

Meteoro logica

PUBLICACIÓN ESPECIALIZADA
EN TEMAS METEOROLÓGICOS

Versión en línea
Versión en CD-ROM

ISSN 1850-468X
ISSN 2347-0364

Volumen 41

Número 2

Año 2016

CONTENIDO:

- María Elena Fernández-Long, Irene Barnatán, Claudia Dominici y Guillermo Murphy*
INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LAS HELADAS EN LA ARGENTINA:
GENERACIÓN Y USO 7
- Augusto César Crespi Abril, Alejandra María Isabel Montes, Gabriela Noemí Williams y
Mauro Fabián Carrasco*
USO DE SENSORES REMOTOS PARA LA DETECCIÓN DE EVENTOS DE
TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS HACIA AMBIENTES MARINOS EN
PATAGONIA 33
- Lucía Curto, Mauro Covi, María Isabel Gassmann, Matías Cambareri, Aída Della Maggiora*
CALIBRACIÓN DE DATOS OBSERVADOS DE CONTENIDO DE AGUA EN EL
SUELO CON SENSORES CAPACITIVOS 49
- Gustavo Almeida, Matilde Rusticucci, Martina Suaya*
RELACION ENTRE MORTALIDAD Y TEMPERATURAS EXTREMAS EN BUENOS
AIRES Y ROSARIO 65

Meteorología

PUBLICACIÓN SEMESTRAL DEL CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS

DIRECTOR

JUAN RUIZ. CIMA, CONICET/FCEN-UBA. UMI-IFAECI, CNRS. DCAO, FCEN-UBA. ARGENTINA

EDITORES EJECUTIVOS

PATRICIO ACEITUNO. UNIVERSIDAD DE CHILE. CHILE

MARIANA BARRUCAND. DCAO, CONICET/FCEN-UBA. ARGENTINA

JOSEFINA BLAZQUEZ. CIMA, CONICET/FCEN-UBA. UMI-IFAECI, CNRS. DCAO, FCEN-UBA. FCAG-UNLP. ARGENTINA

MARCELO BARREIRO. UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA. URUGUAY

RAMIRO SAURRAL. CIMA, CONICET/FCEN-UBA. UMI-IFAECI, CNRS. DCAO, FCEN-UBA. ARGENTINA

MARCELO SELUCHI. CEMADEN. BRASIL

CONSEJO EDITORIAL

E. KALNAY - U. MARYLAND/USA

V. R. BARROS - UBA/CONICET

H. FUENZALIDA - U. CHILE/CHILE

J. N. PAEGLE - U. UTAH/USA

M. N. NUÑEZ - UBA/CONICET

T. AMBRIZZI - U. SAO PAULO/BRASIL

N. A. MAZZEO - UBA/CONICET

W. M. VARGAS - UBA/CONICET

D. KAROLY - MONASH U./ AUSTRALIA

E. H. BERBERY - U. MARYLAND/USA

S. HASTENRATH - U. WISCONSIN/USA

A. M. GRIMM - U. F. PARANA/BRASIL

M. A. F. SILVA DIAS - U. SAO PAULO/BRASIL

H. LE TREUT - LMD-CNRS/FRANCIA

G. RAGA - UNAM/MEXICO

J. PAEGLE - U. UTAH/USA

H. CIAPPESONI - SMN/CONICET

I. VELASCO - UBA

J. RUTLLANT - U. CHILE/CHILE

G. NECCO - IAI/BRASIL

M. L. ALTINGER - UBA/CONICET

J. B. VALDES - U. ARIZONA/USA

P. L. SILVA DIAS - U. SAO PAULO/BRASIL

C. NOBRE - CPTEC - INPE/BRASIL

J. L. MINETTI - U. TUCUMAN/CONICET

V. KOUSKY - NCEP/USA

B. SCIAN - U. NAC. DEL SUR

P. WAYLEN - U. FLORIDA/USA

J. ZAWADSKI - MCGILL U./CANADA

R. D. GARREAUD U. CHILE/USA

Objetivo de la revista: Meteorologica publica y difunde trabajos y resultados de investigación teórica y aplicada en todas las áreas de las ciencias atmosféricas.

Sistema de arbitraje: Para que los trabajos sean incluidos en la revista deberán ser evaluados por, al menos, dos referís independientes. Todas las decisiones tomadas por la Dirección serán finales.

Indizada en Meteorological & Geostrophysical Abstracts. Incluida en el catálogo del sistema LATINDEX, en la biblioteca electrónica de Scielo, en la base de datos EBSCO, SHERPA/ROMEO y DOAJ.



Forma parte del Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentinas



Meteorologica por Centro Argentino de Meteorólogos se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 3.0 Unported.

©2015 Centro Argentino de Meteorólogos. Propietario

Intendente Güiraldes 2160

Ciudad Universitaria, Pabellón II, 2ºPiso

C1428EHA Buenos Aires, Argentina

Queda hecho el depósito legal que marca la ley 11723.

Registro de la Propiedad Intelectual 5266458.

ISSN: Versión en línea 1850-468X Versión en CD-ROM 2347-0364

Editorial

Estimados lectores, tenemos el agrado de presentar el segundo número del volumen 41 de la revista Meteorologica, el cual incluye cuatro artículos en temáticas de particular interés para la comunidad meteorológica y profesionales de áreas afines. En esta oportunidad, damos la bienvenida a un nuevo miembro del Comité Editorial: el Dr. Ramiro Saurral, que desde septiembre de 2016 participa activamente en todas las tareas de gestión.

En estos últimos meses hemos tenido una gran actividad vinculada con nuestra revista. En primer lugar, nos es grato informar que Meteorologica ha sido aprobada para su inclusión en la base de datos Scopus. Dicha incorporación será efectiva en los próximos meses y constituye un reconocimiento importante de la revista, que contribuirá a dar mayor visibilidad a los trabajos publicados. El Comité Evaluador de Scopus reconoció el esfuerzo continuo realizado para mantener la regularidad de la revista y la política editorial adoptada. En el ámbito local, también nos es grato informar que Meteorologica ha sido evaluada satisfactoriamente durante el segundo semestre de este año por el Centro Argentino de Información Científica y Tecnológica (CAICYT – CONICET), renovando su permanencia en el núcleo básico de Revistas Científicas Argentinas.

Queremos aprovechar esta oportunidad para comentarles que continúa el plan de renovación de nuestra revista. En el sitio web (<http://www.cenamet.org.ar/cam/meteorologica/>) se pueden consultar los números completos desde el año 2005 en adelante. Actualmente el Comité Editorial se encuentra abocado a la implementación de un nuevo sistema de administración de trabajos basado en la plataforma Open Journal System. Dicho sistema permitirá hacer más eficiente el proceso de recepción, revisión y publicación de los artículos enviados a nuestra revista. Estos logros han sido posibles gracias a la labor continuada de los autores, revisores y editores que desde su fundación han apostado a la difusión y generación de conocimiento en el ámbito nacional y regional y que desde 2009 han además contribuido a la difusión libre del conocimiento a través de la implementación de las políticas de acceso libre y gratuito a todo el material publicado por la revista.

El Comité Editorial agradece la contribución de los autores, quienes con sus aportes garantizan la continuidad de la revista y la excelencia del material que se publica. El Comité Editorial desea agradecer también la participación de numerosos científicos argentinos y extranjeros como revisores, quienes avalan la calidad científica de Meteorológica. Invitamos a todos los profesionales e investigadores que se desempeñan en áreas relacionadas con las ciencias de la atmósfera, los océanos y ciencias afines, a seguir enviando sus contribuciones a nuestra revista.

Como siempre, agradecemos al Centro Argentino de Meteorólogos por su permanente apoyo a este Comité Editorial.

Este número está dedicado a la memoria del Dr. Erich Lichtenstein quien ha sido socio fundador del Centro Argentino de Meteorólogos y a la Lic. Patricia Ibarra. En sus páginas encontrarán afectuosos recordatorios para ambos.

La Dirección

Erich Ricardo Lichtenstein

El día 4 mayo de 2016 la comunidad meteorológica recibió con inmenso dolor la noticia del fallecimiento del Dr. Erich Ricardo Lichtenstein, uno de los grandes pioneros de la meteorología nacional, con admirable trayectoria profesional, principalmente en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Universidad de Buenos Aires (UBA). El Dr. Lichtenstein participó además en numerosas sociedades científicas y profesionales a nivel nacional e internacional. Fue socio fundador del Centro Argentino de Meteorólogos (CAM) desde el año 1969 y su presidente entre 1972 y 1974. Fue además miembro del Tribunal de Honor, entre 1973 y 1978. Integró la Comisión Directiva del CAM en distintos cargos hasta 2007 y fue miembro del Comité Editorial de la revista Meteorologica editada por el CAM donde también contribuyó en numerosas oportunidades como autor y revisor.



Su carrera profesional se inició en 1944 en el SMN, donde se desempeñó sucesivamente como pronosticador, meteorólogo principal, Jefe del Departamento Central de Pronósticos, Jefe del Instituto de Investigaciones Sinópticas y Jefe del Departamento de Investigaciones. Fue también Asesor Especializado del Director y representante argentino en la Organización Meteorológica Mundial y en diversos foros técnicos nacionales e internacionales. El Dr. Lichtenstein tuvo un papel clave en la realización de los primeros sondeos aerológicos en la Argentina y, fundamentalmente, en la creación y el desarrollo de la Central de Análisis, que dejaron al país en una posición de avanzada en el escenario meteorológico mundial. En la otra orilla del Río de la Plata, realizó también importantes contribuciones para impulsar la Dirección General de Meteorología (hoy Instituto Uruguayo de Meteorología).

El aporte del Dr. Lichtenstein a la calidad y confiabilidad del pronóstico del tiempo fue especialmente notable en los largos años en que la Argentina careció de sistemas o modelos numéricos sofisticados de pronóstico, donde la interpretación, conocimiento y experiencia del meteorólogo eran la herramienta fundamental para determinar la precisión del pronóstico para los próximos días. Su agudísima percepción para extraer informaciones decisivas a partir de datos puntuales o de imágenes de satélite no fue, quizás, igualada hasta hoy. Es posible que esa virtud se haya debido en parte a su completa trayectoria dentro de la meteorología, que incluyó todos los escalones académicos posibles, desde el de observador y pronosticador meteorológico hasta el doctorado en Meteorología. Con el tiempo, se tornó una de las mayores referencias de la meteorología sinóptica de América del Sur, particularmente en su porción extratropical, y uno de los mayores conocedores a nivel mundial, quizás el mayor de todos, en lo que se refiere a la influencia que la Cordillera de los Andes ejerce sobre los sistemas meteorológicos, especialmente en la escala sinóptica y la meso escala.

Tales conocimientos fueron pacientemente transmitidos a sus alumnos y discípulos de la Universidad de Buenos Aires, con una humildad y generosidad casi imposibles de encontrar en los tiempos competitivos actuales. El Dr. Lichtenstein ha sido un “maestro” en el amplio sentido de la

palabra, por sus notables dones y su vocación de enseñanza. Su legado científico y profesional se traduce no sólo en su importante currículum académico, que incluye varias publicaciones, sino también a través de formas menos visibles como una larga serie de notas técnicas y publicaciones internas realizadas para el SMN que, a pesar de los años transcurridos, se mantienen perfectamente vigentes y, muy especialmente, a través de innumerables contribuciones espontáneas y desinteresadas realizadas a sus colegas, y plasmadas en publicaciones que en muchas ocasiones ni siquiera lo incluyen como coautor.

La pasión y la precisión con la que se dedicaba a la investigación con sus discípulos, en modo casi artesanal, es un recuerdo imborrable. Su legendaria pregunta “¿A Usted le parece?” que formulaba cuando alguno de sus discípulos dudaba de algún concepto, siempre dejaba la sensación que él sabía la respuesta.

El Dr. Lichtenstein fue un ejemplo cabal de amor a la profesión, donde los intereses de la ciencia meteorológica se antepusieron siempre a los personales. Dueño de una conducta profesional y ética intachable, los que tuvimos el privilegio y el honor de conocerlo como docente, colega, consejero y amigo estaremos eternamente orgullosos y agradecidos. Su legado debe inspirarnos para continuar desarrollando la ciencia meteorológica y fortaleciendo nuestras instituciones, como él hizo durante más de 50 años.

Muchas gracias por todo, querido maestro!

Drs. Marcelo Seluchi, Federico Norte, Norma Possía y Hugo Berbery

Patricia Ibarra

Patricia Ibarra fue una excelente Meteoróloga. Nació un 12 de abril de 1960 y se recibió de Licenciada en marzo de 1987. Fue becaria de la Universidad de Buenos Aires trabajando bajo la dirección de Alberto Flores en el tema Heladas tempranas en Fruticultura en el Alto Valle del Río Negro . Proyecto MECIN, con lugar de trabajo en el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEN UBA). Becaria de la UBA con el mismo tema. Siempre se caracterizó por los detalles en todas sus investigaciones, por su capacidad enorme de trabajo y dedicación y por su habilidad para resolver varios temas simultáneamente. Lo demostró durante las campañas del MECIN. Eramos ocho personas y había que coordinar muchas tareas diferentes, dado que el grueso del trabajo era durante la noche. Recepción de datos meteorológicos, control de inflado de globo, preparación de radiosonda, recepción y decodificado de datos, cebar mate y preparar otras bebidas calientes, atender escuelas y productores que nos visitaban hasta casi medianoche, preparar el informe de lo realizado durante la noche, etc., etc.,etc. . .y comunicarse con la familia estando a 1200 km de casa. . .



Se desempeñó como consultora independiente luego de haber decidido que este sistema universitario no le satisfacía, siempre decidió independientemente de los demás, su deseo bien pensado y estudiado predominaba y no dudaba en tomar decisiones por más arriesgadas que parecieran. Siempre colaboró con las actividades del DCAO, de extensión y en el Centro Argentino de Meteorólogos donde formó parte de la comisión Directiva durante la presidencia de Jesús Gardiol. Fue una excelente docente que se desempeñó en la Universidad del Salvador y en la Universidad de Tres de Febrero donde, en los últimos tiempos, generó un grupo de investigación en materia meteorológica. Podríamos hablar más y más de su labor, sin embargo, es la persona maravillosa a la que queremos rescatar. Siempre generosa, siempre alegre, sus palabras eran las justas, las precisas, las necesarias. Nunca dudaba en prestar su ayuda y su presencia en los momentos más difíciles. Fue una excelente mamá y dejó tres maravillosos hijos, el primero de los cuales nació aún antes de recibirse de Meteoróloga. Siempre supo combinar su maternidad con su trabajo, junto a su compañero de vida, Carlos, que tanto supo querer. Amiga querida, donde quiera que estés has dejado huella, esa huella que dejan los grandes, que son grandes por sencillos, honestos, sinceros, esos valores que hacen grandes a las personas que son sabios de la vida. Imposible borrar esa huella que dejaste en nuestros corazones. Te fuiste muy temprano, con sólo 54 años nos dejaste el 22 de febrero de 2015, fecha que quedará grabada en mi memoria porque ya no contamos con tus consejos, con tu voz, con tu alegría. Aún en esos últimos momentos tan difíciles que te tocaron vivir, supiste estar entera, supiste dejar cada cosa en su lugar y nos diste a todos los que te acompañamos la entereza que nosotros no teníamos. Con mucho dolor por la ausencia física pero con la seguridad de que no pasaste en vano por esta vida te decimos “hasta siempre”, “hasta luego Pato”; ojalá puedas recibir desde aquí este enorme cariño.

Marcela H. González y Alberto L. Flores

**INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LAS HELADAS EN LA ARGENTINA:
GENERACIÓN Y USO**María Elena Fernández-Long^{1,2}, Irene Barnatán^{1,2}, Claudia Dominici¹ y Guillermo Murphy¹¹ Facultad de Agronomía, UBA. Av. San Martín 4453, CABA, Argentina.² Servicio Meteorológico Nacional, 25 de Mayo 658, CABA, Argentina.

(Manuscrito recibido el 6 de enero de 2015, en su versión final el 6 de noviembre de 2015)

RESUMEN

La información climática es una herramienta cada vez más utilizada al momento de la toma de decisiones tanto en el campo de la agronomía como en otras áreas. Su uso supone el diagnóstico del elemento a analizar, mediante el conocimiento de las condiciones medias y su variabilidad, y su posterior pronóstico, definiendo previamente el nivel de riesgo que se desea asumir. Las fechas de ocurrencia de primeras y últimas heladas son de fundamental importancia en la programación del calendario agrícola, y existen distintas metodologías para su estimación que conducen a resultados diferentes. El propósito de este trabajo es, en primer lugar, presentar una definición y metodología de determinación de fechas de primera y última heladas aplicable a la Argentina. En segundo lugar, calcular y describir las principales variables agroclimáticas de heladas (fecha media de primera y última helada, período con heladas, frecuencia de días con helada, etc.), para dos umbrales: 0 °C (helada meteorológica) y 3°C (helada agrometeorológica). Y, por último, generar una base de datos confiable y de fácil acceso e interpretación, que se encuentre disponible para diferentes usuarios.

Palabras clave: heladas, datos agroclimáticos, probabilidades, Argentina

GENERATION AND USE OF FROST INFORMATION IN ARGENTINA**ABSTRACT**

Climate information is an increasingly used tool to take decisions in agriculture and other areas. Diagnosis of the element, the knowledge of their average conditions and variability, and subsequent prognosis, with predefined risk levels, are different aspects of its use. The dates of occurrence of first and last frosts are really important to plan agricultural calendar, and there are different methodologies to obtain them that lead to different results. So, the objective of this paper, first of all, is show the definitions and methodology to determinate first and last frost dates applicable to Argentina. Then, calculate and describe the main agro-climatic variables frost (average date of first and last frost, frosty period, frequency of days with frost, etc.) to two thermal thresholds: 0°C (meteorological frost) and 3°C (agrometeorological frost). Finally, create a reliable database, easy to access and interpret, to be used by different users.

Keywords: frost, agro-climatic database, probability, Argentina

1. INTRODUCCIÓN

La estimación anticipada de la producción agrícola constituye una herramienta de vital importancia para todos los sectores de la economía de un país. La variabilidad climática genera la mayoría de las fluctuaciones interanuales en los rendimientos de cultivos que representan una proporción importante de la alimentación básica de la humanidad (FAO, 1974). El conocimiento del clima es un poderoso instrumento que contribuye a la planificación y la gestión de todas las actividades socioeconómicas que apuntalan el desarrollo sostenible (Martínez y otros, 2010). El uso de información climática es crucial en la toma de decisiones y en la gestión efectiva del riesgo climático (Goddard y otros, 2010).

En la Argentina numerosos autores han analizado el impacto del uso de la información climática en el sector agropecuario (Rivarola y otros, 2002/03; Vinocur y otros, 2004; Bert y otros, 2006; Barsky y otros, 2008). Esta información se compone, en líneas generales, de tres herramientas claves: climatología (promedios históricos), diagnóstico y pronóstico (Podestá, 2012). Respecto de la primera, es fundamental conocer las condiciones medias o climatológicas, basadas en registros históricos de 20/30 años para entender cuál es la condición más frecuente en una región, y sus rangos de variabilidad. Sobre esta base se puede calcular la probabilidad de ocurrencia de ciertas situaciones y en función de los resultados, planificar y definir estrategias.

En este contexto, las variables relacionadas con el régimen de heladas tales como, las fechas de comienzo y fin del período con heladas, son de fundamental importancia en la programación del calendario agrícola (Fernández Long y Barnatán, 2013). Thom y Shaw (1958) plantearon las bases para la predicción climatológica de las primeras y últimas heladas. Más adelante, Thom (1959) ideó una técnica analítica para utilizar cuando los umbrales de temperatura seleccionados no ocurrieran todos los años

que luego fue modificada por Vestal (1971). Esta metodología fue ampliamente utilizada en Estados Unidos y recomendada por el Centro Climático de Datos (NCDC: National Climatic Data Center) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sobre todo, para regiones templadas (Koss y otros, 1998).

El sur de Sudamérica, caracterizado por su gran variabilidad climática (Garreaud y otros, 2009) y por fuertes irrupciones de aire frío que se manifiestan en algunos años en particular (Müller y otros, 2005; Müller and Ambrizzi, 2006; Müller 2007), determina que no todos los años se presenten heladas. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de analizar la probabilidad de la no ocurrencia del evento, siendo de gran importancia a la hora de caracterizar las fechas de primeras y últimas heladas. Sin embargo, en muchos trabajos esto no es tenido en cuenta, o no se aclara la metodología utilizada, observándose importantes diferencias en los resultados obtenidos, lo cual podría llevar a decisiones incorrectas.

En Argentina, Damario y otros (1996) realizaron las cartas climáticas de fechas de primera y última helada para el período 1961-1990 con datos estimados según la metodología propuesta por Papadakis (1952) y luego modificada por Damario y Pascale (1984, 1993/94); la cual se basa en la utilización de los valores climáticos de las "temperaturas mínimas mensuales medias" de por lo menos 20 años, que a través de un método gráfico determina las fechas medias de primera y última helada. Con anterioridad, Hirschhorn (1939) analizó la dispersión de las fechas medias de primeras y últimas heladas y, más adelante, el régimen de las temperaturas mínimas con las observaciones disponibles hasta 1948, publicando luego el Atlas Agroclimático Argentino que reprodujo Burgos (1963), basado también en una metodología gráfica. Existen también numerosos trabajos que caracterizan las heladas para distintos sitios (Monterubbiansi y Cendoya (2001) en Balcarce; Orta y Federighi (1996) en Villa Mercedes (San Luis); Costa y Abregú (2002) en Chaco; Navarro y otros, (2003)

en Azul; Fernández Long y otros, (2001) en la Ciudad de Buenos Aires y conurbano Bonaerense; Fernández Long y otros, (2004, 2005) en la región Pampeana), en muchos de los cuales no se aclara la metodología utilizada.

El objetivo de este trabajo es, en primer lugar presentar una definición y metodología de cálculo de fechas de primera y última heladas clara y aplicable a la Argentina. En segundo lugar, calcular y describir las principales variables agroclimáticas de heladas (fecha media de primera y última helada, período con heladas, frecuencia de días con helada, etc.), para dos umbrales: 0 °C (helada meteorológica) y 3°C (helada agrometeorológica) (Fernández Long y Barnatán, 2013).Y, por último, generar una base de datos confiable y de fácil acceso e interpretación, que se encuentre disponible en la web.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1. Datos

Se utilizaron datos diarios de temperatura mínima de 124 estaciones meteorológicas de la Argentina, correspondientes al período 1950-2012. Esta información fue proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto de Tecnología Agropecuaria (INTA). Las temperaturas mínimas diarias (Tmin) utilizadas fueron previamente consistidas y corregidas según normativas vigentes en ambas instituciones y de acuerdo con las pautas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1984). Los datos de Tmin cuentan con diversos controles tanto en tiempo real como en tiempo diferido. Cuando el mensaje SYNOP de 0 y 12 UTC (que es el que trae los datos de temperaturas máximas y mínimas) ingresa a la Base de Datos en tiempo real, bajo ambiente Oracle, se realizan controles automáticos respecto de las temperaturas horarias (la Tmin no puede ser superior a cualquier temperatura horaria del período), y de la temperatura de 5 cm sobre el suelo (se sospecha cuando la diferencia entre ambas es superior a

5°C). Además, otra de las consistencias muestra como sospechosa la temperatura mínima que difiere en más de 2°C respecto de la temperatura horaria menor del período. En estos casos, se ratifica o rectifica el dato consultando con el observador de la estación meteorológica en el momento. Luego, una vez completado un año de información se realizan otros controles como: chequeo de temperatura mínima menor que -15°C o mayor que 30°C y chequeo del fenómeno de ocurrencia de helada. En el Tabla I se presenta la ubicación de las estaciones y el período de años disponibles, y en la Figura 1 se muestra la distribución geográfica.

Para la determinación de las heladas se trabajó con dos definiciones diferentes. Se denominó helada meteorológica a toda temperatura mínima igual o inferior a 0 °C; y helada agrometeorológica a toda temperatura mínima igual o menor a 3 °C, ambas medidas en abrigo meteorológico (Fernández Long y Barnatán, 2013).

Las series de fecha de primera helada (FPH) y fecha de última helada (FUH) se definieron mediante el criterio de Pascale y Damario (2004), que determinada que la serie FPH queda conformada como el primer día juliano del año en el que se registra una helada, siempre y cuando la misma ocurra antes del día juliano 196 (15 de julio), de lo contrario, en ese año en particular no habrá ocurrido el evento. Análogamente, la serie FUH se define como el último día juliano en el que se registra una helada, siempre y cuando la misma ocurra después del día 196; y, al igual que en la serie anterior, es posible la no ocurrencia del evento. De esta manera, es posible tener primera helada y no última y viceversa. En los años en que la FPH y/o la FUH se determina como faltante, en esos casos PER también es considerado dato faltante.

Además, se obtuvo la temperatura mínima absoluta (Tabs: temperatura más baja que se registra a lo largo de un año determinado), la frecuencia de días con heladas (FH:número de eventos de heladas producidos en un

Nombre de la estación	Provincia	Lat	Lon	asnm	Año inicial	Año Final	Nro años	Años fal.
Aeroparque AERO	Buenos Aires	-34,57	-58,42	6	1956	2012	57	1
Azul AERO	Buenos Aires	-36,83	-59,88	147	1995	2012	18	0
Bahía Blanca AERO	Buenos Aires	-38,73	-62,17	83	1956	2012	57	1
Balcarce INTA	Buenos Aires	-37,75	-58,30	130	1969	2011	43	0
Barrow INTA	Buenos Aires	-38,32	-60,25	120	1960	2011	52	1
Benito Juárez AERO	Buenos Aires	-37,72	-59,78	207	1981	2012	32	16
Bolívar AERO	Buenos Aires	-36,20	-61,07	94	1989	2012	24	4
Bordenave INTA	Buenos Aires	-37,85	-63,02	212	1960	2011	52	0
Buenos Aires OBS.	Buenos Aires	-34,58	-58,48	25	1950	2012	63	0
Castelar INTA	Buenos Aires	-34,67	-58,65	22	1951	2011	61	0
Coronel Pringles AERO	Buenos Aires	-38,02	-61,33	247	1994	2012	19	0
Coronel Suárez AERO	Buenos Aires	-37,43	-61,88	233	1950	2012	63	6
Dolores	Buenos Aires	-36,35	-57,73	9	1950	2012	63	13
El Palomar AERO	Buenos Aires	-34,60	-58,60	12	1956	2008	53	2
Ezeiza AERO	Buenos Aires	-34,82	-58,53	20	1956	2012	57	2
General Villegas INTA	Buenos Aires	-34,92	-62,73	117	1973	2011	39	16
Hilario Ascasubi INTA	Buenos Aires	-39,38	-62,62	22	1968	2011	44	1
Junín AERO	Buenos Aires	-34,55	-60,92	81	1958	2012	55	1
La Plata AERO	Buenos Aires	-34,97	-57,90	23	1961	2011	51	1
Laprida	Buenos Aires	-37,57	-60,77	212	1956	2008	53	7
Las Flores AERO	Buenos Aires	-36,03	-59,13	36	1988	2012	25	1
Mar del Plata AERO	Buenos Aires	-37,93	-57,58	21	1950	2012	63	3
Nueve de Julio	Buenos Aires	-35,45	-60,88	76	1950	2012	63	2
Olavarría AERO	Buenos Aires	-36,88	-60,22	166	1988	2012	25	0
Pehuajó AERO	Buenos Aires	-35,87	-61,90	87	1959	2012	54	1
Pergamino INTA	Buenos Aires	-33,93	-60,55	65	1950	2011	62	3
Pigüé AERO	Buenos Aires	-37,60	-62,38	304	1950	2012	63	1
Punta Indio B. A.	Buenos Aires	-35,37	-57,28	22	1957	2012	56	5
San Miguel	Buenos Aires	-34,55	-58,73	26	1950	2012	63	4
San Pedro INTA	Buenos Aires	-33,68	-59,68	28	1967	2011	45	0
Santa Teresita AERO	Buenos Aires	-36,55	-56,68	4	1988	2006	19	5
Tandil AERO	Buenos Aires	-37,23	-59,25	175	1961	2012	52	6
Trenque Lauquen	Buenos Aires	-35,97	-62,73	95	1956	2012	57	23
Catamarca AERO	Catamarca	-28,60	-65,77	454	1974	2012	39	2
Tinogasta	Catamarca	-28,07	-67,57	1201	1956	2012	57	5
Colonia Benítez INTA	Chaco	-27,42	-58,93	54	1968	2011	44	0
Las Breñas INTA	Chaco	-27,08	-61,12	102	1967	2011	45	1
Pcia. Roque Sáenz Peña	Chaco	-26,87	-60,45	90	1959	2011	53	0
Resistencia AERO	Chaco	-27,45	-59,05	52	1965	2012	48	1
Comodoro Rivadavia AERO	Chubut	-45,78	-67,50	46	1956	2012	57	2
Esquel AERO	Chubut	-42,93	-71,15	797	1961	2012	52	4
Paso de Indios	Chubut	-43,82	-68,88	460	1968	2000	33	4
Trelew AERO	Chubut	-43,20	-65,27	43	1956	2012	57	5

Tabla I: Información de las estaciones meteorológicas utilizadas. (Lat: latitud (grados y décimas); Lon: longitud (grados y décimas); asnm: altura sobre el nivel del mar en metros; Nro años: número de años analizados; Años fal: número de años faltantes).

Nombre de la estación	Provincia	Lat	Lon	asnm	Año inicial	Año Final	Nro años	Años fal.
Córdoba AERO	Córdoba	-31,32	-64,22	474	1956	2012	57	1
Laboulaye AERO	Córdoba	-34,13	-63,37	137	1950	2012	63	0
Manfredi INTA	Córdoba	-31,82	-63,77	292	1970	2011	42	0
Marcos Juárez AERO	Córdoba	-32,70	-62,15	114	1952	2012	61	5
Pilar OBS	Córdoba	-31,67	-63,88	338	1950	2012	63	3
Río Cuarto AERO	Córdoba	-33,12	-64,23	421	1950	2012	63	1
Villa Dolores AERO	Córdoba	-31,95	-65,13	569	1950	2012	63	1
Villa María del Río Seco	Córdoba	-29,90	-63,68	341	1951	2005	55	7
Bella Vista INTA	Corrientes	-28,43	-58,92	70	1964	2011	48	3
Corrientes AERO	Corrientes	-27,45	-58,77	62	1962	2012	51	5
Curuzú Cuatiá AERO	Corrientes	-29,78	-57,98	73	1977	2000	24	1
Mercedes INTA	Corrientes	-29,17	-58,02	100	1968	2011	44	3
Monte Caseros AERO	Corrientes	-30,27	-57,65	54	1950	2012	63	2
Paso de los Libres AERO	Corrientes	-29,68	-57,15	70	1956	2012	57	8
Concepción del Uruguay	Entre Ríos	-32,48	-58,23	21	1968	2011	44	0
Concordia INTA	Entre Ríos	-31,36	-58,12	48	1970	2011	42	8
Gualeguaychú AERO	Entre Ríos	-33,00	-58,62	21	1950	2012	63	7
Paraná INTA	Entre Ríos	-31,83	-60,52	110	1957	2011	55	1
Villaguay AERO	Entre Ríos	-31,85	-59,08	43	1962	2007	46	9
El Colorado INTA	Formosa	-26,30	-59,37	78	1962	2008	47	7
Formosa AERO	Formosa	-26,20	-58,23	60	1963	2012	50	1
Las Lomitas	Formosa	-24,70	-60,58	130	1956	2012	57	1
Jujuy AERO	Jujuy	-24,38	-65,08	905	1968	2012	45	1
Jujuy U N	Jujuy	-24,17	-65,18	1302	1987	2012	26	1
La Quiaca Obs	Jujuy	-22,10	-65,60	3459	1956	2012	57	0
Anguil INTA	La Pampa	-36,50	-63,98	165	1961	2011	51	0
General Pico AERO	La Pampa	-35,70	-63,75	145	1956	2012	57	3
Santa Rosa AERO	La Pampa	-36,57	-64,27	191	1950	2012	63	0
Chamical AERO	La Rioja	-30,37	-66,28	461	1963	2012	50	2
Chepes	La Rioja	-31,33	-66,60	658	1956	1997	42	5
Chilecito AERO	La Rioja	-29,23	-67,43	945	1989	2012	24	1
La Rioja AERO	La Rioja	-29,38	-66,82	429	1950	2012	63	8
La Consulta INTA	Mendoza	-33,73	-69,12	940	1970	2011	42	0
Malargüe AERO	Mendoza	-35,50	-69,58	1425	1958	2012	55	1
Mendoza AERO	Mendoza	-32,83	-68,78	704	1960	2012	53	1
San Martín (Mendoza)	Mendoza	-33,08	-68,42	653	1956	2012	57	3
San Rafael AERO	Mendoza	-34,58	-68,40	748	1957	2012	56	4
Uspallata	Mendoza	-32,60	-69,33	1891	1970	2009	40	21
Bernardo de Irigoyen AERO	Misiones	-26,25	-53,65	815	1988	2012	25	0
Cerro Azul INTA	Misiones	-27,65	-55,43	270	1968	2011	44	0
Iguazú AERO	Misiones	-25,73	-54,47	270	1961	2012	52	6
Oberá AERO	Misiones	-27,48	-55,13	303	1990	2012	23	1
Posadas AERO	Misiones	-27,37	-55,97	125	1956	2012	57	2

Tabla I (continuación): Información de las estaciones meteorológicas utilizadas. (Lat: latitud (grados y décimas); Lon: longitud (grados y décimas); asnm: altura sobre el nivel del mar en metros; Nro años: número de años analizados; Años fal: número de años faltantes).

Nombre de la estación	Provincia	Lat	Lon	asnm	Año inicial	Año Final	Nro años	Años fal.
Neuquén AERO	Neuquén	-38,95	-68,13	271	1958	2012	55	1
El Bolsón AERO	Río Negro	-41,97	-71,52	337	1980	2012	33	11
Alto Valle INTA	Río Negro	-39,02	-67,67	242	1970	2011	42	6
Bariloche AERO	Río Negro	-41,15	-71,17	840	1956	2012	57	2
Cipolletti	Río Negro	-38,95	-67,97	265	1979	2012	34	8
Maquinchao	Río Negro	-41,25	-68,73	888	1956	2012	57	2
Río Colorado	Río Negro	-39,02	-64,08	79	1956	2011	56	29
San Antonio Oeste AERO	Río Negro	-40,78	-65,10	20	1991	2012	22	2
Viedma AERO	Río Negro	-40,85	-63,02	7	1969	2012	44	1
Santiago del Estero AERO	S. del Estero	-27,77	-64,30	199	1950	2012	63	0
Orán AERO	Salta	-23,15	-64,32	357	1958	2012	55	6
Rivadavia	Salta	-24,17	-62,90	205	1956	1990	35	2
Salta AERO	Salta	-24,85	-65,48	1221	1951	2012	62	0
Tartagal AERO	Salta	-22,65	-63,82	450	1962	2012	51	18
Jachal	San Juan	-30,23	-68,75	1175	1962	2012	51	10
San Juan AERO	San Juan	-31,57	-68,42	598	1967	2012	46	1
San Juan INTA	San Juan	-31,37	-68,32	618	1969	2011	43	0
San Luis AERO	San Luis	-33,27	-66,35	713	1951	2012	62	3
Villa Mercedes INTA	San Luis	-33,72	-65,48	515	1968	2011	44	0
Villa Reynolds AERO	San Luis	-33,73	-65,38	486	1956	2012	57	2
Gob. Gregores AERO	Santa Cruz	-48,78	-70,17	358	1956	2012	57	16
Perito Moreno AERO	Santa Cruz	-46,52	-71,02	429	1956	2012	57	25
Puerto Deseado AERO	Santa Cruz	-47,73	-65,92	80	1957	2010	54	5
Río Gallegos AERO	Santa Cruz	-51,62	-69,28	19	1956	2012	57	8
San Julián AERO	Santa Cruz	-49,32	-67,78	62	1958	2012	55	9
Ceres AERO	Santa Fe	-29,88	-61,95	88	1950	2012	63	1
El Trébol	Santa Fe	-32,20	-61,67	96	1990	2012	23	1
Oliveros INTA	Santa Fe	-32,55	-60,85	26	1961	2011	51	1
Rafaela INTA	Santa Fe	-31,18	-61,55	100	1956	2011	56	1
Reconquista INTA	Santa Fe	-29,18	-59,70	42	1971	2011	41	2
Rosario AERO	Santa Fe	-32,92	-60,78	25	1950	2012	63	0
Sauce Viejo AERO	Santa Fe	-31,70	-60,82	18	1958	2012	55	2
Venado Tuerto	Santa Fe	-33,67	-61,97	112	1989	2012	24	3
Río Grande B. A.	T. del Fuego	-53,80	-67,75	22	1959	2012	54	13
Tolhuin	T. del Fuego	-54,70	-67,25	105	1991	2010	20	1
Ushuaia AERO	T. del Fuego	-54,80	-68,32	57	1991	2012	22	6
Famaillá INTA	Tucumán	-27,05	-65,42	363	1969	2011	43	0
Tucumán AERO	Tucumán	-26,85	-65,10	450	1982	2012	31	0

Tabla I (continuación): Información de las estaciones meteorológicas utilizadas. (Lat: latitud (grados y décimas); Lon: longitud (grados y décimas); asnm: altura sobre el nivel del mar en metros; Nro años: número de años analizados; Años fal: número de años faltantes).

