31.632	-60.700
20/3/10		Entre Ríos	Paraná	-31.742	-60.512
1/4/10		Tucumán	San Miguel de Tucumán	-26.810	-65.218
19/4/10		Entre Ríos	Villa del Rosario	-30.796	-57.912
27/9/10	1	Santiago del Estero	Monte Quemado	-25.803	-62.831
21/10/10		Formosa	Pozo del Tigre	-24.895	-60.322
25/11/10	1	Buenos Aires	Bragado	-35.120	-60.481
8/12/10	1	Buenos Aires	Bahía Blanca	-38.711	-62.267
1/1/11		Córdoba	Carlos Paz	-31.421	-64.502
4/1/11		Entre Ríos	Diamante	-32.069	-60.636
13/1/11		Buenos Aires	Tornquist	-38.101	-62.223
24/1/11		Córdoba	Río Primero	-31.331	-63.621

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
25/1/11		Córdoba	Laboulaye	-34.128	-63.391
27/1/11	2	Uruguay	Migues - Dpto Canelones	-34.487	-55.630
30/1/11		Salta	San José de Metán	-25.494	-64.972
22/2/11		Corrientes	Puerto Gonzales	-27.290	-58.398
23/2/11	0	Mendoza	Godoy Cruz	-32.911	-68.830
1/4/11	0	Tucumán	Monteros	-27.167	-65.499
12/8/11	1	Uruguay	Talita - Dpto Florida	-33.999	-56.099
22/10/11		Uruguay	Vergara	-32.946	-53.942
30/1/12	1	Córdoba	Córdoba	-31.404	-64.182
20/2/12	0	Corrientes	Colonia Libertad	-30.043	-57.822
4/4/12	2	Buenos Aires	Capital Federal	-34.649	-58.384
4/4/12	1	Buenos Aires	Lomas de Zamora	-34.762	-58.430
4/4/12	1	Buenos Aires	José C. Paz	-34.516	-58.766
4/4/12	1	Buenos Aires	Paso del Rey - Moreno	-34.636	-58.753
4/4/12	1	Buenos Aires	La Plata	-34.921	-57.954
13/4/12		Córdoba	La Cumbre	-30.982	-64.491
13/4/12	0	Buenos Aires	Olavarría	-36.890	-60.315
20/10/12	0	Buenos Aires	General Belgrano	-35.767	-58.496
22/10/12	2	Uruguay	Rocha	-34.479	-54.333
30/10/12	2	Buenos Aires	Río Tala	-33.769	-59.638
3/11/12	1	Córdoba	Córdoba	-31.401	-64.183
22/11/12		Córdoba	Santa Rosa de Calamuchita	-32.063	-64.550
28/11/12		Córdoba	Córdoba	-31.401	-64.183
2/12/12	2	Buenos Aires	Ameghino	-34.845	-62.465
6/12/12	1	Córdoba	Bell Ville	-32.620	-62.689
6/12/12		Entre Ríos	Gualeycuychu	-33.008	-58.511