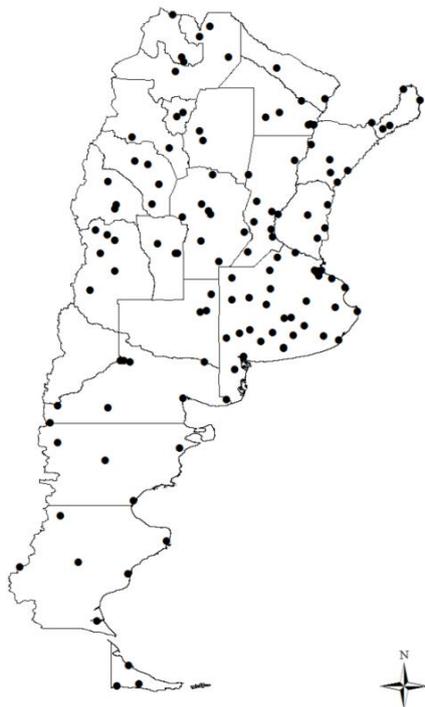


Figura 1: Distribución geográfica de las estaciones meteorológicas.

año determinado) y el período con heladas (PER: número de días que existe entre la primera y la última helada de un año determinado).

Para todas las variables se calcularon los valores con probabilidad del 50 %, considerado este como el valor más probable de ocurrencia, y aquellos con una probabilidad del 20 % por ser considerados como un nivel de riesgo aceptable.

2.2. Métodos

Las fechas de ocurrencia de una helada pueden considerarse como los valores de una variable aleatoria, por lo cual, es posible encontrar una función de distribución para las mismas. El modelo para determinar la probabilidad de heladas es un modelo mixto de dos distribuciones: una discreta (ocurre o no ocurre la helada) y una continua (ocurrencia de helada a partir o antes de una fecha dada, cuando ha ocurrido helada) (Thom, 1959).

Es sabido que una función de distribución continua puede expresarse como:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u)du \quad (1)$$

Dónde $f(u)$ es la función de densidad de probabilidades y $F(-\infty)=0$ y $F(\infty)=1$. Aquí $F(x)$ es la probabilidad de que u sea menor o igual que x . En primavera el interés está puesto principalmente en las últimas heladas y en la probabilidad de que éstas ocurran después de una determinada fecha x , y por lo tanto, en $1 - F(x)$. En otoño el interés está puesto en las primeras heladas y en la probabilidad de que ocurran antes de x , que estará dado por $F(x)$.

Para la determinación de la función de distribución discreta de últimas heladas se define q_s como la probabilidad de que NO ocurran heladas después del 15 de julio y p_s como la probabilidad de que SI ocurran, de esta manera $q_s + p_s = 1$. Por lo tanto, de acuerdo con la definición de distribuciones mixtas (Thom, 1959), la función de distribución de últimas heladas será:

$$G(x) = q_s + p_s F_s(x) \quad (2)$$

Donde $F_s(x)$ es la función de distribución de últimas heladas cuando éstas ocurren y $G(x)$ da la probabilidad de que ocurran o no heladas antes de una determinada fecha x . Como se mencionó, el interés general está en calcular la probabilidad de heladas después de una determinada fecha x entonces:

$$H(x) = 1 - G(x) \quad (3)$$

Reemplazando por (2) en (3) queda:

$$H(x) = 1 - (q_s + p_s F_s(x)) \quad (4)$$

Como $q_s + p_s = 1$, se puede escribir $q_s = 1 - p_s$, entonces:

$$H(x) = 1 - (1 - p_s + p_s F_s(x)) \quad (5)$$

Luego

$$H(x) = p_s(1 - F_s(x)) \quad (6)$$

Si se define $I(x) = 1 - F_s(x)$, entonces:

$$H(x) = p_s I(x) \quad (7)$$

La ecuación (7) da la probabilidad de que ocurran últimas heladas después de una determinada fecha x .

Para el caso de primeras heladas, se tiene una función de distribución mixta similar excepto que la probabilidad de NO helada está ahora concentrada después del período de heladas otoñales y no entra en la probabilidad antes de x . Por lo tanto, la función de distribución es:

$$J(x) = p_A F_A(x) \quad (8)$$

Donde $F_A(x)$ es la función de distribución de primeras heladas cuando éstas ocurren, p_A es la probabilidad de que ocurran primeras heladas y $J(x)$ es la probabilidad de que ocurran o no heladas antes de una determinada fecha x .

Las expresiones (7) y (8) son generales, y como puede verse, si todos los años se registran primeras y últimas heladas entonces: $q = 0$ y $p = 1$.

2.2.1. Funciones de distribución empírica

Para la estimación de las probabilidades, se determina en primer lugar las series FPH y FUH. Es importante distinguir en estas series aquellos años en los cuales no se registran primeras y/o últimas heladas, de aquellos en los que faltan los datos. Es posible que durante un año, si bien no falta ningún dato, no se registraron heladas porque la temperatura del aire durante ese año no disminuyó por debajo del umbral considerado como helada; o también puede ocurrir que durante un año se registre una sola helada, por ejemplo el día 15 de junio, en esos casos se tiene FPH pero no se tiene FUH, y se asigna el código de "sin helada" en FUH.

Una vez determinada las series de FPH y FUH se ordenan los valores de menor a mayor asignándoles un número de orden k . La función de distribución empírica de FUH en los años en que se registraron últimas heladas F_s^* queda determinada como:

$$F_s^* = k/(m + 1) \quad (9)$$

Dónde m es el número de años con últimas heladas. Por lo tanto, la función de distribución I^* que determina la probabilidad empírica de ocurrencias de heladas después de una determinada fecha (en los años que ocurrió helada) será:

$$I^* = 1 - k/(m + 1) \quad (10)$$

Para calcular la función de distribución empírica de ocurrencia o no de últimas heladas H^* , es necesario determinar primero la probabilidad de ocurrencia de heladas tardías p_s^* como:

$$p_s^* = m/n \quad (11)$$

Dónde n es el número de años con datos; por lo tanto $n-m$ será el número de años sin últimas heladas. Entonces, H^* se puede expresar como:

$$H^* = p_s^* I^* \quad (12)$$

De forma análoga se calcula la función de distribución empírica de ocurrencia de primeras heladas J^* .

2.2.2. Funciones de distribución teórica

En aquellos casos que los datos lo permiten, es recomendable utilizar funciones de distribución teóricas en lugar de funciones empíricas debido a que de esta forma se eliminan irregularidades en los datos, además permite la generación de valores extremos y fuera del rango de los datos observados. Numerosos autores han demostrado que las series de FPH y FUH se comportan en la mayoría de los casos como una normal (Reed, 1916; Thom y Shaw, 1958; Thom, 1959; Vestal, 1971; Bravo-Tapia, 1992; Burgos, 1963; Billiet, 2012). Para aseverar que la información que se posee se comporta de manera normal es necesario obtener la función teórica y comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de la muestra y la teórica y testarlo estadísticamente. La función normal teórica es:

$$f(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-(u - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

Si reemplazamos (13) en (1) queda:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(\frac{-(u - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) du \quad (14)$$

Luego, para confirmar el ajuste se utiliza el test de Kolmogorov-Smirnov (Wilks, 2006) con un $\alpha = 0,05$. En caso que los datos se ajusten, pueden ser considerados como una distribución normal, la cual es estandarizada $N(\mu, \sigma)$ y permite determinar la fecha x antes de la cual se tiene una probabilidad de ocurrencia de heladas a partir de la tabla de $N(0, 1)$. Utilizando la expresión:

$$x = z\sigma + \mu \quad (15)$$

Donde x es la fecha asociada a la probabilidad de ocurrencia del evento, σ es la desviación estándar y μ la fecha media de primera o última helada, según sea el caso.

2.2.3. Tratamiento de datos faltantes

Dado que las series de datos diarios poseen una gran cantidad de faltantes, y con el objetivo de no inducir a errores ni descartar información útil, se contabilizó la cantidad de días faltantes en los meses de abril a julio (principales meses en los cuales ocurren las primeras heladas) y de julio a octubre (últimas heladas). En los casos en que el número de datos faltantes en ese período fuese mayor a 25 (valor que corresponde aproximadamente al 20% de los datos), ese año se consideró como faltante y se eliminó del análisis posterior. De esta manera, es posible tener diferente número de años faltantes en las primeras y últimas heladas.

Respecto del mínimo número de años con datos analizado, se consideraron las series con más de 20 años de información y sólo en algunos casos especiales (Coronel Pringles, Azul y Santa Teresita) se decidió incluir series con 18 y 19 años debido a que en ese período no poseen datos faltantes y se encuentran en una zona de gran importancia agropecuaria.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A modo de ejemplo, se presentan en la Tabla II todos los cálculos realizados para la estación meteorológica Catamarca AERO correspondientes a fechas de primera (FPH) y última helada (FUH). En esta estación las

observaciones comienzan en mayo de 1973, por lo tanto para ese año no pudo determinarse la FPH por la cantidad de datos faltantes y se la registró como sin dato (s/d), pero sí la FUH. En el año 1974 la primera helada se registró el día 25 de julio, después de la fecha límite (15 de julio) para ser considerada como primera helada, quedando ese año sin primeras heladas (s/helada). En cambio, en 1982, la primera helada ocurrió en día 22 de junio (día juliano 173), fecha considerada como FPH, pero la última se registró el día 9 de julio, por lo tanto ese año no presentó últimas heladas.

Una vez determinada la serie de FPH se calculó la función de distribución empírica F_A^* con la ecuación (9). De los 37 años con datos (en los años 1973, 1988 y 2010, no se pudo calcular la FPH por falta de datos) hubo tres años en los que no se registraron heladas antes del 15 de julio (1974, 1998 y 2006); por lo tanto, a partir de la ecuación (11) se obtuvo $p_A^* = 0,92$ y se calculó la función de distribución empírica J^* (Tabla II y Figura 2a).

De manera similar, se determinó la FUH y se calcularon a partir de las ecuaciones (10) y (12) las funciones de distribución empírica I^* y H^* . El año 1973 se registró la última helada el día juliano 204 (23 de julio), con un número de orden $k=2$ indicando que fue el segundo año en el que se registraron las últimas heladas más tempranas (el primero fue el año 1979), por lo tanto $I^* = 0,95$, o sea que la probabilidad de que ocurran heladas después del 23 de julio es del 95% (en los años que se registran heladas). La probabilidad de ocurrencia de heladas tardías p_s^* arrojó un valor de 0,9. De los 40 años con datos ($n=40$) hubo 4 años en los que no se registraron últimas heladas (1982, 1997, 1998 y 2008), por lo tanto el número de años con últimas heladas fue de $m=36$ (Tabla II y Figura 2b). De esta manera, se puede observar cómo al considerar los años en que no se registran heladas, los resultados se modifican, siendo del 85% la probabilidad de que ocurran heladas después del 23 de julio ($H^*=0,85$).

Año	FPH				FUH			
	DJ	k	FA*	J*	DJ	k	I*	H*
1973	s/d	s/d	s/d	s/d	204	2	0.95	0.85
1974	s/helada	s/helada	s/helada	s/helada	208	6	0.84	0.75
1975	194	34	0.97	0.89	217	15	0.59	0.54
1976	155	10	0.29	0.26	249	35	0.05	0.05
1977	175	26	0.74	0.68	213	11	0.70	0.63
1978	159	14	0.40	0.37	228	24	0.35	0.32
1979	150	6	0.17	0.16	203	1	0.97	0.88
1980	155	10	0.29	0.26	213	11	0.70	0.63
1981	168	21	0.60	0.55	207	4	0.89	0.80
1982	173	25	0.71	0.66	s/helada	s/helada	s/helada	s/helada
1983	154	9	0.26	0.24	209	7	0.81	0.73
1984	134	1	0.03	0.03	221	19	0.49	0.44
1985	160	15	0.43	0.39	224	22	0.41	0.36
1986	158	12	0.34	0.32	260	36	0.03	0.02
1987	165	20	0.57	0.53	231	25	0.32	0.29
1988	s/d	s/d	s/d	s/d	239	30	0.19	0.17
1989	183	31	0.89	0.81	207	4	0.89	0.80
1990	139	2	0.06	0.05	244	31	0.16	0.15
1991	160	15	0.43	0.39	222	20	0.46	0.41
1992	151	7	0.20	0.18	225	23	0.38	0.34
1993	149	4	0.11	0.11	244	31	0.16	0.15
1994	176	27	0.77	0.71	245	34	0.08	0.07
1995	171	23	0.66	0.60	213	11	0.70	0.63
1996	153	8	0.23	0.21	218	16	0.57	0.51
1997	144	3	0.09	0.08	s/helada	s/helada	s/helada	s/helada
1998	s/helada							
1999	162	17	0.49	0.45	237	29	0.22	0.19
2000	172	24	0.69	0.63	205	3	0.92	0.83
2001	170	22	0.63	0.58	209	7	0.81	0.73
2002	162	17	0.49	0.45	216	14	0.62	0.56
2003	191	33	0.94	0.87	236	28	0.24	0.22
2004	163	19	0.54	0.50	233	27	0.27	0.24
2005	190	32	0.91	0.84	244	31	0.16	0.15
2006	s/helada	s/helada	s/helada	s/helada	210	10	0.73	0.66
2007	179	30	0.86	0.79	222	20	0.46	0.41
2008	149	4	0.11	0.11	s/helada	s/helada	s/helada	s/helada
2009	177	28	0.80	0.74	209	7	0.81	0.73
2010	s/d	s/d	s/d	s/d	220	17	0.54	0.49
2011	178	29	0.83	0.76	232	26	0.30	0.27
2012	158	12	0.34	0.32	220	17	0.54	0.49
Promedio	164				223			
Des. St.	14.6				14.9			

Tabla II: Fechas de primera (FPH) y última helada (FUH) en día juliano (DJ), número de orden (k) y funciones de distribución empírica FA*, J* de las FPH y I*, H* de las FUH, para la estación meteorológica Catamarca AERO.

Es importante remarcar las variaciones que pueden sufrir los resultados según sea la metodología utilizada. Por ejemplo, en Catamarca, de acuerdo con esta metodología, se define como la fecha media de primera helada (FMPH) al valor correspondiente al 50% de probabilidad de ocurrencia, que es el 11 de junio (Tabla IV) (día juliano 162). Pero, si simplemente se promedian los 34 valores observados de FPH se obtiene un valor de 164 (Tabla II) que corresponde al 13 de junio. A ambos resultados se los conoce con el mismo nombre (fecha media de primera helada, FMPH) pero indican situaciones diferentes. En el primer caso el 11 de junio representa la fecha media antes de la cual es probable que ocurran heladas

habiendo considerando todos los años en donde hay datos, sean o no años con heladas (37 años). En el segundo caso, el 13 de junio representa la fecha media antes de la cual es probable que ocurran heladas “siempre y cuando éstas ocurran”. Si bien en esta localidad la diferencia es de sólo dos días, en localidades más templadas, o cuando se consideran umbrales de heladas más bajos, las diferencias pueden ser muchísimo mayores. Tal es el caso de Formosa AERO donde la FMPH muestra una diferencia de 19 días, calculada con la otra metodología, debido a que en sólo 10 de los 49 años analizados se registraron primeras heladas, y en Las Lomitas la FMUH posee una diferencia de 13 días ya que hubo 18 años sin heladas en los 58 años analizados.

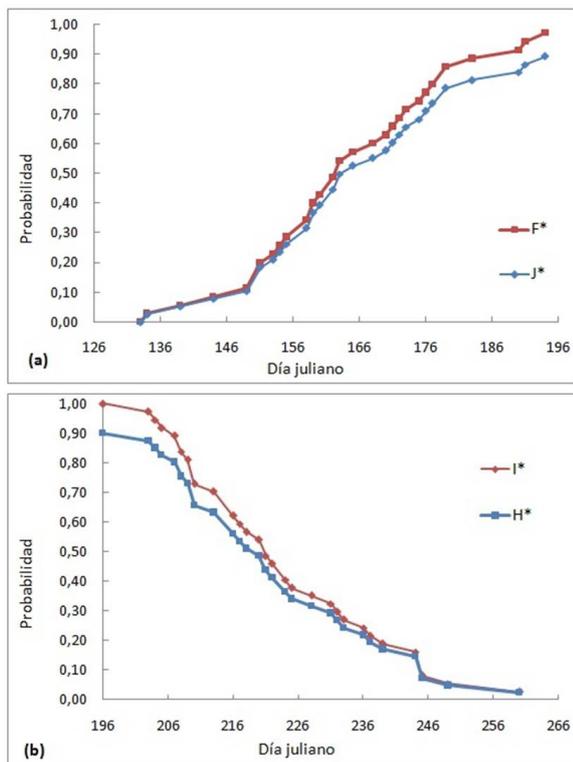


Figura 2: (a): Función de distribución empírica de FPH (F_A^*) y función de distribución mixta de FPH (J^*) para Catamarca AERO. (b): Función de distribución empírica de FUH (I^*) y función de distribución mixta de FUH (H^*) para Catamarca AERO.

Para obtener las funciones de distribución teórica (Tabla III) se calculó en primer lugar el promedio de las FPH (día juliano 164) y FUH (día juliano 223) y el desvío estándar (14,6 y 14,9 respectivamente, ver Tabla II). A partir de estos valores se calcularon las funciones de distribución normal $F(x)$ (ecuación (14)) para ambas series. Para las FUH se calculó la función $G(x)$ (ecuación (2)), siendo $p_s = 0,9$. Además, se calculó $H(x)$ (ecuación 7) pudiendo observarse que en Catamarca la probabilidad de ocurrencia de heladas después del día juliano 204 (23 de julio) es de 81%.

El cálculo de las funciones empíricas J^* y H^* permitió comprobar una vez más (Reed, 1916; Thom and Shaw, 1958; Thom, 1959; Vestal, 1971; Bravo-Tapia, 1992; Burgos, 1963; Billiet, 2012) la normalidad de las series de FPH y FUH; para ello se calcularon las diferencias con las funciones teóricas $F_A(x)$ y $H(x)$, y como se observa en la Tabla III y en la Figura 3.a y b, la máxima diferencia fue de 0,08 por lo que de acuerdo con el test de Kolmogorov-Smirnov (Wilks, 2006), no se rechaza la hipótesis nula y, por tanto la distribución de los datos es normal.

Estos resultados ponen de manifiesto las diferencias que se presentan en los resultados según se consideren o no los años en los que no

FUH							
Día Juliano	I*	H*	F _s (x)	G(x)	I(x)	H(x)	D
203	0.97	0.88	0.09	0.18	0.91	0.82	0.05
204	0.95	0.85	0.10	0.19	0.90	0.81	0.04
205	0.92	0.83	0.11	0.20	0.89	0.80	0.03
207	0.89	0.80	0.14	0.22	0.86	0.78	0.03
208	0.84	0.75	0.15	0.24	0.85	0.76	0.01
209	0.81	0.73	0.17	0.25	0.83	0.75	0.02
210	0.73	0.66	0.19	0.27	0.81	0.73	0.08
213	0.70	0.63	0.25	0.32	0.75	0.68	0.05
216	0.62	0.56	0.31	0.38	0.69	0.62	0.06
217	0.59	0.54	0.34	0.40	0.66	0.60	0.06
218	0.57	0.51	0.36	0.43	0.64	0.57	0.06
220	0.54	0.49	0.41	0.47	0.59	0.53	0.04
221	0.49	0.44	0.44	0.50	0.56	0.50	0.07
222	0.46	0.41	0.47	0.52	0.53	0.48	0.07
224	0.41	0.36	0.52	0.57	0.48	0.43	0.07
225	0.38	0.34	0.55	0.59	0.45	0.41	0.07
228	0.35	0.32	0.63	0.66	0.37	0.34	0.02
231	0.32	0.29	0.70	0.73	0.30	0.27	0.02
232	0.30	0.27	0.72	0.75	0.28	0.25	0.02
233	0.27	0.24	0.74	0.77	0.26	0.23	0.01
236	0.24	0.22	0.80	0.82	0.20	0.18	0.04
237	0.22	0.19	0.82	0.84	0.18	0.16	0.03
239	0.19	0.17	0.85	0.87	0.15	0.13	0.04
244	0.16	0.15	0.92	0.93	0.08	0.07	0.07
245	0.08	0.07	0.93	0.94	0.07	0.06	0.01
249	0.05	0.05	0.96	0.96	0.04	0.04	0.01
260	0.03	0.02	0.99	0.99	0.01	0.01	0.02

Tabla III: Funciones de distribución empíricas de las FUH: I* (probabilidad de que ocurran últimas heladas después de la fecha x en los años que hubo heladas), H* (probabilidad de que ocurran últimas heladas después de la fecha x) y teóricas: F_s(x) (probabilidad de que ocurran últimas heladas antes de x en los años en que hubo heladas), G(x) (probabilidad de que ocurran últimas heladas antes de x), I(x) (probabilidad de que ocurran últimas heladas después de x en los años en que ocurrieron heladas) y H(x) (probabilidad de que ocurran últimas heladas después de x), y diferencias (D) entre función empírica y teórica; para la estación meteorológica Catamarca AERO.

Estación	Helada meteorológicas (0 °C)					Helada agrometeorológicas (3 °C)				
	FPH	FUH	PER	TabS	FH	FPH	FUH	PER	TabS	FH
Aeroparque AERO	15-jul.	15-jul.	1	0.9	1	11-jun.	1-ago.	52	0.9	7
Azul AERO	20-abr.	12-oct.	176	-7.1	46	24-mar.	17-nov.	239	-7.1	92
Bahía Blanca AERO	3-may.	3-oct.	154	-6.2	31	7-abr.	7-nov.	215	-6.2	70
Balcarce INTA	1-jun.	22-sep.	114	-3.4	20	24-abr.	10-nov.	202	-3.4	66
Barrow INTA	25-abr.	27-oct.	187	-6.3	40	16-mar.	26-nov.	256	-6.3	90
Benito Juárez AERO	6-may.	26-sep.	144	-5.4	36	4-abr.	17-nov.	228	-5.4	82
Bolívar AERO	19-may.	19-sep.	124	-6.1	34	17-abr.	26-oct.	193	-6.1	71
Bordenave INTA	26-abr.	4-oct.	162	-7.2	39	27-mar.	8-nov.	227	-7.2	84
Buenos Aires OBS.	7-jul.	15-jul.	9	-0.8	2	29-may.	6-sep.	101	-0.8	16
Castelar INTA	25-may.	5-sep.	104	-3.8	14	27-abr.	5-oct.	163	-3.8	39
Coronel Pringles AERO	16-abr.	27-oct.	195	-7.8	51	26-mar.	24-nov.	244	-7.8	101
Coronel Suárez AERO	25-abr.	10-oct.	169	-7.1	49	29-mar.	14-nov.	231	-7.1	99
Dolores	9-may.	26-sep.	141	-4.5	25	7-abr.	9-nov.	217	-4.5	63
El Palomar AERO	25-may.	5-sep.	104	-4.1	15	29-abr.	8-oct.	163	-4.1	41
Ezeiza AERO	29-may.	8-sep.	104	-3.9	16	29-abr.	5-oct.	160	-3.9	44
General Villegas INTA	2-may.	18-sep.	140	-7.5	42	6-abr.	26-oct.	204	-7.5	82
Hilario Ascasubi INTA	1-may.	2-oct.	155	-6.8	41	3-abr.	11-nov.	223	-6.8	85
Junín AERO	17-may.	13-sep.	120	-5.4	24	23-abr.	5-oct.	166	-5.4	55
La Plata AERO	5-jun.	2-sep.	90	-3	12	4-may.	11-oct.	161	-3	41
Laprida	3-may.	4-oct.	155	-5.9	40	3-abr.	14-nov.	226	-5.9	92
Las Flores AERO	12-may.	22-sep.	133	-5.1	29	12-abr.	3-nov.	206	-5.1	65
Mar del Plata AERO	16-may.	13-oct.	151	-4.4	26	13-abr.	16-nov.	219	-4.4	67
Nueve de Julio	23-may.	4-sep.	106	-4.2	19	29-abr.	1-oct.	157	-4.2	50
Olavarría AERO	30-abr.	5-oct.	159	-6.1	44	7-abr.	15-nov.	223	-6.1	85
Pehuajó AERO	14-may.	18-sep.	128	-5.5	27	16-abr.	16-oct.	184	-5.5	62
Pergamino INTA	20-may.	13-sep.	117	-4.7	22	21-abr.	6-oct.	169	-4.7	54
Pigüé AERO	19-abr.	26-oct.	191	-6.8	48	24-mar.	22-nov.	244	-6.8	94
Punta Indio B. A.	11-jun.	11-ago.	62	-2.5	7	17-may.	25-sep.	132	-2.5	32
San Miguel	4-jun.	24-ago.	82	-3.2	12	4-may.	29-sep.	149	-3.2	36
San Pedro INTA	4-jun.	1-sep.	90	-3.2	10	5-may.	20-sep.	139	-3.2	35
Santa Teresita AERO	24-may.	12-sep.	112	-2.9	14	2-may.	24-oct.	176	-2.9	43
Tandil AERO	4-may.	8-oct.	158	-6	40	30-mar.	16-nov.	232	-6	88
Trenque Lauquen	24-may.	2-sep.	102	-4.6	21	25-abr.	27-sep.	156	-4.6	52
Catamarca AERO	11-jun.	7-ago.	57	-3.7	10	29-may.	1-sep.	96	-3.7	29
Tinogasta	16-may.	7-sep.	116	-6.8	52	30-abr.	29-sep.	153	-6.8	94
Colonia Benítez INTA	27-jun.	25-jul.	29	-1.8	3	2-jun.	3-sep.	94	-1.8	14
Las Breñas INTA	18-jun.	3-ago.	47	-3.3	5	30-may.	3-sep.	98	-3.3	16
Pcia. Roque Sáenz Peña INTA	24-jun.	8-ago.	46	-3.1	6	22-may.	5-sep.	107	-3.1	19
Resistencia AERO	3-jul.	31-jul.	29	-1.9	4	4-jun.	4-sep.	93	-1.9	15
Comodoro Rivadavia AERO	19-may.	14-sep.	119	-4.6	23	12-abr.	26-oct.	198	-4.6	67
Esquel AERO	4-mar.	22-nov.	264	-14.6	117	14-ene.	22-dic.	344	-14.6	195
Paso de Indios	19-mar.	27-oct.	223	-13.5	87	9-feb.	6-dic.	302	-13.5	151
Trelew AERO	22-abr.	7-oct.	169	-7.8	50	31-mar.	4-nov.	219	-7.8	101

Tabla IV: Valores correspondientes al 50 % de probabilidad de fecha de primera helada (FPH), fecha de última helada (FUH), período con heladas (PER), temperatura mínima absoluta (TabS), frecuencia de heladas (FH) para heladas meteorológicas y agrometeorológicas.

Estación	Helada meteorológicas (0 °C)					Helada agrometeorológicas (3 °C)				
	FPH	FUH	PER	TabS	FH	FPH	FUH	PER	TabS	FH
Córdoba AERO	1-jun.	27-ago.	89	-4.8	15	3-may.	21-sep.	142	-4.8	41
Laboulaye AERO	17-may.	11-sep.	118	-6.2	28	21-abr.	7-oct.	170	-6.2	62
Manfredi INTA	12-may.	19-sep.	131	-7.6	38	18-abr.	11-oct.	177	-7.6	68
Marcos Juárez AERO	22-may.	12-sep.	114	-6.2	23	26-abr.	6-oct.	164	-6.2	52
Pilar OBS	31-may.	2-sep.	95	-4.8	16	4-may.	19-sep.	140	-4.8	40
Río Cuarto AERO	2-jun.	28-ago.	88	-4.2	13	1-may.	21-sep.	144	-4.2	41
Villa Dolores AERO	31-may.	31-ago.	92	-5	11	3-may.	24-sep.	145	-5	33
Villa María del Río Seco	19-may.	11-sep.	116	-7	26	20-abr.	8-oct.	173	-7	52
Bella Vista INTA	15-jul.	15-jul.	1	1.2	0	22-jun.	24-jul.	33	1.1	6
Corrientes AERO	15-jul.	15-jul.	1	0.2	1	21-jun.	17-ago.	59	0.2	8
Curuzú Cuatiá AERO	9-jun.	3-ago.	55	-2.6	7	21-may.	17-sep.	120	-2.6	24
Mercedes INTA (Corrientes)	26-jun.	23-jul.	28	-1.6	6	30-may.	7-sep.	101	-1.6	20
Monte Caseros AERO	13-jul.	15-jul.	3	-0.8	2	4-jun.	23-ago.	80	-0.8	12
Paso de los Libres AERO	3-jul.	15-jul.	12	-1	2	4-jun.	21-ago.	79	-1	13
Concepción del Uruguay INTA	10-jun.	10-ago.	62	-2.6	9	17-may.	20-sep.	128	-2.6	31
Concordia INTA	7-jun.	23-ago.	78	-2.7	9	19-may.	19-sep.	124	-2.8	28
Gualeduaychú AERO	7-jun.	26-ago.	82	-3.5	11	8-may.	23-sep.	139	-3.5	34
Paraná INTA	28-jun.	28-jul.	31	-1.6	4	30-may.	9-sep.	103	-1.6	18
Villaguay AERO	21-may.	11-sep.	114	-4.6	17	30-abr.	6-oct.	160	-4.6	39
El Colorado INTA	10-jul.	22-jul.	13	-1.1	3	7-jun.	19-ago.	73	-1.1	10
Formosa AERO	15-jul.	15-jul.	1	0.6	1	29-jun.	5-ago.	37	0.6	5
Las Lomitas	25-jun.	28-jul.	34	-2.7	5	31-may.	28-ago.	90	-2.7	13
Jujuy AERO	26-jun.	5-ago.	42	-3	6	31-may.	5-sep.	99	-3	20
Jujuy U N	19-jun.	13-ago.	56	-3.4	9	19-may.	12-sep.	117	-3.4	32
La Quiaca Obs	12-abr.	26-oct.	198	-12.4	150	25-feb.	3-dic.	283	-12.4	193
Anguil INTA	25-abr.	6-oct.	165	-8.9	52	27-mar.	4-nov.	223	-8.9	97
General Pico AERO	5-may.	15-sep.	134	-7.1	30	18-abr.	15-oct.	181	-7.1	64
Santa Rosa AERO	29-abr.	24-sep.	149	-7.7	37	5-abr.	26-oct.	205	-7.7	78
Chemical AERO	18-jun.	8-ago.	51	-3.6	7	18-may.	3-sep.	109	-3.6	24
Chepes	9-jun.	16-ago.	69	-3.8	10	24-may.	4-sep.	104	-3.8	32
Chilecito AERO	29-may.	29-ago.	93	-5	23	5-may.	20-sep.	140	-5	59
La Rioja AERO	10-jun.	9-ago.	61	-3.1	10	27-may.	2-sep.	99	-3.1	31
La Consulta INTA	2-may.	1-oct.	153	-7.3	65	9-abr.	5-nov.	212	-7.3	116
Malargüe AERO	8-abr.	29-oct.	205	-12	97	15-mar.	22-nov.	254	-12	155
Mendoza AERO	31-may.	27-ago.	89	-4.6	25	4-may.	17-sep.	137	-4.6	63
San Martín (Mendoza)	15-may.	9-sep.	118	-5.3	27	27-abr.	2-oct.	159	-5.3	68
San Rafael AERO	11-may.	16-sep.	129	-6.2	36	15-abr.	22-oct.	191	-6.2	85
Uspallata	7-abr.	4-nov.	212	-12.1	120	3-mar.	27-nov.	270	-12.1	173
Bernardo de Irigoyen AERO	15-jul.	23-jul.	9	-1.2	2	8-jun.	2-sep.	87	-1.2	8
Cerro Azul INTA	15-jul.	15-jul.	1	0	1	11-jun.	7-ago.	58	0	6
Iguazú AERO	12-jul.	15-jul.	3	-0.9	2	6-jun.	21-ago.	76	-0.9	8
Oberá AERO	15-jul.	15-jul.	1	-0.2	2	9-jun.	24-ago.	77	-0.2	10
Posadas AERO	15-jul.	15-jul.	1	0.6	1	13-jun.	29-jul.	47	0.6	5

Tabla IV (continuación): Valores correspondientes al 50 % de probabilidad de fecha de primera helada (FPH), fecha de última helada (FUH), período con heladas (PER), temperatura mínima absoluta (TabS), frecuencia de heladas (FH) para heladas meteorológicas y agrometeorológicas.

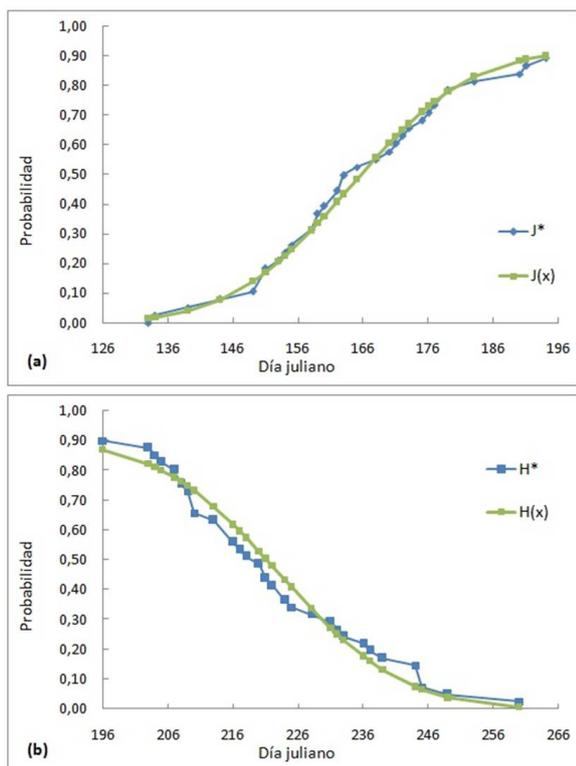


Figura 3: (a): Función de distribución empírica (J^*) y teórica ($J(x)$) de FPH para Catamarca AERO. (b): Función de distribución empírica (H^*) y teórica ($H(x)$) de FUH para Catamarca AERO.

se presentan heladas (Figura 3 a y b), que en este caso fue del 10% aproximadamente, pero en aquellas localidades donde la cantidad de años sin heladas es mayor como lo discutido para Formosa y Las Lomitas, las diferencias son muy importantes generando resultados muy diversos que, si no se los sabe interpretar pueden llevar a conclusiones erróneas.

En la Tabla IV se presentan los resultados de FPH, FUH, PER, Tabs y FH de las heladas meteorológicas y agrometeorológicas con una probabilidad de ocurrencia del 50% para todas las localidades estudiadas, lo que normalmente se conoce con el nombre de fecha media de primera helada (FMPH), fecha media de última helada (FMUH), período medio con heladas (PERM), temperatura mínima anual media (TabsM)

y frecuencia media de heladas (FMH). Es importante remarcar que en aquellas localidades donde no todos los años se presentan heladas, los valores de FMPH y FMUH pueden diferir mucho si esta condición no es tomada en cuenta. Además, es muy importante diferenciar los años en que no hubo registro (datos faltantes) de los que, aun habiéndose registrado la temperatura mínima, no se produjeron heladas.

Por ejemplo en Las Lomitas, provincia de Formosa, se muestran las funciones mixtas teóricas de distribución acumulada de las series de FPH y FUH (Figura 4). Se observa que existe un menor número de años con últimas heladas, que se traduce en una probabilidad acumulada total inferior al de las primeras. Esto se debe a que de los 57 años estudiados, hubo un año que se descartó por datos faltantes, quedando 56 años para el análisis, de los cuales en 12 no se registraron primeras heladas y en 18 no se produjeron últimas heladas, siendo $p_A^* = 0,79$ y $p_S^* = 0,68$. En otras regiones como Laboulaye (Figura no mostrada), las curvas de frecuencia acumulada de FPH y FUH llegan hasta uno, indicando que en todos los años analizados se registraron tanto primeras como últimas heladas.

En la Tabla V se presentan los resultados de la información agroclimática de las heladas meteorológicas de la estación de La Quiaca (provincia de Jujuy) tal cual se muestran en “El Portal de Heladas de la Argentina” que aparece en la web (<http://www.agro.uba.ar/heladas/>). En la primera fila, además del nombre de la estación, se muestra el período de años analizado. Luego, se detallan los valores medios de las FPH, FUH, PER, Tabs y FH. En este caso, las heladas comienzan en promedio el 12 de abril y terminan el 26 de octubre, generando un período medio con heladas de 198 días. El promedio de las temperaturas más bajas registradas en cada uno de los 57 años fue de $-12,4\text{ }^\circ\text{C}$, y el número de heladas promedio por año es de 150 casos, lo que indica que en casi la mitad de los días del año la temperatura está por debajo de $0\text{ }^\circ\text{C}$. En la fila siguiente se presentan los desvíos de cada una de las variables analizadas, poniendo de manifiesto,

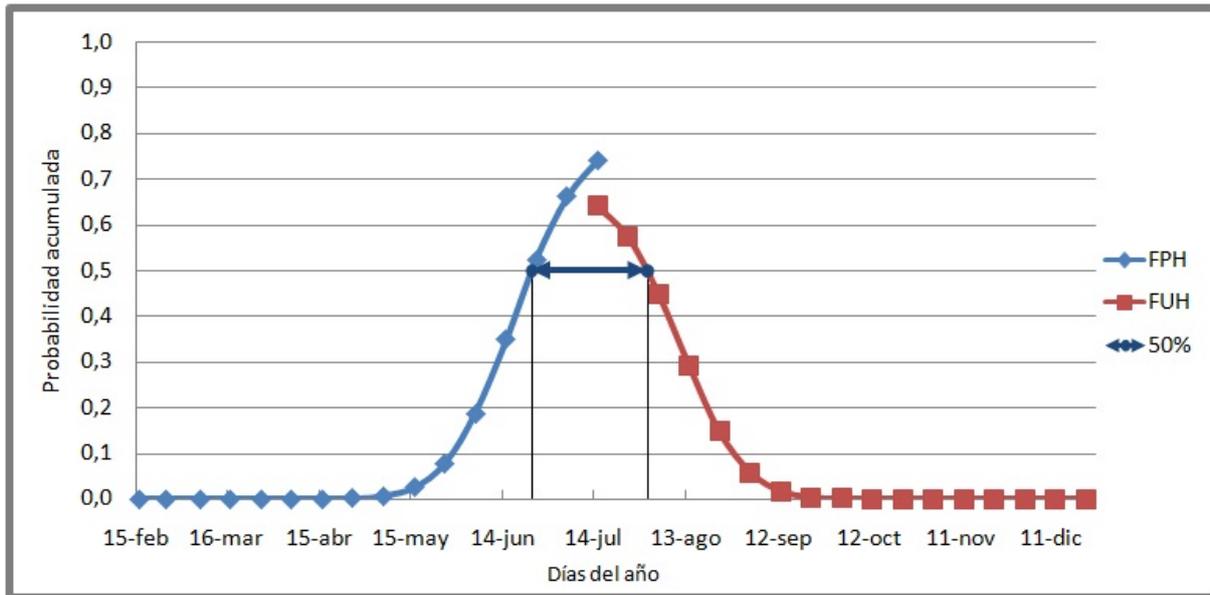


Figura 4: Función teórica de probabilidad acumulada de FPH (línea azul) y FUH (línea roja) en Las Lomitas. La línea con las flechas indica el período con heladas que tiene una probabilidad de ocurrencia del 20%.

La Quiaca Obs	Período analizado: 1956 2012				
	FPH	FUH	PER	TabS	FH
Valores medios	12-abr	26-oct	198	-12.4	150
Desvío estándar	15	14	21	1.3	12
Valores con probabilidad (%): 20	28-mar	6-nov	224	-13.5	160
Extremos	9-feb.	18-nov.	275	-15.2	178
Año de ocurrencia	1976	1970	1976	1981	1971
Nro. de años utilizados	57	57	57	57	57
Nro. de años sin heladas	0	0	0	0	0

Tabla V: Información agroclimática de las heladas meteorológicas en La Quiaca (provincia de Jujuy).

en este caso, que las FPH poseen un desvío algo mayor (15 días) que las FUH (14 días).

Además, se presentan los valores correspondientes a la probabilidad del 20% de cada una de las cinco variables, por ser éste un valor de riesgo comúnmente utilizado. Por lo tanto, si bien la fecha media de primera helada, en esta región, corresponde al 12 de abril, si un productor asume un riesgo del 20%, debería considerar que las heladas comenzarían el 28 de

marzo. De la misma manera, la fecha de última helada con una probabilidad de ocurrencia del 20%, corresponde al 6 de noviembre, indicando que uno de cada cinco años es esperable que ocurrieran heladas a partir de ese momento.

También se informan los valores extremos de cada una de las variables, indicando en cada caso el año de ocurrencia. En La Quiaca, de los 57 años analizados, la fecha de helada más temprana de la que se tiene registro corresponde al 9 de febrero

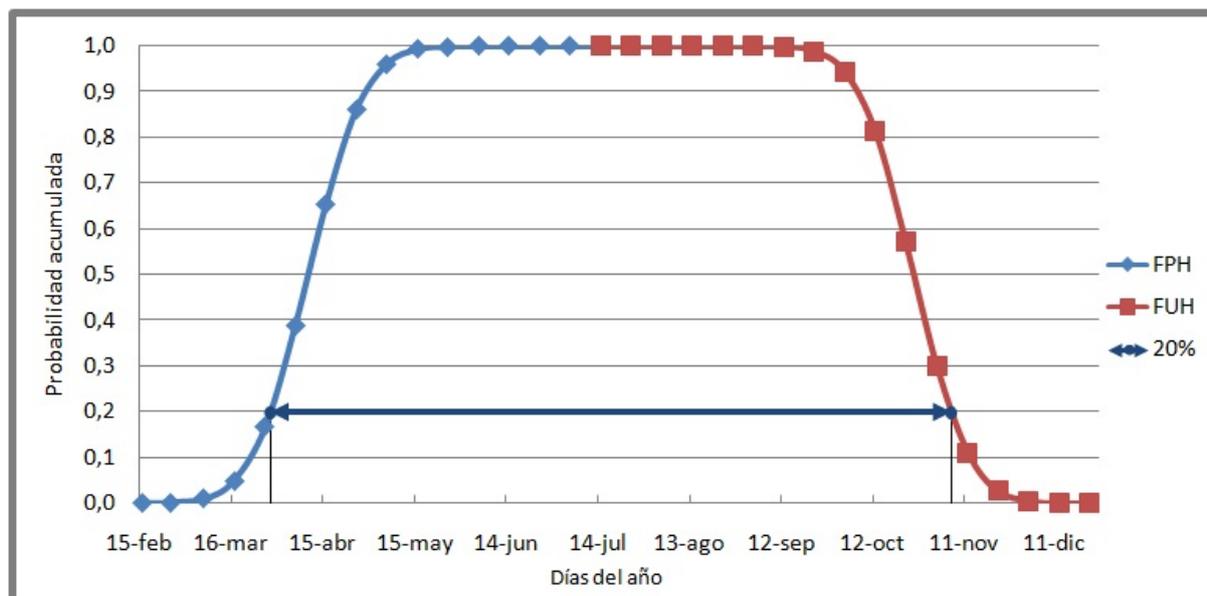


Figura 5: Funciones teóricas de probabilidad acumulada de FPH (línea azul) y FUH (línea roja) para La Quiaca (provincia de Jujuy). La línea con las flechas indica el período con heladas que tiene una probabilidad de ocurrencia del 20%.

de 1976, mientras que la fecha de helada más tardía se registró el 18 de noviembre de 1970. El período con heladas más extenso fue de 275 días y ocurrió durante el año 1976. La temperatura mínima más baja en esta estación fue de $-15,2^{\circ}\text{C}$, registrada en el año 1981, y el año con más heladas fue en 1971 con 178 días.

En las últimas filas de los cuadros se muestra el número de años utilizados para el cálculo de cada una de las variables. Estos valores pueden diferir unos de otros, debido a que la cantidad de datos faltantes antes del 15 de julio es distinta a la cantidad después de esa fecha. Así mismo, para poder realizar el cálculo del PER en un año determinado, los años considerados en ambas variables (FPH y FUH) deben coincidir, de manera que este valor es siempre menor o igual que los anteriores.

En la Figura 5 se pueden ver las funciones teóricas de probabilidad acumulada de FPH, FUH y el período con heladas, delimitado por la línea con flechas, probable de ocurrir en uno de cada cinco años (20% de probabilidad), permitiendo apreciar a simple vista la mayor o

menor peligrosidad de las heladas en las distintas estaciones meteorológicas presentadas. En La Quiaca el período con heladas es muy extenso (224 días).

Algunas de las estaciones meteorológicas poseen un récord inferior al período 1950-2012, como en Rivadavia (provincia de Salta) cuya información llega hasta el año 1990 (Tabla I), correspondiendo los 36 años al siglo pasado. Es importante remarcar que probablemente en los últimos años estos datos se hayan modificado como ocurrió en otras localidades de la Argentina (Fernández Long y otros, 2005, Fernández Long y otros; 2012).

Además, para cada estación meteorológica, se presenta el gráfico de la evolución temporal del período con heladas (Figuras 6 y 7) donde puede verse el período con helada en cada uno de los años analizados. En estos gráficos se adicionó una línea correspondiente al 1 de mayo y 1 de octubre como referencia visual. Por ejemplo, se observa que en Laboulaye (Figura 6) las últimas heladas ocurren casi siempre antes del 1 de octubre (a excepción de los años 1957, 1965, 1972

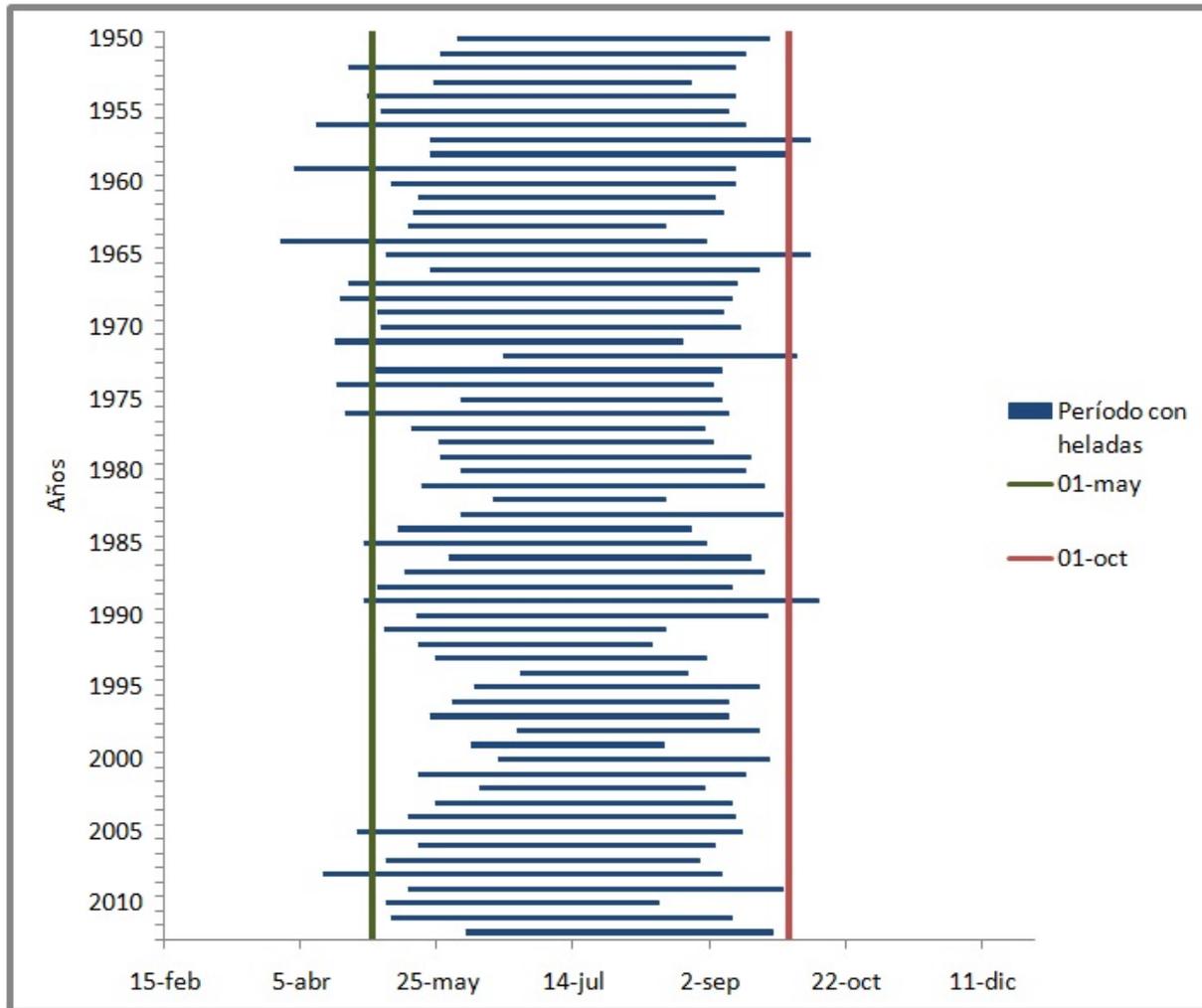


Figura 6: Evolución temporal del período con heladas (barras) en Laboulaye. Se grafican dos líneas (1 de mayo y 1 de octubre) como referencia visual.

y 1989); mientras que las primeras heladas son más riesgosas habiéndose registrado varios años antes del 1 de mayo. También puede observarse que en la década del 80 y 90 el período con heladas fue mucho menor, volviendo a registrarse heladas muy tempranas en los últimos años.

Para los casos en que no se realizó la observación meteorológica (datos faltantes), ese año figura en blanco, sin barra alguna. En los casos en que, habiéndose realizado la observación, no se registraron heladas, se grafica sólo un punto. La Figura 7 muestra la evolución temporal del período con heladas en Las Lomitas, donde se ve claramente que en los primeros años (1950-1955)

no se realizaron observaciones, así como durante el año 1958, mientras que en los años 1982, 2002, 2006 y 2010, habiéndose realizado observaciones, no se registraron heladas. La frecuencia de años sin heladas aumentó considerablemente hacia el final del período. Desde 1956 hasta el 2001 se registró un solo año sin heladas (1982), mientras que desde el 2002 al 2012 hubo 3 casos, mostrando una disminución del riesgo por esta adversidad en esta región.

Dado que uno de los objetivos de este trabajo es obtener información agroclimática útil para diferentes usuarios, los cálculos fueron realizados también para las heladas agrometeorológicas (temperaturas inferiores o iguales a 3 °C medidos

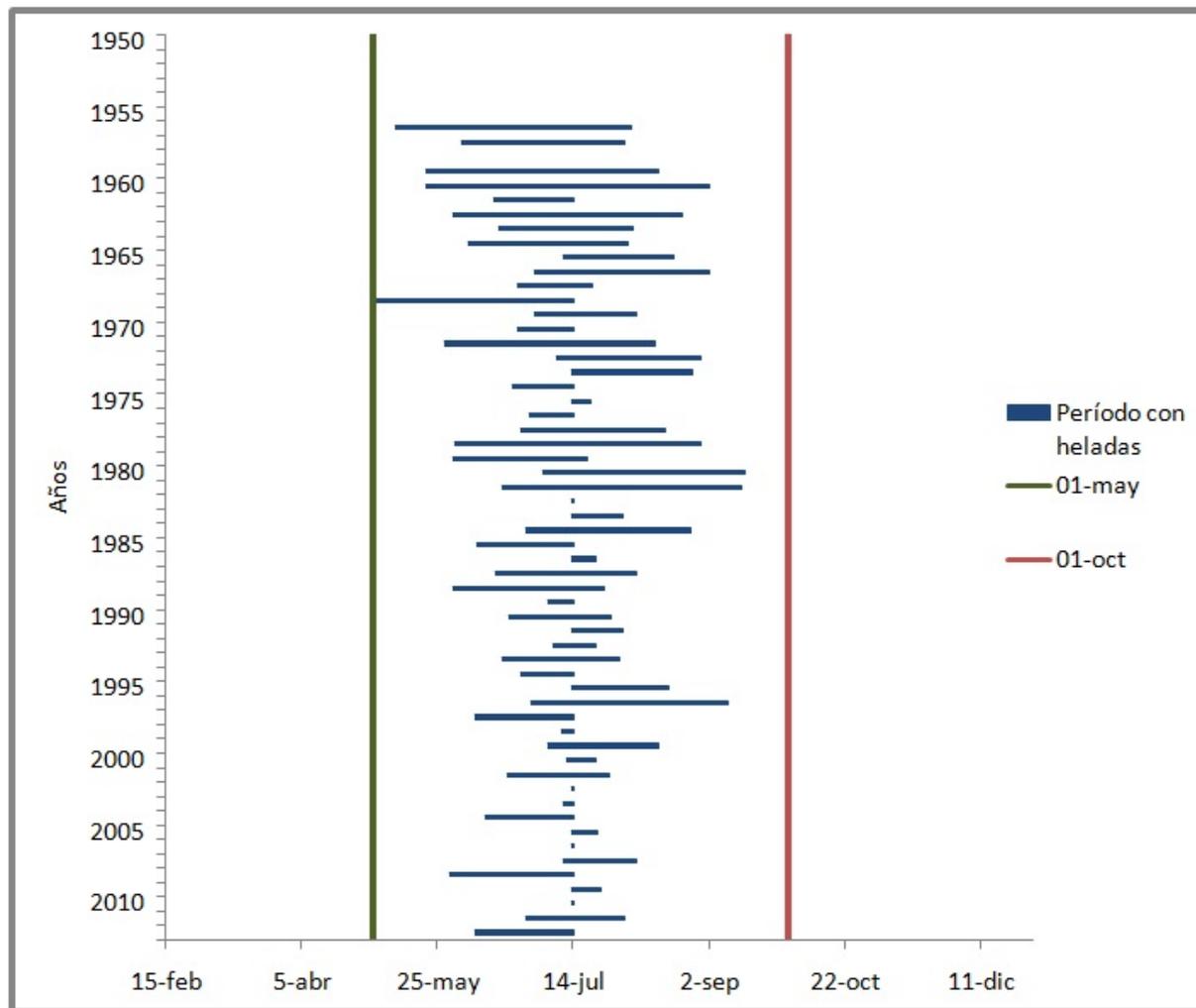


Figura 7: Evolución temporal del período con heladas (barras) en Las Lomitas. Se grafican dos líneas (1 de mayo y 1 de octubre) como referencia visual.

en el abrigo meteorológico). A modo de ejemplo se muestran los resultados para Sauce Viejo (Tabla VI y Figuras 8), donde se observa que la FPH “agrometeorológica” (15 de mayo) se registra 24 días antes de la FPH “meteorológica”, mientras que la FUH “agrometeorológica” (14 de septiembre) se produce 20 días después que la FUH “meteorológica” (25 de agosto) (valores resaltados en negrita en la Tabla IV). En el marco de este nuevo análisis, se registran primeras heladas todos los años, y solamente un año no presenta heladas tardías.

En la Figura 9.a y 9.b se presenta la evolución temporal del período con heladas “meteorológicas”

y “agrometeorológicas” en Sauce Viejo, poniendo de manifiesto la gran diferencia que existe entre ambas. Mientras que en el análisis de las heladas agrometeorológicas no hubo años sin heladas, y el PER fue de 123 días (Figura 9.b), en las meteorológicas se registraron dos años sin heladas y un PER de 78 días (Figura 9.a). Hubo además, dos años en los cuales la cantidad de datos faltantes hizo que no se pudiera calcular esta variable.

Por último, se presentan los resultados de PER en mapas (Figuras 10.a y 10.b) que permiten analizar regionalmente los resultados. Debido a la gran variabilidad espacial que presentan estas variables en altura y a la poca información que

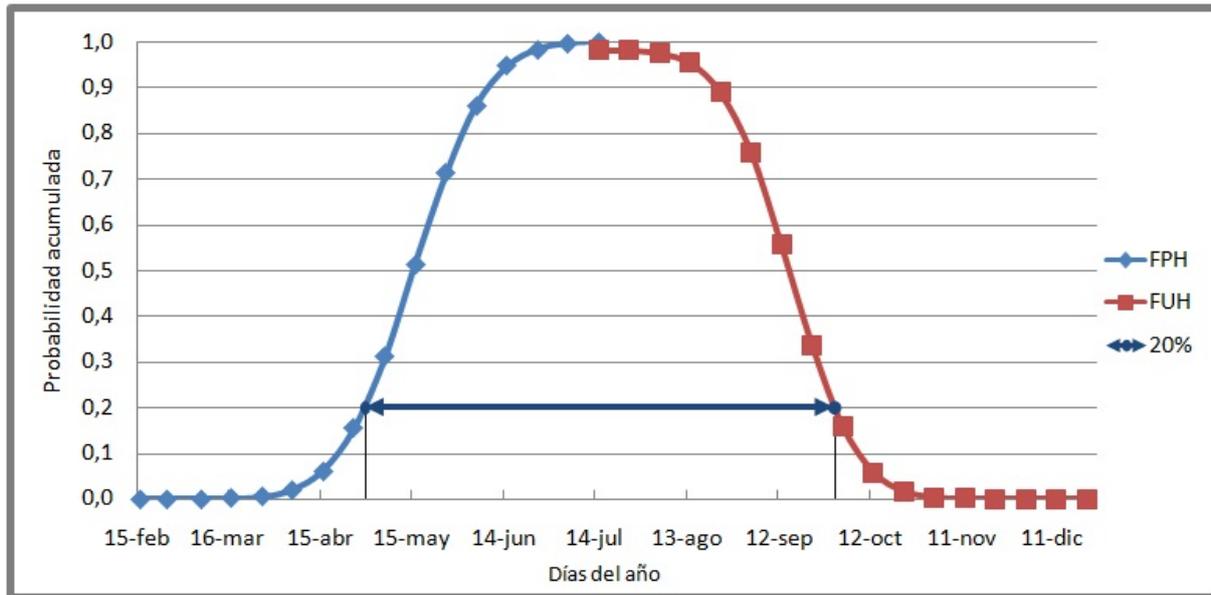


Figura 8: Función teórica de probabilidad acumulada de FPH (línea azul) y FUH (línea roja) “agrometeorológica” en Sauce Viejo. La línea con las flechas indica el período con heladas que tiene una probabilidad de ocurrencia del 20 %.

Sauce Viejo		Período analizado: 1956 2012				
		FPH	FUH	PER	TabS	FH
Valores medios		15-may	14-sep	123	-3.4	26
Desvío estándar		19	17	28	1.7	10
Valores con probabilidad (%):	20	29-abr	30-sep	155	-4.9	34
Extremos		5-abr.	27-oct.	175	-7.0	48
Año de ocurrencia		1968	1966	2008	1967	1964
Nro. de años utilizados		53	55	53	53	53
Nro. de años sin heladas		0	1	0	2	0

Tabla VI: Información agroclimática de las heladas “agrometeorológicas” en Sauce Viejo.

se tiene, se decidió colocar una máscara en las áreas con altitudes mayores a los 1000 metros (área sombreada en marrón). Lo primero que se pone de manifiesto en el análisis de los mapas es la marcada influencia de la latitud en las isolíneas, pasando de cero días con helada al norte de la Argentina, a 300 días con heladas en Río Grande (Tierra del Fuego). La latitud condiciona la intensidad de la radiación solar recibida y el tiempo durante el cual se recibe, siendo éste uno de los principales factores que determinan el clima de una región (Murphy y

Hurtado, 2013). Además, se observa el efecto moderador del océano modificando la disposición de las isolíneas al acercarse a la costa, siendo en la Patagonia directamente dirección norte-sur. En las cercanías del río Paraná y Uruguay se observa la alteración en la trayectoria de las isolíneas provocada también por la influencia moderadora del agua. Es de esperar que esto suceda del mismo modo en otras regiones cercanas a grandes espejos de agua, como la laguna de Mar Chiquita, que por falta de información no se reflejan en los mapas. Se observa también, una cuña de

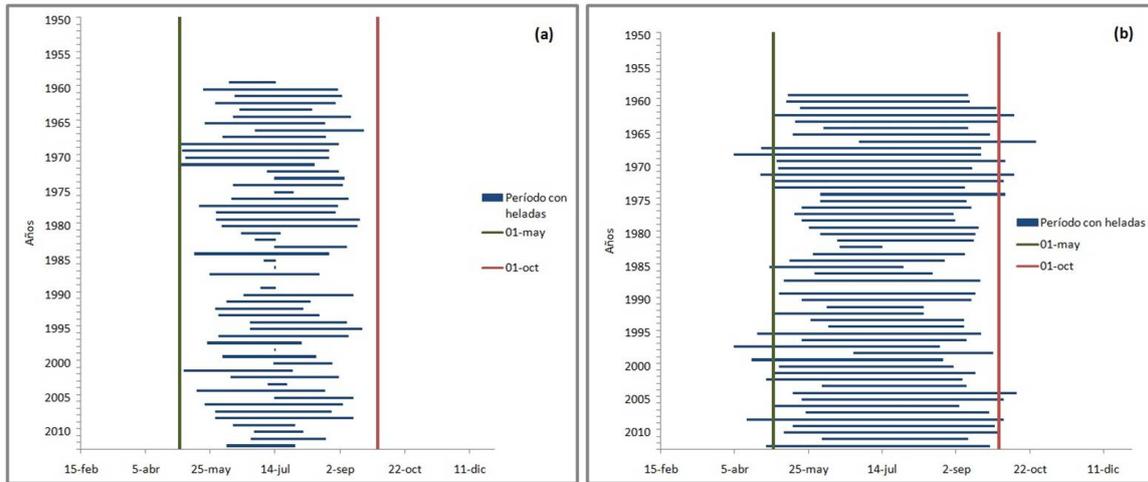


Figura 9: Evolución temporal del período con heladas (barras) “meteorológicas” (a) y “agrometeorológicas” (b) en Sauce Viejo. Se grafican dos líneas (1 de mayo y 1 de octubre) como referencia visual.

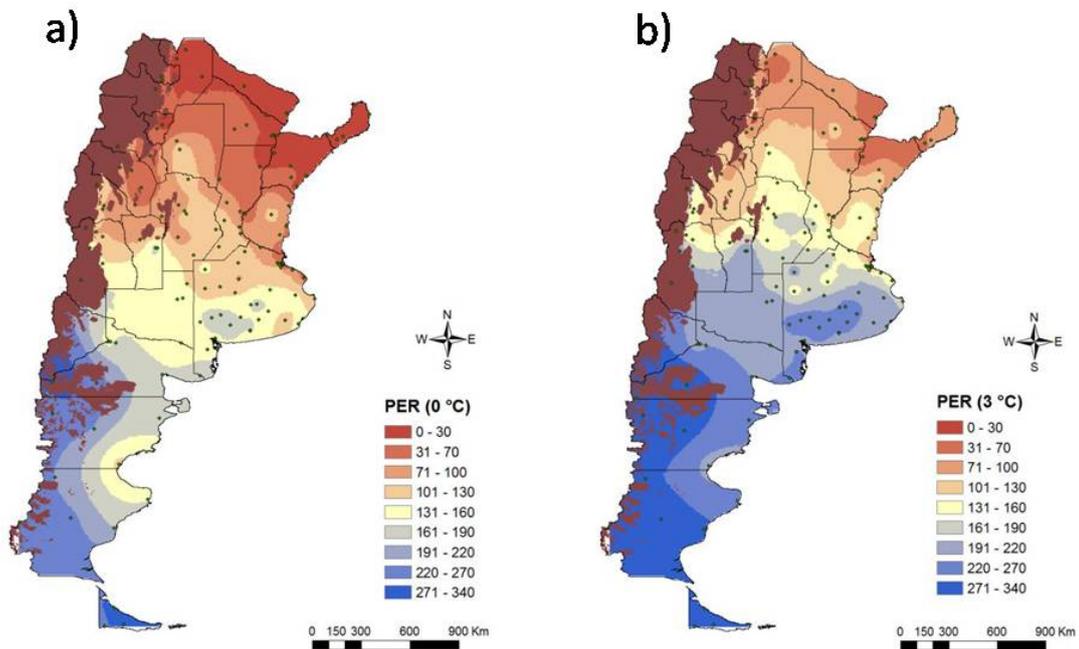


Figura 10: Período medio con heladas meteorológicas (PER 0 °C) (a) y agrometeorológicas (PER 3 °C) (b).

penetración del período con heladas en la parte centro-norte del territorio, la cual es más evidente en el mapa 10 (a), de manera similar a lo mostrado por Pascale y Damario (2004) en las cartas por ellos analizadas. Esto podría estar explicado por el modelo de circulación asociado a heladas generalizadas que muestra un anticiclón post-frontal ingresando por el sudoeste de la Patagonia alrededor de los 50°S, fuertemente influenciado por el obstáculo que representa la cordillera de los Andes, especialmente al norte de los 40°S en donde su altura es mayor, provocando una distorsión de los sistemas meteorológicos. Este anticiclón está asociado a un fuerte flujo de aire polar del sector sudoeste, dando lugar a heladas debido a la advección de aire frío y seco (Müller, 2005).

Al comparar los mapas 10 (a) y 10 (b) se observa que, como era de esperar, las isóneas presentan un comportamiento similar pero con valores diferentes, abarcando áreas más extensas de períodos con heladas mayores en el caso de las agrometeorológicas (10.b). Este mapa confirma que en el territorio argentino no existen áreas suficientemente extensas, en las cuales el período medio libre de heladas permita la explotación de especies agrícolas intolerantes a los 3 °C en abrigo, lo que equivale a pensar en 0°C a nivel del suelo en algún momento de su ciclo evolutivo. Pascale y Damario (2004) indicaron que la elección de ese umbral reconoce un marcado sentido biometeorológico. Así, los 3°C se consideran como un indicador de “helada probable” a nivel del suelo, sobre la base de que los enfriamientos nocturnos por irradiación ocurren acompañados de inversión térmica. La diferencia entre los registros del termómetro de mínima de casilla y a 5 cm sobre el suelo es de 3°C en promedio (Veliz et al., 2012; Pascale y Damario, 2004). Cultivos de bajo porte y muy sensibles como son algunas hortalizas termófilas, o cultivos de grano en su etapa de brotación podrían sufrir daños.

Resulta difícil cotejar estos mapas con cartas similares publicadas anteriormente debido a que todas han sido realizadas con distintas

metodologías y, además, con distintos número de estaciones y diferentes períodos de datos. Las publicadas por Burgos (1963) y desarrolladas por Hirshhorn corresponden a 260 estaciones con registro meteorológicos desde principio de siglo hasta fines de la década del 40. La mayor cantidad de estaciones analizadas en estas cartas permite identificar particularidades que en este trabajo no pueden apreciarse, como la disminución del PER en el valle del Río Negro donde se contaba con 19 estaciones para la provincia de Río Negro, mientras que en este trabajo se contó con 8 estaciones y sólo 2 ubicadas en el valle. En los trabajos de Damario y Pascale (Damario et al., 1996; Pascale y Damario, 2004) si bien se menciona que se realizaron estos mapas, los mismos no fueron publicados, presentando los mapas de FPH y FUH solamente.

Toda esta información resulta de gran utilidad para los productores agropecuarios a la hora de elegir las variedades de los cultivos y/o la fecha de siembra de los mismos, así como para alumnos e investigadores interesados en la climatología de las heladas en la Argentina. Los cultivos de grano de producción extensiva maximizan su rendimiento en función del aprovechamiento que hacen de la estación de crecimiento disponible (definida en base a la época de ocurrencia de las heladas y a la diferente sensibilidad a las mismas que presenta cada una de las especies (Otegui y Lopez Pereira, 2010)), según la mejor combinación de ciclo y condiciones ambientales. En este contexto, la información generada en este trabajo permite la elección de las fechas con un criterio probabilístico. Se puede así, calcular la fecha de siembra buscando disminuir el riesgo de ocurrencia de heladas en etapas definidas como críticas para cada cultivo.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron y analizaron diferentes abordajes en el cálculo de las fechas medias de primeras y últimas heladas. Además, se generó una base de datos con información agroclimática de heladas para dos umbrales (0°C y 3°C) en 124 estaciones meteorológicas

distribuidas en todo el territorio de la República Argentina que se puso disponible en un sitio web (<http://www.agro.uba.ar/heladas/>). Asimismo, se presentan las fechas que poseen un 20% de probabilidad de ocurrencia de heladas, por ser este un nivel de riesgo aceptable en una producción agropecuaria rentable de cultivos anuales.

El análisis de las metodologías pone de manifiesto importantes diferencias de los resultados, principalmente cuando se realiza en localidades ubicadas en climas más cálidos en los que no todos los años se presentan heladas. En estos casos es fundamental aclarar la metodología utilizada para que el análisis de los resultados no lleve a decisiones incorrectas. Es de suma importancia recordar que las fechas de primera y últimas heladas suelen condicionar los calendarios agrícolas y determinar en muchos casos la elección en las fechas de siembra de muchos de los cultivos de grano que se realizan en nuestro país. Es por esto que la probabilidad de ocurrencia de las primeras y últimas heladas debe ser calculada para toda la serie de años y no sólo para los años en que ocurrió el evento.