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
6/12/12		Uruguay	Dolores-Dpto Soriano	-33.533	-58.217
16/12/12	1	Córdoba	Marcos Juarez	-32.693	-62.104
24/12/12	1	Buenos Aires	Chillar	-37.312	-59.982
24/12/12		Buenos Aires	General Villegas	-35.032	-63.018
24/12/12		Córdoba	Jovita	-34.519	-63.946
24/1/13		Buenos Aires	Punta Indio	-35.268	-57.253
30/1/13		Santiago del Estero	Colonia Dora	-28.601	-62.950
14/2/13		Buenos Aires	La Plata	-34.922	-57.955
1/3/13		Buenos Aires	General Las Heras	-34.926	-58.946
2/3/13	1	Buenos Aires	Villa Lugano - Cap. Fed	-34.684	-58.466
4/3/13		Buenos Aires	Cardenal Cagliero	-40.652	-62.753
9/3/13	2	Buenos Aires	Arrecifes	-34.064	-60.103
2/4/13		Buenos Aires	Ensenada	-34.863	-57.909
2/4/13		Buenos Aires	Las Flores	-36.015	-59.097
11/4/13		Entre Ríos	General Ramirez	-32.177	-60.202
31/10/13		Córdoba	Inrville	-32.944	-62.230
26/12/13		Santa Fé	San Lorenzo	-32.746	60.734
11/1/14		Entre Ríos	Chajarí	-30.755	-57.981
21/2/14	3	Buenos Aires	Berazategui	-34.764	-58.209
1/11/14	0	Santa Fé	Arequito	-33.144	-61.470
6/11/14	2	Misiones	San Vicente	-26.996	-54.483
29/11/14		Buenos Aires	Arrecifes	-34.061	-60.100
22/12/14		Uruguay	Montevideo	-34.914	-56.178
13/1/15		Chaco	Resistencia	-27.451	-58.986
16/2/15		Mendoza	Malargüe	-35.480	-69.585

Fecha	F	Prov./País	Localidad	Lat.	Long.
18/2/15		Buenos Aires	Mar de la Pampas	-37.326	-57.025
20/4/15		Brasil	Xanxerê	-26.875	-52.404
17/11/15		Buenos Aires	Leandro Alem	-34.519	-61.391
18/11/15		Córdoba	Sampacho	-33.384	-64.723
12/12/15		Santa Fé	Carlos Pellegrini	-32.052	-61.787
22/1/16		Buenos Aires	Mar del Plata	-38.006	-57.544
24/1/16		Buenos Aires	Henderson	-36.298	-61.718
8/2/16		Santa Fé	Rafaela	-31.253	-61.492
14/2/16		Tucumán	Lastenia	-26.851	-65.166
24/2/16		Santa Fé	Venado Tuerto	-33.746	-61.969
15/4/16	3	Uruguay	Dolores	-33.530	-58.217
18/8/16		Córdoba	Huinca Renancó	-34.840	-64.375
18/11/16		Uruguay	San Luis	-34.775	-55.589
27/11/16		Entre Ríos	Concepción del Uruguay	-32.485	-58.232
25/12/16		Córdoba	La Cumbre	-30.982	-64.489
2/1/17		Buenos Aires	Trenque Lauquen	-35.974	-62.733
8/1/17		Buenos Aires	Vedia	-34.497	-61.542
9/1/17		San Luis	Renca	-32.772	-65.365
9/1/17		San Luis	Tilisarao	-32.733	-65.291
17/1/17		La Pampa	Entre Uribaldi y La gloria	-36.510	-63.809
24/1/17		Chaco	General Pinedo	-27.325	-61.281
6/2/17		Buenos Aires	Pinamar	-37.115	-56.861
23/2/17		Buenos Aires	General Lavalle	-36.406	-56.943
30/3/17		Tucumán	Monteros	-27.165	-65.497
18/11/15		Córdoba	Sampacho	-33.384	-64.723
12/12/15		Santa Fé	Carlos Pellegrini	-32.052	-61.787
22/1/16		Buenos Aires	Mar del Plata	-38.006	-57.544
24/1/16		Buenos Aires	Henderson	-36.298	-61.718

B.2. Mapas de tornados



Figura 42: Tornados de los que se dispone del valor de la escala F.