Por último, el análisis espacial de los resultados pone de manifiesto la gran influencia de los principales factores determinantes del clima en la distribución espacial de las isóneas, generando una gran variabilidad en los resultados, con períodos de heladas meteorológicas que van desde los 300 días en Tierra del Fuego a cero días en el norte de la Argentina. Tampoco hay áreas suficientemente extensas en las cuales el período medio libre de heladas agrometeorológicas permita la explotación, sin riesgos, de especies que no resisten los 3 °C en abrigo.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto CRN-3035 del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI). El programa CRN está financiado por la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) de los Estados Unidos de Norteamérica (Grant

GEO-1128040).

REFERENCIAS

- Barsky, A.; Podestá G. y Ruiz Toranzo F. 2008. Percepción de variabilidad climática, uso de información y estrategias de los agentes frente al riesgo. Análisis de esquemas decisionales en agricultores de la región pampeana argentina. *Mundo Agrario*, 8 (2008). Disponible online en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=84581603>
- Bert, F. E.; Satorre E. H.; Toranzo F. R., and Podesta G. P. 2006. Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural Systems* 88 (2006) 180–204.
- Billiet, D. 2012. Caracterización agroclimática de las heladas en cuatro estaciones meteorológicas de la región pampeana. Tesis de grado para optar por el título de Ing. Agrónomo de la UBA. Director: Fernández Long, M. E. 18 de junio del 2012. 86 pag.
- Bravo-Tapia, J. M. 1992. Modelos matemáticos para pronóstico de temperaturas ambientales. Tesis de Licenciatura en Matemática, Universidad De Sonora, 93 pp.
- Burgos, J. J. 1963. Las heladas en la Argentina. Colección Científica del INTA, Buenos Aires, Vol. III, 338 pág. Costa, C. y A. Abregu. 2002. Diez años de heladas agronómicas en Las Breñas (Prov. De Chaco) Argentina. Actas, IX Reunión Argentina de Agrometeorología. Vaquerías, Córdoba, 1820 septiembre de 2002.
- Damario, E. A. y A. J. Pascale. 1984. Fechas medias de primeras y últimas temperaturas mínimas perjudiciales para los cultivos en Argentina. *Rev. Fac. de Agronomía* , 5(3): 193-211.
- Damario, E. A. y A. J. Pascale. 1993/1994. Método de estimación de las fechas medias de primeras y últimas heladas. *Revista Facultad de Agronomía*, 14(3): 257-264, 1993/94.
- Damario, E. A. Y A. J. Pascale, S. Perez S. Maio Y R. O. Rodríguez. 1996. Cartas climáticas 1961-1990 de primeras y últimas heladas en la Argentina. *Rev. Fac. de Agronomía* , 16(3): 253-263, 1996.

- FAO, 1974. Cumbre mundial sobre la alimentación. 5 al 16 de noviembre de 1974 en Roma, Italia.
- Fernandez Long, M. E., I. Barnatan y G. M. Murphy. 2001. Las heladas en la ciudad de Buenos Aires y en el conurbano bonaerense. *Rev. Arg. de Agrometeorología*, 1 (2): 101-106, 2001.
- Fernandez Long, M. E., I. Barnatan y Y. GarciaSkabar. 2004. Horas con helada y su peligrosidad en seis localidades de la Argentina. *Rev. Fac. de Agronomía*, 24 (3): 217-225, 2004.
- Fernández Long, M. E., I. Barnatán, L. Spescha, R. Hurtado y G. M. Murphy. 2005. Caracterización de las heladas en la Región Pampeana y su variabilidad en los últimos 10 años. *Rev. Facultad de Agronomía*, 25(3): 247-257, 2005.
- Fernandez Long María E., Gabriela V. Müller, Adriana Beltran-Przekurat, Olga Eugenia Scarpati. 2012. Long- and short- term changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *Int. J. Climatol.* (2012) Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.3541.
- Fernández Long, M. E. y I. Barnatán. 2013. Adversidades Climáticas: Heladas. En: *Agrometeorología*. Murphy y Hurtado (Eds). Editorial Facultad de Agronomía. pp 315-341. ISBN 978-950-29-1324-7. (Capítulo de Libro).
- Garreaud, R.D.; Vuille M.; Compagnucci R. and Marengo, J. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281 (2009) 180–195.
- Goddard, L., Y. Aitchellouche, W. Baethgen, M. Dettinger, R. Graham, P. Hayman, M. Kadi, R. Martínez and H. Meinke. 2010. Providing Seasonal-to-Interannual Climate Information for Risk Management and Decision-making. *ProcediaEnvironmentalSciences* 1 (2010) 81–101. doi:10.1016/j.proenv.2010.09.007
- Hirschhorn, J. 1939. Dispersión de fechas medias de primeras y últimas heladas en la República Argentina. (Inédito). Servicio Meteorológico Nacional. Buenos Aires.
- Koss, W.J, J.R. Owenby, P.M. Steurer, D.S. Ezell. 1988. Freeze/Frost data. National Climatic Data Center. Asheville, North Carolina. 206 pp.
- Monterubbianesi, M. G. y M. G. Cendoya. 2001. Caracterización del régimen de heladas meteorológicas y agrometeorológicas en Balcarce (Argentina) en el período 1970-1999. *Rev. Fac. de Agronomía*, 21(1): 69-78, 2001.
- Martinez, R.; B.J. Garanganga; A. Kamga; Y. Luo; S. Mason; J. Pahalad and M. Rummukainen. 2010. Regional Climate Information for Risk Management: Capabilities. *ProcediaEnvironmentalSciences* 1, 354–368.
- Müller, G. V. 2005. Variabilidad interanual en la frecuencia de ocurrencia de heladas en la Pampa húmeda y su relación con la circulación atmosférica asociada. Tesis doctoral de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, en el área de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, 217 pp.
- Müller, G.V and Ambrizzi T. 2006. Teleconnection patterns associated with extreme frequency of Generalized Frosts. Part I: Rossby waves propagation regions in the Austral Hemisphere. In 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. Foz do Iguazu, Brazil.
- Müller, G.V. 2007. Patterns leading to extreme events in Argentina: partial and generalized frosts. *International Journal of Climatology*, Vol. 27, Issue 10, pages 1373–1387.
- Navarro, M., C. Vilatte y L. Aguas. 2003. Duración e intensidad de las heladas a escala regional, en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Actas, X Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología y X Congreso Cubano de Meteorología*. Ciudad de la Habana, Cuba. 3 al 7 de marzo de 2003.
- Otegui, M. E. y Lopez Pereira M. 2010. Fecha de siembra. En: *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. Ed. Facultad de Agronomía. Pag. 259-275. (Capítulo de libro).
- Orta, F. J. y M. Federighi. 1996. El régimen de heladas en el área de V. Mercedes

- (San Luis) en relación con cultivos estivales extensivos. Actas VII Congreso Argentino de Meteorología y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Septiembre 1996, Buenos Aires.
- Papadakis J. 1952. Mapa ecológico de la República Argentina. 2da ed., I texto, 231 pág. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Buenos Aires.
- Pascale, A. J. y E. A. Damario. 2004. Bioclimatología agrícola y agroclimatología. Ed. Facultad de Agronomía, UBA. 550 pág.
- Podestá, G. 2012. Uso de información climática para manejo del riesgo en sistemas de producción agrícola: Lecciones aprendidas y perspectivas para los próximos años. XIV Reunión Argentina de Agrometeorología RADA, 17 al 19 de Octubre de 2012, Malargüe, Mendoza.
- Reed, W. G. 1916. "The Probable Growing Season," Monthly Weather Review, vol. 44, KO. 9, Sept. 1916, pp. 509-612.
- Rivarola, A. D. V., M. Vinocur y R. A. Seiler. 2002/03. Uso y demanda de información agrometeorológica en el sector agropecuario del centro de la Argentina. Rev. Arg. de Agrometeorología, 2 (2): 143-149. ISSN 1666-017X.
- Thom, H. C. S., and Sham, R. H. 1958. "Climatological Analysis of Freeze Data for Iowa," Monthly Weather Review, Vol. 86, No. 7, July 1958, pp. 251-257.
- Thom, H. C. S. 1959. "The Distributions of Freeze-Date and Freeze-Free Period for Climatological Series With Freezeless Years," Monthly Weather Review, Vol. 87, No. 4, Apr. 1959, pp. 136-144.
- Vinocur, M., A. Rivarola y R. Seiler. 2004. Use of climate information in agriculture decisionmaking: experience from farmers in central Argentina. Second International Conference on climate Impacts Assessment. SICCIA. Grainau. Germany. June 28- July 2, 2004.
- Veliz A. E., Fernández Long M.E., Hurtado R.H., Spescha L.B. 2012. Diferencias de temperaturas mínimas en abrigo y a nivel del suelo en el sur de Buenos Aires. Actas XIV Reunión Argentina de Agrometeorología RADA, Octubre de 2012, Malargüe, Mendoza.
- Vestal, C. K. 1971. First and last occurrences of low temperatures during the cold season. Monthly Weather Review, Vol. 99, No. 8, 650-652.
- Wilks, D. S. 2006. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Elsevier's Science & Technology Rights Department in Oxford, UK. 649 pp.
- WMO. 1984. Guidelines on the quality control of surface climatological data. WMO/TD N° 111. 80 pp.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

USO DE SENSORES REMOTOS PARA LA DETECCIÓN DE EVENTOS DE TRANSPORTE EÓLICO DE SEDIMENTOS HACIA AMBIENTES MARINOS EN PATAGONIA

Augusto César Crespi Abril^{1,2,3}, Alejandra María Isabel Montes¹, Gabriela Noemí Williams², Mauro Fabián Carrasco^{1,2}

¹ Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Facultad de Ciencias Naturales. Sede Puerto Madryn, Argentina.

² Centro Nacional Patagónico (Cenpat) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Puerto Madryn, Argentina.

³ Universidad Nacional del Comahue, Escuela Superior de Ciencias Marinas, San Antonio Oeste, Argentina.

(Manuscrito recibido el 19 de octubre de 2015, en su versión final el 26 de febrero de 2016)

RESUMEN

En este trabajo se estudió el transporte eólico de sedimentos a ambientes marinos en Patagonia mediante el uso de sensores remotos. Se seleccionaron 6 eventos correspondientes a las fechas 22 y 23 de Enero de 2009, 28 de Marzo de 2009, 11 y 12 de Septiembre de 2009 y 24 de Enero de 2010 por ser días con la presencia de plumas de sedimento y baja cobertura de nubes en la región. Los eventos fueron estudiados usando imágenes en color verdadero de alta resolución espacial (250m) del sensor MODIS, un índice de sedimento calculado con las bandas 2,13 μm y 0,469 μm del sensor MODIS y el índice de aerosol atmosférico en ultravioleta del sensor OMI. Estas herramientas fueron útiles para observar los eventos estudiados. Las imágenes RGB permitieron observar cada uno de los eventos con una buena resolución espacial, pero su uso está restringido a escenas con baja cobertura de nubes. El índice de sedimentos permitió incrementar el contraste de las plumas cuando se encuentran sobre el mar y de esta forma se pudieron determinar isolíneas que delimiten cada evento para calcular su área. El índice de aerosol permitió observar los eventos y su principal ventaja radica en el hecho de que no es influenciado por la cobertura de nubes. Sin embargo, tiene una baja resolución espacial ($1^\circ \times 1^\circ$) por lo que solo permite tener una aproximación del área influenciada por las plumas. La distancia máxima estimada de las plumas fue de 450 Km hacia el mar, alcanzando la región del talud continental y el área total influenciada por estos eventos fue de 420.998 Km². En todos los casos, la intensidad del viento superó los 40Km/h y la visibilidad se redujo a menos de 10Km excepto por el día 24 de enero de 2010 en el que se redujo a 25Km. El uso combinado de estas herramientas brinda un panorama adecuado para estudiar los eventos de transporte eólico de sedimentos en Patagonia hacia la plataforma continental argentina.

Palabras clave: aerosoles atmosféricos, Patagonia, plataforma continental argentina

USING REMOTE SENSING FOR THE DETECTION OF EOLIAN DUST TRANSPORT INTO MARINE ENVIRONMENT IN PATAGONIA

ABSTRACT

In this paper, we studied eolian transport of mineral dust to marine environments of Patagonia using remote sensors. Six events were selected corresponding to the dates 22 and 23 of January of 2009, 28 of March of 2009, 11 and 12 of September of 2009 and 24 of January of 2010 because they presented sediment plumes and low cloud coverage in the scene. The events were studied using true color images of high resolution from MODIS sensor, using the sediment index estimated with bands centered in 2,13 μm and 0,469 μm , and atmospheric aerosol index in ultraviolet from OMI sensor. These tools were useful to detect the selected events. RGB images allowed to study each event with a high spatial resolution (250m), but this product is restricted to scenes with low cloud coverage. The sediment index increased the contrast of the plumes when the sediment is over seawater and this was used to determine the isolines that define the area. The aerosol index detected each event and this product has the main advantage that is not influenced by cloud coverage. However, the low spatial resolution ($1^\circ \times 1^\circ$) is a limiting factor to estimate the area of influence of the plumes. The maximum distance from coast to sea of the plumes was 450Km, reaching the continental slope and the total area of influence of these events was estimated in 420.998 Km^2 . On each case, wind intensity was higher than 40Km/h and visibility was reduced to less than 10Km, except in January 24 of 2010 that visibility was reduced to 25Km. The combined use of this tools provided a strong framework to study the eolian transport of mineral dust to sea in Patagonia to argentinean shelf.

Keywords: atmospheric aerosols, Patagonia, argentinean shelf

1. INTRODUCCIÓN

En términos generales los aerosoles atmosféricos pueden afectar el clima de una región en particular de manera directa por la dispersión o absorción de la radiación solar e indirectamente mediante la modificación de la propiedades físicas de las nubes y de los procesos de precipitación (Kaufman y otros, 2002). A su vez, los aerosoles pueden tener una influencia directa sobre los ambientes acuáticos cuando entran en contacto con los mismos ya sea incrementando la productividad por aporte de nutrientes (Mahowald y otros, 2005) o disminuyéndola por el aporte de partículas deletéreas para algunos organismos (Balseiro y otros, 2014). Asimismo, la severidad de algunos de estos eventos puede tener consecuencias desfavorables sobre las actividades humanas ya que afectan la navegación por la disminución de

la visibilidad, afectan la salud de las personas, perjudican las actividades agrícolas y cualquier otro perjuicio debido a daños de equipos por la cantidad de sedimento transportado (Prospero y otros, 2002).

En algunos lugares del planeta, la composición de los aerosoles atmosféricos está dominada por sedimentos minerales. El origen de estos sedimentos es consecuencia de la erosión eólica del suelo. El viento suspende las partículas erosionadas que luego son elevadas a gran altitud por convección y, dependiendo de la intensidad del viento, pueden ser transportadas grandes distancias. Ello deriva en la formación de eventos particulares como tormentas o plumas de sedimentos que pueden ser visibles en imágenes satelitales (Prospero y Lamb, 2003). Estos procesos son particularmente importantes en regiones desérticas ya que la baja humedad del

suelo facilita el proceso de suspensión de las partículas de sedimento. Uno de los ejemplos más estudiados corresponde a los sedimentos provenientes del desierto del Sahara que son transportados por el viento hacia el Océano Atlántico (Prospero, 1996; Swap y otros, 1996; Moulin y otros, 1997; Johansen y otros, 2000). Esta fuente de sedimentos está activa todo el año, especialmente en verano (Prospero, 1996; Higurashi y otros, 2000), y estimaciones realizadas por sensores remotos de la cantidad de sedimentos movilizados hacia el océano arrojan valores de 230×10^9 g por año (Kaufman y otros, 2003).

Hasta el momento se han utilizado diversas técnicas de teledetección para el estudio del transporte eólico de sedimentos en diferentes partes del mundo (Ackerman, 1997; Baddock y otros, 2009; Han y otros, 2013; Liu y otros, 2013; Park y otros, 2014; Qu y otros, 2006). Sin embargo, los resultados de cada uno de los algoritmos en diferentes regiones es muy variable lo que dificulta la generalización sobre valores críticos que permita establecer un criterio de demarcación de las plumas. Esto se debe a que la precisión de la teledetección depende de diversos factores como las propiedades espectrales de los minerales del sedimento atmosférico, la superficie (tierra o mar) sobre la cual se desplaza la pluma de sedimento, la densidad del sedimento en la atmósfera y los tipos de nubes presentes en la escena. Recientemente, Jafari y Malekian (2015) estudiaron el comportamiento de diferentes algoritmos de MODIS y OMI para ciertos eventos de transporte de sedimento en la región del Medio Oriente considerando situaciones en las que las plumas se desplazaban sobre la tierra y sobre el mar. Los autores observaron que los índices IS (MODIS) y IA (OMI) son adecuados para el estudio de estos eventos cuando las plumas se desplazaban sobre el mar.

En la región norte de la Patagonia (entre 40°S y 48°S) existen diversas evidencias (e.g. registros directos e indicadores biológicos y geomorfológicos) de que los vientos son

muy intensos y persistentes (Prohaska, 1976; Barros, 1986). En términos generales, la intensidad promedio de los vientos oscila entre 21.6 km/h y 23 km/h (Labraga, 1994; Schwarzkopf, 2005) y alcanzan valores de 130 Km/h (Crespi-Abril, datos sin publicar). Los vientos provienen fundamentalmente del sector oeste con una predominancia anual del 60% del total de los registros (Williams, 2004; Pontones, 2014). La geomorfología de esta región (fundamentalmente una meseta) junto con el clima árido (escasas lluvias y humedad relativa del aire $<5\%$) favorecen la suspensión y transporte del sedimento depositado sobre la superficie continental hacia los ambientes marinos de la Plataforma Continental Argentina (PCA) y Atlántico Sur (AS). Gaiero y otros (2003) realizaron cuantificaciones sobre el material eólico transportado estimando valores entre 0,2 y $7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mes}^{-1}$ dependiendo de la localidad y del mes del año. Si bien en dicho trabajo los autores brindan una aproximación sobre este proceso, los datos obtenidos se corresponden a unas pocas localidades puntuales sobre el continente y no es posible determinar la extensión total de dicho proceso y su alcance sobre la PCA.

En el presente trabajo se estudiarán eventos de transporte eólico de sedimentos hacia la plataforma continental mediante el uso de información proveniente de los sensores remotos MODIS y OMI junto con datos meteorológicos de intensidad de viento y visibilidad. A la luz de los resultados se discutirán los alcances de cada enfoque utilizado con el objeto de avanzar en el conocimiento de este proceso y de desarrollar una herramienta adecuada para la detección del mismo.

2. DATOS Y MÉTODOS

El área de estudio corresponde a la región costera de Argentina comprendida entre los 40°S y 50°S (figura 1). De esta región se seleccionaron los días 22 y 23 de Enero de 2009, 28 de Marzo de 2009, 11 y 12 de Septiembre de 2009 y 24 de Enero de 2010 por poseer una baja

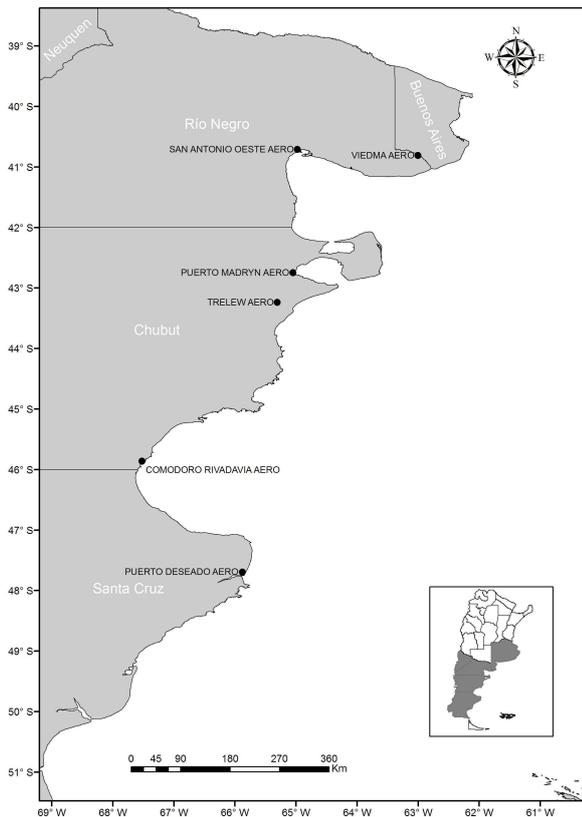


Figura 1: Mapa con el área de estudio y localización de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional sobre la costa patagónica.

cobertura de nubes en la escena y con eventos notables de transporte de sedimentos hacia la plataforma continental. Los eventos observados en cada una de estas fechas fueron abordados con tres aproximaciones metodológicas: 1) análisis de imágenes MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer montado sobre la plataforma AQUA), 2) análisis de imágenes del producto 'índice de aerosol' (IA) del sensor OMI (Ozone Monitoring Instrument montado sobre la plataforma AURA) y 3) análisis de datos meteorológicos de visibilidad e intensidad de viento.

Las imágenes del sensor MODIS se descargaron del portal de Ocean Color de la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/>) en un nivel de procesamiento L1A (tipo de

reprocesamiento 2014.0 para AQUA). Mediante el programa SeaDAS 7.2 (McClain y otros, 2004) fueron convertidas a nivel L1B aplicando las correcciones radiométricas correspondientes de manera de obtener valores de reflectancia y emisividad al tope de la atmósfera para las diferentes bandas. Luego se procedió al desarrollo de dos productos para la mejor visualización de los eventos de transporte de sedimento sobre el mar: 1) imagen en color verdadero (RGB) con una resolución espacial de 250m e 2) índice normalizado de sedimento (IS) con una resolución espacial de 500m (Qu y otros, 2006). En el primer caso, la imagen RGB se obtuvo mediante una combinación de las bandas 1 ($0,64 \mu m$), 3 ($0,555 \mu m$) y 4 ($0,488 \mu m$). En el segundo caso, el primer paso consistió en enmascarar las nubes mediante el uso de la banda térmica 32 ($12,020 \mu m$) y luego se calculó el IS de la siguiente forma:

$$IS = \frac{\rho_{2,13\mu m} - \rho_{0,469\mu m}}{\rho_{2,13\mu m} + \rho_{0,469\mu m}} \quad (1)$$

donde IS es el índice normalizado de sedimentos y ρ es la reflectancia al tope de la atmósfera en las bandas 7 ($2,13 \mu m$) y 3 ($0,469 \mu m$). Este índice es adimensional y los valores más elevados indican mayor concentración de sedimentos. Con el objeto de caracterizar los eventos de transporte, se estimó la extensión de la pluma de sedimento atmosférico tomando la distancia en línea recta desde la costa hasta la región más lejana en la que se observó la misma a partir de las imágenes RGB e IS. Particularmente con el IS, se calcularon isoclinas para determinar el límite de las plumas y así poder calcular la superficie total cubierta por cada evento. Todas las imágenes utilizadas fueron corregidas geométricamente al sistema de coordenadas (latitud-longitud) WGS84.

El IA detecta la presencia de aerosoles que absorben radiación en la franja UV del espectro. En términos generales, este índice representa con valores positivos los aerosoles que absorben UV, como sedimentos minerales y materiales de combustión, y con valores negativos los aerosoles que no absorben en UV, como las nubes. Por lo tanto, las imágenes de IA del sensor

OMI representan una fuente de información complementaria para monitorear los sedimentos en la atmósfera en Patagonia en días con cobertura de nubes en la región. Este índice es adimensional y los valores positivos indican mayor concentración de sedimentos. Sin embargo, para conocer el comportamiento de IA con los eventos de transporte de sedimentos en la región, se analizaron las imágenes para las fechas mencionadas y se compararon con los productos obtenidos para MODIS. Las imágenes de IA se descargaron del portal GIOVANNI de la NASA (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) con una resolución espacial de 1° (tipo de reprocesamiento 003).

Adicionalmente, se analizaron los datos de intensidad de viento y visibilidad en los sitios donde fueron observados dichos eventos con el objeto de caracterizar los eventos de transporte de sedimentos mediante observaciones meteorológicas. Para ello, se trabajó con bases de datos de 6 estaciones costeras sobre Patagonia (Figura 1) que fueron facilitadas por el Servicio Meteorológico Nacional. Los datos correspondieron a registros horarios de intensidad de viento expresada en kilómetros por hora y de visibilidad expresada en kilómetros para un periodo de 15 años (2000-2014). La visibilidad se estima como la distancia máxima a la que puede verse y reconocerse un objeto negro de dimensiones apropiadas (cualquier objeto de referencia a una distancia conocida) a la luz del día con el cielo del horizonte como fondo (Draghici y otros, 2001). Las mediciones de vientos se realizaron mediante anemómetros instalados en estaciones meteorológicas ubicadas a una altura de 10m sobre el suelo para evitar interferencias con cualquier tipo de obstáculo (Draghici y otros, 2001).

3. RESULTADOS

El día 22 de enero de 2009 se registró un evento de transporte de sedimentos sobre la región costera de la localidad de Viedma (41°S) (Figura 2A). Este evento se puede observar en la imagen RGB del sensor MODIS/AQUA (horario de paso

18:00HL) y puede diferenciarse de una nube en base a su coloración característica. El IS facilitó la detección del sedimento presente en la atmósfera cuando la pluma se encuentra sobre el mar y permite establecer su contorno con una isolínea de valor 0,4 (Figura 2C). La pluma de sedimento alcanzó una distancia de 200 Km desde la costa hacia la plataforma continental (Figura 2A), y la superficie de influencia fue estimada en 10.876 Km². Este evento también fue detectado por el IA alcanzando valores máximos de 2,45 en la región cercana a la costa y una consecuente disminución gradual en dirección de la plataforma adyacente (Figura 2B). Los datos in situ registraron intensidades de viento de 45 Km/h del sector noroeste (dirección 340°) y la visibilidad disminuyó a 5 Km (Figura 2G). El día 23 de enero de 2009 se detectó otro evento de transporte de sedimentos sobre la misma región con el sensor MODIS/AQUA (horario de paso 18:40). En este caso, la pluma alcanzó una mayor distancia (350 Km) sobre la plataforma continental ocupando un área de 34.040 Km² (Figura 2D). El contorno de esta pluma estuvo definido por la isolínea de 0,4 del IS (Figura 2F). En la imagen de IA se puede observar la pluma, pero los valores alcanzados (0,889 y 1,667) fueron menores a los registrados para el día anterior (Figura 2E). Durante el día 23 se registraron valores de 47 Km/h de intensidad de viento del sector noroeste (dirección 316°) y la visibilidad disminuyó a 3 Km (Figura 2G).

El día 28 de marzo de 2009 se registró con el sensor MODIS/AQUA (horario de paso 18:40HL) un evento de transporte de sedimentos en la región de Viedma que alcanzó una distancia aproximada desde la costa hacia plataforma continental de 450 Km (Figura 3A). Si bien la mayor intensidad se registró en Viedma, el evento abarcó la mayor parte de la costa patagónica, alcanzado la localidad de Puerto Deseado. Durante este día se generó un frente de más de 850 Km (desde Viedma a Puerto Deseado) con plumas de diferentes magnitudes a lo largo de su extensión (Figura 3A). El área total estimada fue 297.769 Km². El contorno de este evento estuvo definido por la isolínea de valor 0,7 de IS

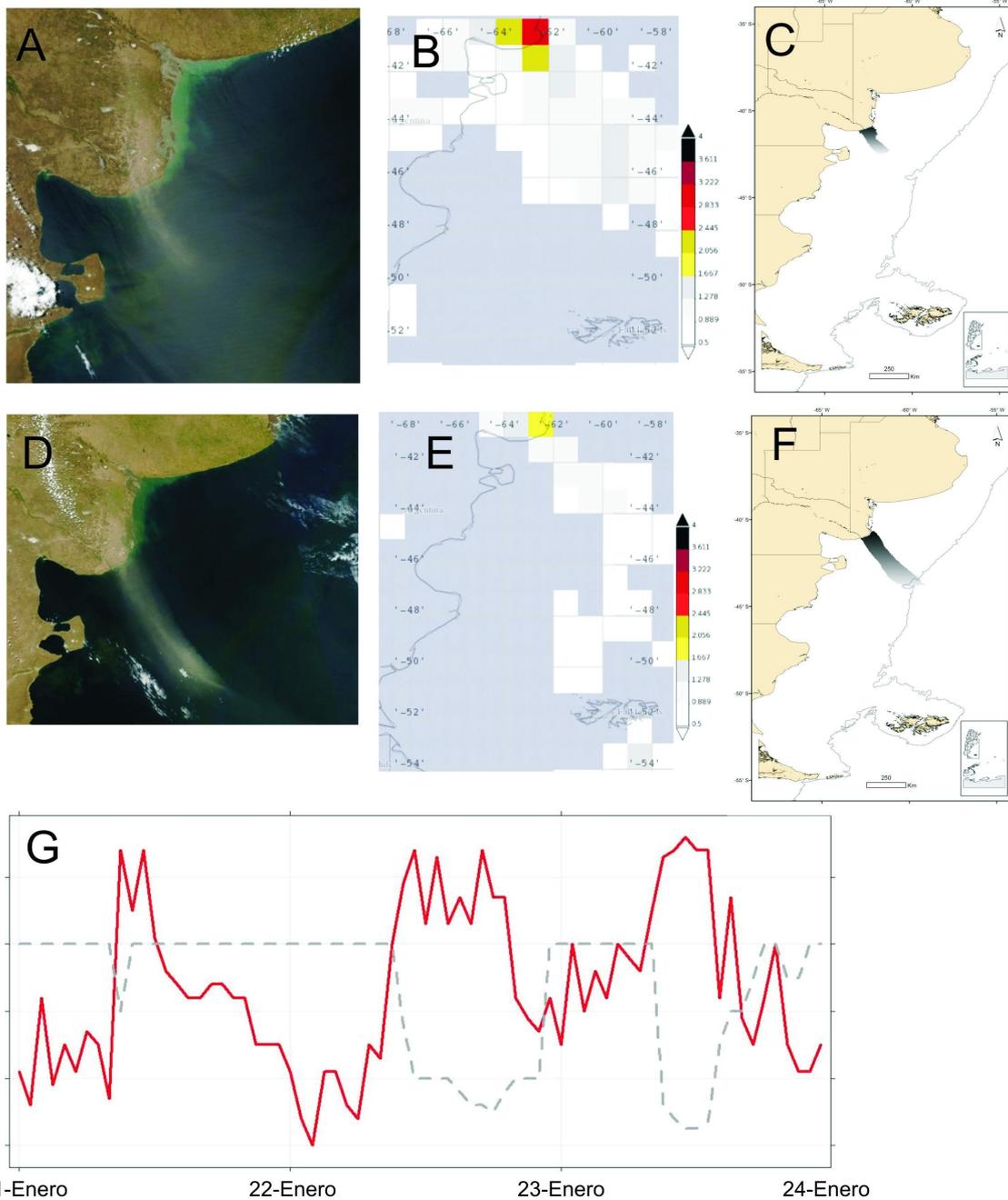


Figura 2: Evento de transporte eólico de sedimentos. Imagen en color verdadero del sensor MODIS para los días 22 (A) y 23 (D) de enero de 2009. Índice de aerosol en el espectro ultravioleta del sensor OMI para los días 22 (B) y 23 (E) de enero de 2009. Área influenciada por las plumas de los eventos del día 22 (C) y 23 (F) de enero de 2009 obtenidas a partir de los valores del índice de sedimentos. Evolución temporal de visibilidad expresada en km (línea punteada) e intensidad del viento expresada en km/h (línea continua) de la estación Viedma del Servicio Meteorológico Nacional (G). En ambos casos, el contorno de la pluma estuvo delimitado por la isolinéa de 0,4 del IS.

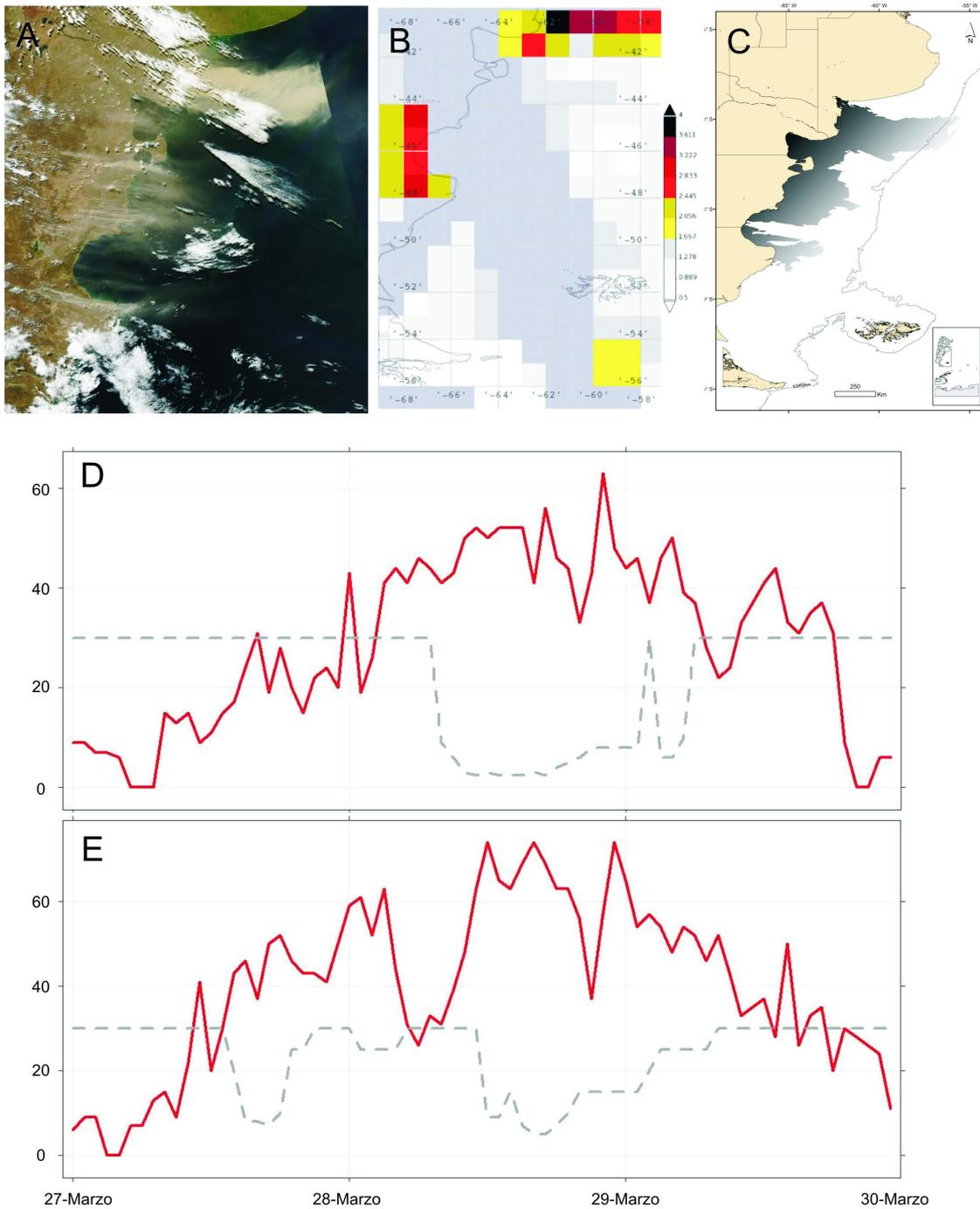


Figura 3: Evento de transporte eólico de sedimentos del día 28 de marzo de 2009 en una imagen en color verdadero del sensor MODIS (A) en el producto de índice de aerosol en el espectro ultravioleta del sensor OMI (B). Área influenciada por el evento obtenida a partir de los valores del índice de sedimento (C). Evolución temporal de visibilidad expresada en km (línea punteada) e intensidad del viento expresada en km/h (línea continua) de la estación Viedma (D) y Comodoro Rivadavia (E) del Servicio Meteorológico Nacional. El contorno de este evento se definió en base a la isolínea de valor 0,7 del IS.