Figura 43: TORNADOS F1



Figura 44: Tornados F2



Figura 45: Tornados F2



Figura 46: Tornados F3



Figura 47: TORNADOS F4



Figura 48: Tornados F5

C. Probabilidad de excedencia de la velocidad del viento

C.1. Probabilidades para un nivel de velocidad dado un tornado F#

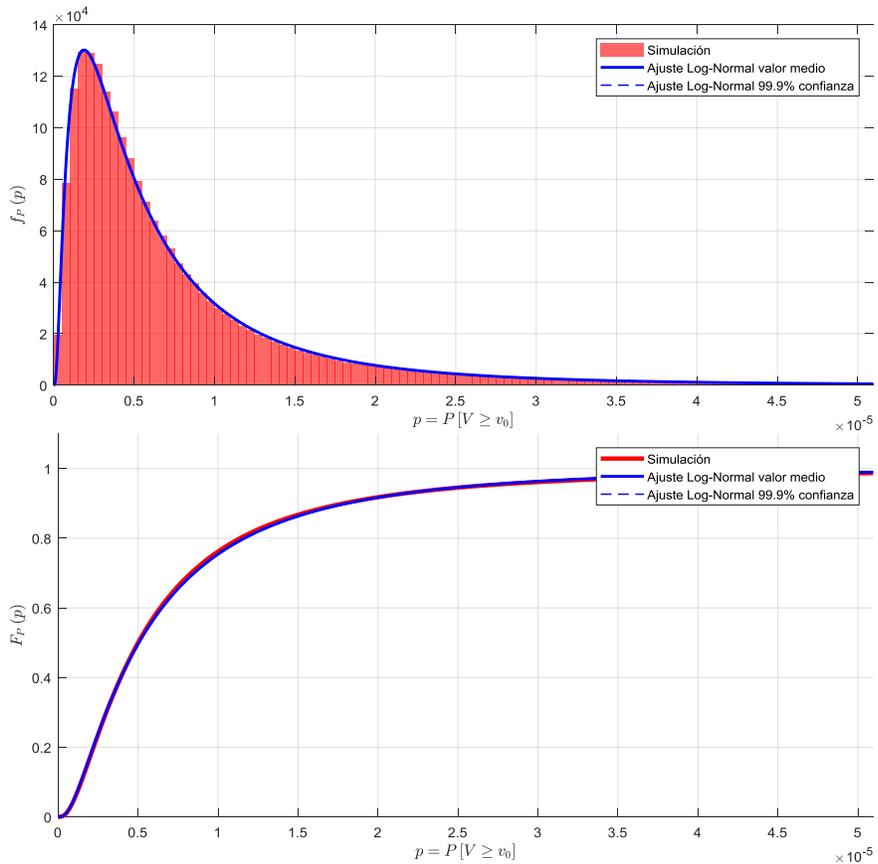


Figura 49: Simulación y ajuste Weibull de la probabilidad de excedencia de v_0 .