(Figura 3C). La imagen de IA indica dos regiones con máximos valores del índice en la región de Viedma y en la región del golfo San Jorge y los valores oscilaron entre 2,056 y 3,611 (Figura 3B). Los vientos registrados fueron muy intensos alcanzando valores superiores a 70 Km/h del sector noroeste (dirección 285°) y 60 Km/h del sector noroeste (dirección 290°) en Comodoro Rivadavia y Viedma respectivamente; mientras que la visibilidad se redujo significativamente alcanzando 6 Km y 2 Km en ambas localidades (Figura 3D y E).

El día 11 de septiembre de 2009 ocurrió un evento de suspensión de sedimento en Viedma que alcanzó una distancia de 100 Km y abarcó un área de 23.734 Km² que fue visible con la imagen RGB del sensor MODIS/AQUA (horario de paso 18:50HL) (Figura 4A). El contorno de este evento quedó definido por la isolínea del IS correspondiente al valor 0,7 (Figura 4C). La imagen de IA muestra una coincidencia espacial con la localización del evento respecto a la imagen RGB, los valores de este índice variaron entre 1,667 y 2,056 (Figura 4B). Los datos de la estación meteorológica indicaron que el viento alcanzó 47 Km/h del sector noroeste (dirección 320°) y la visibilidad se redujo a 10 Km (Figura 4F). El día siguiente (12 de septiembre) se registró un nuevo evento en Viedma que alcanzó una distancia aproximada de 120 Km cubriendo un área de 5.377 Km² que fue visible con la imagen RGB del sensor MODIS/AQUA (horario de paso 17:55HL) (Figura 4D). El contorno de esta pluma correspondió a la isolínea de valor 0,7 del IS (Figura 4E). En este caso, no se dispone de datos a IA provenientes del sensor OMI, pero en base a los valores de IS se puede determinar que la intensidad del evento fue menor al registrado el día 11. La intensidad de viento fue de 41 Km/h del sector noroeste (dirección 330°) y la visibilidad se redujo a 7 Km (Figura 4F).

El día 24 de enero de 2010 se registró un evento de transporte de sedimentos en la localidad de Puerto Deseado que fue visible con la imagen RGB del sensor MODIS/AQUA (horario de paso 18:50HL) (Figura 5A). Dicho evento alcanzó una

distancia aproximada desde la costa de 460 Km hacia plataforma continental abarcando un área de 140.973 Km². En este caso, el contorno del evento quedó definido por la isolínea de valor 0,8 del IS (Figura 5C). La imagen IA tuvo una correspondencia espacial con la imagen RGB (Figura 5B) y los valores máximos del índice alcanzaron 3,222. En la estación meteorológica de Puerto Deseado, se registraron valores de intensidad de viento de 57 Km/h del sector sur (dirección 89°) y la visibilidad se redujo a 25 Km (Figure 5D).

4. CONCLUSIONES

Los estudios sobre el transporte eólico de sedimentos en la región Patagónica han cobrado especial relevancia en los últimos años por su rol en la regulación del clima a nivel global (Gassó y Stein, 2007; Johnson y otros, 2010; Gassó y otros, 2010a; Johnson y otros, 2011). Estos estudios se basaron en la medición del sedimento atmosférico mediante el uso de colectores en sitios puntuales de Patagonia (Gaiero y otros, 2003; Gaiero y otros, 2004) o en la simulación de eventos de transporte mediante el uso de modelos numéricos (Gassó y otros, 2010b; Johnson y otros, 2010). Sin embargo, pocos estudios han utilizado herramientas de sensores remotos para estudiar las características de los eventos de transporte eólico de sedimentos hacia ambientes marinos. En este trabajo se utilizaron tres productos de dos sensores remotos para estudiar 6 eventos particulares. Los productos RGB e IS obtenidos del sensor MODIS permitieron describir los eventos de una manera adecuada debido a su alta resolución espacial de 250m y 500m respectivamente. Las imágenes RGB fueron claras para visualizar el fenómeno ya que son muy intuitivas respecto a los colores reales obtenidos. Sin embargo, con este producto no se pueden establecer valores específicos de reflectancia para delimitar los límites de las plumas de sedimentos suspendidas. El producto IS destacó notablemente las plumas de sedimento localizadas sobre el agua de mar y en cada caso se pudo determinar un valor específico para delimitar claramente el alcance de las mismas.

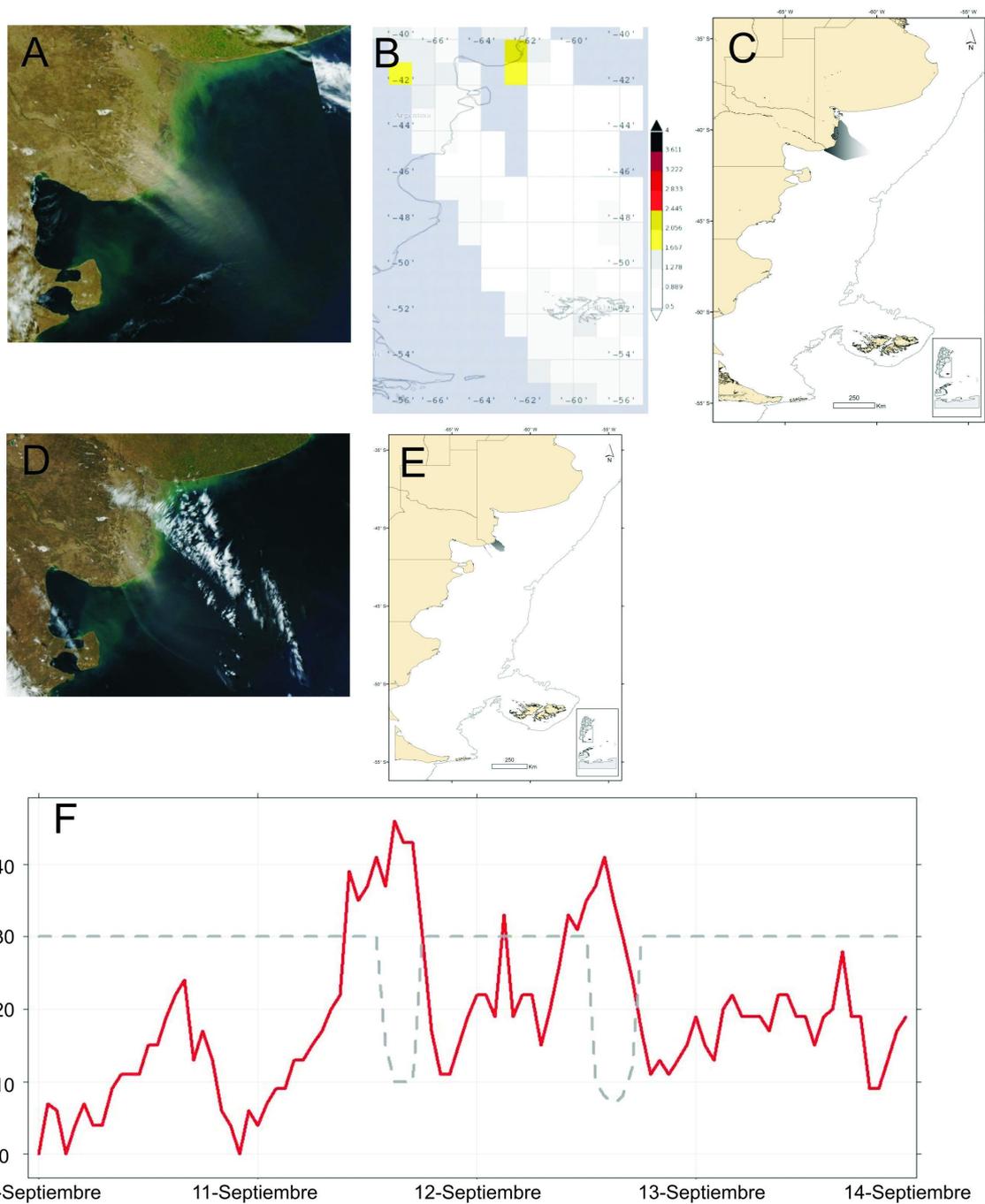


Figura 4: Evento de transporte eólico de sedimentos. Imagen en color verdadero del sensor MODIS para los días 11 (A) y 12 (D) de septiembre de 2009. Índice de aerosol en el espectro ultravioleta del sensor OMI para el día 11 (B) de septiembre de 2009. Área de influencia de los eventos del día 11 (C) y 12 (E) obtenida a partir de los valores del índice de sedimentos. Evolución temporal de visibilidad expresada en km (línea punteada) e intensidad del viento expresada en km/h (línea continua) de la estación Viedma (F) del Servicio Meteorológico Nacional. En ambos casos, el contorno de la plumas estuvo definido por la isolínea de valor 0,7 del IS.

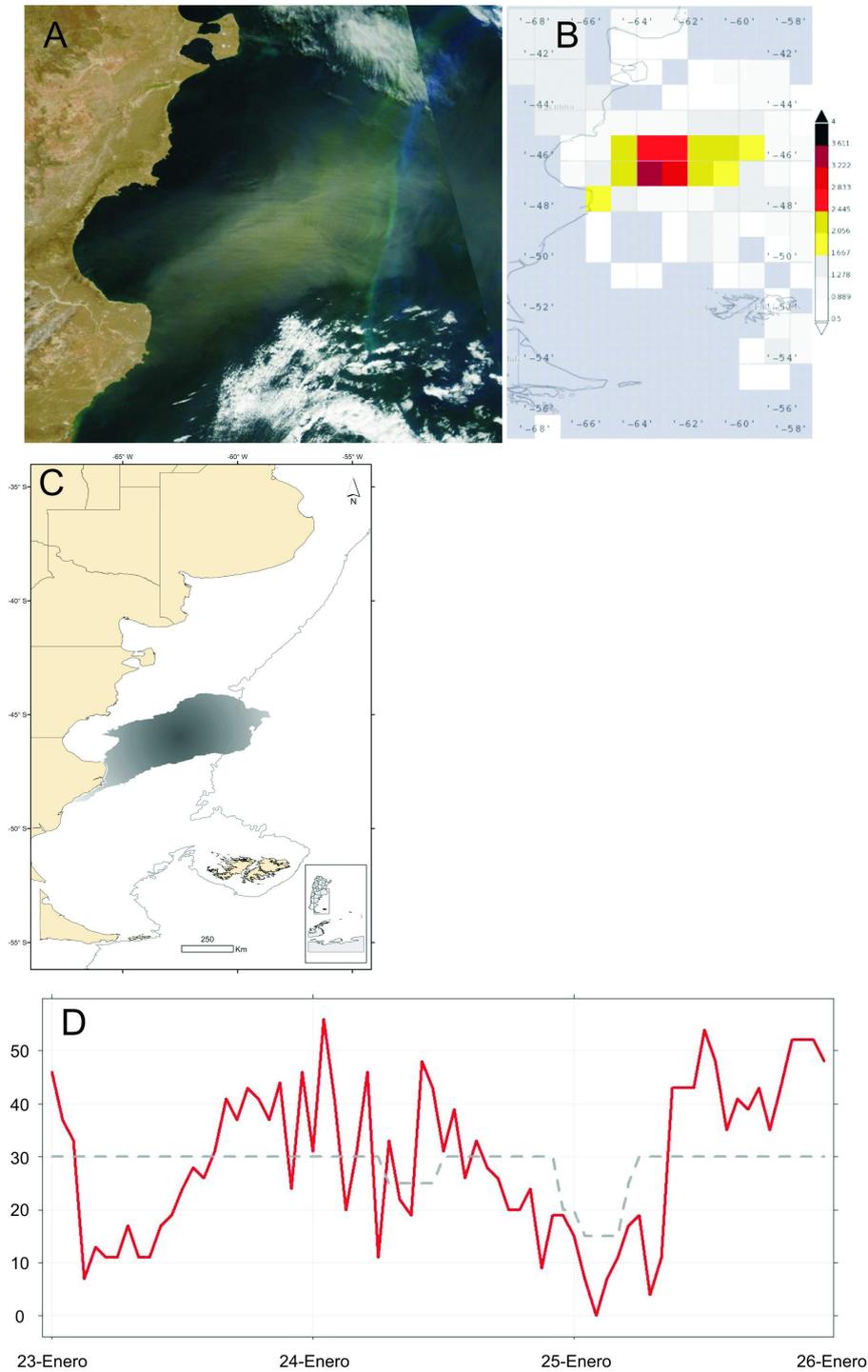


Figura 5: Evento de transporte eólico de sedimentos del día 24 de enero de 2010 en una imagen en color verdadero del sensor MODIS (A) en el producto de índice de aerosol en el espectro ultravioleta del sensor OMI (B). Área influencia por el evento obtenida a partir de los valores del índice de sedimentos (C). Evolución temporal de visibilidad expresada en km (línea punteada) e intensidad del viento expresada en km/h (línea continua) de la estación Puerto Deseado (D) del Servicio Meteorológico Nacional. El contorno de este evento estuvo definido por la isolínea de valor 0.8 del IS.

Este producto ha sido implementado con éxito para estudiar las tormentas de sedimentos en la región asiática al norte de China (Qu y otros, 2006; Jafari y Malekian, 2015), y esta es la primera vez que se explora su utilidad para describir estos fenómenos en Patagonia. Una limitación que tienen ambos tipos de productos es que están basados en bandas de longitudes de ondas del espectro visible. Esto implica que no es posible estudiar estos fenómenos durante la noche o en momentos con alta cobertura de nubes. En el primer caso, habría que explorar algún algoritmo basado en bandas del espectro infrarrojo. Este enfoque fue utilizado con éxito en el monitoreo de cenizas volcánicas en la atmósfera (Prata, 1989a; Prata, 1989b). En el segundo caso, habría que trabajar con bandas en el espectro UV donde las nubes no tienen absorción de la radiación. En este sentido, se exploró el comportamiento del índice IA del sensor OMI. En todos los casos estudiados, el índice representó adecuadamente la magnitud, localización y extensión de cada uno de los eventos comparado con lo que se observó en los productos obtenidos del sensor MODIS. Un aspecto a tener en cuenta sobre el producto IA es su baja resolución espacial respecto a MODIS. Sin embargo, este producto tiene una gran potencialidad para estudiar los eventos de transporte eólico en Patagonia por tres aspectos. En primer lugar, su baja resolución espacial no es limitante para una región tan extensa. En segundo lugar, se puede estudiar la variación temporal de este fenómeno ya que el IA no está influenciado por la cobertura de nubes en la escena. Por último, puede detectar eventos durante la noche ya que no utiliza la región visible del espectro electromagnético.

Los fenómenos de transporte eólico de sedimentos pueden ser estudiados desde la superficie terrestre por medio del uso de fotómetros solares de la red de AERONET (Holben y otros, 1998). Particularmente, en la región patagónica, Otero y otros (2003) han utilizado estos instrumentos para caracterizar los aerosoles atmosféricos. Estos instrumentos son altamente precisos y realizan estimaciones de la densidad óptica de la atmósfera que se utiliza para calibrar las

mediciones de aerosoles realizadas por sensores remotos. Sin embargo, los fotómetros están localizados solo en algunas localidades de la región patagónica. Por lo tanto las mediciones de aerosoles atmosféricos desde la superficie terrestre están confinadas a determinados sitios, lo que limita la capacidad de realizar estudios de los fenómenos de transporte eólico de sedimentos. En este sentido, el parámetro de visibilidad en la atmósfera puede ser utilizado para describir estos fenómenos ya que es registrado en diversas estaciones meteorológicas de manera estandarizada a lo largo de la región patagónica. Si bien la visibilidad es un parámetro notablemente impreciso respecto a las mediciones de los fotómetros, en el presente trabajo se observó que la visibilidad disminuyó significativamente (menos de 10Km) en todos los eventos considerados (excepto el día 24 de enero de 2010). En consecuencia, la visibilidad de la atmósfera puede ser un indicador adecuado de la cantidad de sedimento suspendido en la atmósfera. Este parámetro es particularmente relevante si se lo considera junto con la intensidad del viento. Todos los eventos estudiados en el presente trabajo se produjeron con intensidades de viento superiores a los 40Km/h. Es de esperar que a altas intensidades de viento haya una mayor concentración de sedimento suspendido en la atmósfera (Chomette y otros, 1999).

En los casos estudiados las plumas de sedimentos alcanzaron distancias comprendidas entre 100 Km y 460 Km desde el continente hacia la plataforma submarina. El área de influencia de estos eventos fue de 420.998 Km² y abarcó gran parte de la plataforma continental de la región patagónica (Figura 6). La composición mineral de los sedimentos que son transportados por el viento está caracterizada fundamentalmente por la presencia de SiO₂ (50 %), de Al₂O₃ (10 %) y Fe₂O₃ (5 %) (Gaiero y otros, 2007). De esta forma, se pone en evidencia la existencia de un aporte de nutrientes minerales (Fe y Si) desde el continente hacia la plataforma continental y talud que podría incrementar la productividad primaria en la región. Además, algunos estudios basados en simulaciones numéricas (Gassó y

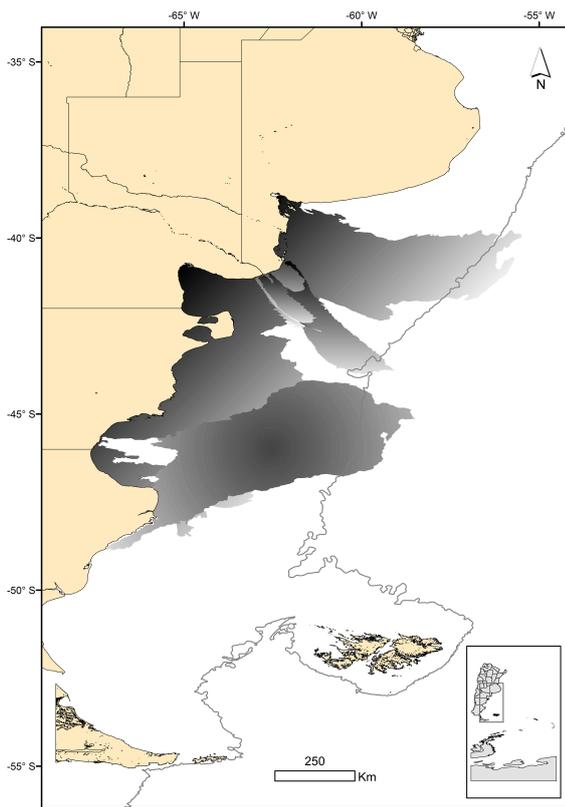


Figura 6: Mapa con el área de influencia de los diferentes eventos de transporte eólico de sedimentos de las fechas 22 y 23 de enero de 2009, 28 de marzo de 2009, 11 y 12 de septiembre de 2009 y 24 de enero de 2010. El contorno de cada evento fue definido en base a los valores del índice de sedimento.

Stein, 2007) y en el análisis de núcleos de hielo (McConnell y otros, 2007) sugieren que el sedimento transportado desde Patagonia alcanza la península Antártica, sugiriendo que el impacto sobre la productividad primaria del Océano Atlántico se extiende más allá de la plataforma continental. En el presente trabajo no se pudieron observar plumas de sedimentos con semejante extensión debido a que las partículas de sedimentos se diluyen en la atmósfera y dejan de ser detectadas por los sensores remotos utilizados.

El uso de sensores remotos y de observaciones desde la superficie terrestre son herramientas

adecuadas para realizar estimaciones sobre el sedimento suspendido en la atmósfera en la región patagónica, pero presentan algunas limitaciones que dificultan el estudio del transporte eólico. Sin embargo, en el presente trabajo se determinó que el uso combinado de ellas permite tener observaciones más adecuadas del sedimento suspendido lo que permitiría estudiar más precisamente los eventos de transporte eólico.

Agradecimientos: Los autores expresan su agradecimiento al Dr. Frumento por su aporte a la interpretación de los resultados, al Dr. Haller por sus contribuciones a la mejora del manuscrito y presentación de los resultados, a los revisores por sus aportes para mejorar el trabajo y al Servicio Meteorológico Nacional por facilitar los datos de sus estaciones meteorológicas. Los análisis y visualizaciones usadas en este estudio fueron realizadas por el sistema de datos en línea Giovanni que son desarrollados y mantenidos por NASA GES DISC. Este trabajo fue financiado por el proyecto PICT-2015-1837 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

REFERENCIAS

- Ackerman, S. A., 1997. Remote Sensing Aerosols Using Satellite Infrared Observations. *J. Geophys. Res.*, 102, 17069–17080, doi:10.1029/96JD03066.
- Baddock, M. C., Bullard, J. E. y Bryant, R. G., 2009. Dust Source Identification Using MODIS: A Comparison of Techniques Applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sens. Environ.*, 113, 1511–1528, doi:10.1016/j.rse.2009.03.002.
- Balseiro, E., Souza, M.S., Serra-Olabuenaga, I., Wolinski, L., Bastidas-Navarro, M., Laspoumaderes, C. y Modenutti, B., 2014. Effect of the Puyehue-Cordon Caulle volcanic complex eruption on crustacean zooplankton of Andean lakes. *Ecología Austral*, 24, 1, 75-82.
- Barros, V.R., 1986. Atlas del Potencial Eólico del Sur Argentino. Informe Técnico del Centro Nacional Patagónico, Puerto Madryn, 293 pp.

- Chomette, O., Legrand, M. y Marticorena, B., 1999. Determination of the wind speed threshold for the emission of desert dust using satellite remote sensing in the thermal infrared. *J Geophys Res D*, 104, D24, :31207-31215.
- Draghici, I.F., Necco, G.V., Riddaway, R.W., Snow, J.T., Billard, C. y Ogallo, L.A., 2001. Directivas de orientación: La enseñanza y formación profesional del personal en meteorología e hidrología operativa. OMM-NO 258, Volumen I. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. 143 pp.
- Gaiero, D.M., Probst, J.L., Depetris, P.J., Bidart, S.M. y Leleyter, L., 2003. Iron and other transition metals in Patagonian riverborne and windborne materials: Geochemical control and transport to the southern Atlantic Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, 19, 3603-3623, doi: 10.1016/S0016-7037(03)00211
- Gaiero, D.M., Depetris, P.J., Probst, J.L., Bidart, S.M. y Leleyter, L., 2004. The signature of river-and wind-borne materials exported from Patagonia to the southern latitudes: a view from REEs and implications for paleoclimatic interpretations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 219, 3, 357-376.
- Gaiero, D. M., Brunet, F., Probst, J. L. y Depetris, P. J., 2007. A uniform isotopic and chemical signature of dust exported from Patagonia: Rock sources and occurrence in southern environments. *Chemical Geology*, 238, 1-2, doi:10.1016/j.chemgeo.2006.11.003.
- Gassó, S. y Stein, A.F., 2007. Does dust from Patagonia reach the sub-Antarctic Atlantic Ocean?. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01801, doi:10.1029/2006GL027693.
- Gassó, S., Stein, A., Marino, F., Castellano, E., Udisti, R. y Ceratto, J., 2010a. A combined observational and modeling approach to study modern dust transport from the Patagonia desert to East Antarctica. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 17, 8287-8303.
- Gassó, S., Grassian, V. H y Miller, R. L., 2010b. Interactions between mineral dust, climate, and ocean ecosystems. *Elements*, 6, 4, 247-252.
- Han, L., Tsunekawa, A. Tsubo, M. y Zhou, W., 2013. An Enhanced Dust Index for Asian Dust Detection with MODIS Images. *Int. J. Remote Sens.*, 34, 6484-6495, doi:10.1080/01431161.2013.802055.
- Higurashi, A., Nakajima, T., Holben, B.N., Smirnov, A., Frouin, R. y Chatenet, B., 2000. A study of global aerosol optical climatology with twochannel AVHRR remote sensing. *J. Clim.*, 13, 12, 2011-2027.
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I. y Smirnov, A., 1998. AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sens. Environ*, 66, 1-16
- Jafari, R. y Malekian, Mansoureh, R., 2015. Comparison and evaluation of dust detection algorithms using MODIS Aqua/Terra Level 1B data and MODIS/OMI dust products in the Middle East. *Int. J. Remote. Sens.*, 36, 2, 597-617.
- Johansen, A. M., Siefert, R.L. y Hoffmann, M.R., 2000. Chemical composition of aerosols collected over the tropical North Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 105, D12, 15277-15312.
- Johnson, M.S., Meskhidze, N., Solmon, F., Gassó, S., Chuang, P. Y., Gaiero, D.M., Yantosca, R.M., Wu, S.L., Wang, Y.X y Carouge, C., 2010. Modeling dust and soluble iron deposition to the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res. D*, 115, 15, 1984-2012.
- Johnson, M.S., Meskhidze, N., Kiliyanpilakkil, V.P. y Gassó, S., 2011. Understanding the transport of Patagonian dust and its influence on marine biological activity in the South Atlantic Ocean. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 6, 2487-2502.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D. y Boucher, O., 2002. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419, 215-223
- Kaufman, Y.J., Koren, I., Remer, L., Tanré, D., Ginoux, P. y Fan, S., 2003. Dust transport and deposition observed from the Terra-MODIS spacecraft over the Atlantic Ocean. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 90, 1-12.
- Labruga, J.C, 1994. Extreme Winds in the Pampa del Castillo Plateau, Patagonia, Argentina,

- with Reference to Wind Farm Settlement. *J. Appl. Meteorol.*, 33, 1, 85-95.
- Liu, Y., Liu, R. y Cheng, X., 2013. Dust Detection over Desert Surfaces with Thermal Infrared Bands Using Dynamic Reference Brightness Temperature Differences. *J. Geophys. Res. D*, 118, 8566–8584.
- Mahowald, N.M., Baker, A.R., Bergametti, G., Brooks, N., Duce, R.A., Jickells, T.D., Kubilay, N., Prospero, J.M. y Tegen, I., 2005. Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean. *Global biogeochem. cycles*, 19, 4, (art. no.—GB4025).
- McClain, C.R., Feldman, G. C. y Hooker, S. B., 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep Sea Res. II*, 51, 5-42.
- McConnell, J.R., Aristarain, A.J., Banta, J.R., Edwards, P.R. y Simões, J.C., 2007. 20th-Century doubling in dust archived in an Antarctic Peninsula ice core parallels climate change and desertification in South America. *PNAS*, 104, 14, 5743-5748.
- Moulin, C., Guillard, F., Dulac, F. y Lambert, C.E., 1997. Long-term daily monitoring of Saharan dust load over ocean using Meteosat ISCCP-B2 data: 2. Accuracy of the method and validation using Sun photometer measurements. *J. Geophys. Res.*, 102, D14, 16959– 16969.
- Otero, L.A., Ristori, P.R., Fochesatto, G.J., Quel, E.J. y Holben, B., 2003. Estadística de la evolución de los aerosoles medidos en las estaciones de la red AERONET en Argentina desde 1999. *Anales AFA*. 15, 23-328.
- Park, S. S., Kim, J., Lee, J., Lee, S., Kim, J. S., Chang, L. S. y Ou, S., 2014. Combined Dust Detection Algorithm by Using MODIS Infrared Channels over East Asia. *Remote Sens. Environ.*, 141, 24–39, doi:10.1016/j.rse.2013.09.019.
- Pontones, J., 2014. Análisis de los patrones espaciales de la energía y altura de las olas en el golfo Nuevo y su efecto sobre algunas especies marinas. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. 35pp.
- Prata, A.J., 1989a. Infrared radiative transfer calculations for volcanic ash clouds. *Geophys. Res. Lett.*, 16, 11, 1293-1296.
- Prata, A.J. 1989b. Observations of volcanic ash clouds in the 10-12 μm window using AVHRR/2 data. *Int. J. Remote Sens.*, 10, 4-5, 751-761.
- Prohaska, F., 1976. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. *Climate of Central and South America. World Survey of Climatology. vol. II H. Landsberg, Ed. Elsevier Press*, págs. 57-69.
- Prospero, J.M., 1996. Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean and Mediterranean: An overview. *The Impact of Desert Dust Across the Mediterranean. S. Guerzoni y R. Chester Eds. Kluwer Academic Press*. págs 133 – 151.
- Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E. y Gill, T.E., 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Rev. Geophys.*, 40, 1002-1033.
- Prospero, J.M. y Lamb, P., 2003. African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications. *Science*, 302, 1024– 1027.
- Qu, J.J., Hao, X., Kafatos, M. y Wang, L., 2006. Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *Geosci. Re. Sen. Lett. IEEE*, 3, 4, 484-486.
- Schwarzkopf, M.L. 2005. Fundamentos meteorológicos que sustentan el trazado de isolíneas de la velocidad básica del viento. Reglamento CIRSOC 102-2005. disponible en: www.inti.gob.ar/cirsoc/102.htm
- Swap, R., Ulanski, S., Cobbett, M. y Garstang, M., 1996. Temporal and spatial characteristics of Saharan dust outbreaks. *J. Geophys. Res.*, 101, D2, 4205–4220.
- Williams, G.N. 2004. ¿Cuáles son las fuentes de nutrientes para mantener la productividad del golfo San Matías? Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. 100pp.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

CALIBRACIÓN DE DATOS OBSERVADOS DE CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO CON SENSORES CAPACITIVOS

Lucía Curto^{1,3}, Mauro Covi¹, María Isabel Gassmann^{1,3}, Matías Cambareri², Aída Della Maggiora²

¹ Dpto. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA. Piso 2, Pabellón 2, Cdad. Universitaria, C1428EGA, CABA, Argentina.

² Unidad Integrada Estación Experimental INTA Balcarce – Fac. de Cs. Agrarias, Univ. Nac. de Mar del Plata. Balcarce, Prov. de Buenos Aires, Argentina.

³ Consejo Nac. de Inv. Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, C1033AAJ, CABA, Argentina.

(Manuscrito recibido el 14 de diciembre de 2015, en su versión final el 20 de marzo de 2016)

RESUMEN

La humedad o contenido de agua en el suelo es una variable de importancia para la meteorología, la agronomía, la hidrología y las ciencias del suelo. En Argentina las mediciones de humedad de suelo son poco sistemáticas y con distribución espacial escasa. Existen distintos métodos de medición de humedad de suelo: gravimétrico, neutrónico y dieléctrico, entre otros. Las mediciones de humedad de suelo utilizadas en este trabajo se realizaron en la localidad de Balcarce, durante la campaña agrícola 2012-2013, sobre un lote de producción de soja. Como objetivo de este trabajo se propuso calibrar los datos observados con un sensor capacitivo con datos gravimétricos y neutrónicos, y posteriormente generar una base de datos de alta resolución temporal. Se ajustaron funciones lineales de calibración para cada nivel de medición. No se pudo caracterizar de manera adecuada la respuesta del sensor capacitivo a las variaciones de humedad de suelo en los dos niveles más profundos. Tanto la calidad de los datos observados como la calidad de las curvas de calibración impactan en el error final de los datos del sensor capacitivo. Para generar la base de datos se utilizaron la totalidad de los datos disponibles, que se interpolaron con el método de Kriging. Se obtuvieron datos de humedad de suelo con buena representatividad espacial en la vertical y temporal, en la que se puede observar la variabilidad del agua en el suelo asociada al aporte de la precipitación y los ritmos de consumo de la vegetación.

Palabras clave: Argiudol típico, sonda de neutrones, función lineal de calibración

CALIBRATION OF SOIL WATER CONTENT MEASUREMENTS OBSERVED WITH CAPACITANCE PROBES

ABSTRACT

Soil moisture or soil water content is an important variable for Meteorology, Agronomy, Hydrology and Soil Science. In Argentina, measurements of soil moisture are both spatially and temporally sparsely distributed. There are different methodologies of measuring soil moisture content like the gravimetric, neutron and dielectric methods, among others. During the growing season 2012-2013, soil moisture measurements were performed in a soybean crop field. The aim of this paper is to

calibrate observed capacitive data with gravimetric and neutron methods as well as to build a high temporal resolution soil moisture database. Linear functions were used to calibrate data for each depth of measurement with the exception of the two deepest levels where retrieved functions have a poor data fitting. The quality of the observed data and the calibration functions have direct impact on the capacitive sensor errors. Gravimetric, neutron and capacitive soil moisture measurements were interpolated with the Kriging method to construct the high resolution database. Variability of soil water content was observed at different soil depths due to precipitation and plant water uptake.

Keywords: Typical Argiudol, neutron moisture meter, linear calibration function

1. INTRODUCCIÓN

La humedad o el contenido de agua en el suelo es una variable compleja que resulta de interés para las ciencias que estudian la pedósfera y su interacción con la atmósfera, como la agronomía, la meteorología, la hidrología y las ciencias del suelo.

Una de las principales dificultades que presenta esta variable es su medición, ya que cualquier método de observación o instalación de sensores para medir la cantidad de agua que se almacena en la matriz del suelo, implica necesariamente una perturbación del medio que se desea muestrear. Existen diversas metodologías destinadas a la medición de agua en el suelo. Entre ellos se destacan el método gravimétrico, el método neutrónico y el método dieléctrico con sensor capacitivo.

En la observación con el método gravimétrico se toman muestras de suelo a distintos niveles de profundidad y por diferencia de peso entre la muestra húmeda y seca se determina el contenido másico de humedad del suelo. Es el método de medición directa de humedad de suelo, con mayor exactitud y se destaca por la sencillez de su procedimiento. Por esta misma razón es considerado el método patrón primario para la calibración de humedad de suelo observado con otros sensores. Entre sus desventajas puede señalarse que el dato no es instantáneo ya que las muestras deben ser procesadas, se requiere de personal capacitado para realizar el muestreo,

y la medición destruye el perfil del suelo, por lo que no se lo puede usar para realizar un registro continuo de la variable (OMM, 1994).

El método de observación con sonda de neutrones consiste en un equipo que posee una fuente radiactiva que emite neutrones rápidos. Éstos colisionan con el hidrógeno presente en las moléculas de agua alojadas en la matriz del suelo, y retornan como neutrones lentos. La sonda contabiliza la cantidad de neutrones que vuelven al sensor y convierte ese valor a datos de humedad volumétrica del suelo a través de una curva de calibración (OMM, 1994). Su instalación solo requiere la colocación de un tubo de aluminio en el suelo por donde se ingresa la sonda para realizar mediciones a diferentes profundidades. El sensor muestrea un volumen esférico de suelo que puede variar, dependiendo de las condiciones de humedad, de 0,10 a 0,25 m de radio. Las ventajas de este método de medición es que es bastante exacto (Van Bavel y otros, 1956; Di Pietro y Suero, 1983b; Gardner y otros, 1986) y menos destructivo y laborioso que el método gravimétrico. Las mediciones requieren de la obtención de una curva de calibración a partir del método patrón. Dentro de sus desventajas se puede mencionar que necesita de personal capacitado y que cuente con permisos especiales otorgados por la entidad reguladora nuclear, dado que utiliza una fuente radiactiva (Evet y Steiner, 1995). No puede utilizarse para muestreo continuo de la variable, y no es recomendable medir con este equipo en profundidades menores a los 0,20 m (Hillel, 1998), debiendo utilizarse otras metodologías de muestreo en este estrato

Prof. (m)	n	$\frac{\rho_b}{\rho_w}$	CC	PMP	%Arcilla	%Limo	%Arena
0 - 0,13	0,54	1,17	0,34	0,15	37,1	34,2	34,1
0,13 - 0,30	0,52	1,21	0,35	0,15	32,1	33,1	34,8
0,30 - 0,49	0,59	1,30	0,38	0,21	46,2	24,1	29,7
0,49 - 0,81	0,62	1,32	0,35	0,21	45,2	23,2	31,6
0,81 - 1,10	0,52	1,23	0,28	0,19	33,9	32,1	34,0

Tabla I: Valores de porosidad del suelo (n) (Salazar, 1989), cociente entre la densidad aparente del suelo y la del agua (ρ_b/ρ_w) (Di Pietro y Suero, 1983 a), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) expresados como contenido volumétrico de agua en el suelo (θ) para la localidad de Balcarce a distintas profundidades (Batallanez, 1972) y datos asociados a la textura del suelo (Salazar, 1989). Los valores de profundidades definidos son aproximados, y dado que las características del suelo pueden presentar variabilidad espacial, se los considera válidos sólo en un entorno del área de medición.

del suelo.