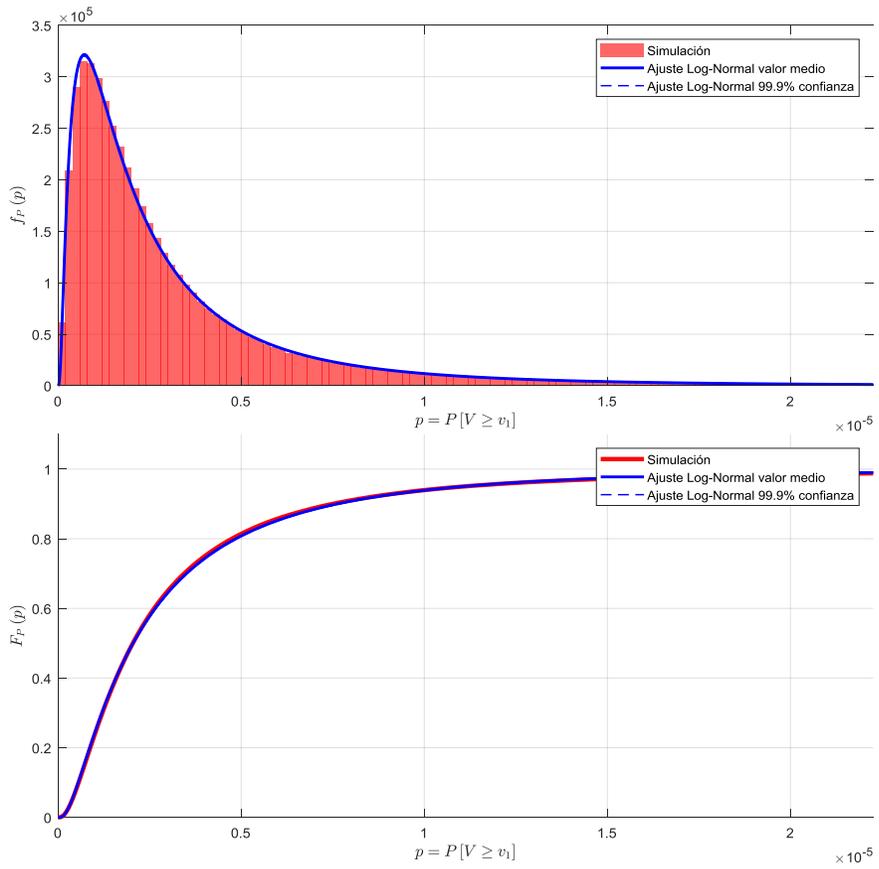


Figura 50: Simulación y ajuste Weibull de la probabilidad de excedencia de v_1 .

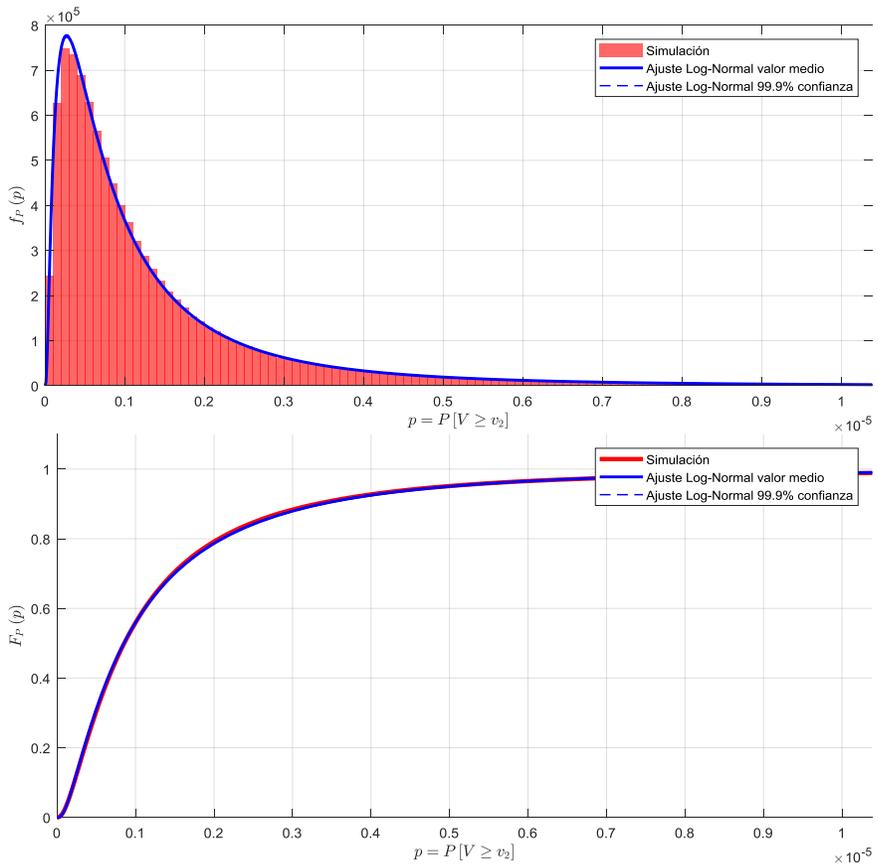


Figura 51: Simulación y ajuste Weibull de la probabilidad de excedencia de v_2 .