El método dieléctrico por reflectometría en el dominio de frecuencias (FDR, por sus siglas en inglés) requiere de la utilización de un sensor capacitivo que mide la constante dieléctrica aparente o permitividad relativa de un volumen de suelo, la cual es dependiente de su humedad. Los sensores capacitivos pueden usarse para un registro continuo ya que obtienen datos con una alta resolución temporal, y al igual que en el caso del método neutrónico, se realiza un orificio en el suelo solo una vez. Se pueden conectar a dataloggers (Evelt y Steiner, 1995) y tienen un costo accesible. Una desventaja que presentan estos sensores es la poca representatividad espacial (Paltineanu y Starr, 1997), ya que el volumen de suelo muestreado no supera al de una esfera de 0,10 m de radio. En consecuencia, las mediciones de los sensores capacitivos pueden resultar sensibles a irregularidades producidas en torno del sensor por el proceso de instalación (Paltineanu y Starr, 1997; Fares y Polyakov, 2006). Otra desventaja consiste en que las mediciones son sensibles a las propiedades del volumen de suelo (densidad aparente, granulometría, etc.) que rodea al sensor (Gardner y otros, 1998; Gessing y otros, 2004; Chandler y otros, 2004).

Los datos obtenidos mediante sensores

capacitivos requieren de una calibración, para la cual OMM (2008) recomienda utilizar como patrón el método gravimétrico o el neutrónico. Al comparar la precisión de las mediciones de humedad de suelo con método neutrónico y con método capacitivo utilizando como patrón mediciones de humedad de suelo con método gravimétrico, se obtienen mejores resultados con sonda de neutrones (Evelt y Steiner, 1995). Dado que las mediciones del sensor capacitivo dependen de la estructura del suelo y de la instalación, numerosos autores (Evelt y Steiner, 1995; Paltineanu y Starr, 1997; Chandler y otros, 2004; Gessing y otros, 2004; Fares y Polyakov, 2006) sugieren que es necesario realizar la calibración con medidas a campo, puesto que de ese modo se tiene en consideración la variabilidad en las propiedades del suelo. Esa calibración generalmente es específica para cada lugar y cada sensor (OMM, 1994).

Argentina tiene una carencia importante de bases de datos con mediciones sistemáticas de la humedad del suelo, en particular, aquellas con suficiente resolución espacial y temporal tal que permita validar modelos atmosféricos (Ferreira y otros, 2011). Si bien existen numerosos productos obtenidos a partir de imágenes satelitales (www.smn.gov.ar, www.ina.gov.ar, www.inta.gov.ar, www.ora.gov.ar), modelos

hidrológicos o modelos meteorológicos acoplados, la información que ofrecen generalmente no se encuentra validada con datos observacionales. El uso de sensores capacitivos correctamente calibrados, de relativamente bajo costo para las prestaciones que ofrece, permitiría la diagramación de una red de observación de medidas de humedad en el suelo con buena resolución temporal y aceptable resolución espacial, necesaria para la validación de modelos y productos que brinden información especializada a escalas nacional o regional.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar la viabilidad del método dieléctrico como sistema de observación del contenido de agua en el suelo para usos de suelo agrícola en la región de la Pampa Húmeda argentina. A partir de la instalación de un sistema de observación capacitivo de humedad del suelo, se desarrolló una metodología de calibración de los datos, utilizando como medida patrón o con trazabilidad garantizada las observaciones obtenidas con los métodos gravimétrico y neutrónico. A su vez, se realizó una evaluación de la calibración obtenida utilizando las metodologías usuales en la disciplina y posteriormente se generó una base de datos de contenido de agua en el suelo de gran resolución temporal para un período de aproximadamente 90 días.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1. Campaña experimental

El experimento se desarrolló durante la campaña agrícola 2012-2013 en la Unidad Integrada Balcarce (UIB; Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata – Estación Experimental Agraria Balcarce del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), provincia de Buenos Aires (37°45'S; 58°18'O). En el lugar se desarrolló un experimento micrometeorológico utilizando un lote de producción de 19 has, sembrado con un cultivo extensivo de soja crecido bajo condiciones de secano en un suelo Argiudol Típico (Di Pietro y Suero, 1983a). Este suelo se caracteriza por ser oscuro, profundo y

moderadamente bien drenado; presenta una capa de tosca a una profundidad que puede variar entre 0,40 y 2,00 m, la cual impide prácticamente la infiltración. En el sitio de muestreo la capa de tosca se encontró a la profundidad de 1,10 m. Los valores de algunas características físicas del suelo se detallan en la Tabla I. La siembra del cultivo de soja se realizó el 21 de noviembre de 2012 y se registró el desarrollo del cultivo, mediante observaciones fenológicas dos veces por semana (Tabla II) siguiendo la escala de Fehr y Caviness (1977).

Dentro del cultivo de soja se instaló un arreglo de sensores capacitivos Sentek EnviroSCAN (Sentek Sensor Technologies, Stepney, Australia), posicionados para medir humedad de suelo en cinco niveles: 0,08; 0,18; 0,38; 0,58 y 0,98 m. Los sensores se colocaron dentro de un tubo de acceso de PVC hasta la profundidad máxima de medición, de acuerdo a las recomendaciones de instalación sugeridas por el fabricante (Sentek, 2003). La profundidad máxima del perfil de suelo utilizada, se determinó como aquella que pudiera

Fase del cultivo	Descripción	Fecha
	Siembra	19-23/11
V2	2 nudos	07/01
V9	9 nudos	22/01
R1-V9	Comienzo de floración	25/01
R3-V12	Comienzo de formación de vainas	05/02
R5-V15	Comienzo de llenado de granos	22/02
R7	Madurez fisiológica	06/04

Tabla II: Estadios fenológicos de soja (Fehr y Caviness, 1977). Se indican los eventos más significativos y las fechas de ocurrencia respectivas.

ser explorada por las raíces del cultivo a lo largo de su desarrollo. La disposición de los sensores en la vertical respondió a la utilizada por el modelo de suelo NOAH que se acopla a modelos de pronóstico meteorológicos para la simulación de procesos de interacción superficie-atmósfera (Rosero y otros, 2010). La variable provista por los sensores es una frecuencia de respuesta adimensional estandarizada (SF, scaled frequency por sus siglas en inglés), la cual depende de la constante dieléctrica aparente del suelo. La información registrada por los sensores fue colectada y almacenada por un sistema de adquisición de datos (datalogger) Campbell CR1000 (Campbell Scientific Inc., Logan, USA), que a su vez administró la alimentación del conjunto de sensores capacitivos. El datalogger se configuró para realizar muestreos cada 30 segundos y almacenar promedios cada 15 minutos. El período de mediciones utilizado comprendió desde el 6 de enero hasta el 8 de abril de 2013 (92 días).

Alternativamente, se realizaron mediciones de humedad de suelo con los métodos gravimétrico y neutrónico con una periodicidad aproximada de siete días. Estas dos metodologías serán mencionadas de aquí en adelante como métodos de referencia. Las mediciones con método gravimétrico se tomaron en dos capas de 0 - 0,10 m, y 0,10 - 0,15 m, a las que se les asignaron las profundidades representativas de 0,05 y 0,125 m, respectivamente. En cada observación, se realizaron tres repeticiones en puntos cercanos al área donde se encontraba el arreglo de sensores capacitivos. Los datos obtenidos por este método fueron convertidos a unidades volumétricas de humedad de suelo utilizando los valores de densidad aparente correspondiente a cada nivel (Tabla I; Di Pietro y Suero, 1983a). Las mediciones con método neutrónico se realizaron con una sonda Troxler modelo 4300 Depth Moisture Gauge (Troxler Electronics Laboratories Inc., Research Triangle Park, USA) en 3 sitios alrededor del tubo de medición con sensores capacitivos. Para este fin se instalaron tubos de acceso para sonda de neutrones y se efectuaron mediciones a seis

profundidades: 0,24, 0,34, 0,44, 0,64, 0,84 y 1,04 m. Los datos fueron convertidos a humedad volumétrica a través de la ecuación de calibración propuesta por Suero y Travasso (1988) para los suelos de Balcarce. De esta manera se pudieron determinar valores promedios para cada fecha de muestreo y cada profundidad observados con los métodos de referencia. En el período de observación se realizaron un total de 11 muestreos de humedad en el perfil de suelo.

Se utilizaron los datos de precipitación diaria observados en el período de enero-abril 2013 en la Unidad Integrada Balcarce, medidos acorde a los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2008).

2.2. Calibración

Para la calibración fue necesario unificar espacial y temporalmente la información provista por los distintos métodos de observación. Se interpolaron linealmente los datos de los métodos de referencia para establecer valores representativos en profundidades coincidentes con los niveles de medición de los sensores capacitivos. Los datos de estos sensores se promediaron temporalmente durante los períodos en los que se habían realizado mediciones con los métodos de referencia (aproximadamente 1 hora de duración por conjunto de observaciones).

Antes de realizar la calibración, se analizó la coherencia espacial y temporal de los datos observados. Para ello, se graficó y analizó en detalle cada uno de los perfiles de humedad de suelo obtenidos con los métodos de referencia y capacitivos (SF) de las 11 fechas con mediciones simultáneas. También se analizaron las series temporales por nivel de los SF y los datos de humedad de suelo medidos con los métodos de referencia interpolados a los mismos niveles.

La metodología de calibración seleccionada consistió en un ajuste por mínimos cuadrados ponderados por los errores de estimación, para los cuales se ensayaron dos tipos de funciones para cada nivel de medición: una potencial

(Baumhardt y otros, 2000; Fares y otros, 2004) - con y sin ordenada al origen - y una lineal (Fares y Polyakov, 2006). Se determinaron los parámetros asociados a cada ajuste, con su error respectivo y se estimaron los coeficientes de determinación (r^2) y raíz del desvío cuadrático medio:

$$RDCM = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\theta_{v,E} - \theta_{v,O})^2} \quad (1)$$

Donde $\theta_{v,E}$ representa los valores de humedad del suelo observados mediante el sensor capacitivo de acuerdo con las curvas de calibración obtenidas, y $\theta_{v,O}$ los valores correspondientes obtenidos por los métodos de referencia. La sumatoria se realizó sobre los datos disponibles para la calibración. De la misma manera, el RDCM se obtuvo para las estimaciones de humedad del suelo, calculadas de acuerdo a la curva de calibración estándar provista por el fabricante.

2.3. Estimación de errores en los datos para la calibración

Los errores asociados al valor promedio de las mediciones de SF se obtuvieron como la suma de las contribuciones de las posibles fuentes de error. Para ello se consideraron tres fuentes: un error temporal (estimado), un error de profundidad (acotado superiormente) y un error propio del instrumental (estimado), los que se ponderaron mediante una propagación lineal de errores. El error temporal ($Er(SF(t))$) se consideró como aquel asociado a la tendencia observada en los SF durante los períodos de muestreo de los métodos de referencia, para cada fecha y profundidad. En el error por profundidad ($Er(SF(Z))$) se tuvieron en cuenta los errores asociados a los defectos de instalación del tubo en el suelo, incluyendo la verticalidad. El error propio del instrumental ($Er(SF(\theta_v))$) fue el provisto por el fabricante, evaluado mediante mediciones sucesivas en suelo equilibrado (Campbell Scientific, 2009). El error total para cada valor de SF (promediado en el lapso de muestreo de los métodos de referencia) se obtuvo en base a una propagación lineal, de

acuerdo con:

$$E_r^2(SF) = E_r^2(SF(t)) + E_r^2(SF(Z)) + E_r^2(SF(\theta_v)) \quad (2)$$

Finalmente se calculó la contribución relativa de cada una de las fuentes al error total, al error, en términos cuadráticos, de acuerdo con la Ecuación (1).

Se determinaron los errores asociados al valor promedio de las mediciones de humedad de suelo obtenidas con los métodos de referencia considerando el desvío estándar correspondiente a las mediciones realizadas en los tres puntos de muestreo, para cada fecha y profundidad. Al interpolar los valores de humedad del suelo obtenidos con los métodos de referencia a los niveles de medición del sensor capacitivo, se propagaron linealmente sus errores, considerando el aporte del error de medición para estos datos y el error por profundidad.

2.4. Generación de la base de datos

Luego de haber establecido una curva de calibración para cada nivel, se determinaron los datos de humedad volumétrica de suelo a partir de la información de SF observada con sensores capacitivos. Los errores asociados a estos valores se determinaron con una propagación lineal de los errores de los SF y de los parámetros obtenidos de los ajustes por mínimos cuadrados, evaluando luego el aporte relativo de cada fuente de error. Se analizaron las series obtenidas en busca de patrones dudosos, para no introducir información errónea. Estos patrones se identificaron como aumentos y disminuciones abruptas de la humedad de suelo, asociados a eventos de precipitación. Dicho comportamiento no es consistente con entradas de agua en el medio en el cual se está produciendo la infiltración (Hillel, 1998; Starr y Paltineanu, 1998), pero sí se puede relacionar con procesos de infiltración a lo largo del tubo que contiene los sensores. Se eliminaron datos que presentaron este comportamiento, tomando como criterio la remoción de datos a partir del valor mínimo de humedad de suelo antes del aumento abrupto, hasta el valor mínimo luego del mismo. En caso

Nivel de medición (m)	Contribución porcentual al error total de medición		
	Profundidad	Tiempo	Instrumental
0,08	82,11	17,89	$4,98 \times 10^{-9}$
0,18	90,06	9,94	$4,09 \times 10^{-9}$
0,38	95,04	4,96	$3,39 \times 10^{-9}$
0,58	95,15	4,85	$2,14 \times 10^{-9}$
0,98	99,98	0,02	$4,39 \times 10^{-9}$

Tabla III: Contribución en porcentaje de cada fuente de error al error total de SF, para cada nivel donde se realizaron las mediciones.

de no encontrar un mínimo relativo luego del aumento de la humedad de suelo, se eliminaron datos hasta encontrar dos valores consecutivos que indicaran humedad de suelo constante. También se incluyeron en la base de datos las mediciones obtenidas con los métodos de referencia, en sus niveles de medición originales.

Se realizó una interpolación de los datos observados mediante el método de Kriging (Cressie, 1993; Snepvangers y otros, 2003; Schume y otros, 2003; Jost y otros, 2005; De Lannoy y otros, 2006) entre 0 y 1,10 m de profundidad con una resolución espacial de 0,01 m y una resolución temporal de 15 minutos en todo el período disponible. Para simplificar el proceso de interpolación de los datos se utilizó una escala espacial en centímetros y una escala temporal en días, lo que permitió que el dominio tuviera, en términos numéricos, extensiones semejantes en tiempo y profundidad. Se analizó el variograma de los datos (Cressie, 1993) y se le ajustó un modelo lineal de respuesta, con lo que se pudieron determinar los errores generados por la interpolación de la información. Al modelo de variograma también se le forzó un valor mínimo de efecto pepita, definido como el cuadrado de los errores asociados al valor promedio de las mediciones de humedad de referencia. En los datos interpolados se consideraron dos fuentes de error, una debido los errores de los datos utilizados, y otra asociada al proceso de interpolación.

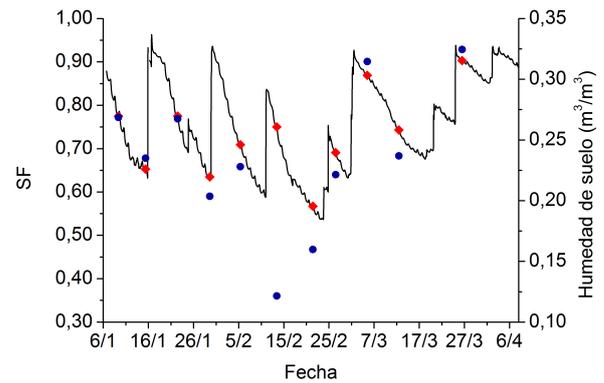


Figura 1: Mediciones de humedad de suelo (m^3/m^3) obtenidas con métodos de referencia (círculos azules), series de SF (líneas negras) y datos de SF coincidentes en tiempo con las mediciones de los métodos de referencia (rombos rojos) para el nivel de 0,08 m.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Errores en los datos, calibración y errores de calibración

Se analizaron las contribuciones al error total de los SF debida a cada fuente de error. Se observó que la mayor contribución al error total para la calibración de cada sensor capacitivo fue el error por profundidad y en menor medida el error temporal (Tabla III). La contribución debida al error propio del instrumental fue prácticamente despreciable. Este patrón se repitió para todos los niveles de medición, aumentando el aporte absoluto (resultados no mostrados) y relativo del error por profundidad al aumentar la misma.

Al analizar la consistencia de los perfiles de humedad de suelo y las series temporales de los datos por nivel de muestreo con los tres métodos, se encontraron dos días en los que las observaciones mostraron diferencias entre sí. En la Figura 1 se presentan, a modo de ejemplo, los valores correspondientes al nivel de 0,08 m en el período completo de medición, donde se puede observar que en el muestreo del 13 de febrero existen diferencias sustanciales entre

metodologías. Desajustes similares se observan para el mismo día en el nivel 0,18 m y para el día 26 de marzo (no mostrado), en los niveles de 0,38 y 0,58 m. Por tal motivo se decidió eliminar los perfiles completos correspondientes a estas fechas del conjunto de datos para realizar la calibración, ya que las diferencias observadas no respondían al patrón de comportamiento usual de los datos.

En términos relativos, el rango de variación de los datos utilizados para la calibración decrece con la profundidad más rápidamente en los valores de SF que en los de contenido volumétrico de humedad medidos con los métodos de referencia (sectores (a) y (b) de la Tabla IV). Esto indica que existió una respuesta diferencial de los sensores capacitivos a medida que aumentó la profundidad, disminuyendo su respuesta frente a la variabilidad del contenido de agua en el suelo. Los valores de SF utilizados para la calibración no siempre lograron representar adecuadamente el rango de variación total de los SF registrados en todo el período (i.e. valores máximos para los niveles de 0,08 y 0,18 m, sectores (b) y (c) de la Tabla IV). Los SF utilizados en la calibración se correspondieron con los momentos de medición de humedad de suelo con los métodos de referencia, por lo que si se quisiera tener una mejor representación de los valores máximos de SF en las calibraciones convendría realizar los muestreos de humedad de suelo con los métodos patrón inmediatamente después de los eventos de precipitación.

De los tres tipos de ajuste ensayados, el lineal resultó ser el más representativo de los datos, además de tener como ventaja una mayor simplicidad matemática. Los resultados del ajuste potencial sin ordenada al origen mostraron que, en la mayoría de las profundidades, la potencia no difiere significativamente de 1, confirmando la relación lineal. Por otro lado los ajustes potenciales con ordenada al origen no nula dieron como resultado dos parámetros, potencia y ordenada al origen, los cuales resultaron no significativamente distintos de 1 y 0, respectivamente, en la mayoría de las profundidades (no mostrado). La curva de

calibración más difundida y que a su vez, es la recomendada por el fabricante, es la no-lineal. Sin embargo, varios autores, en coincidencia con este trabajo, han hallado relaciones lineales para la calibración de estos sensores (Fares y Polyakov, 2006).

Para los primeros tres niveles de profundidad (0,08, 0,18 y 0,38 m) los ajustes lineales pudieron representar adecuadamente la variabilidad de las observaciones de referencia (Tabla V, y Figura 2 (a)). Sin embargo, en los dos niveles de mayor profundidad (0,58 y 0,98 m) el elemento sensor a calibrar no registró adecuadamente la variabilidad observada por el elemento patrón, lo cual se puede evidenciar en la reducción del coeficiente de determinación (r^2) de los ajustes lineales (Tabla V, y Figura 2 (b)), y por lo tanto se optó por no utilizar las curvas de calibración obtenidas. La relación lineal encontrada para el nivel de 0,38 m resultó tener una ordenada al origen no significativamente distinta de cero, por lo que se optó por una relación proporcional entre los SF y la humedad volumétrica de suelo. Este cambio en el nivel de 0,38 m simplificó la curva de calibración sin perder representación de los datos, e hizo que el valor de r^2 aumentara de 0,94 a 0,99. Se observó que los parámetros de los ajustes resultaron distintos entre niveles de medición, utilizando como medida de la diferencia sus errores de estimación, lo que refuerza la hipótesis de una posible dependencia del tipo de suelo y/o proceso de instalación.

Los RDCM hallados en la bibliografía (Evelt y Steiner, 1995; Morgan y otros, 1999; Weinzettel y Usunoff, 2003; Geesing y otros, 2004; Polyakov y otros, 2005; Da Silva y otros, 2007) varían entre 0,007 y 0,058, calibrando en base a datos de referencia gravimétricos. Los valores hallados en este trabajo (Tabla V) se hallan comprendidos dentro de ese rango, considerando que se utilizaron datos de referencia mixtos (gravimétricos y de sonda de neutrones), y que se debieron interpolar verticalmente con el fin de obtener los valores de referencia en los niveles de medición del sensor capacitivo. Los RDCM respecto de la curva de calibración

Datos	(a) Humedad de suelo medida con métodos de referencia interpolada					(b) SF utilizados para la calibración					(c) SF				
	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98
Nivel de medición	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98	0,08	0,18	0,38	0,58	0,98
N	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8750	8750	8750	8750	8750
Mínimo	0,16	0,20	0,30	0,34	0,24	0,57	0,65	0,69	0,88	0,71	0,54	0,63	0,68	0,87	0,68
Máximo	0,31	0,34	0,41	0,42	0,33	0,87	0,84	0,93	0,97	0,73	0,96	0,91	0,95	0,97	0,73
Rango	0,15	0,14	0,11	0,08	0,08	0,30	0,19	0,24	0,09	0,02	0,43	0,27	0,28	0,10	0,05
Media	0,24	0,29	0,36	0,37	0,28	0,71	0,76	0,83	0,93	0,72	0,76	0,77	0,80	0,92	0,71
Desvío Estándar	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,09	0,07	0,10	0,04	0,01	0,11	0,06	0,08	0,04	0,01

Tabla IV: Estadísticos descriptivos de los valores de humedad de suelo (m^3/m^3) medidos con los métodos de referencia, interpolados a las profundidades de medición del sensor capacitivo (a), de los SF medidos con sensor capacitivo utilizados para la calibración (b), y de los SF originales medidos con un sensor capacitivo (c; datos promediados cada 15 minutos).

Nivel de medición (m)	$\theta = aSF + c$				Curva del fabricante
	a	c	r^2	RDCM	RDCM
0,08	0,505±0,042 **	-0,130±0,031 **	0,95	0,014	0,033
0,18	0,651±0,062 **	-0,201±0,046 **	0,94	0,016	0,034
0,38	0,452±0,043 ** ¹	0,013±0,037 ¹	0,94 ¹	0,018 ¹	0,062
	0,437±0,005 ** ²	0 ²	0,99 ²	0,018 ²	
0,58	1,183±0,294 **	-0,728±0,284 **	0,70	0,020	0,069
0,98	5,090±2,910	-3,370±2,101	0,30	0,032	0,061

Tabla V: Parámetros para los ajustes entre humedad de suelo (m^3/m^3) (θ) y frecuencias SF y coeficiente de determinación (r^2), obtenidos con métodos gravimétrico y neutrónico y método capacitivo, respectivamente. Se muestran valores significativos al 99% (**).

estándar son sistemáticamente mayores a los correspondientes a las curvas de calibración halladas en este trabajo (Tabla V). En general, se ha observado un mejor ajuste para curvas de calibración específicas para cada sitio respecto de una curva general (como la curva estándar), independientemente del tipo de sensor utilizado (Morgan y otros, 1999; Weinzettel y Usunoff, 2003; Chandler y otros, 2004; Geesing y otros, 2004; Czarnomski y otros, 2005; Jabro y otros, 2005; Polyakov y otros, 2005; Da Silva y otros, 2007).

3.2. Generación de base de datos

Con las curvas de calibración obtenidas se

calcularon los datos de humedad volumétricos para los niveles de 0,08, 0,18 y 0,38 m de profundidad a partir de los SF y sus errores asociados. En el ajuste lineal de 0,38 m se estimó un solo parámetro mientras que en los dos niveles más superficiales se estimaron dos, cada uno de los cuales aportó su error. De este modo, en la propagación se redujeron los errores en el resultado final para ese nivel respecto de los dos niveles superiores (Tabla V). También se redujo la contribución porcentual del ajuste lineal al error final de humedad de suelo volumétrico (Tabla VI).

Una vez calibrados los datos de los sensores

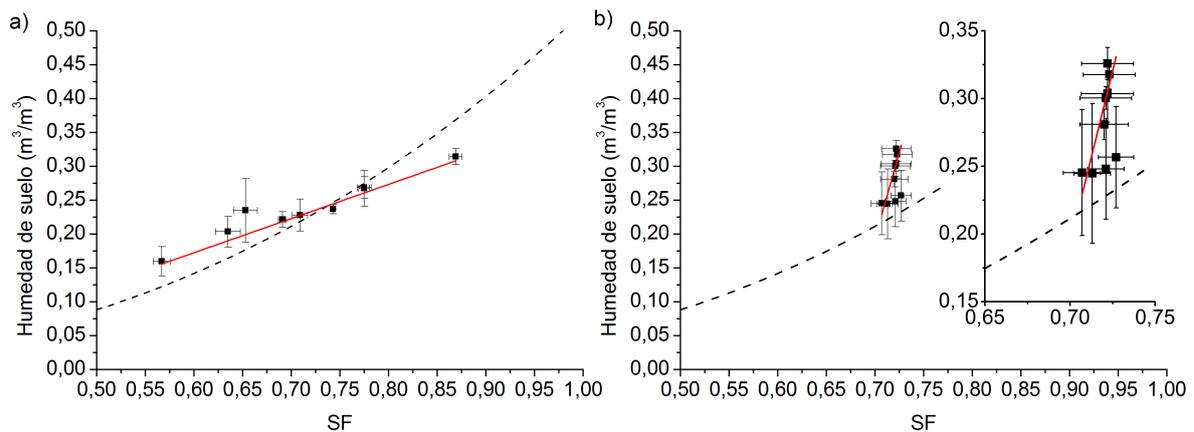


Figura 2: Mediciones de SF vs. Humedad de suelo (m^3/m^3) obtenidas con método capacitivo y métodos gravimétrico y neutrónico, respectivamente, para los niveles de profundidad de suelo de 0.08 (a) y 0.98 m (b). Las barras verticales indican el error estimado para cada observación por los métodos de referencia y las barras horizontales los estimados para los SF. Las líneas punteadas indican la curva de calibración estándar propuesta por el fabricante Sentek EnviroSCAN, y las líneas llenas rojas indican la recta resultante del ajuste lineal.

Nivel de medición (m)	Contribución porcentual al error total de medición	
	SF	Ajuste lineal
0,08	0,75	99,25
0,18	0,20	99,80
0,38	19,03	80,97

Tabla VI: Contribución en porcentaje al error de las estimaciones de humedad volumétrica de suelo dada por SF y los ajustes lineales, para cada nivel donde se realizaron las mediciones de SF.

capacitivos de los primeros tres niveles, se analizó el comportamiento de las series completas de datos medidos. Se pudieron identificar casos de dudoso comportamiento los días 24 y 25 de febrero, y 25 de marzo. En ambos casos se visualizaron aumentos y disminuciones abruptas de la humedad de suelo en todos los sensores del perfil (inclusive en los más profundos - no calibrados), posiblemente asociados a infiltraciones de agua a lo largo del tubo de acceso

de la sonda. Se decidió en estos casos remover los períodos con lluvia de las series temporales de datos de humedad de suelo.

Mediante un variograma se determinó que la representatividad de la información en un determinado punto disminuye aproximadamente en la misma medida en 40 días y para distancias de 0,20 m en la vertical. Se ajustó un modelo lineal, que presentó una anisotropía con un cociente entre su eje mayor y el menor de 3,39, con un ángulo de $161,7^\circ$. El efecto pepita no se apartó del valor mínimo impuesto en el modelo. Considerando la función del variograma ajustado, se realizó una interpolación anisotrópica de la base de datos de humedad de suelo con el método de Kriging.

La humedad de suelo aumentó desde el nivel de superficie hasta aproximadamente 0,50 m de profundidad (Figura 3), donde es mayor la retención de agua debido a que el tipo textural de suelo de ese nivel es más arcilloso (Tabla I). En los niveles más superficiales (por encima de 0,40 m) se observan con cierta periodicidad las recargas de agua asociadas al ingreso de la

precipitación desde superficie. Las disminuciones posteriores se deben a la evaporación del suelo, al consumo de agua por parte del cultivo y a la percolación hacia capas más profundas. En los niveles en los que se dispuso de información de alta resolución temporal proveniente de los sensores capacitivos, se observó en términos generales variaciones más lentas de la humedad del suelo al aumentar la profundidad. La falta de observaciones por encima de los 0,08 m produce en la interpolación una resolución poco realista de su humedad, ya que los aumentos abruptos asociados a la precipitación deberían observarse desde superficie. Esta es una limitación tanto del método de interpolación como del sistema de medición. Por debajo de 0,40 - 0,50 m, la humedad del suelo disminuye con la profundidad. Se observa que, a medida que se secan los niveles más cercanos a superficie, se activa el consumo en raíces más profundas (Starr y Paltineanu, 1998), secándose paulatinamente el suelo desde niveles superiores hacia los inferiores.

Los mínimos valores en el contenido de agua, tanto en capas superficiales como profundas se observaron aproximadamente entre el 10 y el 25 de febrero (35 y 50 días posteriores al 6 de enero, respectivamente). Como la variedad de soja utilizada era de crecimiento indeterminado, durante ese período el cultivo se encontraba entre los estadios V4 o R3 (comienzo de formación de vainas) y V14 o R5 (comienzo de llenado de granos). En esas etapas del desarrollo la demanda de agua es elevada y combinado con un escaso aporte por precipitaciones (15 mm), se produjo una marcada disminución del agua del suelo (Figura 3). A partir de R5 las plantas empiezan a movilizar carbohidratos y nutrientes hacia los frutos en formación, aumentando paulatinamente la biomasa seca, por lo que la demanda de agua por parte del cultivo sigue siendo elevada pero decrece gradualmente. Entre el 25 de febrero y el 7 de marzo se produjeron 63 mm de precipitación, lo cual determinó un aumento del agua del suelo.

Se estimaron los errores de humedad de suelo interpolados con Kriging (Figura 4) utilizando el variograma ajustado (no mostrado). Los errores

asociados a mediciones con sensor capacitivo son mayores que el estimado con los métodos de referencia: las mediciones de humedad de suelo con sensor capacitivo tienen mayores errores iniciales, y a esos se les suman los asociados a las curvas de calibración. Los errores de interpolación se incrementaron más rápidamente con el tiempo hacia profundidades menores, al distanciarse de los datos originales de humedad de suelo, dada la anisotropía del modelo de variograma utilizado. En los niveles cercanos a 0,38 m los errores son de poca magnitud debido a que los datos tuvieron una muy buena representación con el modelo lineal con ordenada al origen nula. Los mayores errores están asociados a los niveles cercanos a la profundidad de 0,18 m, que se ven reducidos en el lapso en que se realizan muestreos gravimétricos a 0,125 m. Los valores de los errores en ese nivel de medición llegan a ser del orden de los valores de humedad del suelo, lo que resalta la importancia de tener mayor resolución vertical de los datos de referencia en niveles cercanos a superficie para las calibraciones, donde la variabilidad espacial de la humedad es mayor. Hacia el final del período de medición (desde el 15 de marzo y hasta el 8 de abril), también se produce un incremento de los errores dado que solo se dispuso de las observaciones con los sensores capacitivos.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se exploraron metodologías de calibración de sensores, generando una base de datos de humedad del suelo de alta resolución temporal. Para la calibración se utilizaron observaciones gravimétricas, con sonda de neutrones y con sensores capacitivos. Se generaron criterios objetivos para verificar la calidad de la información obtenida, identificando problemas asociados al proceso de medición y cuantificando los errores para la información disponible.