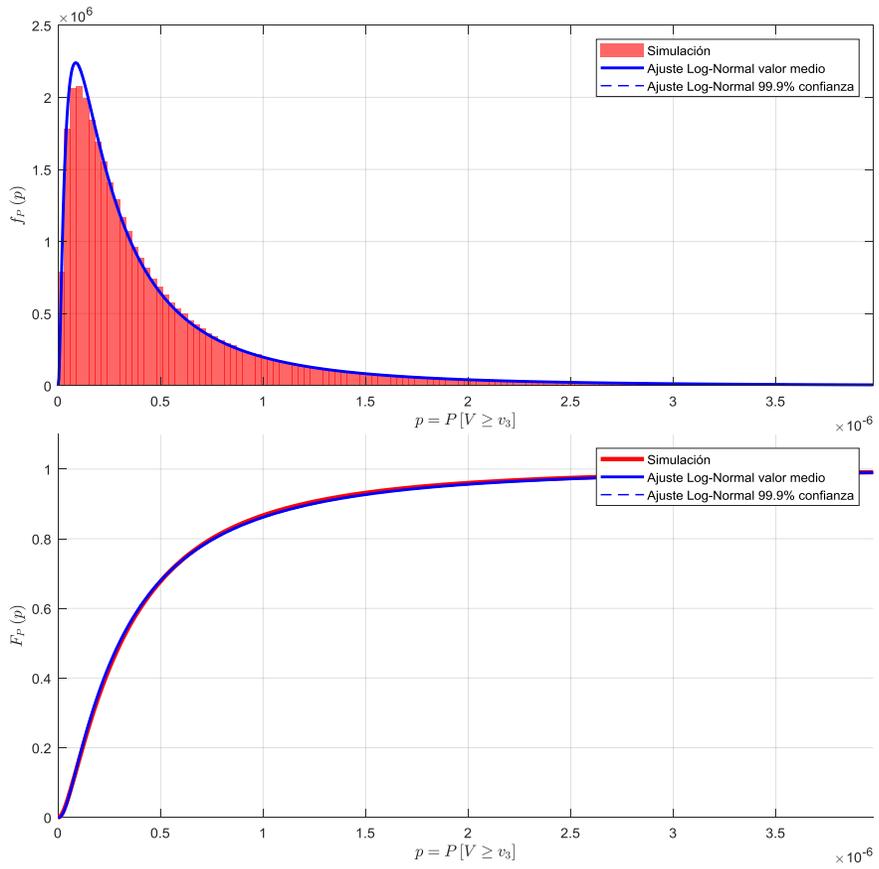


Figura 52: Simulación y ajuste Weibull de la probabilidad de excedencia de v_3 .

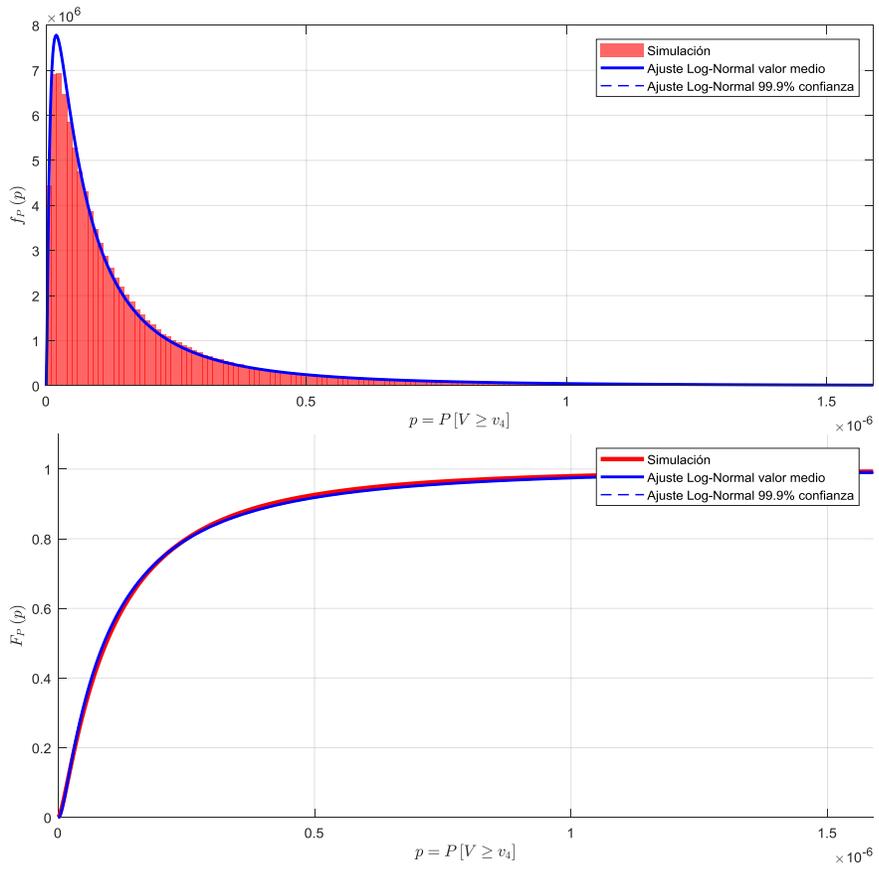


Figura 53: Simulación y ajuste Weibull de la probabilidad de excedencia de v_4 .

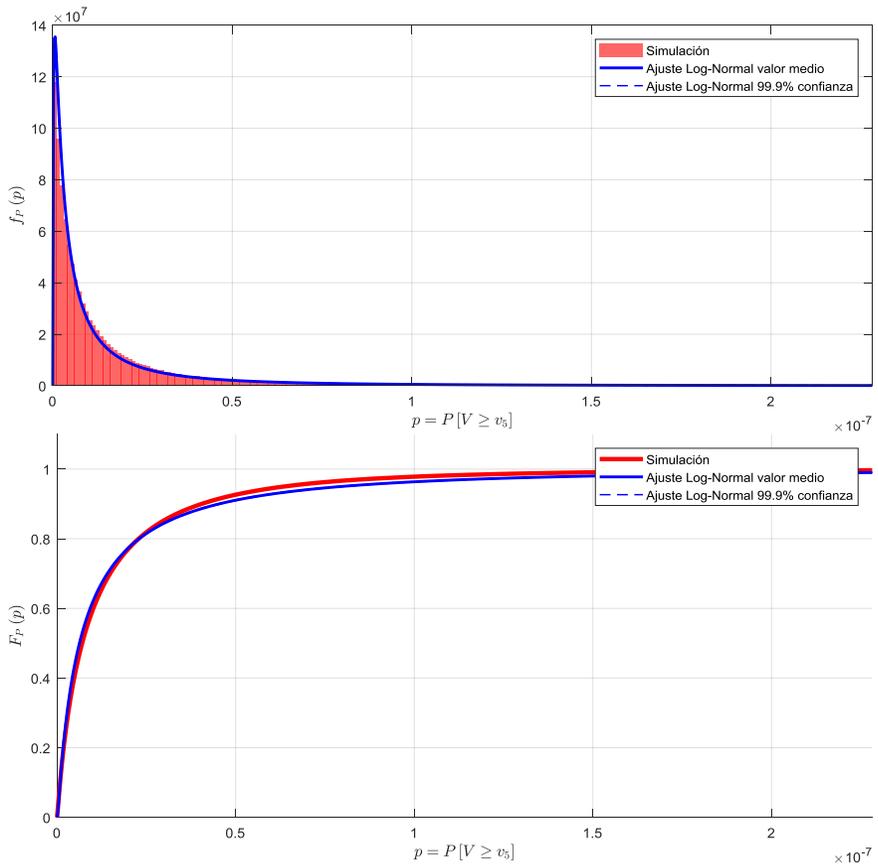


Figura 54: Simulación y ajuste Weibull de la probabilidad de excedencia de v_5 .

C.2. Percentiles de la probabilidad de excedencia del viento

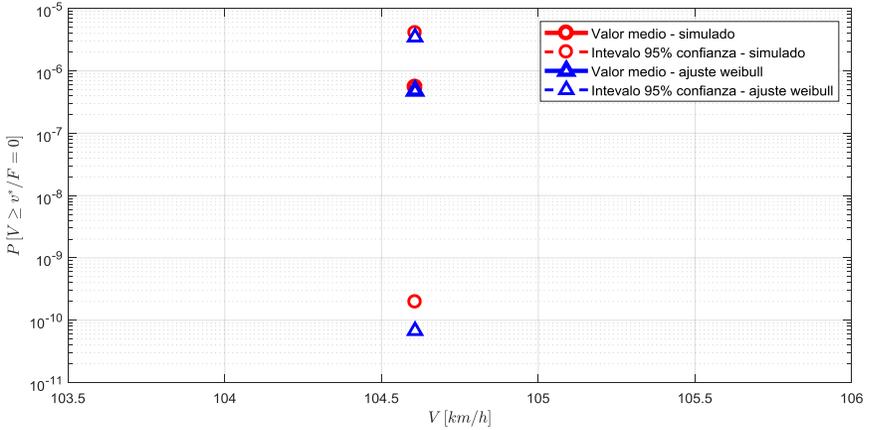


Figura 55: Probabilidad de excedencia dado un tornado F_0 .

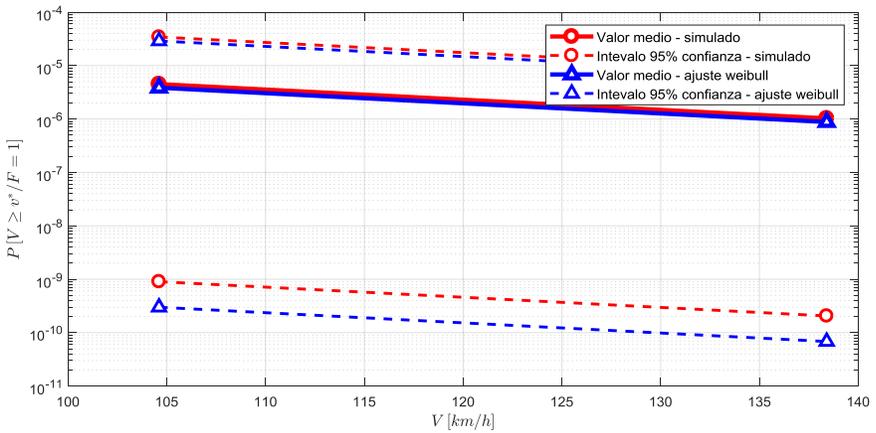


Figura 56: Probabilidad de excedencia dado un tornado F_1 .

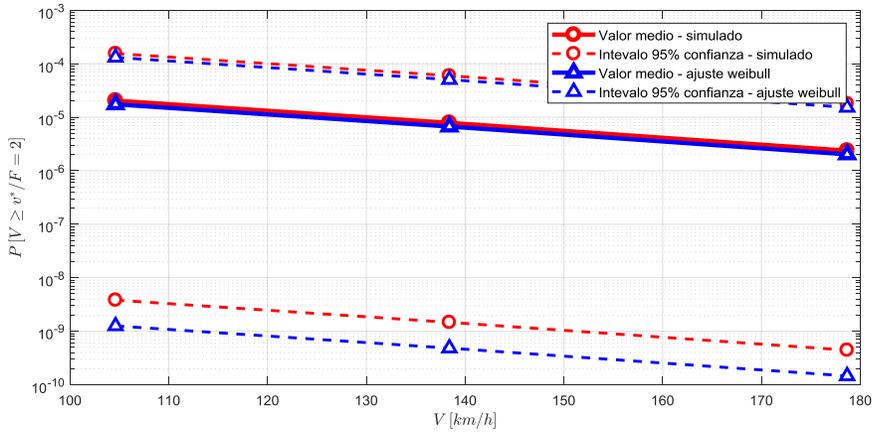


Figura 57: Probabilidad de excedencia dado un tornado F_2 .