El proceso de calibración del sensor capacitivo indicó que la mejor función de transformación para el conjunto de los datos disponibles fue la lineal. La función no sólo es más sencilla sino que también mejora el valor estimado con la

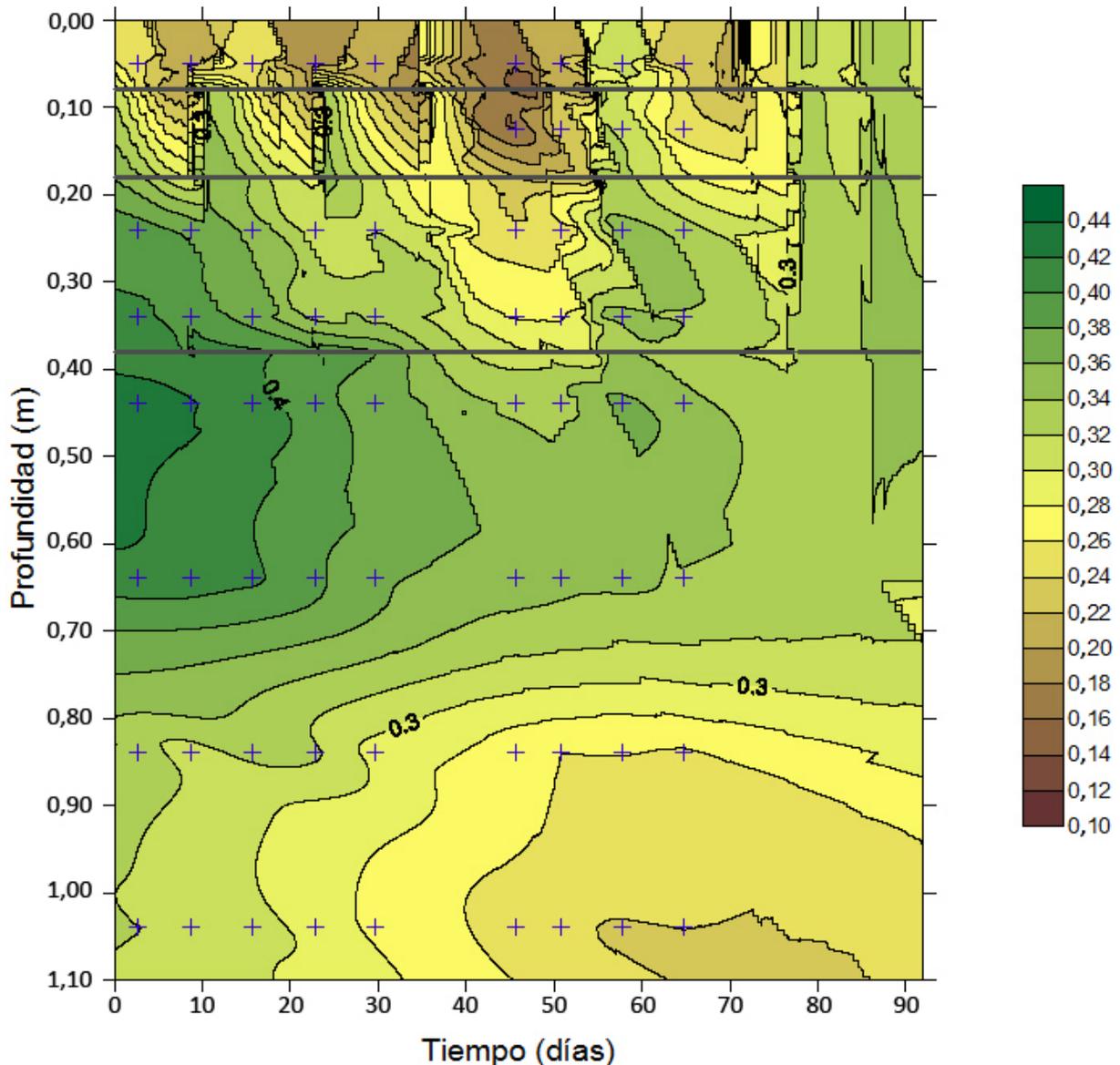


Figura 3: Datos de humedad de suelo (m^3/m^3) interpolados con el método de Kriging con su respectiva escala de valores. En el eje vertical se indica la profundidad en metros. En el eje horizontal se indica el tiempo transcurrido en días, desde el 06 de enero del 2013 a las 17:45 h, momento de inicio del registro de datos. Las cruces azules indican la profundidad y el momento de los muestreos con método gravimétrico y sonda de neutrones. Las líneas continuas grises indican las profundidades para las que hay datos de humedad de suelo cada 15 minutos, reconstruidos de las mediciones con sensor capacitivo.

función potencial propuesta por el fabricante. Los coeficientes de ajuste lineal fueron diferentes para la calibración de cada nivel de profundidad, es decir que las curvas de ajuste para cada nivel de medición resultaron diferentes entre sí. Esto posiblemente haya estado asociado a las diferencias texturales y de densidad aparente de

cada horizonte, por lo que se puede concluir que se necesita una calibración no sólo para cada tipo de suelo, sino para cada profundidad. Se pudo representar de manera adecuada las mediciones de humedad de suelo con sensor capacitivo en los primeros tres niveles, pero posibles deficiencias en la instalación del equipamiento no permitieron

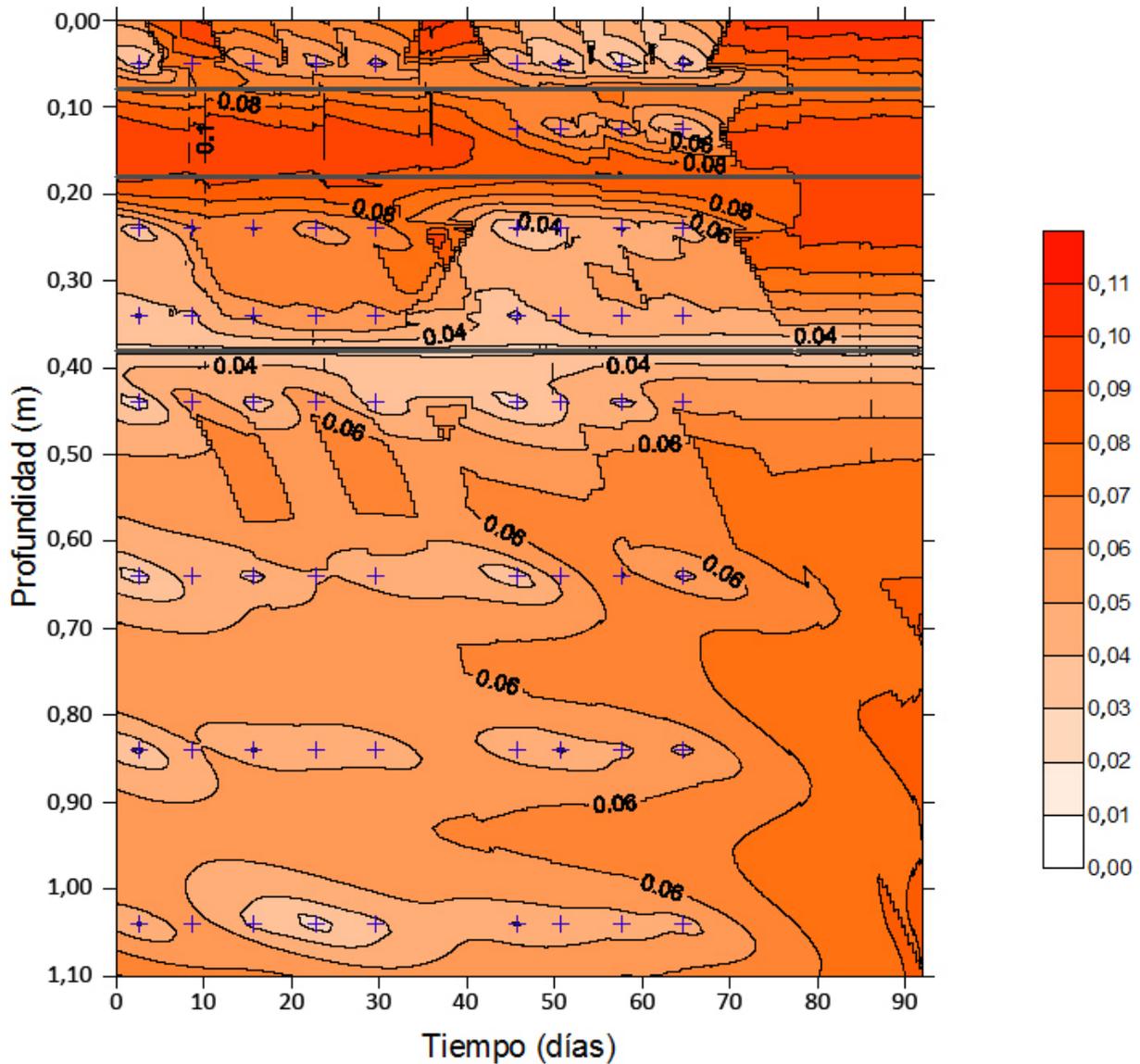


Figura 4: Ídem Figura 3, donde la variable representada es el error total de los datos de humedad de suelo (m^3/m^3), con su respectiva escala de valores.

calibrar los dos niveles más profundos del perfil de suelo. Es posible que la falta de respuesta en estos dos últimos niveles se haya debido a defectos de instalación tales como una brecha con aire en el entorno del sensor, lo que destaca la necesidad de realizar la instalación del instrumental con sumo cuidado y siguiendo las recomendaciones del fabricante, y verificar su respuesta posterior frente a las mediciones de referencia. Los mayores errores en la calibración estuvieron asociados al valor con el que se realizó la acotación de error en la verticalidad de la instalación del tubo de

observación. Es aconsejable, desde el punto de vista de la calibración, realizar los muestreos con los métodos de referencia en los mismos niveles de medición del sistema capacitivo para reducir los errores asociados a la interpolación de los datos. En este trabajo, la configuración vertical de las mediciones de referencia estaba determinada de antemano dado que la campaña contempló otro tipo de observaciones además de las aquí utilizadas, por lo que fue no fue posible modificarla. Es aconsejable también optimizar los momentos de muestreo de modo de cubrir

el rango total de variabilidad en la humedad del suelo para cada nivel. La calidad de la información y el modelo utilizado en la curva de calibración determinan los errores de los parámetros, y por ende impactan en el error final informado para los datos del sensor capacitivo.

El método de interpolación de Kriging permitió generar una base de datos de muy buena resolución temporal y espacial de los datos de contenido de humedad. Sin embargo, debido a la discontinuidad que representa el nivel de superficie el método no permite una interpolación adecuada de los datos cerca de la misma. En caso de requerirse información más precisa en los primeros centímetros de suelo, deberían utilizarse sensores dispuestos específicamente para ello. Los mayores errores resultaron del mismo orden de magnitud de los valores de humedad de suelo obtenidos, y estuvieron asociados a los errores de las mediciones con sensor capacitivo y a su propagación lineal, con excepción del nivel de 0,38 m, en el cual la buena representación de los datos dada por el ajuste lineal sin ordenada al origen produjo mínimos errores. Para reducir los errores de interpolación es conveniente disponer de datos con alta resolución temporal y vertical.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado con fondos de los proyectos PIP 11220100100044 (CONICET, Argentina) y PICT 2010-0554 (ANPCyT, Argentina).

REFERENCIAS

- Baumhardt R.L., Lascano R.J. y Evett S.R., 2000. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 6, 1940-1946.
- Batallanez E., 1972. Capacidad de almacenaje de humedad para cuatro series de suelos del S.E. de la Provincia de Buenos Aires. Tesis Ingeniero Agrónomo-Universidad Católica de Mar del Plata, Balcarce.
- Chandler D.G., Seyfried M., Murdock M. y McNamara, J.P., 2004. Field calibration of water content reflectometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 5, 1501-1507.
- Cressie N., 1993. *Statistics for Spatial Data*, rev. ed. Wiley, New York, 900 págs.
- Czarnomski N.M., Moore G.W., Pypker T.G., Licata J. y Bond B.J., 2005. Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of the Pacific Northwest. *Can. J. For. Res.*, 35, 1867-1876.
- Da Silva C.R.D., Andrade Júnior A.S.D., Alves Júnior J., Souza A.B.D., Melo F.D.B. y Coelho Filho M.A., 2007. Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. *Scientia Agricola.*, 64, 6, 636-640.
- De Lannoy G.J., Verhoest N.E., Houser P.R., Gish T.J. y Van Meirvenne M., 2006. Spatial and temporal characteristics of soil moisture in an intensively monitored agricultural field (OPE 3). *J. Hydrol.*, 331, 3, 719-730.
- Di Pietro L.B. y Suero E.E., 1983a. Medición de densidad aparente del suelo utilizando una sonda gamma. *Ciencia del Suelo* 1, 1, 93-94.
- Di Pietro L.B. y Suero E.E. 1983b. Calibración a campo de una sonda de neutrones para medición de humedad en un argiudol del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 1, 2, 1-4.
- EnviroSMART soil water content profile probes (Revision 3/09), 2009. Campbell Scientific, Inc., 44 págs. (www.campbellsci.com).
- Evett S.R. y Steiner J.L., 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 961-968.
- Fares A., Buss, P., Dalton M., El-Kadi A. I. y Parsons, L. R., 2004. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. *Vadoze Zone J.*, 3, 1390-1399.
- Fares A. y Polyakov V., 2006. Advances in crop water management using capacitance sensors. *Adv. Agron.*, 90, 43-77.
- Ferreira L.J., Salgado H., Saulo S. y Collini E., 2011. Modeled and observed soil moisture variability over a region of Argentina. *Atmos. Sci. Lett.*, 12, 334-339.
- Fehr W.R. y Caviness C.E., 1977. Stages of soybean development. *Iowa Agric. Exp. Stn.*

- Spec. Rep., 80 págs.
- Gardner W.H. y Klute A., 1986. Water content: Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods, 493-544.
- Gardner C.M.K., Dean T.J. y Cooper J.D., 1998. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. *J. Agric. Engng. Res.*, 71, 395-403.
- Geesing D., Bachmaier M. y Schmidhalter U., 2004. Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields. *Aust. J. Soil Res.*, 42, 289-299.
- Hillel D., 1998. *Environmental Soil Physics*, Academic Press, San Diego, 771 págs.
- Jabro J.D., Leib B.G. y Jabro, A.D., 2005. Estimating soil water content using site-specific calibration of capacitance measurements from sentek EnviroSCAN systems. *Applied engineering in agriculture*.
- Jost G., Heuvelink G.B.M. y Papritz A., 2005. Analysing the space-time distribution of soil water storage of a forest ecosystem using spatio-temporal kriging. *Geoderma*, 128, 3, 258-273.
- Morgan K.T., Parsons L.R., Wheaton T.A., Pitts D.J. y Obreza T.A., 1999. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. *Soil Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 4, 987-989.
- OMM-WMO, 1994. *Guía de prácticas hidrológicas N° 168*, Quinta edición, Geneva, 818 págs.
- OMM-WMO, 2008. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation N° 8*, Seventh edition, Geneva, 681 págs.
- Paltineanu I.C. y Starr J.L., 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 61, 6, 1576-1585.
- Polyakov V., Fares A. y Ryder M.H., 2005. Calibration of a capacitance system for measuring water content of tropical soil. *Vadose Zone J.*, 4, 4, 1004-1010.
- Rosero E., Yang Z.L., Wagener T., Gulden L.E., Yatheendradas S. y Niu G.Y., 2010. Quantifying parameter sensitivity, interaction, and transferability in hydrologically enhanced versions of the Noah land surface model over transition zones during the warm season. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, 1984-2012.
- Salazar L., Plaza J.C. y Moscatelli G., 1989. *Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires*. Editorial Edipubli S.A, Buenos Aires, Argentina.
- Sentek Sensor Technologies Acces Tube Intalation Guide (V 1.0), 2003. Sentek Pty Ltd., 57 págs. (<http://www.sentek.com.au>)
- Schume H., Jost G. y Katzensteiner K., 2003. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)–European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand. *Geoderma*, 112, 3, 273-287.
- Snepvangers J.J.J.C., Heuvelink G.B.M. y Huisman, J.A., 2003. Soil water content interpolation using spatio-temporal kriging with external drift. *Geoderma*, 112, 3, 253-271.
- Starr J.L. y Paltineanu I.C., 1998. Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. *Soil and Tillage Research* 47, 1, 43-49.
- Suero E.E. y Travasso M.I., 1988. Medición del contenido de agua en suelos. Métodos de radiación. XII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Van Bavel C.H.M., Underwood N. y Swanson R.W., 1956. Soil moisture measurement by Neutron moderation. *Soil Sci.*, 82, 29-41.
- Weinzettel P. y Usunoff E., 2003. Calibración de una sonda de capacitancia en suelos argiudoles de la zona central de la provincia de Bs. As., Argentina. *Zona no Saturada del Suelo*, 6, 165-170.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

RELACION ENTRE MORTALIDAD Y TEMPERATURAS EXTREMAS EN BUENOS AIRES Y ROSARIO

Gustavo Almeira^{1,5}, Matilde Rusticucci^{2,3}, Martina Suaya^{2,4}

¹ Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

² Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina.

⁴ Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina.

⁵ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata,
Argentina.

(Manuscrito recibido el 9 de octubre de 2015, en su versión final el 28 de marzo de 2016)

RESUMEN

En este trabajo se examinan las relaciones entre las temperaturas extremas y la mortalidad en verano en las ciudades de Buenos Aires y Rosario para el establecimiento de un alerta de olas de calor con aplicación a la salud. Se encuentra que en ambas ciudades existe una relación tipo U entre la mortalidad y las temperaturas máximas, mínimas y aparentes diarias entre los años 2001/2012. De esta manera se muestra que la población porteña y rosarina es susceptible a la ocurrencia de periodos de altas temperaturas. Mediante el análisis de las olas de calor con afectación en la mortalidad vemos que los hombres y mujeres son afectados por exceso de calor en igual proporción relativa a su población parcial y los adultos mayores a 65 años acaparan entre el 70-80 % de los fallecidos. Para ayudar desde la meteorología a la salud, se desarrollaron Sistemas de Alerta de Olas de Calor y Salud en ambas ciudades, y operados por el Servicio Meteorológico Nacional. Los mismos tienen el objetivo de anticipar a la población situaciones meteorológicas extremas y sus posibles efectos en salud, para que la misma aumente los recaudos frente a las olas de calor.

Palabras clave: Olas de calor, mortalidad, Sistema de Alerta, Buenos Aires, Rosario

RELATIONSHIP BETWEEN MORTALITY AND EXTREME TEMPERATURES IN BUENOS AIRES AND ROSARIO

ABSTRACT

In this paper the associations between summer heat waves and mortality in Buenos Aires and Rosario is studied. Both cities have an 'U' relationship between daily mortality and maximum, minimum and apparent temperatures over the 2001-2012 period. The population over both cities is susceptible to extreme high temperatures. Men and women are equally affected, but people over 65 represent 70-80 % by analyzing heat waves. Alert systems were implemented in both cities through the National Weather Service with the aim of anticipate extreme meteorological situations

to the population.

Keywords: Heat waves, mortality, alert system, Buenos Aires, Rosario

1. INTRODUCCIÓN

Las olas de calor o frío son eventos raros que varían en el carácter e impacto aun en una misma localidad. Para el estudio de olas de calor o de frío se necesita previamente una definición de las mismas, no existiendo una definición universal aceptable (Perkins and Alexander, 2013). Los componentes esenciales de una definición de una ola de calor debe incluir la presencia de altas temperaturas en un área de interés y también una componente de duración o persistencia. Una ola de calor es una exposición sostenida a altas temperaturas durante varios días.

La ola de calor puede ser definida basándose en la superación de umbrales de distintas variables meteorológicas o combinación de ambas, que pueden incluir las temperaturas máximas y mínimas, parámetros de humedad o acumulación de horas de calor, entre otras (Páldy A. et al, 2005; Jendritzky G. et al, 2010; Thiele-Eich In. et al, 2010). Los umbrales mencionados de temperaturas varían de una población a otra y se supone que es una función de la adaptación de la población al clima local.

Los estudios de olas de calor en zonas urbanas muestran una asociación entre un aumento en calor y un aumento en la mortalidad, medidas con temperaturas máximas o mínimas, índices de calor o masas de aire, presentando las relaciones entre mortalidad y temperatura en climas templados una forma de 'U' o 'V' y en climas cálidos forma de 'J' (Honda et al, 2013; Martínez Navarro F. et al, 2004 y Días Jiménez J et al, 2005).

Un ejemplo de ola de calor que afectó a la población seriamente, fue la producida en Chicago en 1995 con una duración de 5 días, con temperaturas máximas que alcanzaron los 40°C, en donde las muertes se incrementaron un

85 % con una prevalencia de hombres fallecidos, de color y mayores a 75 años. Esta situación trajo como experiencia que los esfuerzos de prevención envuelvan a comunidades e individuos (Basu and Samet, 2002 y Páldy A, et al, 2005).

El otro ejemplo muy significativo es la ola de calor ocurrida en Francia en 2003 durante la cual se registraron excesos de 15000 muertos en el mes de agosto (Vandentorren E. et al, 2005; Michelon T et al, 2005 y Fouillet A. et al, 2006), con estimaciones de más de 70000 muertos en exceso en 16 países europeos en el mismo episodio cálido extremo (Robine J. et al, 2007).

En Australia, por ejemplo, se encontró que aumentó la relación entre los muertos en verano versus muertos en invierno de 0.71 a 0.86 de 1968 a 2007, en asociación con el aumento de las temperaturas medias anuales (Bennett C. et al, 2013); siendo los más afectados las personas mayores de 55 años por problemas respiratorios y luego por complicaciones cardiovasculares.

En un ambiente expuesto sostenidamente al calor los grupos poblaciones de mayor edad o infantes incrementan su riesgo de muerte; además de tener una enfermedad preexistente, vivir solo, socialmente aislado, sin hogar, sin acceso a la información de salud y calor, ser inmóvil, sufrir de una enfermedad mental o no ser capaz de realizar el autocuidado (WMO and WHO, 2015). Otros factores son el bajo status socioeconómico, la falta de aire acondicionado y transporte, el uso de tranquilizantes, obesidad excesiva y vivir en los pisos superiores de varias plantas (Martínez Navarro F. et al, 2004 y Fouillet A. et al, 2006).

El medio ambiente urbano, debido a que normalmente tiene índices de calor (combinación de temperatura y humedad) más altos y que retiene más calor durante la noche que las zonas rurales, podría incrementar el riesgo (Lee, 1980).

A medida que la población vaya envejeciendo y la población urbana se incrementa, el impacto de las temperaturas elevadas en la mortalidad podría ser más importante.

En el periodo de 1880 a 2005, por ejemplo, en Europa occidental se ha encontrado que la longitud de las olas de calor del verano se han duplicado y casi se han triplicado la frecuencia de hot days (Della-Marta et al, 2007). En Buenos Aires, la frecuencia de olas de calor extremas, con temperaturas máximas y mínimas por encima de los percentiles 90, se han casi cuadruplicado entre las décadas 1961-70 y 2001-10 (Rusticucci et al, 2015).

Las temperaturas elevadas tienen un lag de 0-3 días en producir el máximo efecto en la mortalidad, demostrando que el calor relacionado con la mortalidad es un evento grave, requiriendo una rápida intervención; utilizando datos de mortalidad en 15 ciudades del noreste de Asia (Chung et al, 2015).

A pesar de que el grupo de mayor vulnerabilidad frente a la ola de calor es el de las personas mayores a 65 años; han fallecido personas jóvenes aparentemente sanas al realizar deporte al aire libre en horas de altas temperaturas durante la ola de calor en Europa en 2003 (Diaz Jimenez y otros, 2005). Se debería informar a la población sobre medidas básicas a seguir ante extremos térmicos y la correcta formación y adecuación de los servicios médicos ante patologías relacionados con las olas de calor y frío y además articular sistemas de alerta in situ ante posibles extremos climáticos.

En varias investigaciones (Basu R. et al., 2002; Michelon T et al, 2005 y Martínez Navarro F. et al, 2004) se hacen varias indicaciones frente a las olas de calor, tales como el monitoreo continuo de las condiciones meteorológicas y creación de Sistemas de Alerta de Calor, un sistema de comunicación inmediata y una red que pone en funcionamiento y coordina a emergencias médicas, hospitales y clínicas, la creación y/o acondicionamiento de salas especiales con aire

acondicionado, disponibilidad de buses especiales y usos de shopping con aire acondicionado los días de la ola de calor y la identificación de los grupos más vulnerables en la población frente a olas de calor (personas de mayor de 70 años, viven solos y/o de menores recursos). Se sugiere dar avisos de calor cuando se superan los distintos umbrales de temperaturas y duración de la misma en tantos días; según la localización y la región. Las políticas deben ser actualizadas e implementadas según los últimos trabajos y hallazgos.

Antes de la intensa ola de calor de 2003, existían pocos sistemas de Alerta de olas de calor en Europa (Lowe et al., 2011). Por ejemplo en Francia se desarrolló el Plan Nacional Francés de Olas de Calor, luego de 2003, que monitorea todo el país (Vandentorren E et al, 2005 y Michelon T. et al, 2005). Este incluye umbrales de índices biometeorológicos, definidos a partir de la mortalidad diaria de los últimos 30 años e indicadores meteorológicos y funciona de junio a agosto de cada año. De los 7 indicadores testeados (relacionados con la temperatura y humedad), las temperaturas máximas y mínimas, juntos y promediados en 3 días consecutivos, tiene la mayor sensibilidad y especificidad y han sido elegidos como índices biometeorológicos. Este sistema pretende informar a la autoridades francesas cuando los niveles de alerta exceden un exceso de mortalidad diaria es mayor al 50 o 100 %, de acuerdo al tamaño de la ciudad y el nivel 2 del sistema es activado cuando el pronóstico de los índices biometeorológicos a 3 días es mayor que los umbrales. En 13 países europeos; tales como Portugal, Francia, Reino Unido, España, Noruega y Holanda; se desarrollaron sistemas de alertas federales, que cubren todo el país, aunque con diferentes umbrales en las distintas ciudades; al igual que en Estados Unidos y Canadá (WMO and WHO, 2015).

Considerando que dos de las principales urbes de nuestro país son las ciudades de Buenos Aires y Rosario, y que no cuentan con un sistema de alerta ante olas de calor, el objetivo de este trabajo es estudiar las relaciones entre periodos

de temperaturas elevadas y mortalidad en Buenos Aires y Gran Rosario, efectos en la salud pública frente a periodos de olas de calor y sentar las bases para la creación de sistemas de Olas de Calor y Salud en ambas ciudades argentinas.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

En esta investigación se trabajó con datos de mortalidad diaria en el período 2001-2012 en la ciudad de Buenos Aires y 2001-2011 para el Gran Rosario, provistos por el Ministerio de Salud de la Nación. Estos datos se encuentran diferenciados por sexo, datos etarios, causa de defunción y lugar de residencia a paso diario.

La ciudad de Buenos Aires es la sede del gobierno federal, y es llamada Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), posee una población de alrededor de 2.900.000 habitantes según el último censo de 2010, de los cuales son 54 % son mujeres y 46 % hombres. De ahora en adelante llamada Buenos Aires.

El Gran Rosario es el aglomerado urbano que comprende a la ciudad de Rosario propiamente dicha y demás localidades de los departamentos vecinos. El Gran Rosario ocupa un área de aproximadamente 590 km², posee una población de alrededor de 1.450.000 habitantes, según el Censo 2010, y es el tercer conurbano de la Argentina, luego de Gran Buenos Aires y Gran Córdoba, y el primero de Santa Fe. Llamada en adelante Rosario. Los datos meteorológicos utilizados provienen de las estaciones Buenos Aires Observatorio (35°35'S, 58°29'W) y Rosario Aero (32°55'S, 60°47'W) pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional en el periodo 2001 al 2012; representativas de ambas ciudades para relacionar con los datos del sector de salud. Se consideraron en este trabajo las temperaturas máximas, mínimas y rocío diarias.

Además se introdujo la temperatura aparente, que es la temperatura recibida por un individuo, y es una medida del discomfort debido al calor y altos contenidos de humedad utilizada en varios trabajos (Steadman, 1979 y Kalkstein and

Valimont, 1986). Esta temperatura es calculada mediante una combinación de la temperatura y el punto de rocío de acuerdo a la siguiente fórmula

$$T_a = -2,653 + 0,994T_{max} + 0,0153T_{rocio_{max}}^2 \quad (1)$$

En esta investigación se propone utilizar la temperatura aparente máxima, tomando como entrada para su cálculo la temperatura máxima y el rocío máximo diario; como una idea de situarnos en las condiciones de máximo discomfort diario.

Para investigar sobre las relaciones durante olas de calor y la mortalidad en los años considerados en ambas ciudades, se utilizaron las definiciones de olas de calor de Rusticucci et al (2015). En dicho trabajo definen tres tipos de olas de calor, aquellas con una sucesión de 3 o más días con (1) Temperaturas mínimas por encima del Percentil 90, (2) Temperaturas máximas por encima del Percentil 90 y (3) la ocurrencia conjunta de Temperaturas Máximas y Mínimas de sus percentiles 90, calculados sobre un período base 1961-1990.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Relación entre mortalidad y temperaturas

Para las ciudades de Buenos Aires y Rosario se encuentra una relación típica de U entre mortalidad y temperatura máxima y mínima (Figura 1 y 2 respectivamente). Esto indica que existe una susceptibilidad de la población de ambas ciudades a los extremos de temperaturas. Se puede observar que esta susceptibilidad en algún caso es más marcada en los meses de invierno a las temperaturas bajas que en los de verano a las temperaturas altas. Sin embargo, considerando que las tendencias de temperatura que ambas ciudades fueron positivas, (Hartman et al, 2013) y que las proyecciones climáticas muestran aumentos de temperatura, para una mejor adaptación de la salud al clima futuro, el presente trabajo se enfoca en estudiar éste aspecto de la relación. Por otro lado, es muy significativa la relación entre la temperatura y

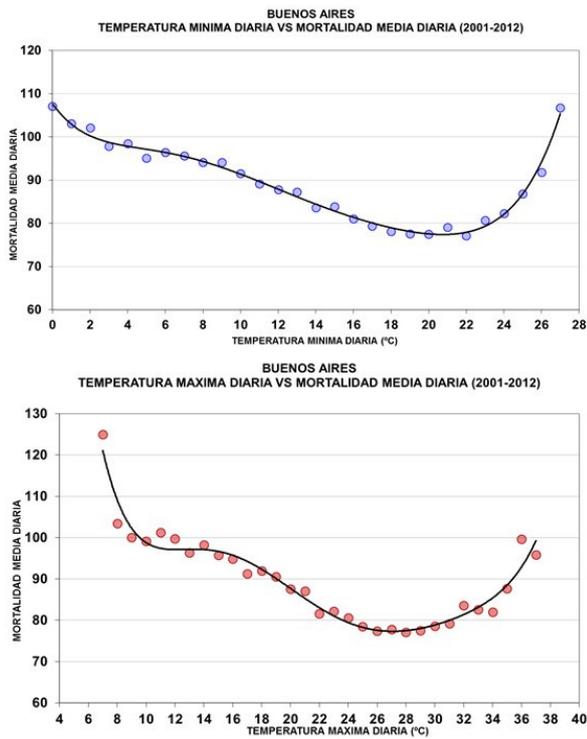


Figura 1: Relación entre temperaturas mínimas y máximas y mortalidad en la ciudad de Buenos Aires (ambos sexos).

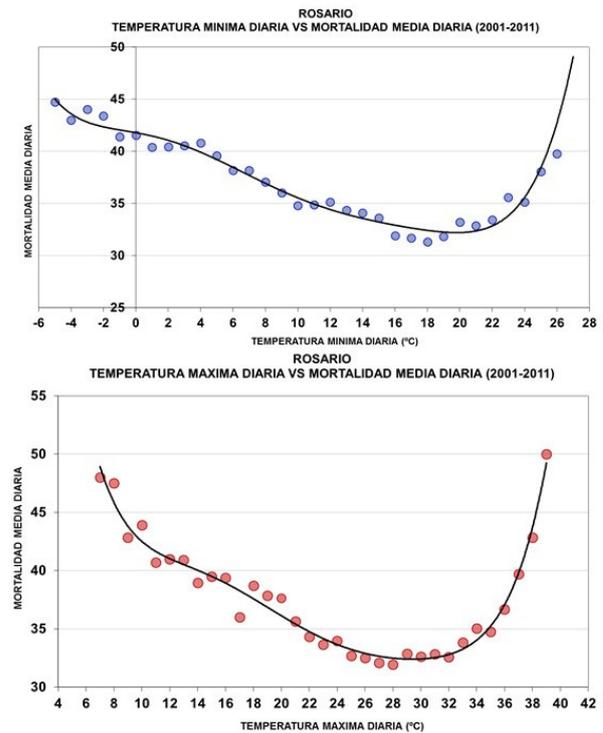


Figura 2: Relación entre temperaturas mínimas y máximas y mortalidad en Gran Rosario (ambos sexos).

mortalidad en la época estival, ya que ocurren máximos diarios más significativos en verano que en invierno, relacionados con extremos cálidos de temperatura.

Examinando los gráficos se pueden inferir diferentes umbrales de temperaturas máximas y mínimas a partir de los cuales hay un claro efecto en el punto de inflexión y abrupto crecimiento de la mortalidad diaria, principalmente en temperaturas altas.

La mortalidad media anual en la ciudad de Buenos Aires es de 86 muertos por día por todas las causas y si se considera solamente el verano (definido como diciembre a marzo) la mortalidad es de 77 muertos, mientras que en invierno (de mayo a agosto) asciende a 97 muertos. (Tabla I). Sin embargo, durante el período estudiado ocurrieron máximos diarios más relevantes en verano que en invierno, con casos de 248 y 176 muertos.

MORTALIDAD	BUENOS AIRES	ROSARIO
MEDIA ANUAL	86	35
MEDIA INVIERNO	97	38
MEDIA VERANO	77	32

Tabla I: Valores medios diarios 2001-2012 de mortalidad en Buenos Aires y Rosario.

En tanto que en la ciudad de Rosario y alrededores hay una mortalidad diaria media anual de 35 muertos, ocurriendo 38 en invierno y de 32 en verano. (Tabla I). Se observa que los valores están muy cercanos entre ellos, aunque en verano se han encontrados episodios de altas temperaturas con 70 fallecidos en un día.

Para finalizar se calcularon las relaciones entre mortalidad de ambos sexos por separado y las temperaturas máximas y mínimas (resultado no mostrado). Aquí se observó que no hay una susceptibilidad marcada significativa o mayor

FECHA	% AUMENTO MORTALIDAD	sexo M	sexo F	>65	sexo M	sexo F
Ene-01	79%	42	57	82	38	61
Ene-05	43%	42	58	77	36	64
Ene-08	35%	43	57	81	39	61
Ene-03	29%	44	56	80	38	62
Ene-04	24%	41	59	80	37	63
Dic-10	21%	42	58	82	38	62
Ene-09	19%	42	58	79	39	61
Nov-08	19%	41	59	82	39	61
Ene-06	18%	45	55	80	41	59
Feb-07	17%	48	53	76	41	59
Dic-07	17%	42	58	78	37	63
Ene-03	24%	45	55	79	40	60

Tabla II: Exceso de mortalidad ocurrido en las principales Olas de Calor en Buenos Aires ordenadas por su exceso (sin corregir por datos poblacionales). Valores totales, y separados por sexo, y por edad, >65: mayores a 65 años totales y separados por sexo.

FECHA	% AUMENTO MORTALIDAD	sexo M	sexo F	>65	sexo M	sexo F
Ene-10	47%	51	49	69	43	57
Ene-08	45%	54	46	71	46	54
Ene-03	48%	59	41	73	56	44
Ene-03	26%	45	55	71	38	62
Ene-01	38%	48	52	65	40	60
Ene-05	53%	49	51	75	41	59
Ene-06	51%	47	53	75	41	59
Feb-07	18%	52	48	73	47	53
Mar-08	27%	47	37	59	51	49
Nov-08	26%	50	50	68	41	59
Dic-08	29%	46	54	69	44	56
Dic-08	40%	49	51	73	46	54
Ene-09	20%	51	49	69	52	48
Ene-09	33%	56	44	63	50	50
Feb-10	31%	53	47	68	42	58
Dic-10	41%	54	46	77	51	49

Tabla III: Exceso de mortalidad ocurrido en las principales Olas de Calor en Rosario ordenadas por su exceso (sin corregir por datos poblacionales). Valores totales, y separados por sexo, y por edad, >65: mayores a 65 años totales y separados por sexo.

afectación al sexo femenino o masculino a los cambios de temperaturas, tanto en invierno como en verano.

3.2. Olas de calor y mortalidad

Se analizaron todas las olas de calor ocurridas

en el período estudiado, en cualquiera de sus tres definiciones, se identificaron aquellas olas de calor que manifestaron un efecto en la mortalidad, presentando un exceso de al menos un 17% con respecto a los muertos esperados, o sea al valor medio. En total se seleccionaron 28 olas de calor para las 2 ciudades, con fechas, en general,

coincidentes o próximas en las dos ciudades.

Al analizar las olas de calor en Buenos Aires y su relación con la mortalidad ocurridas en los años de testeo, se nota que las afectaciones varían entre un 20-80 % de exceso de mortalidad durante dichos eventos, esto es que ocurrieron entre un 20 hasta un 80 % más de muertos que lo esperado durante las olas de calor analizadas (Tabla II). En tanto que en Rosario se contabilizaron entre un 20 a 53 % de excesos de muertos en los episodios de stress térmico analizados (Tabla III).

En dichas olas de calor la susceptibilidad es similar en ambos sexos en las 2 ciudades, con un cierto predominio de afectación al sexo femenino en la ciudad de Buenos Aires (43 % vs 57 %).

Al analizar la influencia de la edad, se observa que alrededor del 70-80 % de los fallecidos son personas mayores a los 65 años; encontrando este grupo etario de mayor afectación por el stress térmico en ambas ciudades argentinas.

Y si dentro del grupo de la población mayor a 65 años se clasifica según a qué sexo pertenecen, los mayores afectados son las mujeres sobre los hombres basándose con datos absolutos o crudos. En Buenos Aires las proporciones son de alrededor del 65 % de las mujeres y un 35 % de hombres mientras en Rosario de 55 % y 45 % respectivamente.