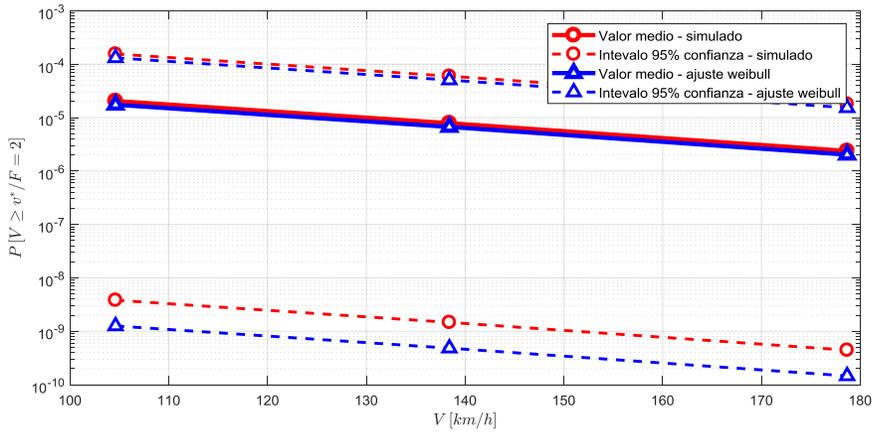


Figura 58: Probabilidad de excedencia dado un tornado F_2 .

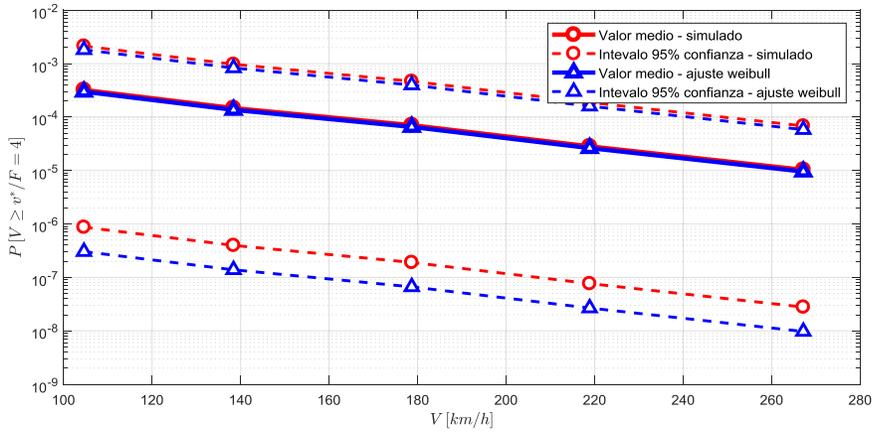


Figura 59: Probabilidad de excedencia dado un tornado F_4 .

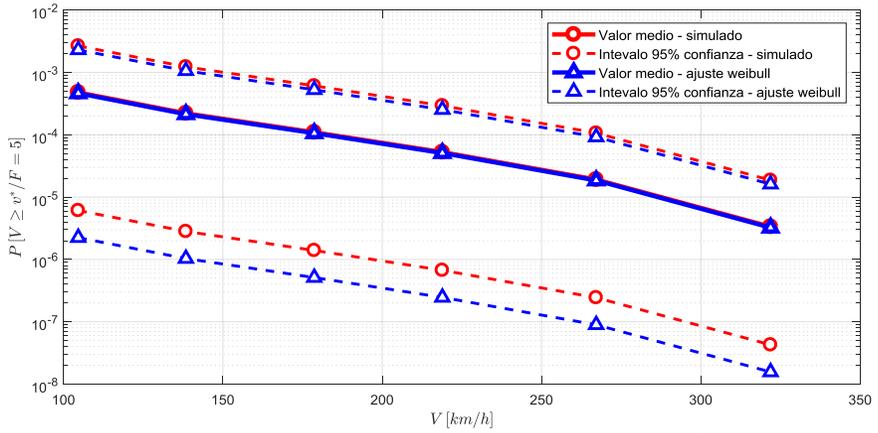


Figura 60: Probabilidad de excedencia dado un tornado F_5 .