Sin embargo al corregir estos datos crudos por la pirámide o estructuras de la población en cada ciudad, se encuentra que prácticamente son afectados los mayores a 65 años sin distinción de sexo en ambas ciudades. Si bien las mujeres son las más afectadas por episodios de stress térmicos, al relativizarlos por la cantidad de mujeres/total de población, prácticamente ambos sexos poseen la misma susceptibilidad. Esto se denomina Índice de Masculinidad, el cual vale alrededor de 0.65 en Buenos Aires y 0.7 en Rosario (hay 7 hombres cada 10 mujeres) en la población mayor de 65 años (censo 2010).

Resumiendo lo anterior, examinando las olas de

	MAXIMA	MINIMA	MEDIA
BUENOS AIRES	44,6°C	13,3°C	29,8°C
ROSARIO	46,5°C	11,6°C	31°C

Tabla IV: Valores de Temperatura Aparente registrados en Buenos Aires y Rosario en el período estudiado, para verano.

	MAXIMA	MINIMA	APARENTE
BUENOS AIRES	30°C	22°C	38°C
ROSARIO	32°C	22°C	40°C

Tabla V: Umbrales de aumento de la mortalidad para la temperatura máxima, mínima y aparente en Buenos Aires y Rosario.

calor de mayor afectación se concluye que las personas de edad superior a 65 años son las más afectadas y dentro de este grupo etario es el sexo femenino el más susceptible por su mayor proporción en la población. Dichas olas de calor pueden aumentar la mortalidad esperada hasta en un 80 %.

3.3. Temperatura aparente y mortalidad

En el caso de la ciudad de Buenos Aires las temperaturas aparentes máximas presentan valores mínimos de alrededor de 13°C, máximo de 44.6°C y medias de 30°C (Tabla IV) y la mortalidad aumenta dramáticamente a partir de los 38°C (Figura 3). En consecuencia los umbrales de aumento de la mortalidad son de 22°C, 30°C y 38°C para la temperatura mínima, máxima y aparente máxima respectivamente (ver Tabla V). La diferencia de 8°C entre la temperatura máxima y la aparente se atribuye a los efectos de los altos contenidos de humedad.

En tanto que en la ciudad de Rosario las temperaturas aparentes son un tanto más elevadas (máxima de 46.5°C y media de 40°C), salvo la mínima (11.6°C) (ver también Tabla IV). Y las cotas para el aumento de la mortalidad en verano son de 22°C, 32°C y 40°C, para las temperaturas mínimas, máximas

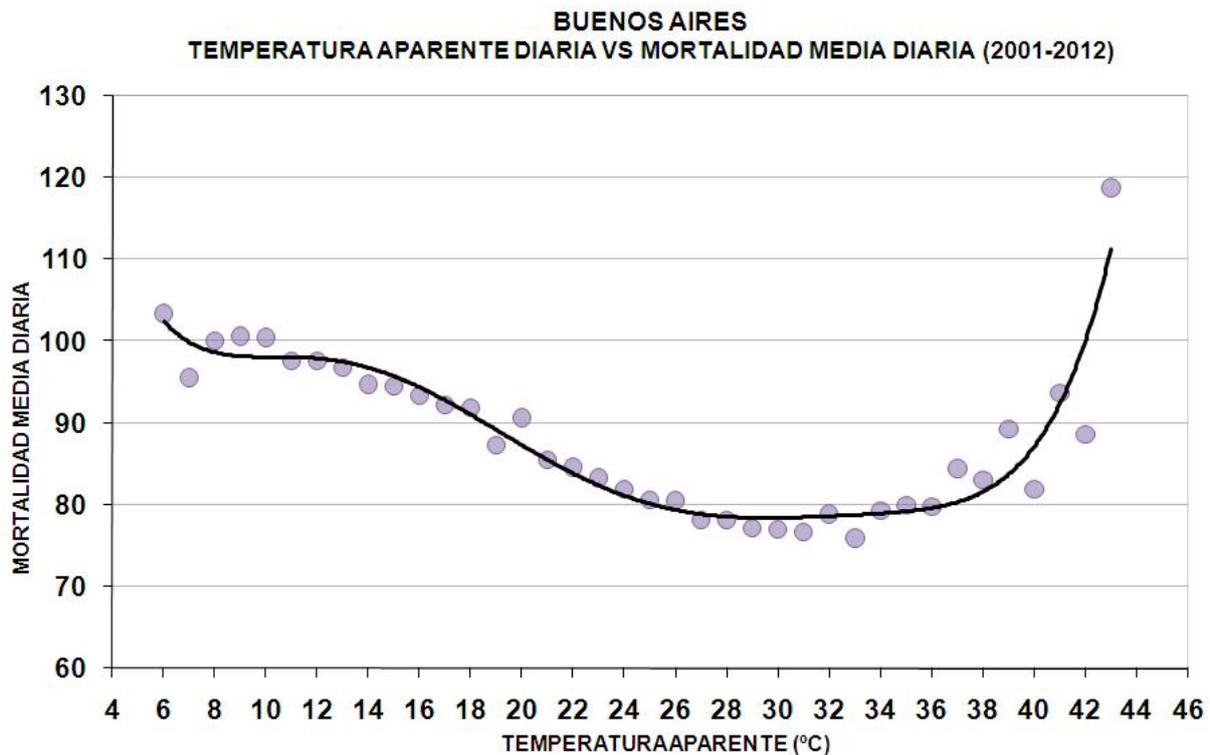


Figura 3: Relación entre temperatura aparente y mortalidad en la ciudad de Buenos Aires.

y aparente máxima respectivamente (Figura 4). La incorporación de la humedad nos da una atribución, de nuevo, de 8°C.

3.4. Sistema de Alerta y Salud

Mediante el uso de los resultados descriptos en las secciones anteriores se desarrollaron los Sistemas de Alerta y Salud en las ciudades de Buenos Aires y Rosario, que están basados en las relaciones encontradas entre temperaturas máximas, mínimas y la mortalidad diaria en ambas ciudades, entre los años 2001-2011. El desarrollo de ambos sistemas y su transferencia al SMN, fue un proceso virtuoso de nuestro trabajo.

El objetivo máximo a alcanzar con la implementación de estos Sistemas de Alerta es poder anticipar a la población, situaciones meteorológicas extremas y sus posibles efectos en la mortalidad, para que la misma aumente los recaudos frente a las olas de calor.

El Sistema tiene una clasificación de situación de olas de calor y su efecto en la salud y la mortalidad (ver Tabla VI):

Los niveles del Sistema de Alerta y Salud en ambas ciudades involucran las siguientes características:

VERDE: Mínimo estado de vigilancia durante el verano. Sin peligro sobre la salud de la población.

AMARILLA: Las olas de calor pueden ser

ESTADO	EFEECTO SOBRE LA SALUD
VERDE	SIN EFECTO SOBRE LA SALUD
AMARILLO	LEVE-MODERADO
NARANJA	MODERADO-ALTO
ROJO	ALTO-EXTREMO

Tabla VI: Distintos estados del Sistema de Alerta de Olas de Calor y Salud y sus efectos en la salud.

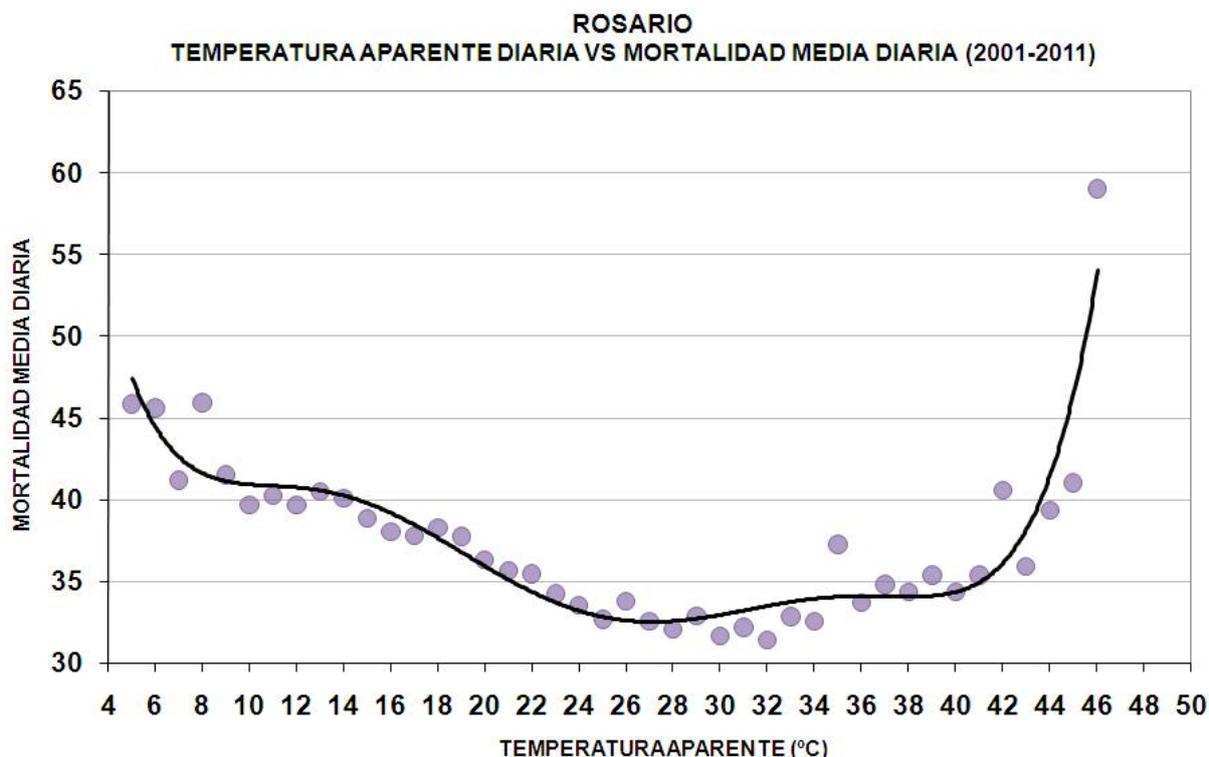


Figura 4: Relación entre temperatura aparente y mortalidad en Gran Rosario.

peligrosas, especialmente para los bebés y niños pequeños, personas mayores de 65 años o aquellos con enfermedades crónicas. Se requiere la toma de medidas preventivas.

NARANJA: Las olas de calor pueden ser peligrosas, especialmente para los bebés y niños pequeños, personas mayores de 65 años o aquellos con enfermedades crónicas. Es necesario cumplir las normas dadas por el Ministerio de Salud de la Nación frente a la ola de calor.

ROJA: Casos excepcionales de olas de calor. Pueden afectar a todas las personas saludables, y no sólo a los grupos de riesgo.

En el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se instaló dicho sistema en la temporada de verano 2009-2010 en CABA y funciona de Noviembre a Marzo. Para Gran Rosario el sistema comenzó a ejecutarse para la temporada 2013-2014. El alerta por Ola de Calor y Salud se activa cuando las temperaturas del día y la pronosticada para los

siguientes dos días exceden el umbral específico para cada localidad. En ese caso se emite el alerta correspondiente que se distribuye a la brevedad a las agencias de protección civil, a las agencias de noticias, a los usuarios registrados por mail, al canal de Alertas por Olas de Calor RSS (Really Simple Syndication"), y a la página web del SMN www.smn.gov.ar.

En la Figura 5 se muestran la cantidad de alertas emitidas por ola de calor para la Ciudad Autónoma de Buenos Aires por temporada estival. Se observan 52 días con alertas Amarillas (número 1), 24 días con alerta Naranja, y 8 días con alerta Roja. Estos últimos concentrados en el verano 2013-2014. Para pasar de alerta Amarilla a Naranja se requieren al menos dos días consecutivos con alerta Amarilla. Sin embargo, los requisitos para emitir alerta Roja no están prefijados. Como mínimo debe estar precedido de al menos un día con alerta Naranja, y debe haber un pronóstico de temperaturas por encima de los umbrales definidos. A su vez se toma la



Figura 5: Numero de alertas emitidos en los Sistemas de Olas de Calor y Salud en Buenos Aires y Rosario.

decisión de elevar a alerta Roja considerando factores como el exceso de calor, la longitud de la ola de calor, exceso de humedad, persistencia de las condiciones meteorológicas, respuesta de la comunidad, entre otros.

La emisión de alerta por ola de calor se realiza al final de un día con valores por encima de los umbrales y con pronósticos acordes. El alerta tiene vigencia por 24 hs, tiempo en el cual se debe actualizar el estado (es decir aumentar, disminuir o mantener el nivel de alerta). Debido a que el sistema se basa en un pronóstico de temperaturas extremas, puede ocurrir que las condiciones meteorológicas sean más o menos extremas que las esperadas por lo que el nivel de Alerta por ola de calor debe actualizarse en lapsos menores de tiempo. Se enfatiza aquí la necesidad del monitoreo constante de las condiciones meteorológicas y el pronóstico del tiempo para una eficaz prevención a la salud.

Dentro de una extensa ola de calor pueden

ocurrir alivios temporales. Si las condiciones se mantienen entonces se mantiene el alerta aunque puede disminuir el nivel del mismo (se pasa de naranja a amarillo por ejemplo).

En Rosario se observan también un gran número de días con Alertas emitidas. El número de alertas naranjas y rojas (11 y 7 respectivamente) son similares en número que las emitidas en para CABA (7 y 7 respectivamente). Las alertas Amarillas son en número significativamente distintas a CABA.

La cantidad de días consecutivos con alerta emitida ("duración del alerta") se pueden observar en la Figura 6. La máxima frecuencia es de alertas emitidas solo por 1 día lo que implica 3 días consecutivos de temperaturas extremas, tanto para CABA como Gran Rosario. En el extremo opuesto, se observó una ola de calor tan persistente que durante la cual se emitieron 20 alertas consecutivos para CABA y 19 para Rosario.

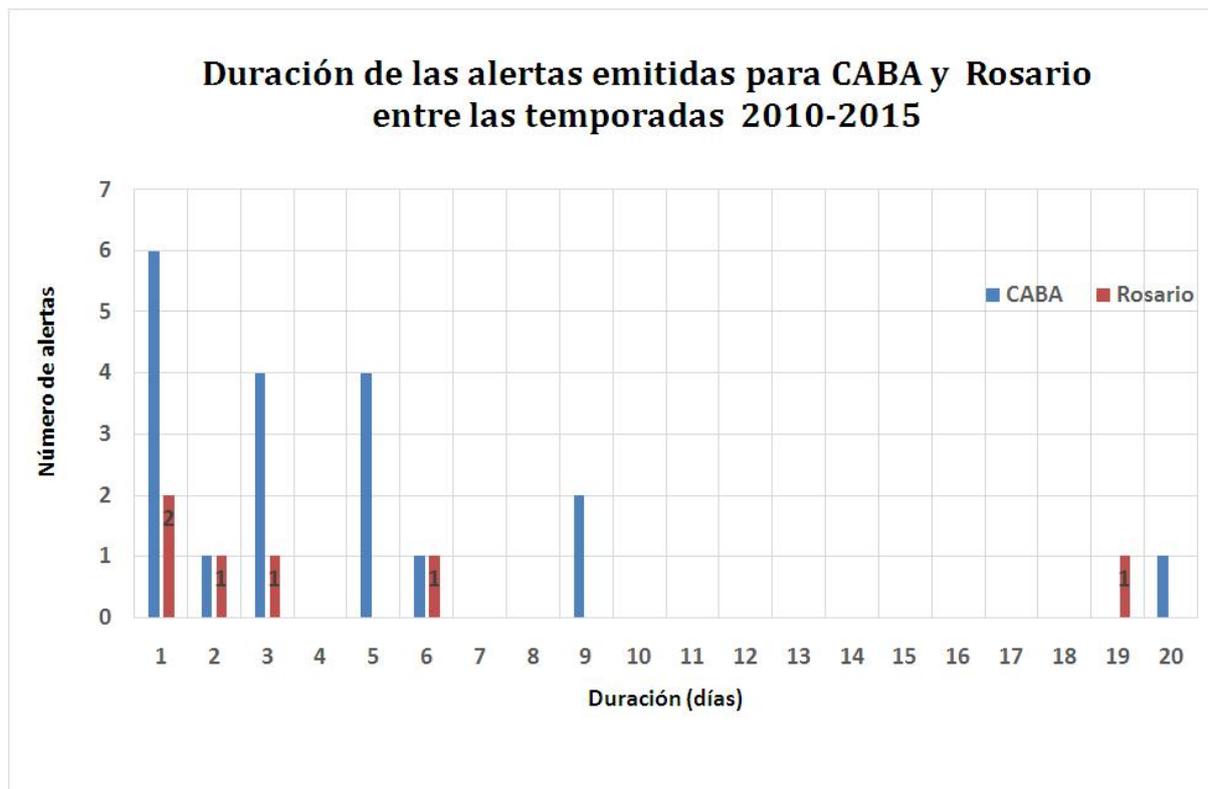


Figura 6: Duración de los alertas emitidos en los Sistemas de Olas de Calor y Salud en Buenos Aires y Rosario.

Dicho alerta de 20 días consecutivos es la ocurrida durante la ola de calor extrema que sucedió en la segunda mitad del mes de Diciembre 2013, clasificada como la más persistente y la más intensa registrada en Buenos Aires (Barros et al 2015). Se muestra en la Tabla VII los valores de las temperaturas medidas y pronosticadas a 24-96 hs y el consecuente nivel de alerta emitido, en el caso de Buenos Aires. La sucesión de las altas temperaturas mínimas y máximas tuvieron efectos en la salud de la población porteña. como se puede observar en la Figura 7, la mortalidad experimentó un aumento, con exceso de muertos superior al 50% de la media estival. El pico de mortalidad diaria fue de 180 muertos en un solo día, segundo máximo de mortalidad diaria asociada a olas de calor, comparable con la de principios de enero de 2001. El exceso de mortalidad coincide con la declaración de alertas Rojas consecutivas entre el 24 al 30 de diciembre de 2013.

Muchos de los decesos frente a las altas temperaturas pueden ser prevenibles, si se toman en cuenta las precauciones o medidas sencillas dadas por el Ministerio de Salud de la Nación, tales como hidratarse sostenidamente con agua fresca y segura, consumir alimentos frescos, usar ropa suelta, no exponerse al sol en determinadas horas; entre otras recomendaciones (Ministerio de Salud, 2013).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la relación entre meteorología y salud en grandes concentraciones urbanas. En particular se estudian las relaciones entre mortalidad y temperaturas diarias en las ciudades de Buenos Aires y Rosario en los años 2001-2012 y 2001-2011 respectivamente.

Los resultados concluyen acerca de que las poblaciones estudiadas muestran evidencias del calor en la mortalidad diaria. Se concentró el

FECHA	Tmáx (°C)					Tmín (°C)					Alerta
	HOY	24	48	72	96	HOY	24	48	72	96	
13/12/2013	32,6	34	35	37	37	20,3	22	23	24	25	1
14/12/2013	35,2	36	37	36	27	20,0	22	24	24	17	1
15/12/2013	34,9	34	36	28	29	24,7	23	23	20	18	2
16/12/2013	34,5	36	30	29	32	23,0	24	23	18	20	2
17/12/2013	36,5	32	32	34	36	24,8	25	22	23	24	2
18/12/2013	32,8	31	32	33	35	24,4	20	22	23	24	1
19/12/2013	31,0	32	33	35	36	23,5	22	23	23	24	1
20/12/2013	30,5	32	34	35	36	23,3	23	24	24	24	1
21/12/2013	32,0	34	36	37	33	22,2	24	24	25	25	1
22/12/2013	34,1	36	37	36	34	24,2	24	25	25	22	1
23/12/2013	35,4	37	37	36	34	24,8	25	26	25	22	2
24/12/2013	35,7	37	35	32	33	25,0	26	26	22	20	3
25/12/2013	38,1	37	33	35	37	27,2	27	22	20	22	3
26/12/2013	39,0	34	35	37	38	27,1	23	21	23	23	3
27/12/2013	34,0	35	39	38	35	24,0	23	25	25	23	3
28/12/2013	34,8	38	36	33	32	24,0	25	22	22	23	3
29/12/2013	37,6	37	33	36	28	26,0	23	21	22	18	3
30/12/2013	36,6	32	34	28	24	26,7	22	22	18	14	3
31/12/2013	31,5	32	28	26	27	23,2	20	21	16	14	1
01/01/2014	33,6	29	27	30	33	23,1	20	14	15	16	1

Tabla VII: Salida del Sistema de Alerta y Salud para Buenos Aires en la segunda mitad de diciembre 2013. Se indica la fecha, la temperatura del día, y las pronosticadas para 24, 48, 72 y 96 horas, en el caso de Temperatura Máxima y mínima. En la última columna se indica el nivel de alerta emitido.

estudio en las principales olas de calor según su exceso de mortalidad sobre los valores medios esperados.

En concordancia con una gran cantidad de estudios en diversas ciudades del mundo, se observa para ambas ciudades argentinas una relación tipo U entre mortalidad y temperaturas; tanto máxima, mínima y aparente.

En dichas curvas U, el extremo relacionado con las temperaturas más bajas e invernales no es tan preciso con respecto al umbral ya que manifiesta una pendiente mucho más reducida. En cambio en el otro extremo de las curvas, la relación con temperaturas altas o de verano el cambio es evidente y el umbral es mucho más significativo.

Al estudiar las olas de calor más importantes en los años de datos disponibles, se concluye que la población más susceptible al calor es la compuesta por los adultos mayores a 65 años; tanto en Buenos Aires como Rosario; sugiriendo que los mayores son particularmente vulnerables. Y afecta por igual tanto a hombres como mujeres en términos relativos a la población total.

El hecho de identificar como las personas de mayor edad como las más sensibles al calor y considerando que cada vez hay más población de edad avanzada en ambas ciudades, pone en evidencia una problemática de la salud pública actual y fundamental para focalizar en programas futuros relacionados a olas de calor.

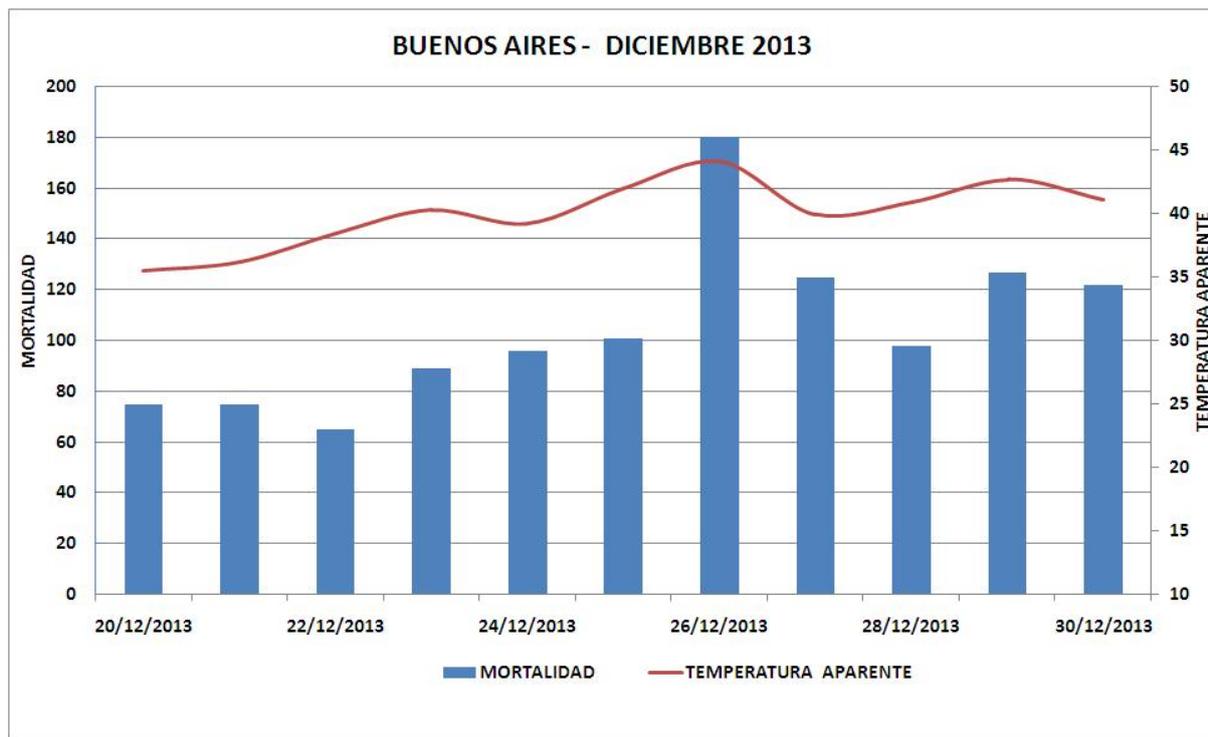


Figura 7: Mortalidad en la ciudad de Buenos Aires a fines de diciembre 2013.

Las olas de calor de principios de la época estival parecen ser las más peligrosas, sobre todo a la población susceptible, quizás porque el organismo no se habituó a las altas temperaturas y no puede reaccionar rápidamente frente al exceso de calor.

Por los peligros de las primeras olas de calor, la susceptibilidad al calor de los grupos de riesgo, y con el fin de prevenir a toda la población se crearon los Sistemas de Alertas de Olas de Calor y Salud que opera el SMN. Una componente importante del mismo es la estrategia de comunicación y la capacidad de respuestas rápidas y oportunas. El sistema de alerta temprana del SMN busca reducir la vulnerabilidad de la población de ambas ciudades y a la vez aumentar su preparación.

El valor del Sistema de Alerta de Olas de Calor para prevenir reacciones adversas en la salud de la población se incrementará en el futuro, a la luz del aumento de la variabilidad climática y aumentos de temperaturas proyectados debido

al cambio climático.

Agradecimientos: Los autores agradecen por la provisión de datos y del registro de las alertas emitidas por olas de calor al Servicio Meteorológico Nacional, como así también los datos de mortalidad al Ministerio de Salud de la Nación (Argentina).

REFERENCIAS

- Barros, V., J. Boninsegna, I. Camilloni, M. Chidiak, G. Magrín, M. Rusticucci (2015) Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. WIREs Climate Change, 6 (2), 151-169.
- Basu R. and Samet J. M., 2002. Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality: A Review of the Epidemiologic Evidence. Epidemiologic Reviews 24(2):190-202.
- Bennett, C.M., K.G. Dear, and A. McMichael, 2013: Shifts in the seasonal distribution of

- deaths in Australia, 1968-2007. *International Journal of Biometeorology*, (April), doi:10.1007/s00484-013-0663-x.
- Censo 2010 (2015) <http://www.censo2010.indec.gov.ar>
- Chung Yeonseung, Y. Lim, Y. Honda, Y. Guo, M. Hashizume, M. Bell, B. Chen y H. Kim, 2015. Mortality related to Extreme Temperature for 15 Cities in Northeast Asia. *Epidemiology*, Volume 26, Number 2.
- Della-Marta, P. M., M. R. Haylock, J. Luterbacher, and H. Wanner (2007), Doubled length of western European summer heat waves since 1880, *J. Geophys. Res.*, 112, D15103, doi:10.1029/2007JD008510.
- Días Jiménez J, C. Linares Gil y R. García Herrera, 2005. Impacto de las Temperaturas Extremas en la Salud Pública: Futuras Acciones. *Revista Española Salud Publica* 2005, Vol 79, N°2, 145-157.
- Fouillet A., G. Rey, F. Laurent, G. Pavillon, S. Bellec, C. Guihenneuc-Jouyaux, J. Clavel, E. Jouglá, Denis Hemon, 2006. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. Vol 80, Issue 1, pp 16-24.
- Hartmann DL, Klein Tank AM, Rusticucci M, Alexander LV, Brönnimann S, Charabi Y, Dentener FJ, Dlugokencky EJ, Easterling DR, Kaplan A, et al. Observations: atmosphere and surface. Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, 2013, 159-254.
- Honda, Y., M. Kondo, G. McGregor, H. Kim, Y. Guo, Y. Hijioka, M. Yoshikawa, K. Oka, S. Takano, S. Hales, and R.S. Kovats, 2013: Heat-related mortality risk model for climate change impact projection. *Environmental Health and Preventive Medicine*, doi:10.1007/s12199-013-0354-6.
- Jendritzky G., P. Broede, D. Fiala, G. Havenith, P. Weihs, E. Batchvarova and R. De Dear, 2010. Future Universal Thermal Climate Index UTCI. *Proceeding of the 7th Conference on Biometeorology*. Freiburg, Alemania.
- Kalkstein, L. and Valimont, K., 1986: An Evaluation of Summer Discomfort in the United States Using a Relative Climatological Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67, 842-848
- Lee DH. 1980. Seventy-five years of searching for a heat index. *Environ Res*; 22: 331-56.
- Lowe, D., K.L. Ebi and B. Forsberg, 2011: Heatwave early warning systems and adaptation advice to reduce human health consequences of heatwaves. *Int. J. Env. Res. and Public Health*,
- Martínez Navarro F., F. Simón-Soria and G. López-Abente, 2004. Valoración del impacto de la ola de calor del verano de 2003 sobre la mortalidad. *Gacetilla Sanitaria*; 18(Supl 1):250-8, España.
- Michelon T, P Magne and F Simon-Delavelle, 2005. Lessons of the 2003 Heat-Wave in France and Action Taken to Limit the Effects of Future Heat-Waves. *Extreme Weather Events and Public Health Responses*. W. Kirch, B.Menne and R. Bertollini editors. Springer, pag 131-140.
- Ministerio de Salud de la Nación (Argentina) (2013) http://www.msal.gob.ar/prensa/index.php?option=com_content&id=1060:ministerio-de-salud-recomienda-adoptar-cuidados-basicos-ante-altas-temperaturas
- Páldy A., J. Bobvos, A. Vámos, R.S. Kovats and S. Hajat, 2005. The Effect of Temperature and Heat Waves on Daily Mortality in Budapest, Hungary, 1970 – 2000. *Extreme Weather Events and Public Health Responses*. W. Kirch, B.Menne and R. Bertollini editors. Springer, pag 99- 107.
- Perkins, S.E. and L.V. Alexander, 2013: On the measurement of heatwaves *J. Clim.*, 26: 4500-4517.
- Robine, J.-M., S. L. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.-P. Michel and F. Herrmann, 2008: Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C. R. Biologies* 331. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001>

- Rusticucci, M., Kysely, J Almeida, G, Lhotka, O, 2015. Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. Theoretical and Applied Climatology DOI: 10.1007/s00704-015-1445-7.
- Steadman R. G., 1979. The Assessment of Sultriness. Part II: Effects of Wind, Extra Radiation and Barometric Pressure on Apparent Temperature. J. Appl. Meteor., 18, 874-885.
- Thiele-Eich I., S. Brienen, A. Kapala, G. Jendritzky and C.Simmer, 2010. Future thermal comfort in Germany. Proceeding of the 7th Conference on Biometeorology. Freiburg, Alemania.
- Vandentorren E. and P. Empeur-Bissonnet, 2005. Health Impact of the 2003 Heat-Wave in France. Extreme Weather Events and Public Health Responses. W. Kirch, B.Menne and R. Bertollini editors. Springer, pag 81-87.
- World Meteorological Organization and World Health Organization, 2015 Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development, G. R. McGregor, P. Bessemoulin, K. Ebi and B. Menne.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

Meteorología

CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS

COMISIÓN DIRECTIVA

PRESIDENTE:	Álvaro Scardilli
VICEPRESIDENTE:	Eduardo Agosta
SECRETARIA:	Silvina Righetti
PROSECRETARIA:	Vanesa Pántano
TESORERO:	M. Eugenia Dillon
PROTESORERO:	Leyba Ines Mercedes
VOCALES TITULARES:	Osores Maria Soledad Falco Magdalena Ferreira Lorena Judith
VOCALES SUPLENTE:	Osman Marisol Tonti Natalia Edith Flores Alberto

TRIBUNAL DE HONOR

TITULARES:	Velasco Ines Penalba Olga Clorinda Niccolini Matilde Compagnucci Rosa Hilda
SUPLENTE:	Ulke Ana Graciela Gassmann Maria Isabel

COMISIÓN REVISORA DE CUENTAS

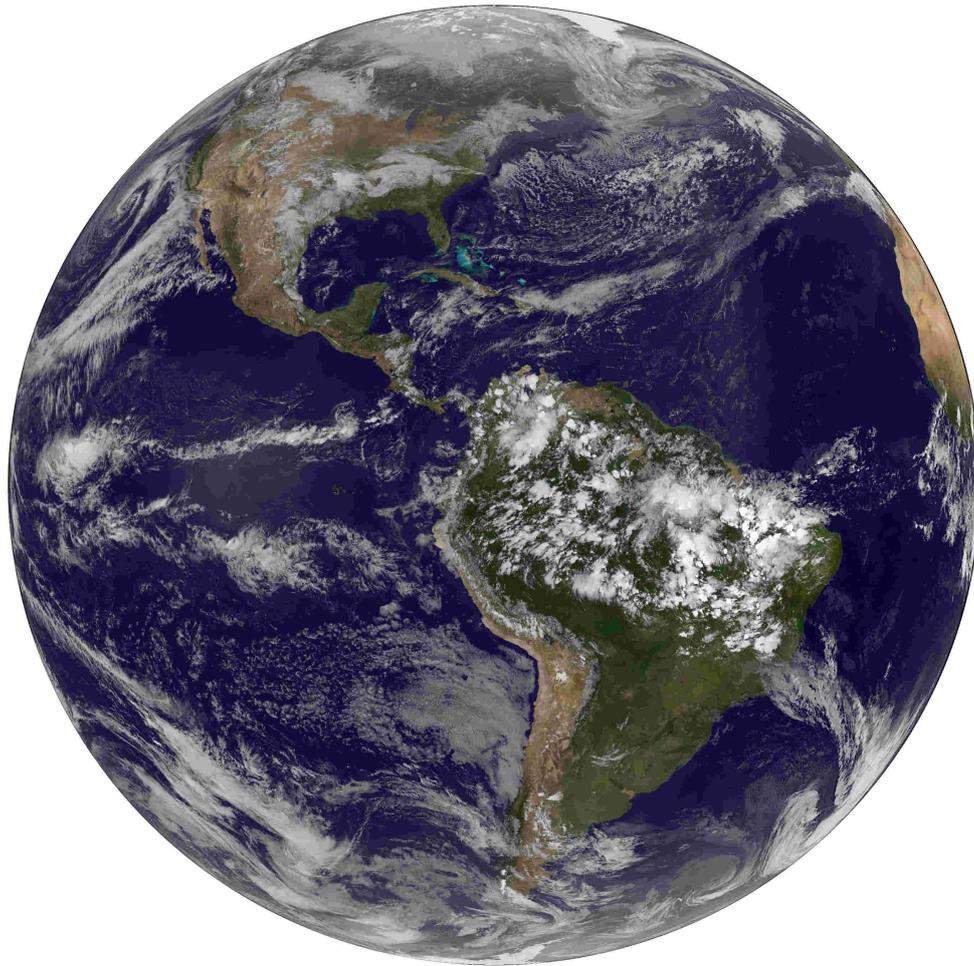
Marcela Torres Brizuela
María Laura Betolli

CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS
CIUDAD UNIVERSITARIA
PABELLÓN II - PISO 2
C1428EHA BUENOS AIRES. ARGENTINA
Tel/Fax: (54)-(11)4783-4224
e-mail: meteorologica@at.fcen.uba.ar
web: www.cenamet.org.ar/cam/meteorologica

Meteoro logica

Versión en línea
Versión en CD-ROM

ISSN 1850-468X
ISSN 2347-0364



Meteorologica es una publicación on-line de libre acceso editada por el Centro Argentino de Meteorólogos. Los trabajos publicados en la revista pueden consultarse en <http://www.cenamet.org.ar/cam/meteorologica/> donde además encontrará información sobre las normas de publicación y la política editorial de la revista.

ESTE NÚMERO HA SIDO PARCIALMENTE FINANCIADO POR EL CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS