

# Meteoro logica

PUBLICACIÓN ESPECIALIZADA  
EN TEMAS METEOROLÓGICOS

Versión en línea

ISSN 1850-468X

Volumen 42

Número 1

Año 2017

## CONTENIDO:

*Adelia P. Alessandro*

ASOCIACIÓN ENTRE PACIENTES CON PATOLOGÍAS ÓSTEOARTICULARES Y  
VARIABLES METEOROLÓGICAS, EN EL ÁREA DE BUENOS AIRES 3

*María Paula Hobouchian, Yanina García Skabar, Daniel Barrera, Daniel Vila y Paola Salio*

VALIDACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN POR SATÉLITE  
APLICANDO LA TÉCNICA HIDROESTIMADOR 19

*Carolina G. Cerrudo, Gonzalo M. Díaz, Sabrina H. Juárez y Lorena J. Ferreira*

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ESPACIO TEMPORAL ENTRE LA PRECIPITACIÓN  
ESTIMADA POR EL SATÉLITE TRMM (3B42RT) Y EL CAUDAL MEDIO DIARIO  
EN LA CUENCA DEL RÍO IGUAZÚ 39

Notas y Correspondencia

*Erica Colombani, Santiago Behr y Laura Brandizi*

ESTIMACION DE PRECIPITACIONES EXTREMAS A TRAVES DE GSMAP Y  
APLICACIÓN HIDROLOGICA A LA CRECIDA DEL ARROYO TELSEN, CHUBUT,  
PATAGONIA ARGENTINA 53

# Meteorología

PUBLICACIÓN SEMESTRAL DEL CENTRO ARGENTINO DE METEORÓLOGOS

## DIRECTOR

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

## EDITORES EJECUTIVOS

PATRICIO ACEITUNO. UNIVERSIDAD DE CHILE. CHILE

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

MARCELO BARREIRO. UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA. URUGUAY

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

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 SCOPUS, EBSCO, SHERPA/ROMEO y DOAJ.



Forma parte del Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentinas

©2017 Centro Argentino de Meteorólogos. Propietario

Intendente Güiraldes 2160

Ciudad Universitaria, Pabellón II, 2º Piso

C1428EHA Buenos Aires, Argentina

Queda hecho el depósito legal que marca la ley 11723.

Registro de propiedad intelectual en trámite.

ISSN: Versión en línea 1850-468X

## **Editorial**

*Estimados lectores, tenemos el agrado de presentar el primer número del volumen 42 de la revista Meteorologica, el cual incluye cuatro artículos en temáticas de particular interés para la comunidad meteorológica y profesionales de áreas afines.*

*Queremos aprovechar esta oportunidad para comentarles que estamos prontos a incorporar el sistema de administración de trabajos Open Journal System (OJS), el cuál permitirá a través de la página web de nuestra revista (<http://www.cenamet.org.ar/cam/meteorologica/>) el envío y el seguimiento de los trabajos de una manera más ágil y práctica. Por otra parte, nos es grato informarles que Meteorologica ha sido incluida en la base de datos Scopus, lo cual contribuirá a una mayor visualización de los trabajos publicados en nuestra revista. Estos logros han sido posibles gracias a la labor continuada de los autores, revisores y editores de la revista que desde su fundación han apostado a la difusión y generación de conocimiento en el ámbito nacional y regional y que desde 2004 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.*

*Recordamos que Meteorologica también se encuentra indizada en Meteorological & Geostrophysical Abstracts, se encuentra incluida en el catálogo del sistema LATINDEX, en la biblioteca electrónica de Scielo, en las bases de datos EBSCO, SHERPA/ROMEO, DOAJ y ha renovado exitosamente su inclusión en el núcleo básico de Revistas Científicas Argentinas (CAICYT – CONICET).*

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

*La Dirección*

**ASOCIACIÓN ENTRE PACIENTES CON PATOLOGÍAS ÓSTEOARTICULARES Y  
VARIABLES METEOROLÓGICAS, EN EL ÁREA DE BUENOS AIRES**

Adelia P. Alessandro

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, UBA, Buenos Aires, Argentina

(Manuscrito recibido el 10 de abril de 2015, en su versión final el 28 de octubre de 2015)

**RESUMEN**

En este trabajo se analizan datos correspondientes a pacientes que presentan patologías osteoarticulares (POA) en la zona de influencia del gran Buenos Aires, para el período enero 2005-diciembre 2012. Se determina la distribución frecuencial de los mismos en función de la edad y del sexo con el fin de determinar el grado de vulnerabilidad frente a dichas patologías. Además se muestra la relación existente entre la cantidad de afectados con POA y las variables meteorológicas (temperatura media (T), temperatura de rocío (Td) y presión atmosférica (Pr)), así también como la vinculación entre estas últimas y la cantidad de pacientes osteoarticulares relativos al número total de pacientes, con el objetivo final de efectuar una posible previsión del número estimado de pacientes que potencialmente se deberían atender y de poder optimizar los recursos de personal y materiales (vehículos).

De las patologías osteoarticulares más frecuentes se han elegido las siguientes: lumbocitalgia, cervicalgia, artralgia, osteocondritis, dorsalgia, ciatalgia y condritis por constituir éstas el 93.3% del total de pacientes registrados con estas patologías. La mayor frecuencia de pacientes con estas afecciones se producen generalmente entre las personas mayores de 70 años, siendo las de sexo femenino las más afectadas. Los coeficientes de correlación diarios entre los pacientes de las distintas enfermedades y las variables meteorológicas utilizadas no son estadísticamente significativos, pero sí lo son las correlaciones mensuales obtenidas entre las tres variables y los pacientes con dorsalgia y osteocondritis, así también como la correlación entre la temperatura mensual y los pacientes con lumbocitalgia.

A partir de los resultados obtenidos de las frecuencias de pacientes con POA en relación al número total de pacientes que acuden a la empresa proveedora de los datos, se puede inferir que la temperatura media es la que mejor se correlaciona linealmente con el número de pacientes registrados y que la empresa prestadora del servicio sanitario habría recibido más llamadas cuando la T y la Td superaron los 14.1°C y a 9.1°C respectivamente y menos llamadas cuando la Pr superaron los 1013 mb, en cualquier mes del año. Considerando periodos estacionales y para todas las POA analizadas, se observa una disminución del porcentaje relativo de pacientes en el siguiente orden: verano, primavera, otoño e invierno. Considerando los valores mensuales de T, Td y Pr, por medio de las expresiones de correlación múltiple (Stepwise) que los involucran, se calculan los valores esperados de pacientes relativos mensuales (NRSt), con un error cuadrático ( $\varepsilon$ ) que varía entre 0.26 y 0.0001; el máximo e corresponde a la lumbocitalgia, disminuyendo en el siguiente orden: cervicalgia, artralgia, osteocondritis, dorsalgia, ciatalgia y condritis.

Con los resultados obtenidos entre los valores mensuales de pacientes con POA y las variables meteorológicas, a través de las proyecciones de los valores de la temperatura media obtenidos por modelos climáticos globales, se podría evaluar la cantidad mensual futura de pacientes osteoarticulares.

*Palabras clave: patologías osteoarticulares, temperatura media, temperatura de rocío, presión atmosférica*

## ASSOCIATION BETWEEN PATIENTS WITH OSTEOARTICULAR PATHOLOGIES AND METEOROLOGICAL VARIABLES, IN THE BUENOS AIRES AREA

### ABSTRACT

This paper examines data of patients with osteoarticular pathologies (POA) in the area of influence of the bigger Buenos Aires in the period January 2005–December 2012. Frequency distributions of POA occurrence are determined in function of the age and gender to determine the degree of vulnerability to the POA. The relationship is also established between the number of patients with POA during that period and meteorological variables (temperature (T), dew point (Td) and atmospheric pressure (Pr)). In addition, the relationship between T, Td, Pr and the relative frequency of POA patients with respect to the total of patients at a medical enterprise, with the aim to determine whether these meteorological variables can be used to forecast the number of patients, as well as the number of professionals and vehicles under given weather conditions.

The following POA were selected: lumbocitalgia, cervicalgia, artralgia, osteocondritis, dorsalgia, ciatalgia and condritis, given that 93.3% of the patients suffer from these pathologies. The greatest incidence of these illnesses is generally observed in adults above 70 years old, primarily women. Daily correlation coefficients between the incidence of each POA and meteorological variables are not statistically significant. On the contrary, monthly correlations for the three variables and the number of patients with dorsalgia and osteocondrits are statistically significant. This is also true for monthly temperature and patients with lumbocitalgia.

The analysis of the frequencies of patients with POA relative to the total number of patients would indicate that mean temperature correlates best with the number of registered patients. In addition, a larger number of calls would reach the health service company when T and Td are warmer than 14.1 and 9.1, respectively and less phone calls when Pr is higher than 1013 mb in any month of the year. The seasonal analysis of POA occurrence shows that frequency decreases from its summer peak through spring, autumn and winter.

Multiple correlations obtained from the Stepwise method of T, Td and Pr allow estimating the expected number of patients per month, (FrSt) with a quadratic error range of 0.26 - 0.0001. The maximum error is for lumbocitalgia and decreases through cervicalgia, artralgia, osteocondritis, dorsalgia, ciatalgia and condritis.

Based on the results obtained between the monthly number of patient with POA and meteorological variables, mean temperature projected by global climate models might be used to forecast the monthly number of osteoarticular patients in the future.

*Keywords: Osteoarticular pathologies, temperature, dew point, atmospheric pressure,*

*expected frequencies*

## 1. INTRODUCCIÓN

Como se viene mostrando en la bibliografía actual, los factores climatológicos y meteorológicos diversos ocasionan –directa o indirectamente– la muerte prematura de millones de personas y generan enfermedades o incapacidades a cientos de millones más. A pesar de ello, es escasa la atención y mínimo el grado de prioridad política y económica que se le da a la prevención de las enfermedades meteorotrópicas, existiendo poca conciencia social del riesgo atribuible a los factores ambientales en Salud Pública. El estudio de los factores ambientales, en donde se incluyen los meteorológicos, constituye un aporte fundamental como herramienta capaz de interpretar mejor lo que ocurre en los procesos sobre la salud-enfermedad (Tolcachier et al., 1994; Kashiwabara et al., 2002; Santic et al., 2002; Wardman et al., 2002).

Debido a la carencia de registros sanitarios fiables y de series temporales largas de los mismos, en la Argentina se han realizado muy pocos estudios sobre la incidencia de la meteorología o el clima sobre los seres humanos. Así por ejemplo Hoffmann et al (1983) estudiaron la relación entre la presencia de una depresión localizada en aproximadamente 65 - 75°W y 40°S at 500 hPa y la ocurrencia de asma en la ciudad de Rosario. Piccolo et al (1988) realizaron un trabajo similar para la ciudad de Bahía Blanca. Rusticucci et al. (1996; 2000) y Alexander P. (2013) relacionaron diferentes variables atmosféricas con distintas enfermedades. Alessandro et al. (2003; 2006) examinaron en la Ciudad de Buenos Aires, la irritabilidad causada por un dado rango de temperatura y la influencia de las variables meteorológicas sobre enfermedades cardíacas donde sobresalió la gran correlación con la temperatura.

En dos trabajos anteriores al presente (Alessandro, 2012 y 2014), la autora analizó la

relación de algunas variables meteorológicas sobre enfermedades respiratorias, considerando una muestra de pacientes obtenida a partir de registros de la empresa Ayuda Médica, entre agosto de 2004 y agosto de 2012 de la Ciudad de Buenos Aires. En ellos se pudo observar que los grupos más afectados por las variables meteorológicas fueron el de los menores de 10 años y el de los mayores a 71 años.

Como continuación de los trabajos realizados, la autora desea determinar en una muestra (2005/2012) de pacientes con determinadas patologías osteoarticulares la posible influencia que ejercen sobre ellas las variables meteorológicas seleccionadas y conocer el grupo etario más afectado por las condiciones atmosféricas, con el fin de mitigar los efectos causados por estas patologías.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se han utilizado los registros diarios de pacientes del período enero 2005 a diciembre 2012 (muestra total: 3.854.254), proporcionados por la empresa Ayuda Médica, que dispone de socios propios y a su vez es prestador del servicio a obras sociales, empresas y colegios, por lo que sus posibles pacientes no constituyen una muestra fija. La compañía posee un sistema de atención domiciliaria que cubre toda el área del Gran Buenos Aires, que incluye la Ciudad de Buenos Aires y los 19 partidos que la rodean.

Desafortunadamente en el momento de realizar este trabajo, la empresa no contaba con mayor número de datos ordenados y revisados, para que los resultados obtenidos tengan una mayor validez estadística; problema que se repite en nuestro país y en la mayoría de las instituciones relacionadas con la salud, cuando se desean relacionar datos de distintas enfermedades con variables de otras especialidades ajenas a las de la medicina.

Los diagnósticos utilizados son los aportados por los médicos que realizan las visitas y se han tomado sin utilizar ningún tipo de filtro, tal como fueron informados. Por lo que se asume que una misma patología puede ser interpretada de distinta manera por dos médicos, de acuerdo al criterio adoptado, lo que implica que los datos utilizados en el estudio pueden estar sesgados de acuerdo al subjetivo diagnóstico efectuado por el médico de guardia. Otro problema que presenta la muestra, es que la mayor parte de las personas afectadas con POA no llaman inmediatamente a la empresa de salud, siendo este el motivo por lo que en los registros diarios no se han encontrado relaciones directas con los valores diarios de las variables meteorológicas. A pesar de estos inconvenientes, la muestra de datos empleada es significativa para realizar una primera aproximación.

Teniendo presente que en este trabajo no se ha realizado una discriminación zonal de los pacientes, se ha tomado como referencia la estación meteorológica Ezeiza (34.49°S, 58.32°O) para las variables atmosféricas. La elección de esta estación es debida a que aporta serie de datos más completos y confiables que otras estaciones situadas en la vecindad. En ella se toman los valores diarios y medios de temperatura (T), temperatura de rocío (Td) y presión atmosférica en superficie (Pr), todos ellos suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

La compañía sanitaria Ayuda Médica reúne con el nombre de patologías osteoarticulares (POA) a varias enfermedades y afecciones, de las cuales se han seleccionado: lumbocotalgia, cervicalgia, artralgia, osteocondritis, dorsalgia, ciatalgia y condritis, por constituir éstas el 93.3% (140.659) del total de pacientes que presentan estas patologías.

Debido a que se quiere conocer cuáles son las edades y el sexo más influenciado por este tipo de patologías, se determina la distribución de los pacientes por edad y sexo; pero además teniendo en cuenta que el número de pacientes para cada edad es función del número de habitantes

existentes en cada zona analizada, se realiza un proceso de estandarización de acuerdo al censo del año 2010 de la Ciudad de Buenos Aires y alrededores.

Dado que el llamado a la empresa puede efectuarse el mismo día o en días posteriores al comienzo de la afección se calcula la correlación diaria entre T, Td y Pr y el número de pacientes de cada POA para distintos lags (0, 1, 2, 3 y 4).

Con el fin de investigar si un cambio brusco entre días consecutivos de alguna de las variables (V), sería la causa de un número mayor de pacientes, para cada una de ellas se calcula la diferencia entre el valor del día anterior  $i-1$  ( $V_{i-1}$ ) y el valor del día  $i$  ( $V_i$ ) en que se produjo el registro. Estas diferencias ( $V_{i-1}-V_i$ ) se correlacionan con el número de pacientes del día  $i$ .

Posteriormente se obtiene la gráfica de las frecuencias diarias de todos los pacientes del período considerado (2005-2012), donde se observa una ligera disminución de los mismos en los últimos cuatro años, así también como en los correspondientes a cada POA analizadas, a excepción de los afectados por la Ciatalgia que muestra un incremento en sus últimos valores. Debido al desconocimiento que causa dicha disminución, para cada una de las distintas afecciones POA, se realiza un proceso estadístico de estandarización de los valores absolutos de los pacientes, dividiéndolos por el número total de pacientes de todas las enfermedades registradas por la empresa sanitaria (FR).

Se determinan las correlaciones entre los valores mensuales de T, Td y Pr y los pacientes con afecciones osteoarticulares, las correlaciones entre estos últimos y las anomalías de las tres variables, así también como las correlaciones entre T, Td Y Pr y las FR.

Además, se calcula para las afecciones elegidas, la distribución relativa de los pacientes según la época del año.

Finalmente, y con el objetivo de poder

detectar en que porcentaje influyen la T, Td y Pr cuando éstas actúan en forma conjunta en el número relativo de pacientes de cada una de las POA, se calculan mediante el método Stepwise, (STATISTICA-Multiple Regression), los diferentes coeficientes de correlación múltiple mensuales ( $\rho$ ) y las ecuaciones de las distribuciones aproximadas de pacientes relativos (FRSt).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Porcentajes de las POA y distribución por edad y sexo según censo 2010

Porcentajes de las POA y distribución por edad y sexo según censo 2010.

En la Tabla I se presenta el número total de pacientes (n) de cada POA y el porcentaje de estos últimos respecto a la cantidad total de pacientes con POA (n%) en el período analizado. Se advierte que cerca del 50% corresponde a los afectados por lumbalgia.

Para conocer las edades y el sexo más influenciado por las POA se determina la distribución de los pacientes, relativizados respecto a los valores del censo 2010 de la Ciudad de Buenos Aires y alrededores. Previamente se muestra en la Figura 1, la distribución de sus habitantes según dicho censo, donde se observa que la mayor frecuencia corresponde al intervalo de edad 21-30.

Se grafican en la Figura 2 (a, b, c, d, e, f, y g) para cada una de las afecciones: las Frecuencias de pacientes por edad (i), Frecuencias de pacientes relativos (Fr) al censo de 2010 en períodos etarios mayores (ii), y Frecuencias de pacientes relativos (Fr) al censo de 2010 por edad y sexo (iii). De acuerdo a esta figura se puede decir:

**Lumbocitalgia:** (Fig. 2a) Según el período analizado se observa que existe un máximo de frecuencia de pacientes (F) entre los 21 y 30 años, desciende con los años y se presenta un máximo secundario en los 71-80 (Fig. ai). Esta distribución puede facilitar la preparación de las

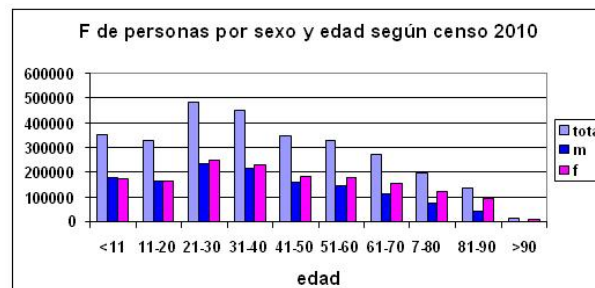


Figura 1: Distribución de habitantes de la Ciudad de Buenos Aires y alrededores según el Censo de 2010 (eje y) por sexo (rosa: femenino, azul: masculino y celeste: ambos) y edad (eje x).

condiciones necesarias para atender a personas en esos rangos de edades. Pero si se compara con el censo 2010 y se obtienen las frecuencias relativas (Fr) respecto al mismo y en períodos de 9 años de edad, entonces la Fr es máxima para los mayores a 90 años (Fig. aiii) o bien corresponde a los mayores de 70 si se toman solo tres períodos etarios diferentes (Fig. aii). En la Figura af3 se muestra que el sexo masculino supera al femenino aproximadamente hasta los 51 años para descender respecto al femenino en los años subsiguientes a excepción del último período.

**Cervicalgia:** (Fig. 2b) En este caso, la distribución de F (Fig. bi) es similar a la correspondiente a la lumbocitalgia. La distribución de las Fr (Fig. biii) muestra un máximo para los pacientes entre 21 y 30 años. Excepto el último período, en todos ellos las mujeres se hallan más afectadas que los hombres (biii).

**Dorsalgia:** (Fig. 2c) Al igual que en la POA anterior los pacientes (F) entre 21 y 30 son los más frecuentes, pero en este caso se advierte un aumento de Fr muy pronunciado con el aumento de la edad. Los mayores de 90 años superan en más de ocho veces y media a la Fr del período 21-30. A partir de los 51 años las Fr del sexo femenino son mayores a las del sexo masculino.

**Artralgia:** (Fig. 2d) En este caso ya no se advierte el máximo secundario de F de los 21-30, y es más significativo el aumento con la edad. A partir de los 51 años en las Fr también supera el



POA	n	n%	POA	n	n%
Lumbocitalgia	73369	48,69	Osteocondritis	8603	5,71
Cervicalgia	31831	21,12	Ciatalgia	1962	1,30
Dorsalgia	12778	8,48	Condritis	1756	1,16
Artralgia	10360	6,87	Total	140659	

Tabla I: Cantidad de pacientes (n) y de pacientes porcentuales ( n% ) con distintas POA

sexo femenino al masculino.

**Osteocondritis:** (Fig. 2e) La distribución de F presenta valores máximos entre los 71 y 90 años. La de Fr presenta un máximo para los pacientes mayores de 90 años y respecto al sexo solo en este período el sexo masculino supera al femenino.

**Ciatalgia:** (Fig. 2f) Presenta distribuciones similares a la osteocondritis, pero se observa una gran prevalencia del sexo femenino en la distribución de Fr.

**Condritis:** (Fig. 2g) Se magnifica un máximo de F en los 81-90 años y uno secundario entre los 21 y 31 años. Las Fr presentan un máximo para los mayores a 90 años y su distribución muestra un claro aumento de Fr con la edad. El sexo femenino vuelve ser mayor a partir de los 41 años.

### 3.2. Análisis de los valores diarios

Las correlaciones diarias entre T, Td y Pr y los pacientes de las distintas POA para los lags= 0, 1, 2, 3 y 4 no resultan significativamente distintas de cero. El mismo resultado se obtiene al correlacionar para cada POA y para cada una de las tres variables, la diferencia entre el valor de la variable en el día anterior  $i-1$  ( $V_{i-1}$ ) y el valor de la variable del día  $i$  ( $V_i$ ) en que se produjo el registro, con el número de pacientes del día  $i$ .

A excepción de los afectados con Ciatalgia, como se mencionó anteriormente, al graficar el número diario de pacientes de cada una de las POA se advierte un descenso de los mismos en los últimos cuatro años. También se observa esta singularidad entre los distintos meses de cada año.

Periodo	Enero		Anual	
	2005/08	2009/12	2005/08	2009/12
Pac.	28	19	44976	28797
T	21,2	21,9	16,9	17,3
Td	16,3	16,8	11,3	11,5
Pr	1009,6	1009,5	1013,6	1013,2

Tabla II: Valores medios de T, Td y Pr y de pacientes con lumbocitalgia en los períodos:2005/08 y 2009/2012.

A título de ejemplo, por ser la lumbocitalgia la POA con mayor número de pacientes, se muestra en la Figura 3 los datos diarios de enero de los ocho años de pacientes con esta afección.

Si bien como se menciona en el primer párrafo de este inciso las variables meteorológicas y los pacientes de las POA no están linealmente correlacionadas, se quiere ver si esa disminución de pacientes entre ambos períodos está relacionada con un cambio de los valores medios de las variables en dichos períodos.

Como ejemplo se toma el caso de enero, se obtienen las medias de los pacientes de lumbocitalgia y de las tres variables para los períodos: 2005-2008 y 2009-2012 respectivamente (Tabla II).

En Ezeiza el valor normal de T en enero es de 24°C y su desvío típico de 3°C y el de Td es de 16 y 4°C su desvío típico, es decir que las T y Td de ambos períodos están dentro del rango determinado por el valor normal y el desvío. O sea que no hay diferencias de T y Td.

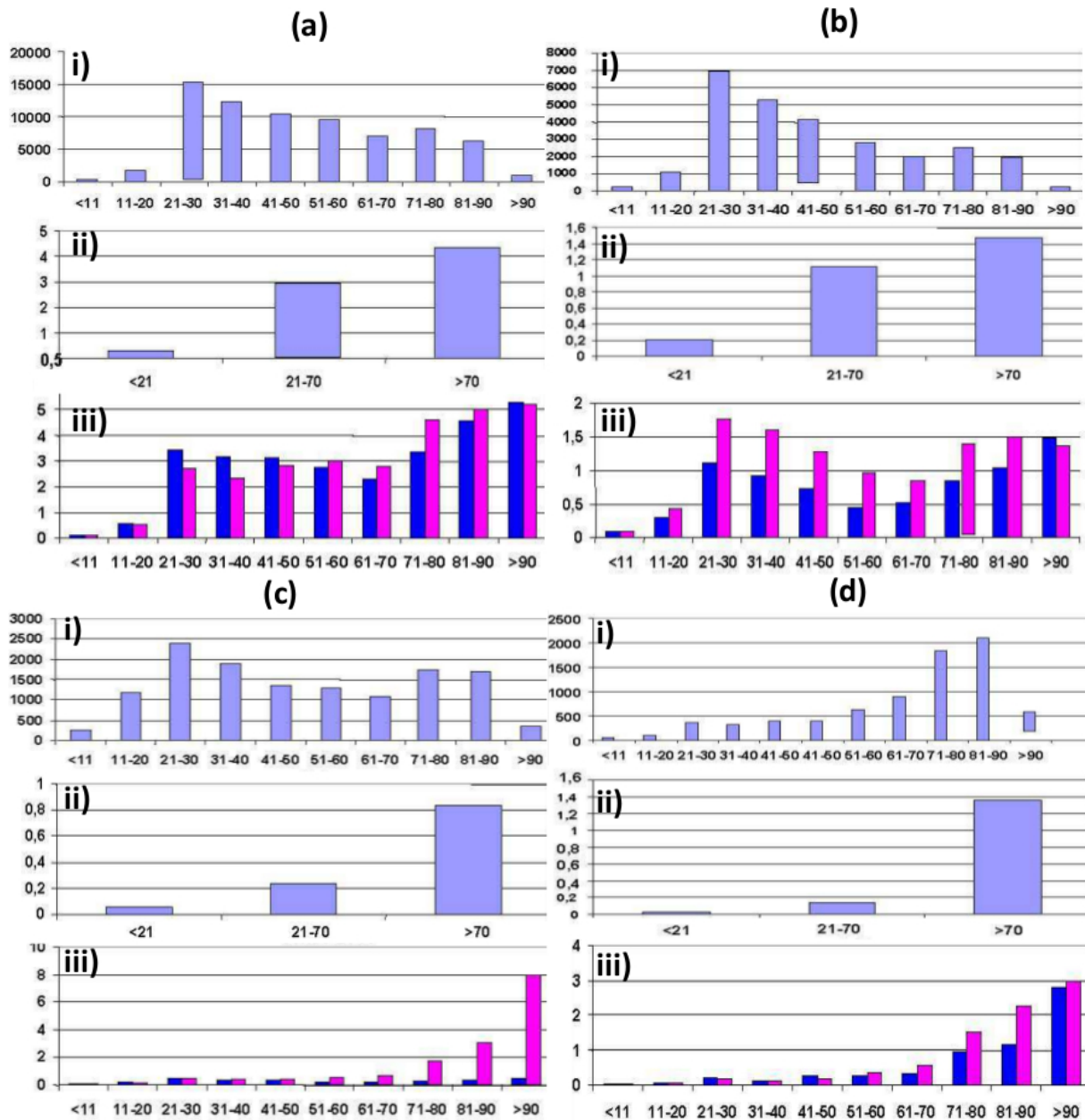


Figura 2: Frecuencias de pacientes por edad (i), frecuencias relativas de pacientes de acuerdo al censo de 2010 en mayor escala etaria (ii), y frecuencias relativas de pacientes por edades de acuerdo al censo de 2010 (iii) para Lumbocitalgia (a), Cervicalgia (b), Dorsalgia (c), Artralgia (d), Osteocondritis (e), Ciatalgia (f) y Condritis (g).

Por otra parte, se calculan en la misma estación, los valores medios anuales de ambos períodos y se comparan con los valores estadísticos de la T, Td y Pr media anual y sus desvíos. Estos últimos resultan:  $16.6 \pm 5$  °C y  $11.3 \pm 4.1$  °C y  $1012.5 \pm 2.9$  mb. De la comparación de estos valores con los representados en la columna 4 y 5 de la Tabla

III, se advierte que los dos períodos no presentan diferencias entre sí.

Se observa que las variables meteorológicas no están relacionadas con la disminución de pacientes por lo tanto el origen es debido a otro factor, quizás el económico.

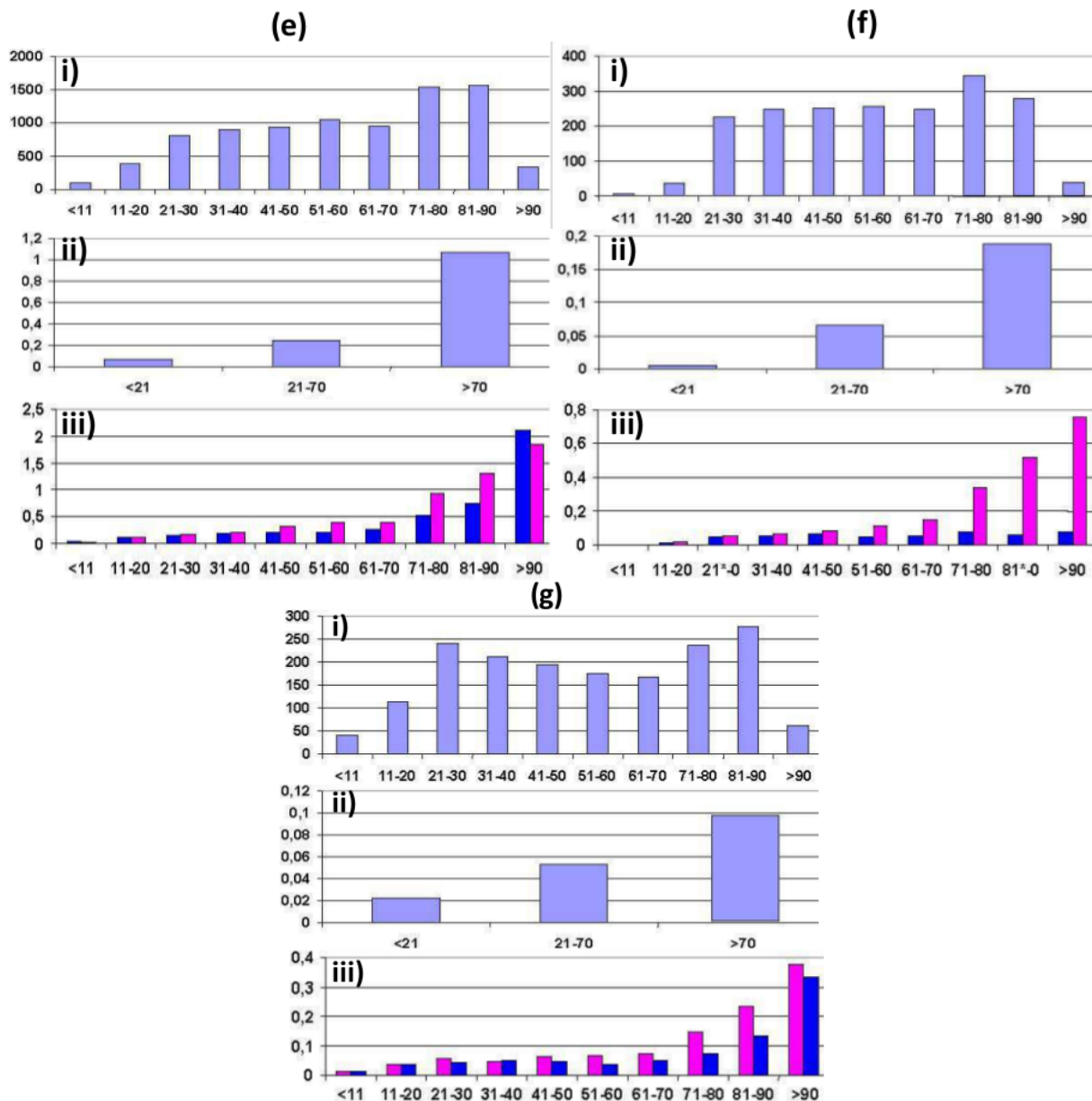


Figura 2 (continuación): Frecuencias de pacientes por edad (i), frecuencias relativas de pacientes de acuerdo al censo de 2010 en mayor escala etaria (ii), y frecuencias relativas de pacientes por edades de acuerdo al censo de 2010 (iii) para Lumbocitalgia (a), Cervicalgia (b), Dorsalgia (c), Artralgia (d), Osteocondritis (e), Ciatalgia (f) y Condritis (g).

### 3.3. Análisis de los valores mensuales

Las correlaciones entre los valores mensuales de las tres variables y los pacientes con POA, solo dan significativamente distintas de cero ( $>0.19$ ) en el nivel del 95% cuando éstas corresponden a dorsalgia y osteocondritis (negativas con Td y positivas con Pr) y solo se

correlacionan negativamente con T los pacientes con lumbocitalgia. Por el signo negativo de la correlación se esperaría que a menor T el número de pacientes con lumbocitalgia sea mayor, lo que coincide con lo mostrado en la Figura 4, donde se representa la marcha mensual de pacientes con esta patología durante los ocho años, y cuyos máximos corresponden mayormente a los meses

POA	R(T)	R(Td)	R(Pr)	Fr St	$\rho$	Ds	$\epsilon$
Lumbocitalgia	<b>0,76</b>	<b>0,71</b>	<b>-0,61</b>	0,98+0,0589T	0,756	0,400	0,2572
Cervicalgia	<b>0,71</b>	<b>0,66</b>	<b>-0,61</b>	0,00357+0,0004T	0,712	0,022	0,015
Artralgia	<b>0,70</b>	<b>0,66</b>	<b>-0,57</b>	-0,03889+0,0001T+0,00003Pr	0,704	0,0692	0,0492
Dorsalgia	<b>0,56</b>	<b>0,58</b>	-0,38	-0,10093+0,000130T+0,0001Pr+0,00002Td	0,608	0,0008	0,0006
Osteocondritis	0,49	0,46	-0,36	-0,10093+0,00013T+0,0001Pr+0,00007Td	0,528	0,00049	0,00042
Ciatalgia	0,37	0,29	-0,32	0,00028+T0,000021-0,000008Td	0,389	0,00027	0,00025
Condritis	0,37	0,35	-0,34	0,00028+0,00001T	0,350	0,00016	0,00015

Tabla III: Para cada POA : a) valores de correlación lineal (R) entre la frecuencia relativa media de pacientes (FR) y T (R(T)), Td (R(Td)) y Pr (R(Pr)) medias, b) expresiones de la aproximación de Stepwise (FRSt), correlación múltiple ( $\rho$ ), desvíos (Ds) y errores ( $\epsilon$ ) del método.

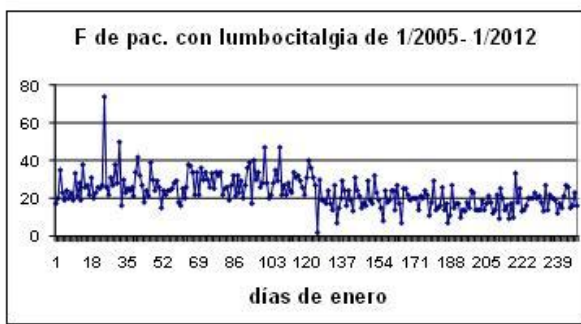


Figura 3: Distribución diaria de pacientes con lumbocitalgia ( eje y) del mes de enero de los años 2005- 2012.



Figura 4: Distribución mensual de pacientes con lumbocitalgia (eje y) en los meses (eje x) del período 2005- 2012.

de junio, julio o agosto.

Los valores de las correlaciones son aún menores cuando se calcularon con las anomalías de las

variables. A pesar de la débil correlación con la T y más aún con la Td y Pr, se quiere estimar el porcentaje de pacientes afectados por un aumento o descenso de estas variables respecto a los valores normales. Se calculan las anomalías ( $\Delta$ ) de T, Td y Pr y se determina el número total de pacientes correspondientes al signo de las mismas. Las Figuras 5 a), b) y c) muestran esta distribución para los pacientes con lumbocitalgia.

En este caso los meses del año no están discriminados, hay más pacientes cuando la T ó Td ó la Pr mensuales son mayores a sus valores normales, es decir cuando se produce un aumento de la Td, T ó Pr. Por ejemplo, podrían haber más pacientes en el mes de julio o en el mes de enero de un año determinado cuando éstos son más cálidos, o más húmedos o tener presión más alta de lo normal.

Entre el 66 y 68 % de los pacientes acumulados en cada mes de cada POA se producen con valores de anomalías mensuales de temperatura ( $\Delta T$ ) positivas, entre el 67 y 69 % con anomalías de presión ( $\Delta Pr$ ) positivas y entre el 52 % y 56 % con anomalías de temperatura de rocío ( $\Delta Td$ ) positivas.

Es decir que independientemente del mes que se esté considerando, una mayor T o Pr respecto a sus valores normales determinan una mayor probabilidad de casos de POA.

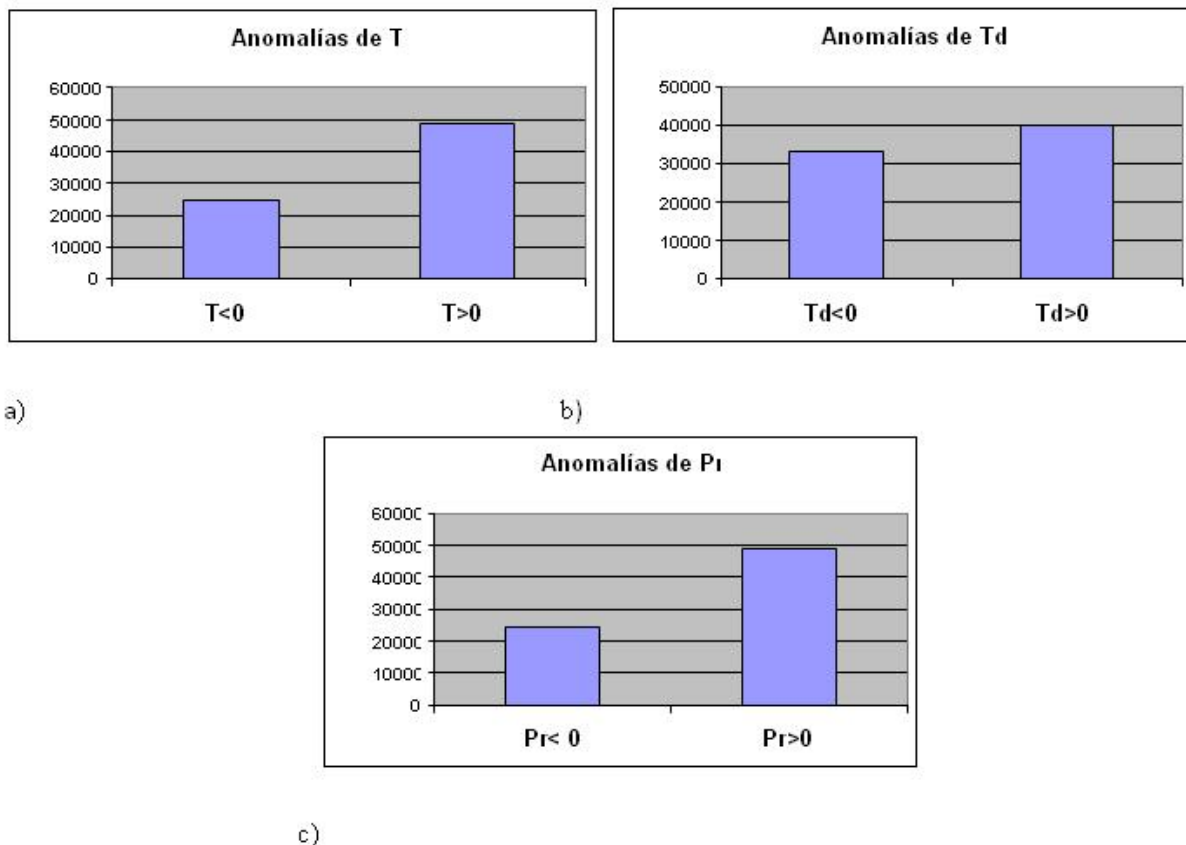


Figura 5: Distribución de pacientes acumulados mensualmente con lumbocotalgia (eje y) según las anomalías ( $\Delta$ ) de T, Td y Pr (eje x).

### 3.4. Análisis de los valores mensuales relativos. Aplicación del método de Stepwise

Se relativizan los valores absolutos de cada POA respecto al número total de pacientes. Bajo estas condiciones se obtiene la Figura 6 para los pacientes con lumbocotalgia, que representa a los datos relativos mensuales (FR) en donde se observa una periodicidad con máximos de diciembre a febrero y mínimos entre mayo y agosto de cada año, es decir que dan en forma inversa a los datos absolutos.

Se calculan las correlaciones lineales (R) entre los valores mensuales de T, Td y Pr ( $R(T)$ ,  $R(Td)$  y  $R(Pr)$ ), y las FR de cada POA. Todas las correlaciones mensuales son significativamente distintas de cero, al nivel del 95% ( $\pm 0.19$ , Brooks and Carruthers, 1953), si bien las tres primeras

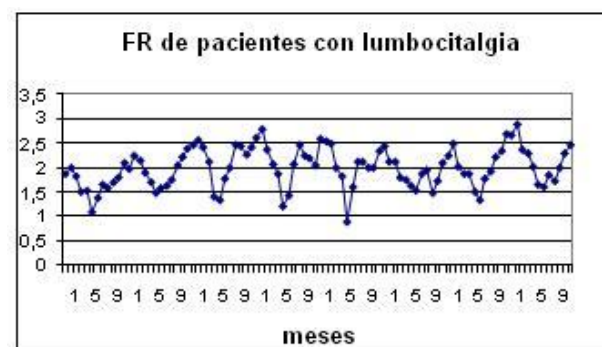


Figura 6: Frecuencia relativa mensual de pacientes (FR) con lumbocotalgia (eje y) durante los meses del período 2005- 2012 (eje x).

presentan las mejores correlaciones con las tres variables y sobre todo con la temperatura (Tabla III).

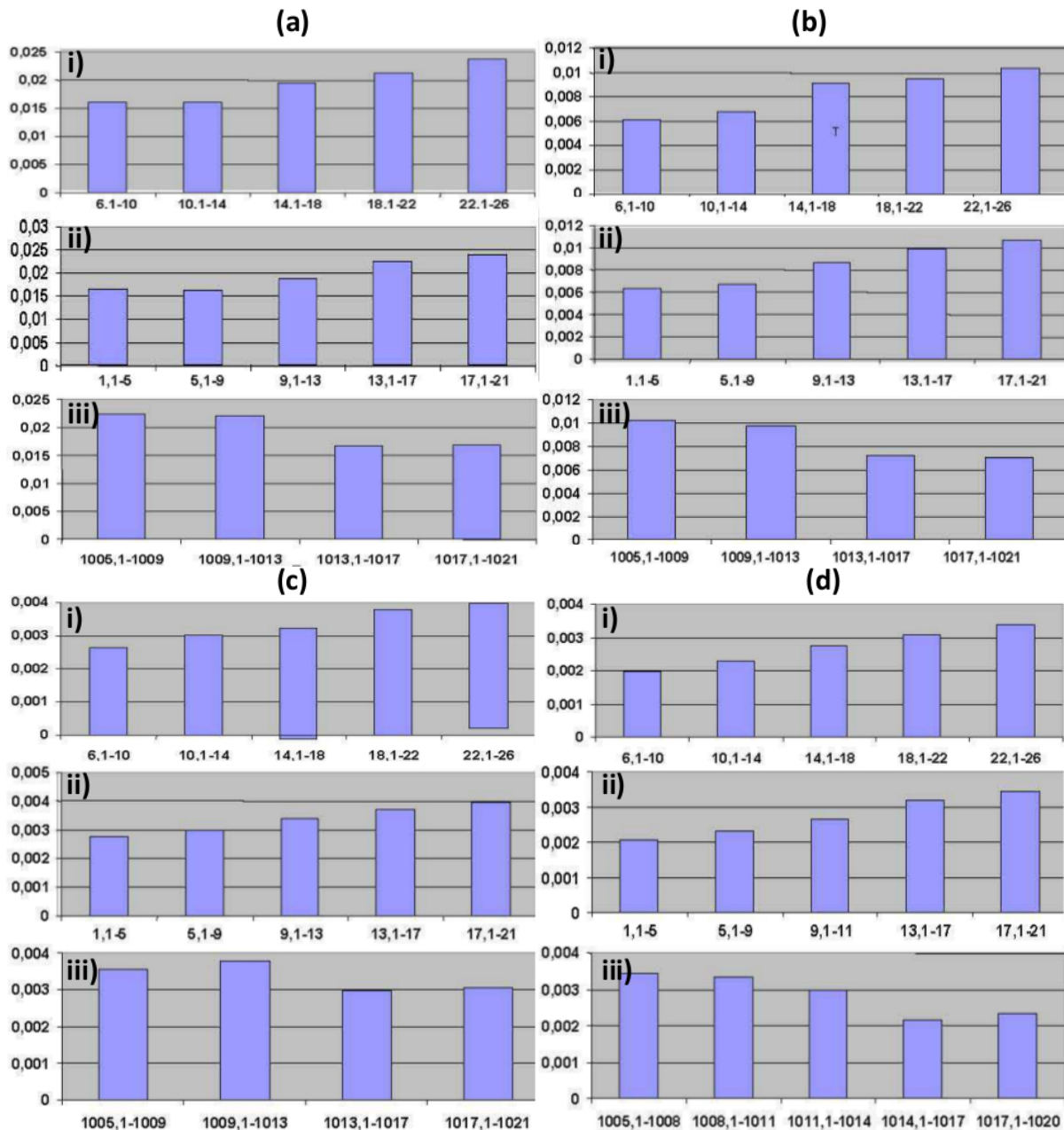


Figura 7: Frecuencia relativa mensual de pacientes con Lumbocotalgia (a), Cervicalgia (b), Dorsalgia (c), Artralgia (d), Osteocondritis (e), Ciatalgia (f) y Condritis (g), en función de la temperatura (i), temperatura de rocío (ii) y presión a nivel de mar (iii).

Dada las altas correlaciones mensuales entre el número relativo de pacientes y las variables, así también como la periodicidad de las distribuciones, se calcula para las afecciones elegidas la distribución relativa de los pacientes (FR) en función de los valores mensuales de T (v1), Td (v2) y Pr (v3), para el período

2005/2012. La Figura 7 (a, b, c, d y e) representa las distribuciones mencionadas para las cinco primeras enfermedades.

En general se observa que el número de pacientes aumenta con la T (mayores a 14.1°C) y la Td (mayores a 9.1°C). Respecto a la presión,

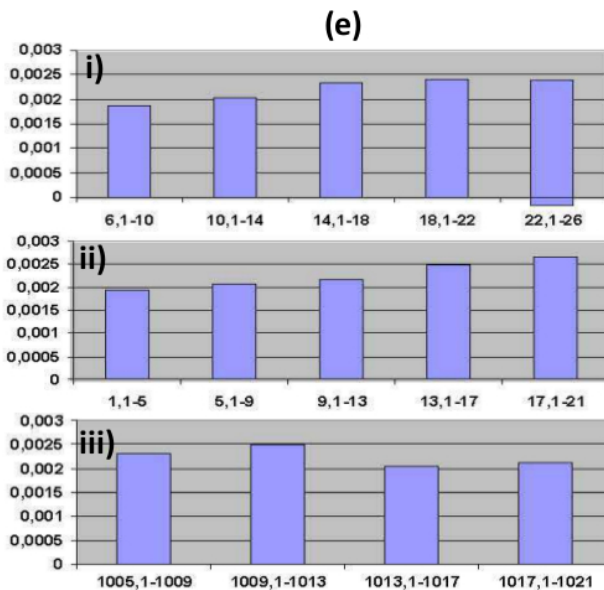


Figura 7 (continuación): Frecuencia relativa mensual de pacientes con Lumbocitalgia (a), Cervicalgia (b), Dorsalgia (c), Artralgia (d), Osteocondritis (e), Ciatalgia (f) y Condritis (g), en función de la temperatura (i), temperatura de rocío (ii) y presión a nivel de mar (iii).

los pacientes con lumbocitalgia, cervicalgia, artralgia y ciatalgia disminuyen cuando aumenta esta variable y los afectados por dorsalgia, osteocondritis y condritis presentan un máximo en el rango de 1009.1 a 1013 hPa y valores mínimos para los mayores a 1013 hPa.

La empresa habría recibido más llamadas cuando las temperaturas y las temperaturas de rocío fueron mayores a 14.1 y a 9.1°C respectivamente y menor cantidad de llamadas cuando las presiones fueron mayores a 1013 mb, en cualquier mes del año.

La distribución relativa de los pacientes según la época del año muestra un porcentaje relativo de mayor a menor en el siguiente orden: verano, primavera, otoño e invierno. En la Figura 8, se representa como ejemplo el caso de pacientes con lumbocitalgia.

Se determinan las correlaciones múltiples mensuales ( $\rho$ ) y las aproximaciones de las



Figura 8: Frecuencia relativa de pacientes (FR) con lumbocitalgia (eje y) durante las estaciones del año: verano (v), otoño (o), invierno (i) y primavera (v) (eje x).

distribuciones de pacientes relativos obtenidas a través del método de Stepwise (FRSt), procedimiento recomendado por Draper and H. Smith (1981).

Se aplica este método para cada una de las POA y se halla el error cuadrático medio ( $\varepsilon$ ) y la desviación estándar de cada serie (Ds). Los  $\varepsilon$  resultaron menores que las desviaciones standard (Ds) de las series, por ello el ajuste realizado a través del método se puede considerar bueno (Rao V. B. at al, 1997). En la Tabla III se advierte que los Ds son cada vez más similares a los  $\varepsilon$  en la dirección desde la fila superior a la inferior, coincidentemente con la significancia de los coeficientes de correlación R obtenidos anteriormente, siendo Ds y  $\varepsilon$  casi iguales en las tres POA inferiores. En la Figura 9, se muestran los valores mensuales relativos (FR) de pacientes afectados por la enfermedad (azul) y los obtenidos con las aproximaciones del método de Stepwise (rosa) (FRSt).

Las cuatro primeras distribuciones correspondientes a la frecuencia relativa de pacientes de lumbalgia, cervicalgia, artralgia y dorsalgia (Figura 9 a), b), c) y d)) están en fase con la aproximada a través del método de Stepwise, notándose que los mínimos de la aproximación son menores a medida que disminuye R.

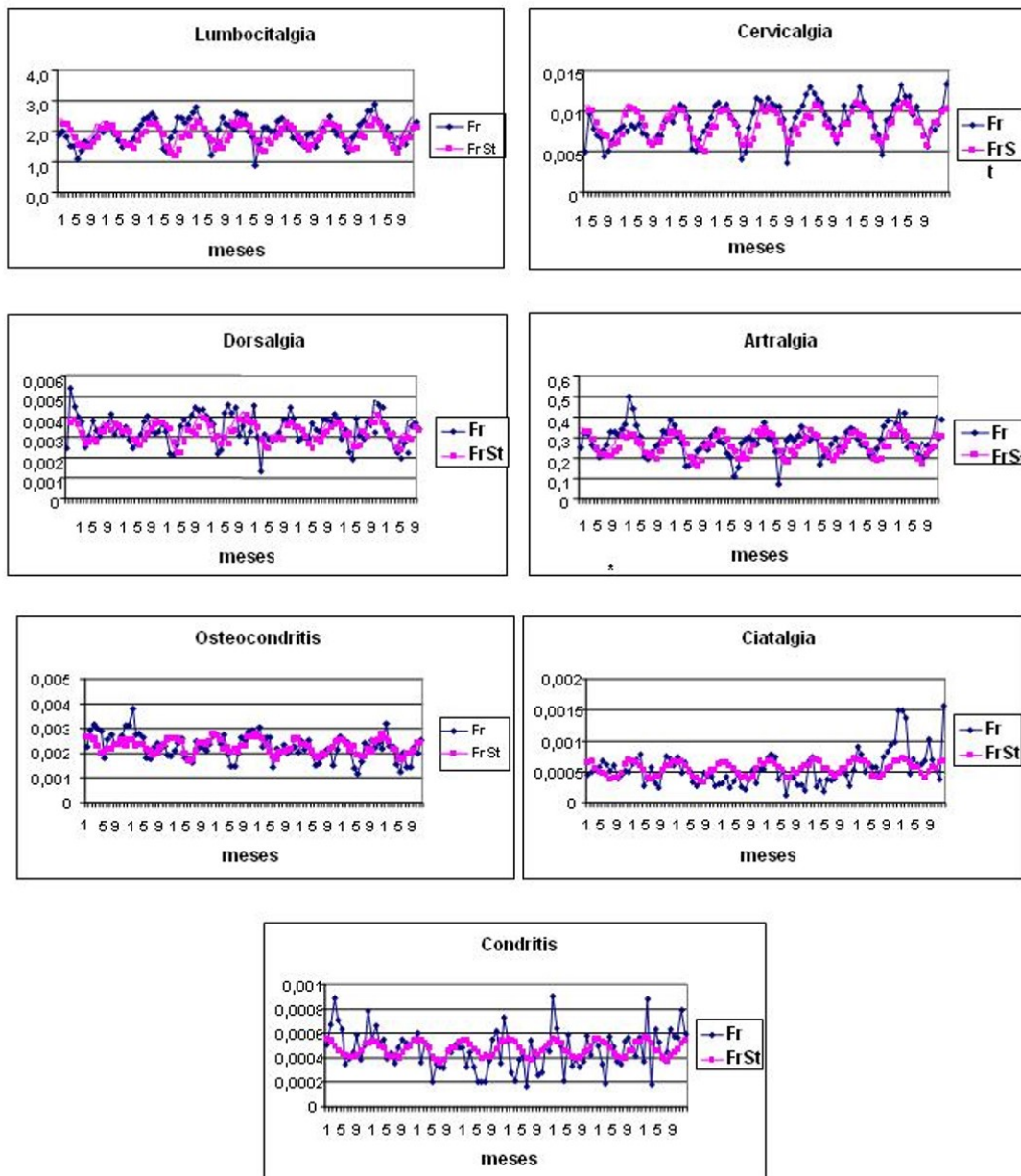


Figura 9: Aproximación de Stepwise (FRSt) en rojo y frecuencias relativas reales (FR) en azul de pacientes de lumbocotalgia, cervicalgia, artralgia, dorsalgia y osteocondritis (eje y), durante los meses el período 2005-2012 (eje x).

En las tres siguientes aplicaciones los coeficientes de correlación lineal resultan menores a 0.50 y también el número de pacientes es menor, en ellos el desvío típico de la serie da prácticamente igual al error cuadrático medio, los desvíos son ligeramente mayores. Se puede apreciar en las Figura 9 e) y g) que los valores reales se presentan cada vez más irregularmente dispuestos respecto

a la curva estimada.

Los resultados obtenidos en los dos últimos ítems, podrían ser aplicados a las proyecciones de los valores mensuales de la temperatura obtenidas por modelos climáticos globales de la región húmeda Argentina (Proyecto tercera comunicación Nacional sobre Cambio Climático,



2015), para poder realizar una evaluación futura de la cantidad mensual de pacientes osteoarticulares.

#### 4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta a la población registrada en el censo de 2010, las patologías osteoarticulares (POA) afectan con mayor frecuencia a los mayores de 70 años y al sexo femenino, a excepción de los mayores de 90 años afectados por cervicalgia y osteocondritis donde supera el sexo masculino. Con baja frecuencia los pacientes masculinos aproximadamente menores de 51 años afectados con lumbocitalgia y artralgia superan al sexo femenino.

No existe correlación lineal diaria para los lags 0, 1, 2, 3 y 4 entre el número de pacientes de las distintas afecciones osteoarticulares (POA) y las variables: Temperatura (T), Temperatura de rocío (Td) y Presión (Pr). Con estas variables, a nivel mensual, los pacientes con dorsalgia y osteocondritis presentan correlaciones significativamente distintas de cero en el nivel de confianza de 0.95. Para este mismo nivel los pacientes con lumbocitalgia se correlacionan con la T.

Para cualquier mes del año, se registran entre el 70 y 72 %, 67 y 69 % o entre el 52 % y 56 % de los pacientes acumulados mensualmente de cada POA, cuando son positivas las anomalías medias de temperatura, presión o temperatura de rocío respectivamente.

Considerando las frecuencias de pacientes relativos (FR) respecto a la cantidad de pacientes de todas las enfermedades proporcionadas por la compañía médica, se concluye que:

- a) Las correlaciones lineales mensuales entre las tres variables y las FR de cada una de las POA son significativamente distintas de cero en el nivel del 95 %. Las correlaciones entre T o Td y la Fr de pacientes con Lumbocitalgia, Cervicalgia y Artralgia, son mayores a 0.66 y entre estas tres enfermedades y la Pr, más negativas que -0.57.
- b) Es mayor la cantidad de pacientes en verano y primavera y menor en invierno y se estima que la empresa que ha otorgado los datos, podría haber recibido más llamadas cuando las T y las Td medias resultaron mayores a 14.1C° y a 9.1C°

respectivamente y cuando las Pr fueron menores a 1013.1 mb, en cualquier mes del año.

- c) A través de las ecuaciones obtenidas por el método de Stepwise se puede llegar a aproximar la cantidad mensual relativa (FRSt) de pacientes esperados con el conocimiento del valor mensual de la T, la Td y la Pr con un error cuadrático ( $\varepsilon$ ) que varía entre 0.26 y 0.0001 y un coeficiente de correlación ( $\rho$ ) entre 0.75 y 0.35.  $\varepsilon$  disminuye en el siguiente orden de mayor a menor: lumbocitalgia, cervicalgia, artralgia, osteocondritis, dorsalgia, ciatalgia y condritis.

Los resultados mensuales podrían relacionarse con los valores mensuales de la temperatura proyectados por los modelos climáticos globales aplicados a la región húmeda Argentina, para obtener una evaluación futura de la cantidad mensual de pacientes.

Agradecimientos: A la UBA por costear este trabajo a partir del subsidio 20020100100628, así también como a la empresa Ayuda Médica y al Servicio Meteorológico Nacional por proveer los datos utilizados.

#### REFERENCIAS

- Alessandro, A. P. and A. de Garín, 2003. A study on predictability of human discomfort in Buenos Aires city. *Meteorological Applications*. Vol. 10, pags. 263-271. ISSN 1450-4827. Inglaterra.
- Alessandro, A. P., 2012. Respiratory diseases in the greater Buenos Aires and meteorological variables. *Meteorological Application*. Vol. 19, pags. 79-90. Inglaterra
- Alessandro, A. P., 2014. Variables meteorológicas y su incidencia en enfermedades respiratorias de niños de en el Gran Buenos Aires. *Revista Meteorológica*. Vol. 39 (1), pags. 27-39. Argentina.
- Alexander, P., 2013. Association of monthly frequencies of diverse diseases in the calls to the public emergency service of the city of Buenos Aires during 1999-2004 with meteorological variables and seasons.

- International Journal of Biometeorology, vol. 57 p. 83 – 90.
- Brooks, C. and N. Carruthers, 1953. Handbook of Statistical Methods in Meteorology. Pags. 237-239.
- Draper, N, R. and H. Smith, 1981. Applied Regression. Vol. 181, pags. 307-311.
- De Garín, A. B., A. P. Alessandro y E. Romano, 2006. Influencia de los parámetros meteorológicos sobre enfermedades cardíacas en la Ciudad de Buenos Aires. Presentado en el XIV Congresso Brasileiro de Meteorología (Florianópolis) del 27/ 11 al 1/12/06 y en CD.
- Hoffmann, J. R, A. Daguerre y L. Calcagno, 1983. Correlaciones entre los ataques de asma en pediatría y las condiciones meteorológicas en Rosario. Revista Meteorológica. Vol 14, pág.87.
- Kashiwabara, K., H. Kohrogi, K. Ota and T. Moroi, 2002. High frequency of emergency room visits of asthmatic children on misty or foggy nights. J Asthma. Vol 39(8), pags. 711-717.
- La Proyección del clima en Argentina para el siglo XXI. Capítulo 3, 2015. Responsable de Ejecución de Proyecto: Daniel Calabrese. terceracomunicacioncc@ambiente.gob.ar.
- Piccolo C, G. Perillo, C. Ramon and V. Didio, 1988. Outbreaks of asthma attacks and meteorologic parameters in Bahia Blanca, Argentina. Ann Allergy. Vol. 60, pags. 107-110.
- Rao, V. B., L. D. A. Sá, S. H. Franchito and H. Kioshi, 1997. Interannual variations of rainfall and corn yields in Northeast Brasil. Agricultural and forest Meteorology. Vol. 85, pags. 63-74.
- Rusticucci M., M. L. Bettolli, M. A. Harris, 2000. Association between conditions and the number of patients at the emergency room in an Argentine hospital. Int. J Biometeorol. Vol. 46, pags. 42-51.
- Rusticucci M., M. Harris y E. Agosta, 1996. Relación entre las causas de internación en un hospital general y las condiciones meteorológicas durante el año 1995. Actas VII Congreso Argentino de Meteorología. Bs. As., pags. 459-460.
- Santic Z., K. Santic, D. Ondza and S. Bogut, 2002. The relationships between the asthma and weather. Med Arh. Vol 56 (3), pags. 155-157.
- Tolcachier A. J. y colaboradores, 1994. Distribución y frecuencia de casos de Asma bronquial en consultas pediátricas de urgencia en la Capital Federal durante 1992. Archivos argentinos de Alergia e Inmunología clínica. Vol. 26 (2), pags. 82-90.

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.



## VALIDACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN POR SATÉLITE APLICANDO LA TÉCNICA HIDROESTIMADOR

María Paula Hobouchian<sup>1</sup>, Yanina García Skabar<sup>1,4,5</sup>, Daniel Barrera<sup>2,5,6</sup>, Daniel Vila<sup>7</sup> y Paola Salio<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Investigación y Desarrollo. SMN. Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. FCEyN UBA. Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. CONICET UBA. Buenos Aires, Argentina.

<sup>4</sup>UMI-Instituto Franco Argentino sobre Estudios del Clima y sus Impactos. Buenos Aires, Argentina.

<sup>5</sup>CONICET. Buenos Aires, Argentina.

<sup>6</sup>Facultad de Agronomía. UBA. Buenos Aires, Argentina.

<sup>7</sup>División de Satélites y Sistemas Ambientales. CPTEC. Cachoeira Paulista, Brasil.

(Manuscrito recibido el 10 de agosto de 2015, en su versión final el 22 de abril de 2016)

### RESUMEN

La técnica Hidroestimador para estimar precipitación por satélite fue desarrollada originalmente en la National Oceanic and Atmospheric Administration/National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NOAA/NESDIS). En el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, esta técnica volvió a estar operativa a partir de septiembre de 2013, y utiliza imágenes del canal infrarrojo térmico del satélite GOES-13 e información de variables meteorológicas pronosticadas por el modelo ETA. Los píxeles de lluvia y no lluvia, se separan de acuerdo a un valor construido con la media y la desviación estándar de la temperatura de brillo en un área centrada en el píxel de interés. Las nubes en un determinado píxel, producen precipitación si poseen topes más fríos que la media de los píxeles circundantes. La tasa de precipitación, se ajusta teniendo en cuenta la humedad del entorno, a partir de datos de humedad relativa y agua precipitable de los modelos de pronóstico numérico. En la página web del SMN, los mapas de precipitación instantánea están disponibles cada 30 minutos, y los mapas de precipitación acumulada cada 6, 12 y 24 horas, con una resolución espacial de 4 km.

Actualmente, se lleva adelante el seguimiento y la aplicación de diferentes cambios en el algoritmo con el fin de mejorar esta estimación, que incluyen una versión asociada al filtrado de nubes cirrus, como también la comparación con una versión que no discrimina clusters de nubes.

En este trabajo, se realiza una validación cada 24 horas de la versión operativa y las versiones de prueba de la estimación de precipitación, teniendo en cuenta el periodo de un año completo de datos disponibles. Esta evaluación integral, consiste en el análisis de diferentes estadísticos en forma puntual, y en la red completa de estaciones pluviométricas disponible en tiempo real.

En el sur de Sudamérica, que presenta diferentes regímenes de precipitación, se pudo observar en la validación diaria para los meses disponibles, que el Hidroestimador tiende a subestimar la precipitación en los eventos de precipitación débil, tal como mostraron Salio et al. (2015), pero aparece una sobrestimación importante en los

eventos de precipitación más intensa.

*Palabras clave: Precipitación, Hidroestimador, Sudamérica.*

## VALIDATION OF SATELLITE PRECIPITATION ESTIMATE WITH HYDRO-ESTIMATOR TECHNIQUE

### ABSTRACT

The Hydro-Estimator technique to estimate precipitation from satellite was originally developed at the National Oceanic and Atmospheric Administration / National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NOAA / NESDIS). In Argentina, a local version of this technique became again operational at the National Meteorological Service from September 2013. It is based on thermal infrared channel images from GOES-13 satellite and forecasted meteorological variables from ETA model outputs. Rain and no rain pixels are separated according to a temperature value built with the mean and standard deviation of the brightness temperature at an area centered on the pixel being analyzed. The clouds in a given pixel produce precipitation if they have colder tops than the average of the surrounding pixels. The precipitation rate is adjusted considering data from relative humidity and precipitable water of numerical forecast models. On the website of SMN, precipitation rain rate maps are produced and uploaded to internet every half hour, and accumulated precipitation maps every 6, 12 and 24 hours, with a spatial resolution of 4 km.

Currently, monitoring and the application of different changes in the algorithm are being performed in order to improve the estimate. The changes included a version associated with filtering cirrus clouds, as well as a comparison with a version that does not discriminate clouds clusters.

A validation is performed every 24 hours for this product and test versions, for a period of one complete year of data available. This integral evaluation is made with different statistical analyses locally and in the complete network of meteorological stations available in real time.

In southern South America, where different precipitation regimes are present, it was observed in daily validation over the available months, that Hydro-Estimator tends to underestimate in weak precipitation events, as shown by Salio et al. (2015), but a significant overestimation appears in more intense precipitation events.

*Keywords: Precipitation, Hydro-Estimator, South America.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La precipitación tiene un rol fundamental en la regulación del ciclo hidrológico, como en diferentes actividades humanas desde la agricultura al turismo. Su correcta medición representa un gran desafío dada su gran variabilidad espacial y temporal. Las observaciones pluviométricas en Argentina resultan insuficientes para las aplicaciones de

diversos usuarios, no se distribuyen en forma homogénea, y en la mayoría de los casos se mide con una baja resolución temporal, cada 6 horas o más frecuentemente cada 24 horas. Si bien numerosas instituciones realizan observaciones de precipitación acumulada diaria, no todas comparten la información en tiempo real, lo que dificulta la utilización de la misma en tareas operativas y de toma de decisión.

La llegada de los satélites meteorológicos en los años 1970, permitió avanzar en múltiples técnicas de detección de variables meteorológicas en forma remota. Las primeras técnicas, utilizaron datos visibles (VIS) e infrarrojos (IR) de los satélites de órbita geoestacionaria para inferir la precipitación, basadas en la radiación solar visible reflejada por las nubes y la temperatura del tope de nube respectivamente. En tal sentido, el razonamiento supone que la precipitación más intensa que alcanza la superficie está asociada a nubes con mayor desarrollo vertical en la atmósfera y que tienen toques de nube más brillantes (mayor albedo) y más fríos (mayor altura) en las imágenes de satélite. Sin embargo, la emisión y dispersión de los hidrometeoros en el rango de las microondas emitidas por la superficie terrestre están más directamente relacionadas con la estructura interna de las nubes y en consecuencia con la precipitación. Los algoritmos que utilizan datos de microondas pasivas (MP) de los satélites de órbita polar, generalmente proveen estimaciones de precipitación instantánea más adecuadas que los algoritmos a partir de datos VIS o IR, aunque con una menor resolución espacial (píxeles de decenas de km de lado). De este modo, estos productos resultan de mejor calidad pero con limitaciones asociadas al tamaño del píxel y a una disponibilidad de datos cada 12 horas en el caso de los satélites helio-sincrónicos (operativos, como los de la serie NOAA, y de investigación, como el AQUA y el TERRA de la NASA); y de una a dos veces por día en el caso de algunos satélites de investigación de órbita oblicua (como el TRMM y el GPM de NASA/JAXA). En los últimos años, diversos grupos científicos han desarrollado productos casi operacionales de estimaciones de precipitación cada 3 horas con una resolución de 0.25 grados de lado en latitud y longitud, combinando la información proveniente de sensores de MP de varios satélites, el sensor activo del radar de precipitación montado en el satélite TRMM, y la información complementaria de satélites geoestacionarios. En síntesis, la ventaja de los datos IR para generar una estimación de precipitación radica en una mayor resolución espacial (4 km) y temporal (cada 30

minutos). En este sentido, es importante disponer de herramientas en tiempos operacionales, dado que los datos del satélite GOES-13 se descargan operativamente en el SMN a fin de dar respuesta a los diversos usuarios. El advenimiento de la nueva generación de satélites de la serie GOES, como el GOES-R/16, con información multiespectral y frecuencias temporales de 5 minutos, proveerá herramientas vitales para el estudio de la precipitación.

Una técnica operacional de la actualidad y con larga historia, cuyos orígenes se remontan al trabajo de Scofield (1987), es el método Hidroestimador (Vicente et al, 2002; Scofield y Kuligowski, 2003), que surge como una modificación del método Autoestimador (Vicente et al., 1998). Estas técnicas, desarrolladas para estimar precipitación de origen convectivo, generan tasas de precipitación basadas en la temperatura de brillo (Tb) del canal IR de los satélites de órbita geoestacionaria, y factores de corrección provenientes de los modelos de pronóstico numérico.

El método Hidroestimador ha tenido importantes mejoras y diversas adaptaciones en la región de Sudamérica desde su versión original. En Argentina, la técnica fue replicada en 2001 (Barrera et al., 2001) en su versión original, Autoestimador, con algoritmo y código computacional propio, derivados a partir de las publicaciones de sus autores originales. En 2002, fue puesta en operación en el SMN, y al año siguiente, se introdujeron las modificaciones necesarias al algoritmo original y se replicó la versión Hidroestimador. Este desarrollo y colaboración, dieron origen al Convenio CONICET-SMN en 2004, y al registro de propiedad intelectual por el CONICET bajo el nombre PPGOES en el mismo año. Posteriormente, siguieron varias modificaciones y mejoras (Barrera et al., 2003; Barrera, 2007), y validaciones con información pluviométrica (Barrera, 2005a,b; Saldanha et al., 2007). El mapa de precipitación acumulada en 24 horas estuvo disponible en el sitio web del SMN hasta fines de 2013.

A su vez, desde el año 2006, el SMN operó en forma paralela una versión automatizada (Vila et al., 2001), con algunas incorporaciones de la versión PPGOES. Luego de un tiempo fuera de servicio, debido a cambios en la recepción de imágenes, volvió a estar disponible en forma operativa en el SMN a partir de septiembre de 2013.

Actualmente, el Departamento de Investigación y Desarrollo del SMN se ocupa del seguimiento y ensayo de mejoras en torno a esta estimación. El interés de múltiples usuarios en la distribución de la precipitación, y las limitaciones en su medición en forma directa, motivan la utilización y la necesidad de conocer la calidad de este tipo de productos. Hobouchian et al. (2014), realizaron una primera evaluación de estos datos sobre el periodo de un mes. El objetivo de este trabajo, es realizar una evaluación diaria del Hidroestimador durante el período de un año, y analizar los resultados obtenidos al incorporar cambios en la técnica con la finalidad de mejorar su rendimiento.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

### 2.1. Estimación de precipitación

En este trabajo se utiliza la técnica Hidroestimador para estimar la precipitación por satélite en forma automatizada (Vila et al., 2001), cuya versión original proviene de la NOAA/NESDIS, con algunas incorporaciones de la versión PPGOES (Barrera et al., 2001 y 2003; Barrera, 2007).

El programa automatizado que incorpora las imágenes satelitales y salidas del modelo ETA, y lleva adelante la ejecución del algoritmo, la generación de mapas de tasa de precipitación (RR, por sus siglas en inglés), y su publicación en el sitio WEB del SMN, fue implementado por Vila (Vila et al, 2001). En este proceso, es necesario corregir radiométricamente la señal que llega atenuada al satélite, debido a la absorción de radiación por vapor de agua existente entre la superficie radiante (el tope de nube) y el

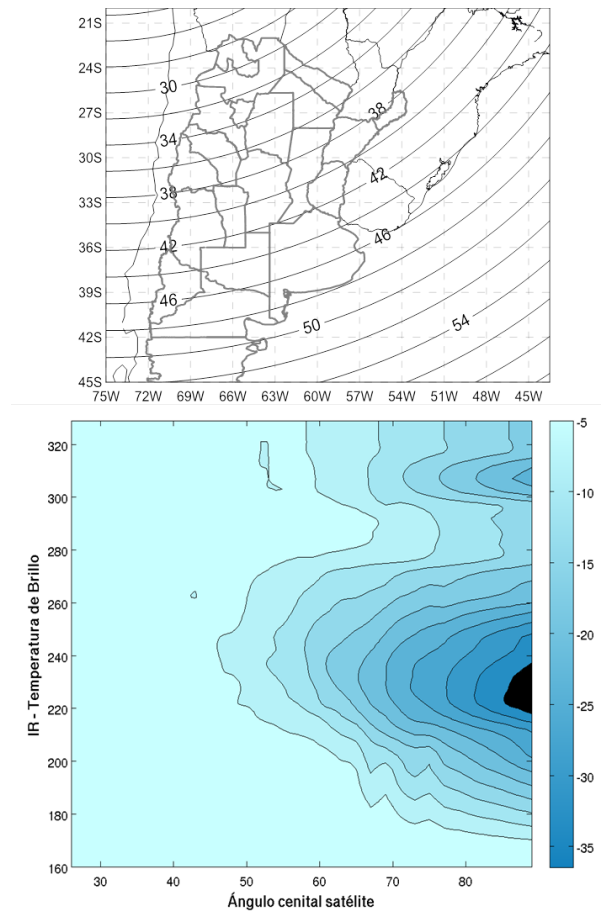


Figura 1: Distribución espacial del ángulo cenital del satélite GOES-Este en grados (panel superior), y atenuación radiométrica en grados kelvin, en función de la temperatura de brillo (K) del canal 4 y el ángulo cenital del satélite (grados), a principios de junio (panel inferior).

satélite. La señal se atenúa más a medida que el ángulo cenital del satélite es mayor, lo que aumenta su recorrido en la atmósfera (camino óptico), efecto conocido como “limb darkening” (Lienesch y Wark, 1967). La Figura 1 (panel superior), muestra la distribución espacial del ángulo cenital para el satélite GOES-Este ( $75^{\circ}$  W). Al implementarse la técnica Hidroestimador automatizada en 2006, se incorporó un algoritmo de corrección radiométrica desarrollado por Joyce et al. (2001), que ya estaba siendo utilizado en la versión semi-automatizada PPGOES (Barrera et al., 2003). Esta corrección, está basada en



las diferencias encontradas en las mediciones del canal 4 ( $10.7\mu\text{m}$ ), realizadas sobre el mismo sitio por los satélites GOES-Este y Meteosat (desde distintos ángulos cenitales), sobre la región escaneada por ambos satélites (Océano Atlántico y este de Sudamérica). Mediante análisis estadístico, se produjeron correcciones isotrópicas en función del ángulo cenital del satélite, y la temperatura radiométrica para ocho fechas distribuidas en el año, a partir de las cuales se interpolaron valores para cada día del año (Joyce et al., 2001). La marcha anual de esta corrección, varía principalmente debido a la distribución espacial y temporal de la concentración media del vapor de agua, que atenúa la señal emitida desde el píxel. La magnitud de la atenuación se muestra en la Figura 1 (panel inferior), en la que se aprecia su aumento en valor absoluto al incrementarse el camino óptico hasta el satélite, ya sea por aumento del ángulo cenital, o de la temperatura radiométrica en niveles medios y altos de la atmósfera. En la misma Figura, se aprecia que cuando la emisión de radiación proviene de niveles bajos (superficie o nubes bajas, lo que se evidencia por temperaturas de brillo mayores que  $250\text{K}$ ), la atenuación es menor. Esto último, indica la inexistencia de nubes medias y altas, y por lo tanto la atmósfera está relativamente seca y el camino óptico es menor. En la Figura 2, se muestra cómo varía la distribución espacial de la corrección en dos fechas diferentes. Las imágenes corregidas se utilizan como datos de entrada al Hidroestimador.

La estimación de precipitación, utiliza imágenes del canal IR térmico del satélite GOES-13 y datos de humedad relativa (RH, por sus siglas en inglés) y agua precipitable (PW, por sus siglas en inglés) en la capa atmosférica desde superficie hasta 500 hPa del modelo de pronóstico numérico ETA, que se corre operativamente en el SMN (Suaya, 2004). El principio que asume esta estimación, se basa en que las celdas convectivas producen precipitación más intensa cuanto más frío son los toques de nube, y cuanto mayor es el contenido de humedad en la columna atmosférica entre superficie y 500 hPa. De esta forma, es posible estimar la tasa

de precipitación asociada a la temperatura de brillo del canal centrado en  $10.7\mu\text{m}$  (T10.7) de los satélites de órbita geoestacionaria, y a la información de humedad suministrada por el modelo ETA.

### 2.1.1. Cálculos para la tasa de precipitación

La intensidad de la precipitación depende del espesor de la nube, que está relacionado con el tiempo de permanencia y crecimiento de las gotas y cristales de hielo, y con el contenido y distribución de agua líquida y sólida dentro de la nube. La  $T_b$  del tope nuboso, da información sobre la altura del espesor de la nube, y consecuentemente, el Hidroestimador asume que la intensidad de precipitación es principalmente función de dicha temperatura. A su vez, dicho espesor, depende del nivel de base de la nube, que es función del contenido de humedad en la tropósfera inferior. Para una dada temperatura del tope de nube, el espesor será menor cuanto más seco se encuentre el aire en las capas bajas de la atmósfera.

La técnica Hidroestimador utilizada en este trabajo, se basa en el algoritmo desarrollado por Scofield y Kuligowski (2003), y se describe a continuación:

En primer lugar, dado que la tasa de precipitación y la temperatura de brillo del tope de nube no están directamente relacionadas, y para considerar las diferencias entre la precipitación convectiva y estratiforme, se define mediante relaciones empíricas, la tasa de precipitación en los “centros convectivos” y “no convectivos” en forma separada. Luego, se combinan estas ecuaciones con distinto peso, dependiendo de las características del píxel y su entorno, y se asigna una tasa de precipitación final.

La precipitación convectiva está relacionada con T10.7 mediante una versión modificada de la ley empírica original de Vicente et al. (1998) que se muestra en la ecuación(1). Para ello, se analiza cada píxel cuya temperatura

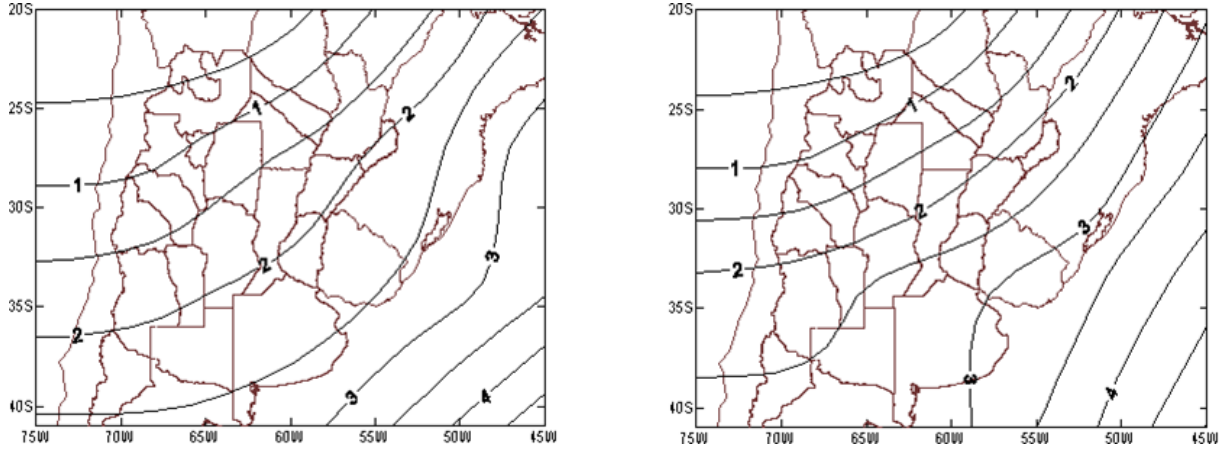


Figura 2: Corrección radiométrica por defecto en grados Kelvin para imágenes GOES del canal 4, cuando la temperatura de brillo obtenida es 230K del 21/9 (panel izquierdo), y 21/12 (panel derecho).

radiométrica es inferior a 250 K (los píxeles más cálidos se consideran sin precipitación), y se utiliza el valor de PW entre superficie y 500 hPa como parámetro para obtener una familia de curvas de intensidad de precipitación convectiva  $RR_c = f(T_b, PW)$ , con  $RR_c$  en mm/h y  $T_b$  en grados Kelvin.

$$RR_c = k_0 \exp(-\alpha T_b^{1,2}) \quad (1)$$

Los valores de  $\alpha$  y  $k_0$  se encuentran resolviendo un sistema de dos ecuaciones en (1). Por un lado,  $RR_c = 0,5$  mm/h para  $T_b = 240$  K; y por otro lado, una tasa de precipitación para  $T_b = 210$  K que está relacionada con PW del modelo ETA mediante una función empírica de ajuste, de modo que  $RR_c$  sea función de la disponibilidad de humedad en la atmósfera. A su vez, se define un valor de tasa de precipitación máxima, igual al contenido de PW (expresado en pulgadas) multiplicado por 40 mm/h.

La precipitación estratiforme ( $RR_s$ ), se define a partir de una ley lineal con  $T_{10,7}$  que se muestra en la ecuación (2). Para ello, se considera la tasa de precipitación máxima ( $RR_{max}$ ) como una función empírica diferente, que se calcula como la  $RR_c$  que corresponde a la  $T_b$  del píxel analizado y el contenido de PW máximo en el núcleo convectivo más cercano.

$$RR_s = (250 - T_{10,7}) \frac{RR_{max}}{5} \quad (2)$$

A su vez,  $RR_s$  no puede exceder el 20% de la  $RR_c$  correspondiente a la  $T_b$  y PW del píxel analizado, o los 12 mmh<sup>-1</sup> (el valor que sea más bajo).

Por otro lado, la presencia o ausencia de precipitación y su intensidad son función de la pertenencia al núcleo de un sistema precipitante y de las condiciones del entorno en el píxel de interés. Para ello, se encuentra la  $T_b$  mínima en un área de 101x101 píxeles y dependiendo de cuan bajo sea este valor, se determina la región de interés, entre un área mayor de 101x101 píxeles para toques de nube por debajo de 200 K, y un área menor de 61x61 píxeles para valores superiores a 220 K.

Luego, las nubes en un determinado píxel producen precipitación si poseen toques más fríos que la media de los píxeles circundantes, y la técnica separa los píxeles de lluvia y no lluvia de acuerdo a un valor de temperatura estandarizado en la ecuación (3), construido con la media ( $T_m$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) de la temperatura de brillo en el área definida previamente centrada en el píxel de interés.

$$Z = \frac{T_m - T_{10,7}}{\sigma} \quad (3)$$

En el caso de que  $Z$  sea mayor o igual a 1.5 la precipitación es enteramente convectiva,

mientras que si  $Z$  es igual a cero la precipitación es enteramente estratiforme, y si  $Z$  es negativo la tasa de precipitación se ajusta a cero (píxel más cálido que la media del entorno). La tasa de precipitación para valores de  $Z$  entre 0 y 1.5, se calcula combinando una fracción convectiva y otra estratiforme, como un promedio ponderado, de la siguiente manera:

$$RR = \frac{RR_c Z^2 + RR_s (1,5 - Z)^2}{Z^2 + (1,5 - Z)^2} \quad (4)$$

A su vez, en un sistema convectivo típico, existen múltiples mínimos de temperatura de brillo, y una única región circundante es inapropiada para diferenciar los mínimos locales de los globales. Para aumentar la habilidad en representar los núcleos secundarios de precipitación, y poder determinar mejor la intensidad de la precipitación, se consideran dos áreas diferentes respecto al píxel de interés. La idea es evitar que si el área considerada es muy pequeña, quede afuera el tope de nube más frío del sistema (el mínimo absoluto de temperatura de brillo) y solo se tenga en cuenta un mínimo local de  $T_b$ . Mientras que si solo se considerara un área muy grande, se le restaría importancia a los mínimos locales de temperatura de brillo del sistema. En la actualidad, se trabaja con un área interna de 31-31 píxeles, y la estimación final se calcula como la raíz cuadrada del resultado de multiplicar la tasa de precipitación de esta área interna y la externa definida previamente.

La corrección por humedad, se realiza aplicando ajustes en forma separada con los valores medios de PW y RH entre superficie y el nivel de 500 hPa. El contenido de PW se utiliza como un factor de disponibilidad de humedad como se describió previamente, y los valores de  $T_b$  se incrementan (disminuye la RR) en entornos secos, y se reducen (aumenta la RR) en entornos húmedos. A su vez, la RH media se utiliza como un factor que remueve una fracción de la precipitación que es evaporada por debajo de la base de nube, antes de alcanzar la superficie; cuanto más seco es el entorno, mayor es la fracción removida.

Además, se han incorporado a la técnica

Hidroestimador ajustes al nivel de equilibrio convectivo (Scofield, 2001) para eventos de tope cálido que pueden desarrollar precipitación intensa; correcciones por error de paralaje en la ubicación de los topes de nubes y por ascenso o descenso mecánico del aire debido a obstáculos orográficos, que se describen con detalle en el trabajo de Vicente et al. (2002); y el ajuste por incrementos en el ángulo cenital del satélite detallado en la sección anterior (Joyce et al., 2001).

### 2.1.2. Estimación de la precipitación acumulada

La precipitación acumulada en 24 horas, se obtiene como la suma de la precipitación instantánea en cada hora disponible. En general, para una hora determinada, se cuenta con más de un dato estimado de precipitación instantánea debido a la alta resolución temporal de las imágenes de satélite. Actualmente, para calcular los valores de precipitación estimada diaria, se considera el valor medio entre los datos disponibles en el periodo horario como representativo de una hora determinada del día (mm/h), y luego se suman los valores obtenidos en las 24 horas del día (mm/día).

### 2.1.3. Limitaciones y ventajas de la técnica Hidroestimador

Una de las limitaciones principales de la técnica Hidroestimador, está relacionada con la precipitación proveniente de nubes con topes más bajos, como los nimbostratus, que es ignorada si no hay convección presente en el entorno cercano. En eventos de precipitación intensa, la contribución de estas nubes al registro total de precipitación es pequeña en proporción, pero en otros casos no es despreciable. Además, hay casos de precipitación proveniente de nubes stratus en ausencia de convección, que ocurren principalmente en el semestre frío en latitudes extratropicales, en los que la técnica tampoco asigna precipitación.

Otra limitación importante que presenta la

técnica, está asociada a la dificultad en la detección y filtrado de nubes no precipitantes. Los cirrus son nubes de hielo que no producen precipitación, y tienen temperaturas de brillo similares a los toques de nubes convectivas bien desarrolladas. Los cirrus finos, generalmente dejan pasar radiación infrarroja que proviene de nubes más bajas o de superficie, en distinta medida según su espesor, por lo que las radiancias medidas en los respectivos píxeles están contaminadas en diferentes grados por radiación de niveles inferiores. Esto hace que un área de cirrus finos se “vea” rugosa en el campo de temperatura de brillo, lo que dificulta su filtrado por medio de técnicas de análisis espacial textural basadas en la temperatura de brillo. En los Estados Unidos, la detección de áreas nubosas se realiza con una red de radares meteorológicos que cubren el territorio nacional (Scofield, 2001), y los cirrus y cúmulos en etapa de disipación, que no producen precipitación o bien es débil, son filtrados de esta manera. Sin la ayuda de los radares, la técnica Hidroestimador confunde estos toques de nube fríos en áreas de cirrus y restos de cúmulos, con sistemas precipitantes, lo cual fue reportado por Rozumalski (2000).

En Argentina, se desarrolla una subrutina para la detección y filtrado de nubes cirrus, de efectividad limitada debido a la poca información disponible. La misma, resulta más eficaz cuanto más espeso es el cirrus, y sirve también para detectar píxeles con cúmulos en etapa de disipación. Por otra parte, en vigilancia meteorológica por sensores remotos, se observó que la versión operativa del Hidroestimador sobrestimaba el área de precipitación máxima en numerosos eventos de precipitación intensa. El filtrado de nubes cirrus y esta última problemática, condujeron a la realización de algunas pruebas con cambios en la versión operativa que se discuten en la próxima sección, con la finalidad de encontrar mejoras en la estimación de precipitación.

Además, la ausencia de imágenes disponibles por más de media hora puede introducir errores significativos en la estimación de la precipitación acumulada, dada la alta variabilidad temporal

de la precipitación de origen convectivo.

A pesar de las limitaciones expuestas previamente, es importante remarcar que la ventaja principal del Hidroestimador frente a otras estimaciones de precipitación por satélite que utilizan datos de MP, datos de superficie y otro tipo de información en forma óptima, radica en su disponibilidad en tiempo real para tareas operativas. Estos datos estimados, tienen un desfase de pocos minutos y a lo sumo media hora, mientras que los algoritmos más avanzados actualmente, logran un desfase de 4 horas en el mejor de los casos. Además, Salio et al. (2015), mostraron que si bien esta estimación tiene un sesgo negativo casi constante a lo largo del año, su PDF se corresponde bastante bien con la distribución observada. Es decir, el grado de subestimación puede analizarse en dicho estudio, como un error sistemático que a futuro podría ser removido para mejorar la técnica.

#### **2.1.4. La técnica Hidroestimador implementada en el SMN**

La versión del Hidroestimador que actualmente se encuentra operativa en el SMN (en adelante, HIDRO ACTUAL), produce los mapas de precipitación instantánea disponibles cada 30 minutos, y genera los mapas de precipitación acumulada cada 6, 12 y 24 horas, con una resolución espacial de 4 km. En la Figura 3, se presenta un ejemplo de los respectivos mapas de precipitación que se publican en la página web del SMN, correspondientes al día 13 de enero de 2015.

A fin de minimizar la asignación de lluvia a cirrus y cúmulos en etapa de disipación, se ensaya la incorporación en el algoritmo operativo de una subrutina asociada al filtrado de estas nubes (en adelante, HIDRO CIRRUS OUT), que está basada en un análisis textural que identifica los píxeles asociados a las nubes mencionadas como aquellos que pertenecen a un determinado rango de temperatura de brillo en una secuencia de al menos 4 píxeles consecutivos, e incorpora los píxeles contiguos si pertenecen al mismo intervalo

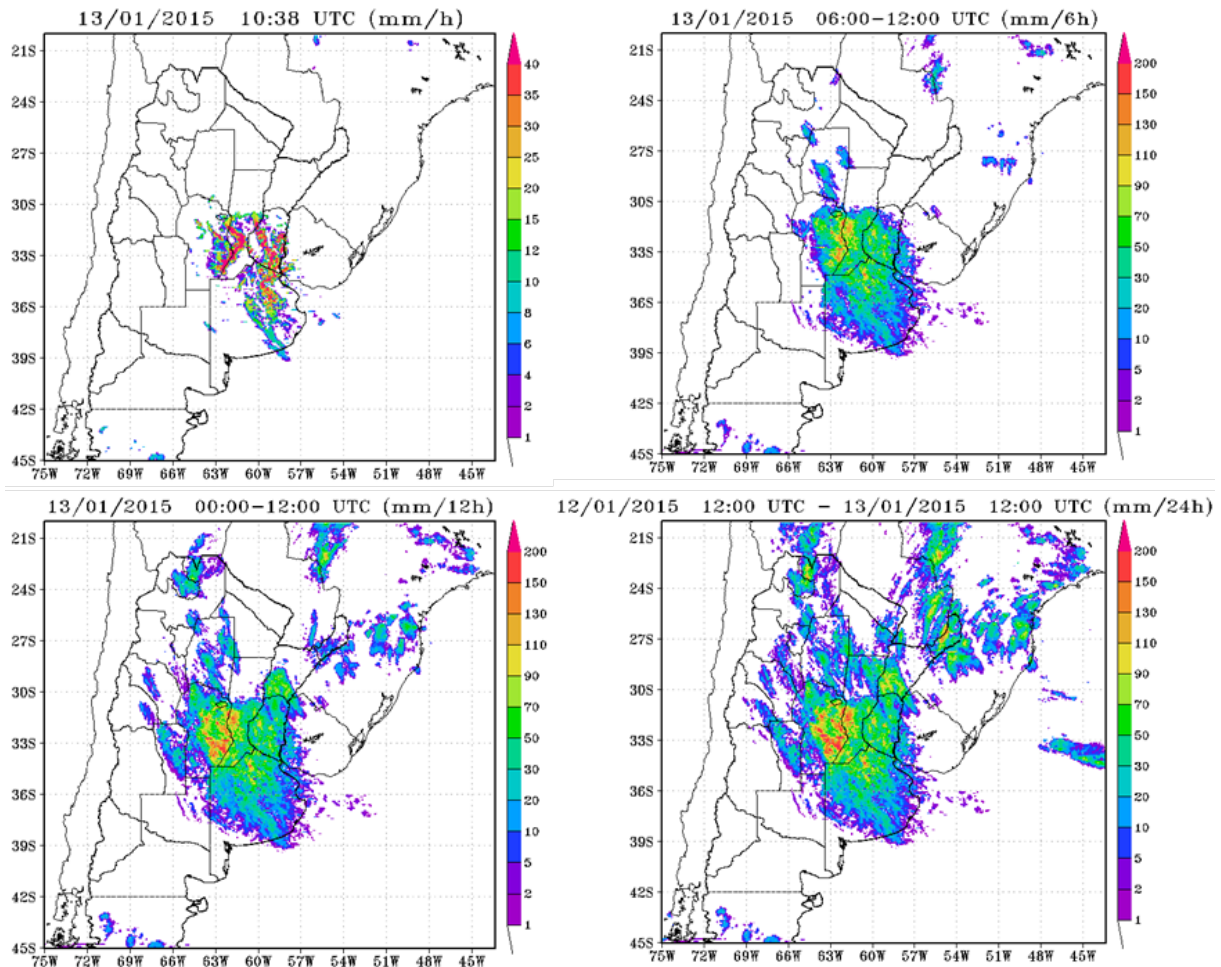


Figura 3: Mapa de precipitación instantánea del Hidroestimador correspondiente a las 10:38 UTC del día 13 de enero de 2015 (panel superior izquierdo), y mapas de precipitación acumulada cada 6 horas (panel superior derecho), 12 horas (panel inferior izquierdo) y 24 horas (panel inferior derecho) correspondientes a las 12:00 UTC del mismo día. Notar que la escala de precipitación va de 0 a 40 mm en el mapa de precipitación instantánea y de 0 a 200 mm en los mapas de precipitación acumulada.

de temperatura. La secuencia mencionada, se busca en sentido oeste-este, y luego, en sentido sur-norte. Actualmente, se analizan intervalos de 2 grados de temperatura de brillo desde 243 K hasta 203 K. Los valores utilizados son empíricos y deberían ser ajustados en un futuro utilizando la base de datos de observaciones y estimaciones. Una vez identificados los pixeles que cumplen estas condiciones, se inhibe la precipitación en los mismos; y a modo de control, se generan mapas de temperatura de brillo para analizar en qué valores de temperatura se agrupan en mayor medida los pixeles filtrados. Asimismo, se

considera la posibilidad de utilizar el valor de agua precipitable en la columna entre superficie y 500hPa pronosticado por el modelo ETA, para ayudar a detectar una región seca, y de este modo identificar mejor los cirrus. La contribución que pueden hacer estos campos pronosticados es incierta, dado que: a) la retícula del modelo ETA es mucho mayor que el tamaño de un píxel; b) los campos están suavizados respecto de la atmósfera real; y c) se tiene un valor cada tres horas, mientras que las imágenes GOES se obtienen cada media hora aproximadamente.

Finalmente, se corre una versión del Hidroestimador que descarta una subrutina para discriminar los clusters de nubes (en adelante, HIDRO SC). El propósito es estudiar si mejora la estimación de precipitación al no incorporarla en el algoritmo operativo, y se reducen las áreas de máxima precipitación sobrestimadas en algunos casos detectados en vigilancia operativa. La subrutina que no se utiliza en esta versión, selecciona los píxeles convectivos mediante umbrales de temperatura de brillo (valores por debajo de 241 K), y los píxeles convectivos contiguos los asigna al mismo cluster o sistema convectivo. De este modo, la subrutina devuelve tres datos: una matriz con el número de sistema al que pertenece cada píxel convectivo (asigna cero para píxeles no convectivos), un valor que indica la cantidad total de píxeles convectivos y otro valor que indica la cantidad total de sistemas convectivos encontrados en la imagen de satélite. Luego, esta información la utiliza para tener en cuenta la extensión de un sistema convectivo, y solo va tener en cuenta los píxeles convectivos que pertenezcan al mismo cluster en el cálculo de la intensidad de la precipitación. Es decir, al descartar esta subrutina en la versión HIDRO SC, se consideran todos los píxeles (convectivos o no) en el área alrededor del píxel de interés para el cálculo de la precipitación, sin exigir que a su vez pertenezcan a un mismo cluster. Esta diferencia con HIDRO ACTUAL, implica un aumento de la desviación estándar en el entorno del píxel de interés (porque las variaciones de temperatura son mayores al considerar todos los píxeles), lo que disminuye el valor de temperatura estandarizada siguiendo la ecuación (3) para un píxel de lluvia. Con lo anterior, es esperable que esta versión asigne una menor tasa de precipitación con respecto a HIDRO ACTUAL, y se reduzca la sobrestimación del área de máxima precipitación.

En la Figura 4, se presenta a modo de ejemplo, la comparación entre las distintas versiones del Hidroestimador para el mismo caso de la Figura 3. En el mapa de HIDRO CIRRUS OUT, se observan claramente los píxeles filtrados

en los que se inhibe la precipitación; y en el mapa de HIDRO SC, se reduce el área de máxima precipitación respecto al mapa de HIDRO ACTUAL en la Figura 3, en acuerdo con la discusión previa.

## 2.2. Datos de la red de estaciones

Este trabajo cuenta con las observaciones de precipitación acumulada en 24 horas de la red de estaciones pluviométricas disponibles en tiempo operativo. Esta red está compuesta por las observaciones del SMN, y la información proveniente de los países vecinos a través del Sistema de Telecomunicación Global. Actualmente, se dispone de aproximadamente 210 estaciones diarias sobre el sur de Sudamérica, que se pueden observar en la Figura 5. La validación cada 24 horas se llevó a cabo sobre el periodo de 1 año, entre el 1 de febrero de 2014 y el 31 de enero de 2015, y solo se consideraron los pares de datos disponibles de estimación-observación para los cálculos estadísticos. La elección del periodo de estudio, está determinada por el mes de comienzo de las versiones de prueba en febrero de 2014. Los datos observados en superficie, se comparan con el punto más cercano correspondiente a la retícula del Hidroestimador.

## 2.3. Metodología para la validación

Para realizar la evaluación y comparación de las versiones del Hidroestimador, se calcularon diferentes estadísticos en forma puntual y considerando la red completa de estaciones descripta previamente, utilizando los datos cada 24 horas.

Los estadísticos clásicos que se utilizaron son: la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), que proporciona una medida del valor medio de los errores de la estimación, el sesgo (BIAS), que representa el error sistemático de la misma y el coeficiente de correlación (CORR), que representa el grado de asociación lineal entre la estimación y las observaciones. Las fórmulas que corresponden a estos estadísticos son las

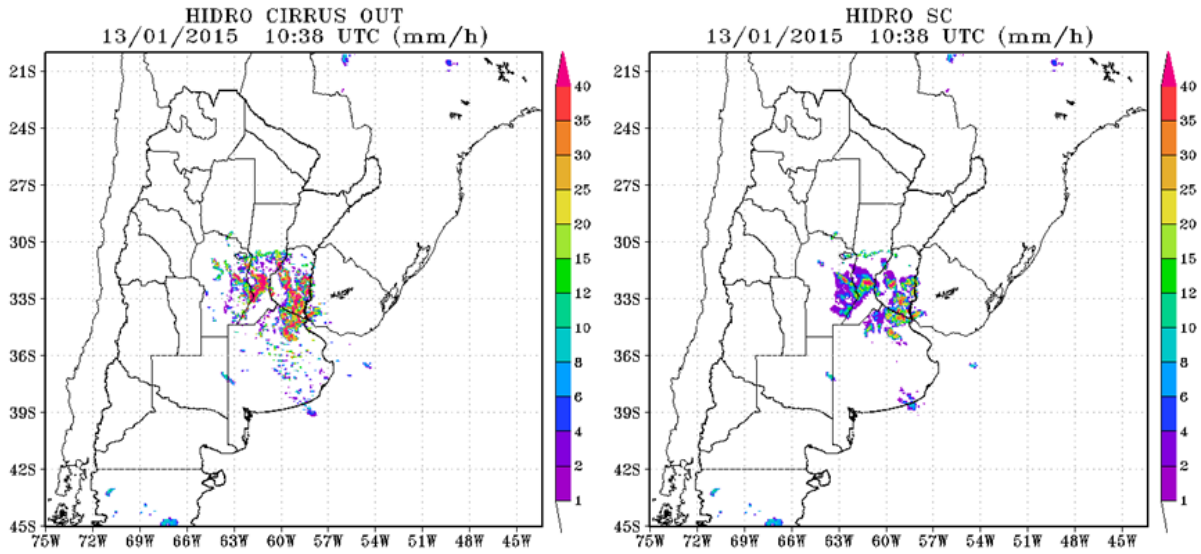


Figura 4: Mapa de precipitación instantánea de HIDRO CIRRUS OUT (panel izquierdo), e HIDRO SC (panel derecho), correspondiente a las 10:38 UTC del día 13 de enero de 2015, para ser comparados con el mapa de precipitación instantánea de HIDRO ACTUAL en la Figura 3.

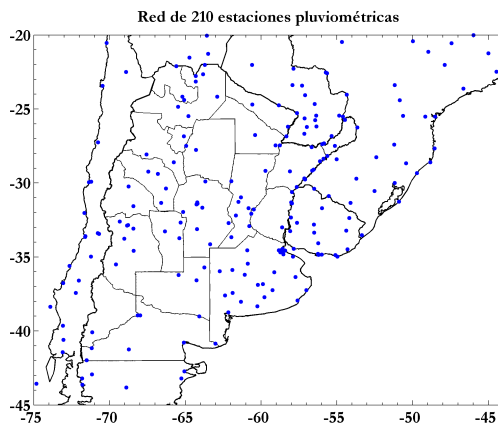


Figura 5: Red de estaciones pluviométricas sobre el sur de Sudamérica, disponibles en tiempo operativo en el SMN.

siguientes:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_e - P_o)^2}{N}} \quad (5)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (P_e - P_o)}{N} \quad (6)$$

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^N (P_e - \bar{P}_e) (P_o - \bar{P}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_e - \bar{P}_e)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_o - \bar{P}_o)^2}} \quad (7)$$

Donde,  $P_e$  y  $P_o$  son la precipitación estimada y observada respectivamente, el guion representa el valor medio, y  $N$  es la suma de los puntos de retícula considerados en el periodo de análisis.

Por otro lado, se calcularon estadísticos categóricos que miden la correspondencia entre la ocurrencia de eventos de precipitación estimada y observada. Se consideraron eventos de lluvia por debajo o sobre los siguientes umbrales: 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 20, 30 y 50 mm, seleccionados siguiendo distintos trabajos de referencia (Vila et al., 2009; Ruiz et al., 2009; Salio et al., 2015); y se clasificó cada estación dentro de una de las siguientes categorías: acierto (A) que corresponde a la precipitación observada y estimada por encima del umbral; sorpresa (S) que corresponde a la precipitación observada por encima del umbral y estimada por debajo; y falsa alarma (F) que corresponde a la precipitación

estimada por encima del umbral y observada por debajo.

Los índices que se incluyeron y que combinan esta información para una correcta validación son: El Bias Score (BIASS), que es la relación entre la cantidad de eventos de precipitación estimada y la cantidad de eventos de precipitación observada, con un rango de valores desde 0 a infinito y un valor óptimo igual a 1. El Equitable Threat Score (ETS), que es la fracción de precipitación correctamente estimada considerando el número de aciertos aleatorios, con un rango de valores desde -1/3 a 1 y un valor igual a 1 corresponde a una estimación perfecta. La probabilidad de detección (POD), que es la relación entre el número de aciertos y la cantidad de eventos de precipitación observada, con un rango de valores de 0 a 1 y un valor óptimo igual a 1. Las falsas alarmas (FAR), que como su nombre lo indica, es la relación entre el número de falsas alarmas y la cantidad de eventos de precipitación estimada, con un rango de valores de 0 a 1 y un valor óptimo igual a 0. Estos estadísticos se definen con las siguientes fórmulas:

$$BIASS = \frac{A + F}{A + S} \quad (8)$$

$$ETS = \frac{A - \frac{(A + S)(A + F)}{N}}{A + S + F - \frac{(A + S)(A + F)}{N}} \quad (9)$$

$$POD = \frac{A}{A + S} \quad (10)$$

$$FAR = \frac{F}{A + F} \quad (11)$$

Para analizar los resultados, se graficó la distribución espacial del BIAS, los diagramas de dispersión, los diagramas de los estadísticos categóricos en función de los umbrales de precipitación, las distribuciones de probabilidad del volumen de precipitación, conocidas como PDFs volumétricas (Amitai et al., 2011), y se dispuso de los valores totales obtenidos para los diferentes estadísticos.

Las PDFs volumétricas son distribuciones de probabilidad que subdividen la tasa de precipitación en intervalos en escala dBR,

y consideran la contribución relativa de los mismos al volumen total de precipitación. Se definen como la suma de las tasas de precipitación para un dado intervalo en escala dBR ( $dBR = 10 \log(R/1 \text{ mmdía}^{-1})$ ;  $[R] = [\text{mmdía}^{-1}]$ ) dividido por la suma total de las tasas de precipitación:

$$PDF(R_i) = \frac{\int_{R_i-0,5}^{R_i+0,5} RP(R) dR}{\int_0^{\infty} RP(R) dR} \quad (12)$$

En esta fórmula, R representa la tasa de precipitación en mmdía<sup>-1</sup> y P es la probabilidad de precipitación en el intervalo i. La ventaja que tienen respecto a las PDFs de ocurrencia, es que son menos sensibles a las limitaciones en la detección de precipitación débil (asociada a una pequeña fracción de la precipitación total), y más recomendables para una comparación entre las observaciones de superficie y las estimaciones derivadas de distintos algoritmos e instrumentos, con un límite de detección diferente (Amitai et al., 2011).

### 3. RESULTADOS

El resultado de la validación diaria de HIDRO ACTUAL para el periodo de un año, se muestra en la Figura 6. En los paneles superiores, se encuentra la tasa diaria de precipitación y el BIAS teniendo en cuenta el periodo entre el 01/02/2014 y 31/01/2015 en las estaciones disponibles. Asimismo, se incluye el diagrama de dispersión y la PDF volumétrica en los paneles inferiores correspondientes también al periodo completo, con el objetivo de reunir la información necesaria para una correcta evaluación de esta estimación. Los resultados de los estadísticos para todo el año en el panel inferior central, cuantifican los errores diarios de esta herramienta de trabajo y se analizan en más detalle en la Tabla I y la Figura 10 junto con las otras versiones del Hidroestimador. Un valor agregado en el panel inferior central de la Figura 6, es el valor promedio total de precipitación y los valores



N=73104	RMSE	BIAS	CORR
<b>HIDRO ACTUAL</b>	12.11	0.47	0.53
<b>HIDRO CIRRUS OUT</b>	10.84	-1.08	0.48
<b>HIDRO SC</b>	10.45	-0.70	0.52

*Tabla I:* Estadísticos totales para las distintas versiones del Hidroestimador, sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual 01/02/2014-31/01/2015.

máximos de precipitación para las observaciones y la estimación. En ambos casos, estos valores muestran a HIDRO ACTUAL por encima de los valores observados. Además, se incluye el total de puntos disponibles en el área durante el año completo de validación. De este modo, esta figura puede ponerse a futuro a disposición de diferentes usuarios interesados en el funcionamiento del Hidroestimador.

El BIAS de la Figura 6, presenta una mayor cantidad de puntos con valores cercanos a cero en los que el Hidroestimador se acerca más a la precipitación diaria, pero en las áreas del noroeste y centro este de Argentina, los valores altos positivos de BIAS remarcan una sobrestimación de este producto. En esta última región, se encuentran las principales diferencias con la distribución del BIAS de las versiones de prueba (Figura 7). La versión HIDRO SC logra reducir los valores positivos que presenta HIDRO ACTUAL, mientras que la versión HIDRO CIRRUS OUT obtiene una mayoría de puntos con valores negativos de BIAS al filtrar las nubes cirrus. En este último algoritmo, surge la necesidad de sumar nuevos cálculos que eviten ignorar algunos eventos de precipitación más intensa por debajo de la nubosidad cirriforme.

En el diagrama de dispersión de la Figura 6, si bien se marca una gran cantidad de puntos en los cuales la observación diaria es subestimada, se observa la presencia de varios valores extremos del Hidroestimador que sobrestiman considerablemente las observaciones en superficie. Este análisis, concuerda con la gran

dispersión de los puntos a lo largo del año, y un valor del coeficiente de correlación lineal igual a 0.53.

En la PDF de la Figura 6, se muestra la relación entre la precipitación total estimada y observada sobre la región, que al ser mayor a uno (1.14) ratifica que domina una sobrestimación de la precipitación en el periodo de análisis. Por otro lado, la curva del Hidroestimador indica el porcentaje de la precipitación estimada total que es explicado por cada intervalo de lluvia (volumen relativo de precipitación) en escala dBR, y del mismo modo en forma de barras en el caso de la precipitación observada. Si bien cada intervalo del eje X es de 1 dBR, en acuerdo con la ecuación (12), en las PDFs se indica el equivalente en mm/día de -10, 0, 10, 20 y 30 dBR (0.1, 1, 10, 100 y 1000 mm/día respectivamente), para relacionar mejor los porcentajes con el tipo de evento de precipitación. El resultado indica una mayor contribución por parte de umbrales en torno a los 50 mm de precipitación diaria, como se observa en el máximo de ambas distribuciones. A su vez, se observa una correspondencia entre ambas distribuciones con un leve corrimiento del Hidroestimador hacia los umbrales más altos. Es decir, que la estimación presenta una mayor contribución a la precipitación total en umbrales más altos, al compararlo con la distribución observada.

La Tabla I, resume los estadísticos totales para cada versión del Hidroestimador teniendo en cuenta el total de puntos disponibles en el año para la validación (N). La versión actual, presenta mejores resultados en el BIAS y el CORR en comparación con el resto. Las versiones de prueba, se diferencian en el grado de subestimación de la precipitación observada, que es más importante en el caso de HIDRO CIRRUS OUT con un valor del BIAS de -1.08. Sin embargo, obtienen mejores resultados en cuanto al RMSE que tiene el valor más bajo de 10.45 en el caso de HIDRO SC.

La Figura 8, presenta las series mensuales de precipitación, BIAS, RMSE y CORR

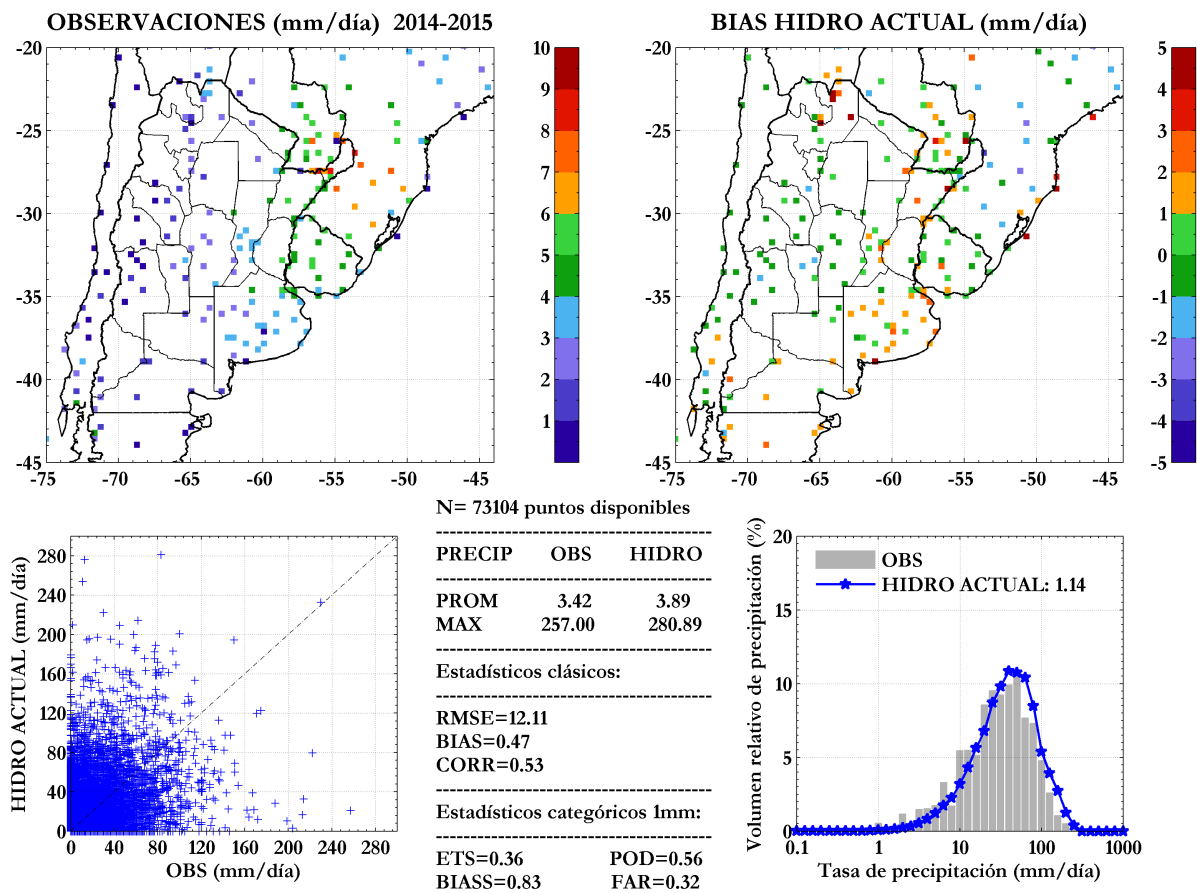


Figura 6: Validación diaria de HIDRO ACTUAL para el periodo anual 01/02/2014-31/01/2015: Tasa media de precipitación acumulada en 24 horas (panel superior izquierdo), distribución del BIAS (panel superior derecho), diagrama de dispersión (panel inferior izquierdo), PDF volumétrica (panel inferior derecho) y estadísticos totales (panel inferior central).

para comparar las distintas versiones del Hidroestimador sobre la región durante el periodo anual entre febrero de 2014 y enero de 2015. En el caso de la serie de precipitación, se calculó para cada mes, la suma total de precipitación acumulada diaria en los puntos disponibles del sur de Sudamérica, para los datos observados y las distintas versiones del Hidroestimador.

A partir de estas series, se busca estudiar el desempeño de cada versión del Hidroestimador, y analizar si algún producto se aparta favorablemente del funcionamiento de la versión actual. Además, se observan los meses que conducen a valores más altos de error en estas estimaciones, como son enero, abril y

diciembre con valores máximos de RMSE para HIDRO ACTUAL, y los meses que obtienen mejores resultados en los estadísticos asociados al invierno, principalmente el mes de agosto. Si bien, los meses de febrero y marzo presentan una subestimación por parte de todas las estimaciones, en general, el BIAS resulta positivo en la mayoría de los meses para la versión operativa y negativo para las versiones de prueba, sin evidencia de una mejora sustancial por parte de las mismas.

La Figura 9, muestra la comparación de las PDFs volumétricas. En este caso, sumado al análisis de la Figura 6 para HIDRO ACTUAL, se ratifica la subestimación por parte de las versiones de prueba. Este resultado se obtiene, no

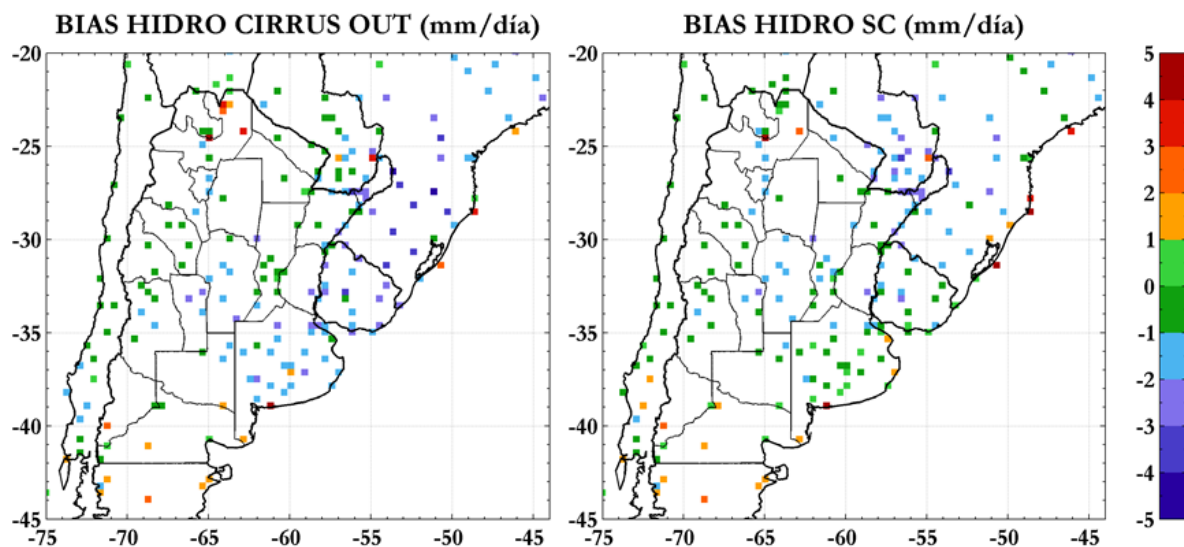


Figura 7: Distribución del BIAS para las versiones HIDRO CIRRUS OUT (panel izquierdo), e HIDRO SC (panel derecho), sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual 01/02/2014-31/01/2015.

solo de la relación de precipitación total en el área entre las estimaciones y las observaciones que es menor a uno, sino a partir del corrimiento de las distribuciones de prueba hacia los umbrales más bajos. De esta manera, y con mayor claridad en el caso de HIDRO CIRRUS OUT, que tiene una relación total de 0.68, se observa que los umbrales medios y bajos de precipitación contribuyen en mayor medida al volumen total de precipitación comparado con la distribución de precipitación observada.

En la Figura 10, se evalúa la calidad de las distintas estimaciones a partir de los índices BIASS, ETS, POD y FAR en función de los umbrales seleccionados y para todo el periodo anual de los datos disponibles. En el BIASS, se muestra como HIDRO ACTUAL tiene un comportamiento diferenciado según el tipo de evento de precipitación diaria. En acuerdo con el análisis previo, se confirma una limitación en los eventos extremos con valores superiores a uno que sería óptimo para este estadístico y marca una sobrestimación del algoritmo en los umbrales más altos. Si bien, se corrige en el caso de las versiones de prueba, permanece un grado de subestimación constante en todos los umbrales de precipitación en forma similar a los resultados obtenidos

por Salio et al. (2015). El ETS y el POD, permiten observar claramente que la versión operativa continúa siendo más efectiva en cuanto a la detección de los eventos de precipitación y que la versión HIDRO SC presenta un comportamiento intermedio en los estadísticos categóricos. Sin embargo, las versiones de prueba reducen las falsas alarmas en los eventos extremos de precipitación. En conjunto con los resultados del resto de los estadísticos, sobresale la importancia de analizar distintos índices, que proporcionen información combinada para una correcta validación y determinación de las limitaciones de estos productos.

Salio et al. (2015), realizaron una validación diaria de estimaciones de precipitación por satélite disponibles sobre el sur de Sudamérica, utilizando una red de observaciones de alta resolución espacial y un periodo de 2 años de datos. En dicho trabajo, se incluyó la evaluación de una versión similar del Hidroestimador proveniente del Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Si bien los resultados coinciden, en cuanto a una subestimación de la precipitación por parte de este producto al sur de 20° S en los umbrales medios y bajos, la PDF volumétrica no mostró un corrimiento hacia los

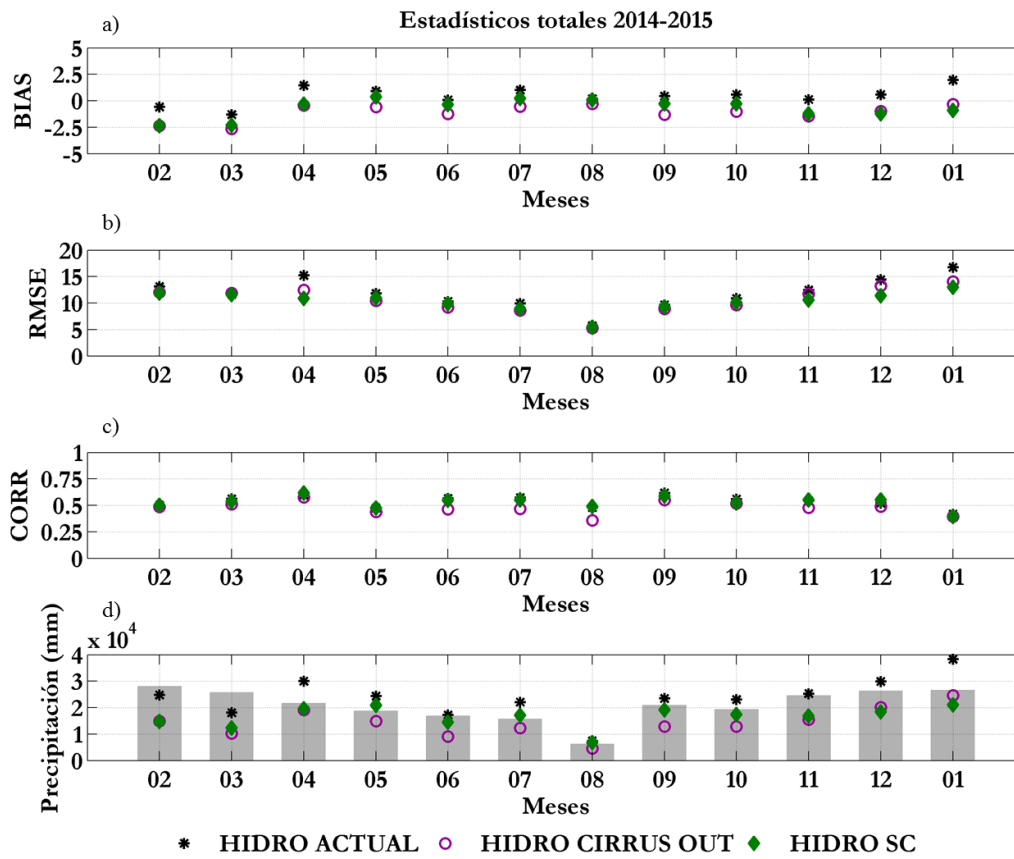


Figura 8: Series mensuales de BIAS (a), RMSE (b), CORR (c) y Precipitación (d) para las distintas versiones del Hidroestimador, sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual. Los meses corresponden del 02 de 2014 al 01 de 2015. Las barras grises en (d), indican la suma total de precipitación diaria observada en los puntos disponibles.

umbrales más altos como muestra en este trabajo la versión operativa del Hidroestimador en el SMN.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se expone la técnica Hidroestimador para estimar la precipitación por satélite, sus ventajas y limitaciones. A su vez, se describe el estado actual de este producto en el SMN, y las actividades en torno a la evaluación y a obtener mejoras en su desempeño. La validación diaria para un año completo de datos, muestra que el Hidroestimador tiende a sobrestimar la precipitación en las áreas, meses y umbrales asociados a un desarrollo

de la precipitación más intensa. Por otro lado, se observa que el método tiende a subestimar la precipitación en los eventos más débiles, coincidiendo en este punto con lo que mostraron Salio et al. (2015).

Las versiones de prueba, si bien disminuyen el valor medio del error, las falsas alarmas, y algunos casos extremos de estimación de precipitación por parte de HIDRO ACTUAL, en general, obtienen un marcado nivel de subestimación y valores desfavorables en los índices. Es necesario evaluar la estabilidad de esta condición, a fin de determinar si este desvío es sistemático.

De este modo, se confirman las limitaciones de

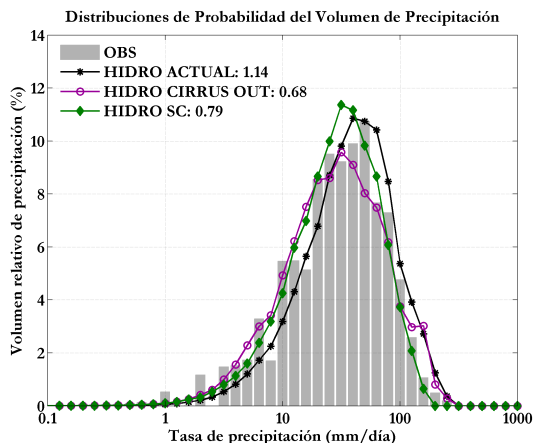


Figura 9: PDFs volumétricas para las distintas versiones del Hidroestimador y las observaciones, sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual 01/02/2014-31/01/2015.

este producto en cuanto a estimar la precipitación en presencia de nubes cirrus y nimbostratus como se explicó anteriormente. Las nubes cirrus pueden ser detectadas y filtradas con una metodología efectiva, pero no se sabe ni tiene en cuenta si se está desarrollando precipitación por debajo de las mismas. A su vez, la precipitación asociada a nubes más cálidas, es un desafío vigente aún para las estimaciones de precipitación de múltiples sensores.

Además, el sur de Sudamérica presenta diferentes regímenes de precipitación y es importante destacar la necesidad de realizar una evaluación regional, dado que existen diferencias en el desempeño de la estimación según la región, pero actualmente, no se cuenta con redes de observación de mayor densidad en superficie en tiempos operativos, que permitan llevar a cabo esta tarea.

A futuro, y con la finalidad de mejorar esta estimación de precipitación, se espera generar diferentes versiones de prueba enmarcadas en los siguientes temas:

- Aplicación de una técnica multispectral que aproveche óptimamente la información del resto de los canales del satélite.

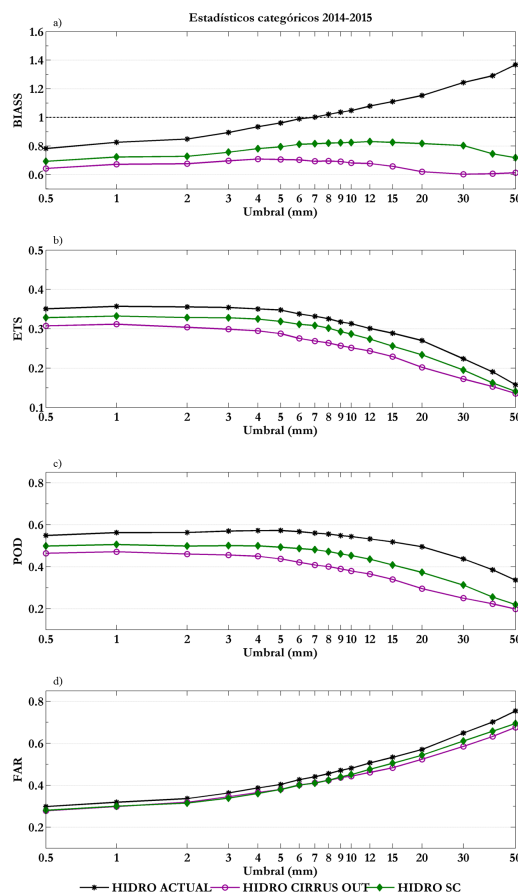


Figura 10: BIAS (a), ETS (b), POD (c) y FAR (d), para las distintas versiones del Hidroestimador, sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual 01/02/2014-31/01/2015.

- Estudiar la sensibilidad del Hidroestimador a la incorporación de datos del modelo WRF en alta resolución.
- Probar un ajuste en el valor de la precipitación estimada a partir de curvas de calibración obtenidas luego de un tiempo razonable de evaluación del Hidroestimador, o bien evaluar la posibilidad de aplicar un esquema combinado con datos de superficie para mejorar este producto.

Agradecimientos: La realización del presente trabajo fue parcialmente financiada por los proyectos PIDDEF47-2010, PIDDEF16/2014, PICT 2008-215, PICT 2013-1299 y UBACyT

20020130100618BA.

## REFERENCIAS

- Amitai, E., Petersen, W., Llorca, X., and Vasiloff, S., 2011. Multi-Platform Comparisons of Rain Intensity for Extreme Precipitation Events. *IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing*, 50, págs. 675–686.
- Barrera, D.F., Marcuzzi, E., y Naumann, G., 2001. Desarrollo del software de un Sistema Operativo de estimación de precipitación a partir de imágenes GOES. IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.
- Barrera, D.F., Zucarelli, G., y Ceirano, E., 2003. Una técnica satelital de estimación de lluvia como herramienta de pronóstico hidrológico. Aplicación a la tormenta del 22 al 25 de abril de 2003 sobre Santa Fe y Entre Ríos. Preprints, XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba, Brasil.
- Barrera, D.F., 2005a. Precipitation estimation with the hydro-estimator technique: its validation against rain gauge observations. VII Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences. Foz do Iguazú, Brasil.
- Barrera, D.F., 2005b. Análisis comparativo de los mapas de precipitación obtenidos a partir de datos pluviométricos y de estimaciones satelitales. IX Congreso Argentino de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.
- Barrera, D.F., 2007. The generation of synthetic brightness temperature images to improve rainfall estimation from GOES satellite. Predictions in Ungauged Basins: PUB Kick-off. IAHS Publication 309, 13, 113-120. Daniel Schertzer, Pierre Hubert, Sergio Koide & Kuni Takeuchi Editores.
- Hobouchian, M.P., García Skabar, Y., Barrera, D., Vila D., y Salio, P., 2014. Estimación de precipitación por satélite aplicando la técnica Hidroestimador en su versión para Sudamérica. 2do Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Buenos Aires, Argentina.
- Joyce, R., Janowiak, J., and Huffman, G., 2001. Latitudinally and Seasonally Dependent Zenith-Angle Corrections for Geostationary Satellite IR Brightness Temperatures. *J. Appl. Meteorol.*, 40, 4, págs. 689–703.
- Lienesch, J.H., and Wark, D.Q., 1967. Infrared Limb Darkening of the Earth From Statistical Analysis of TIROS Data. *J. Appl. Meteorol.*, 6, 4, págs. 674-682.
- Rozumalski, R.A., 2000. A quantitative assessment of the NESDIS Auto-Estimator. *Wea. and Forecast.*, 15, págs. 397-415.
- Ruiz, J.J., 2009. Evaluation of different methodologies to calibrate CMORPH over Sudamerica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24, 4, págs. 473–488.
- Saldanha, C.B., Rolim da Paz, A., Allasia, D., Collischonn, W., y Barrera, D.F., 2007. Avaliação da chuva do Hidroestimador para modelagem hidrológica na região da bacia do Rio Grande. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. San Pablo, Brasil.
- Salio, P., Hobouchian, M.P., García Skabar, Y., y Vila, D., 2015. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over Southern South America using a dense rain gauge network. 6thWIPWG Special Issue Atmospheric Research., Vol. 163, págs. 146–161.
- Scofield, R.A., 1987. The NESDIS operational convective precipitation estimation technique. *Mon. Wea. Rev.*, 115, págs. 1773-1792.
- Scofield, R.A., 2001. Comments on “A quantitative assessment of the NESDIS Auto-Estimator”. *Wea. and Forecast.*, 16, págs 277-278.
- Scofield, R.A., and Kuligowski, R.J., 2003. Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme-precipitation events. *Mon. Wea. Rev.*, 18, págs. 1037-1051.
- Suaya, M., 2004. Primera evaluación objetiva de los pronósticos operativos de los modelos ETA-SMN y GFS-NCEP durante el año 2003. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

- Vicente, G., Scofield, R.A., and Menzel, W.P., 1998. The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Amer. Meteor. Soc.*, 79, págs. 1883–1898.
- Vicente, G., Davenport J. C., and Scofield, R. A., 2002. The role of orographic and paralax corrections on real time high resolution satellite rainfall rate distribution. *Int. J. of Remote Sensing*, 23, 2, págs. 221-230.
- Vila, D.A., De Goncalves, L., Toll, D.L. y Rozante, J.R., 2009. Statistical evaluation of combined daily gauge observations and rainfall satellite estimates over continental South America. *Journal of Hydrometeorology*, 10, págs. 533–543.
- Vila, D.A., Scofield, R.A., and Davenport, J., 2001. Satellite rainfall estimation over South America: Evaluation of two major events. *AMS 16th Conference on Hydrology*, págs. 33-36.

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.





**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ESPACIO TEMPORAL ENTRE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR EL SATÉLITE TRMM (3B42RT) Y EL CAUDAL MEDIO DIARIO EN LA CUENCA DEL RÍO IGUAZÚ**Carolina G. Cerrudo<sup>1,2</sup>, Gonzalo M. Díaz<sup>1,2</sup>, Sabrina H. Juárez<sup>1</sup>, Lorena J. Ferreira<sup>1</sup><sup>1</sup>Departamento de Hidrometeorología, Servicio Meteorológico Nacional<sup>2</sup>Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. FCEyN UBA

(Manuscrito recibido el 10 de diciembre de 2015, en su versión final el 5 de mayo de 2016)

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es analizar la relación espacio temporal entre la precipitación diaria estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT en la cuenca del río Iguazú y el caudal medio diario en los puertos Iguazú y Andresito durante el período 2001 - 2013. Se realizan correlaciones teniendo en cuenta la precipitación diaria areal en la cuenca, así como también considerando los valores de precipitación estimados en cada punto de retículo. Asimismo se realiza un estudio para los eventos de crecida del río Iguazú ocurridos en junio de 2013 y junio de 2014, con el objetivo de analizar el impacto de la precipitación estimada sobre el caudal medio diario en el puerto Iguazú. Los resultados obtenidos a partir del análisis realizado teniendo en cuenta la precipitación areal muestran para el puerto Iguazú que la lluvia estimada para un día tiene mayor influencia en el caudal del río entre 5 a 7 días posteriores a la ocurrencia del evento de precipitación. Mientras que para Andresito el impacto tiene lugar entre 2 y 3 días después de ocurrido el evento de precipitación. En ambos casos se observa que el impacto observado en la tasa de cambio del caudal es más inmediato. Respecto de la relación espacio temporal se observa que el valor de caudal medio diario del puerto Iguazú se encuentra mayormente influenciado por la precipitación estimada ocurrida en la cuenca media y alta, entre 5 y 7 días después de ocurridos los eventos de precipitación. Por su parte, para el puerto Andresito las mayores correlaciones se encuentran entre 2 y 4 días posteriores al evento de precipitación en casi toda la extensión de la cuenca, con máximos en la cuenca alta y media. A partir del análisis de los dos eventos de crecidas analizados se obtienen resultados coherentes con lo mencionado anteriormente.

*Palabras clave: precipitación estimada, caudal medio diario, Cuenca del río Iguazú*

**ANALYSIS OF TEMPORAL AND SPATIAL RELATIONSHIP BETWEEN ESTIMATED PRECIPITATION FROM TRMM SATELLITE (3B42RT) AND DAILY AVERAGE STREAMFLOW IN THE IGUAZÚ RIVER BASIN****ABSTRACT**

The aim of this study is to analyse the spatial-temporal relationship between daily precipitation estimated by TRMM satellite Version 3B42RT in Iguazu River Basin and daily average streamflow in the Iguazú and Andresito Ports during the period

2001- 2013. Correlations are made using areal daily precipitation estimated in the whole basin, as well as using precipitation estimated in each grid point. In addition, two case studies of Iguazú River floods are analysed, one occurred in June 2013 and the other one in June 2014. Results obtained from the areal precipitation analysis for Iguazú Port show that daily estimated precipitation has better influence in the river streamflow about 5 to 7 days after the precipitation event occurrence, whereas that in Andresito Port the most impact takes place between 2 and 3 days after the precipitation event occurrence. In both cases the impact observed in the streamflow rate change is earlier. In respect of the spatial – temporal relationship, it is found that the daily average streamflow in Iguazú Port is mostly influenced by the estimated precipitation occurred in the middle and upper basin, between 5 and 7 days after precipitation events occurred. On the other hand, the highest correlations that are found in Andresito Port are between 2 and 4 days after the precipitation event occurrence in all the basin area, with maximum values in the upper and middle basin. Moreover, the analysis of the two particular case studies of floods show consistent results compared with the above mentioned.

*Keywords: estimated precipitation, daily average streamflow, Iguazú river basin*

## 1. INTRODUCCIÓN

La precipitación es una de las variables meteorológicas más influyentes en el sistema hidrológico y juega un papel fundamental en distintas relaciones físicas como es el balance de agua (Seneviratne y otros, 2010). Es una de las componentes más importantes y determinantes en los eventos hidrológicos de fuerte impacto como son las inundaciones por crecidas de ríos. Es un parámetro de entrada fundamental para los sistemas hidrológicos (cuencas y/o subcuencas hídricas), influenciando de forma local o remota en el caudal medio diario de un punto de cierre específico de la cuenca hídrica. La disponibilidad de un registro continuo de precipitación, así como también del caudal, es relevante para determinar el comportamiento de un sistema hidrológico. Conocer la relación entre ambas variables es una tarea de interés, ya que permite determinar el grado de impacto de los eventos precipitantes sobre el sistema hidrológico de influencia.

En Argentina, las poblaciones asentadas en las regiones ribereñas son las más vulnerables ante la ocurrencia de este tipo de eventos (Latrubesse y Brea, 2010). El impacto social y económico que tienen en la sociedad es muy alto (Chamorro, 2006), por ello es de importancia su continuo

estudio, monitoreo y predicción para atenuar sus efectos.

Para determinar la precipitación areal en una cuenca se pueden emplear redes de pluviómetros instalados en superficie. En muchas situaciones estas redes no tienen suficiente cobertura espacial o no funcionan en los tiempos operativos requeridos para la determinación de situaciones de desastres. Si bien hay muchas iniciativas tendientes a mejorar este aspecto, una alternativa viable es la utilización de estimaciones satelitales de precipitación. Uno de los productos más utilizados es el de la misión TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, por sus siglas en inglés), el cual es generado a partir de información extraída de las bandas visible, infrarrojo, microondas pasivo y del radar a bordo del satélite. En la actualidad existen numerosos trabajos que emplean estimaciones satelitales de precipitación en lugar de observaciones de superficie debido al beneficio de su gran cobertura espacial. Su y otros (2008) evalúan el desempeño de las estimaciones satelitales de precipitación en la Cuenca del Plata, con el objetivo de ser utilizadas en el proceso de asimilación de datos en modelos hidrológicos. Para un empleo adecuado de dicha información, es muy importante la verificación y evaluación del

error. En este sentido, análisis sobre los errores en las estimaciones satelitales de precipitación se pueden encontrar en trabajos como los de Salio y otros (2015), Cerrudo y otros (2013) y Hobouchian y otros (2012).

Existen en la bibliografía estudios que analizan la relación entre el caudal y la precipitación a nivel mensual y/o anual para distintas cuencas en Argentina, como el caso de Romero y González (2014) para las cuencas de los ríos Limay, Neuquén, Negro y Colorado en la región norte de la Patagonia. También, Camilloni y Barros (2003) para la cuenca del Alto Paraná, muestran a nivel mensual, la existencia de una fuerte relación entre las precipitaciones generadas en esa sección de la cuenca y los caudales ocurridos en la ciudad de Corrientes. Un 40 % del aporte de agua en Corrientes es proveniente del Alto Paraná y en menor medida del río Paraguay. Asimismo, también concluyen que las mayores crecidas del río Paraná en esa sección están asociadas principalmente a las fases Niño del ENSO (El Niño-Southern Oscillation, por sus siglas en inglés), debido al aumento de las precipitaciones en la región por este efecto. Por otra parte, Barros y otros (2004) presentan un análisis similar para la cuenca del río Paraguay, aunque encuentran en este caso que la señal del Niño no es determinante para los eventos de crecidas de dicha cuenca. A pesar de que la mitad de los casos analizados muestran anomalías positivas de caudal durante la fase del Niño, hay otro 50 % que se produjo debido a otros modos de oscilación. En este sentido, se destaca la importancia de estudiar la relación entre los distintos modos de oscilación en la atmósfera-océano y la ocurrencia de precipitaciones.

Todos los estudios mencionados anteriormente analizan la relación entre caudal y precipitación en escalas mensuales. Debido a la necesidad de profundizar la relación entre caudal y precipitación en escala diaria, en este trabajo se analiza la relación espacio temporal entre la precipitación diaria estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT en la cuenca del río Iguazú y el caudal medio diario en los puertos

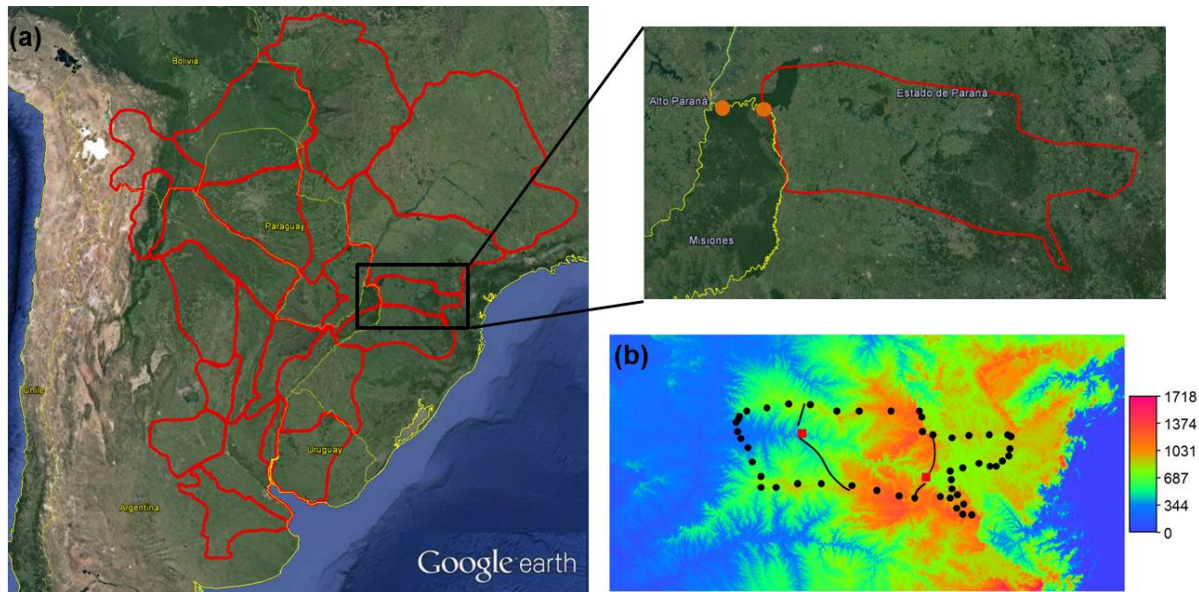
Iguazú y Andresito. Asimismo, con el objetivo de afirmar los resultados obtenidos, se diagnostican los casos de crecidas ocurridos en el puerto Iguazú en junio 2013 y junio 2014.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

La región de estudio es la correspondiente a la subcuenca hídrica de río Iguazú, perteneciente al sistema hidrológico de la Cuenca del Plata (Figura 1). La mayor parte de la cuenca del Iguazú se encuentra en el territorio de Brasil. El río Iguazú nace en el cordón montañoso brasileño denominado Serra do Mar en el estado de Paraná, donde comienza su recorrido de aproximadamente 1300 kilómetros hasta su desembocadura en el río Paraná.

Esta subcuenca pertenece a una de las regiones más lluviosas de la Cuenca del Plata debido a que recibe precipitaciones a lo largo de todo el año (en promedio, 5 mm/día aproximadamente). La Figura 1 (b) muestra el modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) con una resolución espacial de 1 km de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, por sus siglas en inglés). A partir de este, puede apreciarse que gran parte de la cuenca media (definida entre Salto Osorio y Uniao da Vitoria, indicados con un punto rojo en Figura 1 (b)) se encuentra aproximadamente 500 mts más elevados sobre el nivel del mar que la cuenca baja. Las secciones de la cuenca consideradas en el trabajo (baja, media y alta) son las aplicadas por el Instituto Nacional del Agua (INA) en función de la distribución de embalses que se encuentran en la región (Goniadzki y Borús, 2015).

La delimitación de la cuenca del río Iguazú utilizada (Figura 1) fue brindada por el INA. La misma se presenta con el punto de cierre en puerto Andresito, donde es más representativo el funcionamiento de la cuenca como tal, es decir, que el río tiene un comportamiento fluvial propio e independiente del Paraná. Mientras que los niveles del río registrados en puerto Iguazú están influenciados por el río Paraná. Sin embargo, teniendo conocimiento de ese efecto,



*Figura 1:* Región de estudio: (a) Sistema hidrológico de la Cuenca del Plata junto con la subcuenca del río Iguazú. En naranja se indica la posición del puerto Iguazú (oeste) y puerto Andresito (este). (b) DEM de la región de la cuenca Iguazú con el límite aproximado de la cuenca (puntos negros). Los puntos rojos y líneas negras llenas indican aproximadamente los límites de cada una de las secciones de la cuenca Iguazú. Desde la región este de la cuenca hasta el primer punto rojo (Uniao da Vitoria) se define la cuenca alta, desde esta ubicación hasta el siguiente punto rojo (Salto Osorio) se encuentra la cuenca media y finalmente, entre esta locación y la zona oeste se limita la cuenca baja.

en este trabajo se han utilizado los datos de caudal provenientes tanto del puerto Iguazú como Andresito, para analizar diferencias y/o similitudes en los resultados obtenidos en ambos puertos.

Los datos utilizados para el trabajo son las estimaciones de precipitación acumulada en 24 horas a partir del satélite TRMM Versión 3B42RT para la cuenca Iguazú y el caudal medio diario del puerto Iguazú ( $54^{\circ} 34' 47.5''$  O y  $25^{\circ} 35' 35.7''$  S) para el período 2001 – 2013, obtenido mediante la siguiente expresión de relación altura-caudal brindada por el INA:

$$Q = 15,1062H^2 + 534,337H + 2462 \quad (1)$$

donde Q es el caudal y H es el valor de altura registrado en el puerto. También se utilizaron los datos de caudal medio diario del puerto Andresito ( $53^{\circ} 59' 42.0''$  O y  $25^{\circ} 35' 26.0''$  S) para el período 2001 – 2013 obtenidos de la base hidrológica de la

Subsecretaría de Recursos Hídricos ([http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso\\_bd.php](http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso_bd.php)).

La decisión de utilizar la estimación de precipitación TRMM en lugar de otra se fundamenta principalmente en que la misma tiene una disponibilidad acorde a los tiempos requeridos en tareas operativas, así como también una longitud temporal mayor que permite realizar estudios estadísticos. Cabe aclarar que si bien existen versiones corregidas de las estimaciones de precipitación realizadas a partir del satélite TRMM (como ser las Versiones 6 y 7 de 3B42), en este trabajo se utiliza la salida 3B42 “RT” (Real Time, por sus siglas en inglés) debido a que es el producto utilizado en forma operativa, y disponible en tiempo real, para las actividades de monitoreo diario de la precipitación en el Servicio Meteorológico Nacional. Las características principales del satélite TRMM son: resolución espacial de  $0.25^{\circ}$

x 0.25°, resolución temporal de 3 hrs, dominio global de 50°N-50°S y disponibilidad de datos desde el año 1998.

Respecto de la calidad de las estimaciones satelitales de precipitación cabe señalar el trabajo de Salio y otros (2015), quienes evalúan el desempeño de seis estimaciones, entre ellas, TRMM Versión 3B42RT, utilizando datos diarios de precipitación para el período diciembre 2008 – noviembre 2010. Los autores encuentran para la región de interés del presente estudio una sobrestimación de la precipitación en la cuenca baja del río Iguazú, con valores de BIAS % entre +10 % y +30 %, mientras que en la cuenca alta estos valores disminuyen a -10 % y +10 %. En concordancia, en este trabajo se utilizó la información histórica de la estimación del satélite TRMM Versión 3B42RT disponible para calcular el valor del estadístico BIAS % en las estaciones del SMN (Iguazú y Bernardo de Irigoyen) pertenecientes a la cuenca del río Iguazú para el período 2001 – 2013, considerando la estimación satelital diaria en los puntos más cercanos a dichas estaciones. Dicho cálculo muestra valores acordes con los encontrados por Salio y otros (2015), entre -5 % y +5 %. Esto demuestra la importancia de conocer el error sistemático y las limitaciones de cualquier herramienta que se desee utilizar.

La metodología utilizada para el tratamiento de datos faltantes en la serie de caudales fue utilizar el promedio entre el día anterior y posterior para completar dichas carencias. La cantidad de faltantes corresponde aproximadamente a un 1 % del total de la serie. Sin embargo, en los casos en donde hubo cantidad de días sucesivos con dato faltante, se verificó que en ninguno de esos días se hubieran producido abundantes precipitaciones que pudieran haber afectado el caudal diario del puerto. En los casos particulares de junio del 2013 y 2014, también se utilizaron las observaciones pluviométricas provenientes de la red de monitoreo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para la estación Iguazú Aero.

Con el objetivo de evaluar el tiempo de respuesta

hidrológica de la cuenca a la ocurrencia de precipitación, se analizó en primer lugar la correlación desfasada temporalmente para varios días (lags) entre la precipitación areal diaria y el valor de caudal diario observado en el puerto. La precipitación areal diaria consiste en sumar los valores de precipitación para cada punto de retículo dentro de la cuenca y así obtener un único valor diario para toda el área. Este procedimiento se repitió con la serie de diferencias diarias de caudal y se realizó para los puertos Iguazú y Andresito. Se utilizó la siguiente expresión para calcular el coeficiente de correlación desfasado (Wilks, 2006):

$$rd = \frac{\sum_{i=1}^{n-d} [(x(i) - \bar{x})(y(i+d) - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-d} (x(i) - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n-d} (y(i+d) - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

donde  $n$  es la cantidad de pares de datos totales,  $d$  es el desfasaje temporal (toma valores de 0 a 16),  $x(i)$  es el valor de precipitación diario areal estimado,  $y(i+d)$  es el valor diario de caudal (o de diferencias diarias de caudal) desfasado temporalmente,  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$ , son los valores medios de la serie de precipitación diaria areal estimada y de la serie diaria de caudal (o de diferencias diarias de caudal) respectivamente.

Para evaluar la significancia de los coeficientes de correlación calculados se asumió distribución normal debido a la gran cantidad de datos utilizados. Los valores del coeficiente de correlación superiores a 0.028 y 0.037 son significativos al 95 % y 99 % respectivamente. Cabe aclarar que si bien la cantidad de datos totales cambia para cada coeficiente de correlación calculado (debido al desfasaje temporal de la serie), los valores críticos difieren en el cuarto decimal, motivo por el cual se decidió utilizar el mismo valor crítico para todos los casos.

En segundo lugar, con el objetivo de encontrar una relación espacio temporal entre la precipitación ocurrida en la cuenca del río

Iguazú y los valores de caudal diario en cada uno de los puertos, se calculó la correlación entre la precipitación diaria estimada TRMM Versión 3B42RT en cada punto de retículo contenido dentro de la cuenca del río Iguazú, y el caudal diario en los registros del puerto Iguazú y puerto Andresito. Por otra parte, para evaluar el tiempo de respuesta hidrológica de la cuenca a la ocurrencia de precipitación, se analizó la correlación desfasada temporalmente entre las variables mencionadas anteriormente en cada punto de retículo. De esta manera, se obtuvieron distintos campos de correlación desfasada a paso diario (desde lag 0 hasta lag 16).

Por último, a raíz de los resultados obtenidos, se realiza un estudio para dos eventos particulares de crecidas del río Iguazú, como fueron los ocurridos en junio de 2013 y junio de 2014, con el objetivo de corroborar el impacto de la precipitación sobre el caudal medio diario en el puerto Iguazú. Para ello se analizó la distribución espacial y temporal de la precipitación estimada y observada en relación al momento del pico de crecida en cada caso.

### 3. RESULTADOS

En primer lugar se presenta el análisis de la correlación desfasada temporalmente entre la precipitación areal diaria y el valor obtenido de caudal medio diario en el puerto, así como también con la serie de diferencias diarias de caudal para los puertos Iguazú y Andresito (Figura 2). Si bien los valores de correlación calculados resultan en su mayoría significativos al 95 % y 99 % para todos los lags (salvo algunas excepciones), se focaliza el estudio en los máximos valores de correlación obtenidos.

A partir de la Figura 2(a) para el caso del puerto Iguazú, se observan las mayores correlaciones en los lags 5, 6 y 7. Esto significa que la lluvia estimada para un día tiene mayor influencia en el caudal del río entre 5 a 7 días posteriores a la ocurrencia del evento de precipitación. A partir del día 7 el impacto de la precipitación en el caudal disminuye lentamente hasta que

a partir del día 12 se estaciona. También se observa un importante cambio entre el lag 0 (cuya correlación no resultó significativa), 1 y 2.

Al realizar la correlación entre la serie de precipitación diaria estimada y la serie de diferencias diarias de caudal (Figura 2 (c)) se observa que las mayores correlaciones ocurren en el lag 2 y 3. Esto significa que la lluvia ocurrida un día tiene mayor influencia en la tasa de cambio del caudal que registra el río Iguazú dentro de los tres días subsiguientes al evento de precipitación. Si bien este resultado no necesariamente tiene relación con un valor extremo en el caudal observado, es importante ya que tiene implicancia en el manejo de cuencas reguladas. En el caso de Andresito (Figura 2 (b) y (d)), se observa que el mayor impacto en el caudal del río tiene lugar entre 2 y 3 días después de ocurrido el evento de precipitación, mientras que el impacto observado en la tasa de cambio del caudal es más inmediato, tal como se observó para el puerto Iguazú.

A continuación se presentan los resultados de realizar el análisis espacio temporal entre la precipitación ocurrida en la cuenca del río Iguazú en cada punto de retículo y el valor de caudal diario en cada uno de los puertos.

La Figura 3 representa los campos de correlación desde lag 0 hasta lag 16 entre la precipitación estimada en los puntos de retículo del satélite TRMM pertenecientes a la cuenca del Iguazú y el caudal medio diario en el puerto Iguazú. La escala representada en la Figura 3 se define a partir del nivel de significancia al 95 % de 0.028. Las regiones en blanco indican que el coeficiente de correlación no es significativo al 95 %.

A partir de la Figura 3 se puede observar que las máximas correlaciones se dan principalmente en la mayor parte de la extensión de la cuenca media/alta en los lag 5, 6 y 7, con valores de coeficiente de correlación que se encuentran entre 0.15 y 0.20. Estos máximos se indican con un círculo rojo. Asimismo hay máximos locales absolutos que alcanzan valores de 0.19 (este

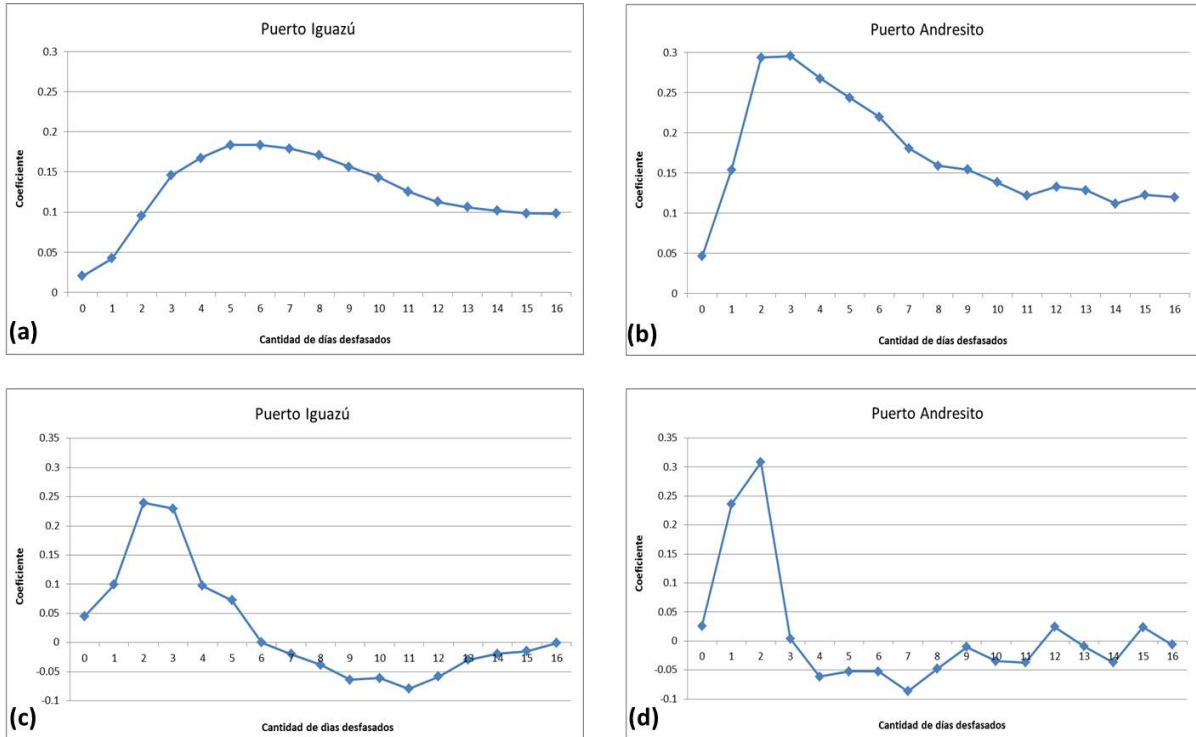
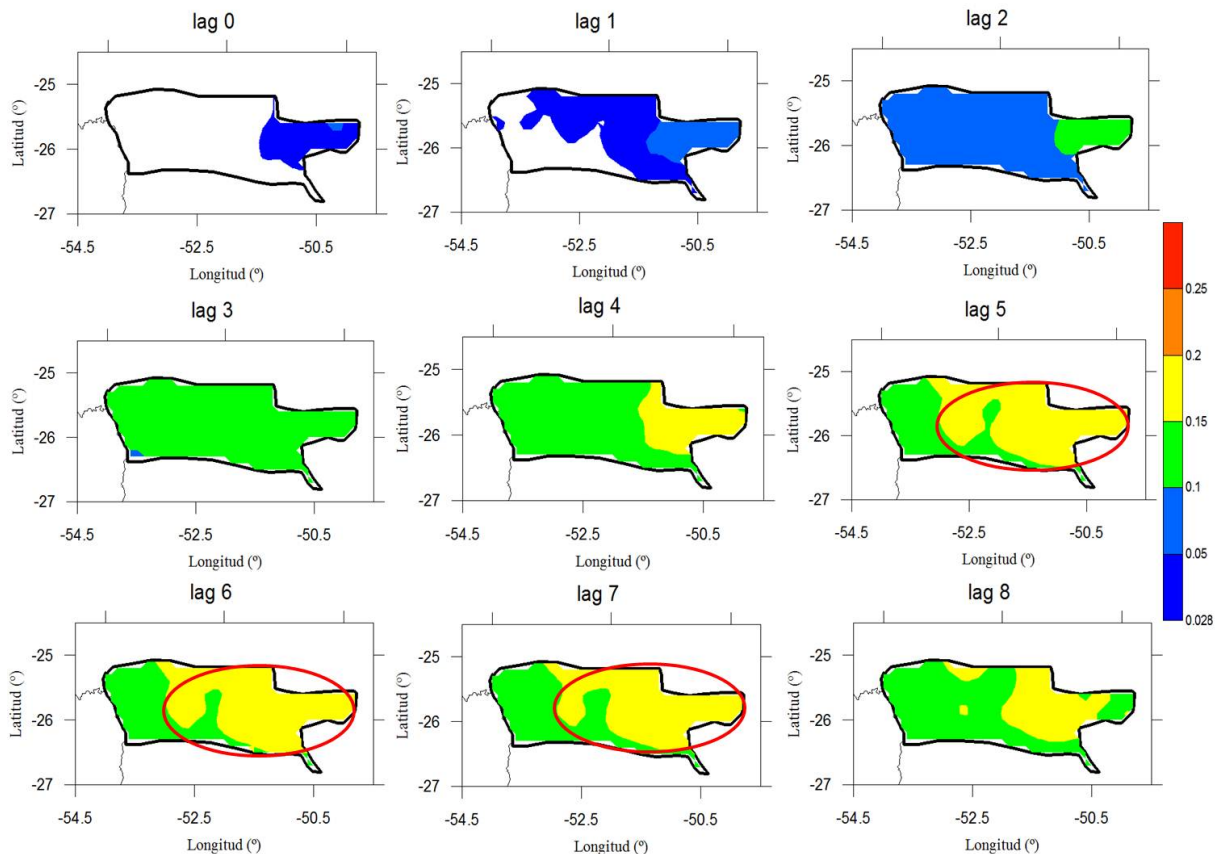


Figura 2: Coeficiente de correlación entre la serie de precipitación areal diaria estimada para la cuenca del río Iguazú y el valor diario de caudal del río para distintos lags obtenido en: a) puerto Iguazú, b) puerto Andresito. La serie desfasada corresponde a la de caudal. Coeficiente de correlación entre la serie de precipitación areal diaria estimada para la cuenca del río Iguazú y la serie de diferencia diaria de caudal del río para distintos lags obtenido en: c) puerto Iguazú, d) puerto Andresito. La serie desfasada corresponde a la de diferencia diaria de caudal.

valor no se detalla según la escala presentada en la Figura 3). Cabe mencionar que valores de correlación entre 0.15 y 0.20 se observan también en la región de la cuenca alta para los lags 4 y 8. También se observa un importante cambio entre el lag 0, 1 y 2, ya que entre el lag 0 y 2 hay un aumento del doble en la correlación espacio temporal, y en consecuencia, esta relación se convierte en significativa en toda la extensión de la cuenca. A partir del lag 11 en adelante, los valores de correlación disminuyen progresivamente de oeste a este, primero en la región de la cuenca baja, y luego en las cuencas media y alta, obteniéndose valores entre 0.05 y 0.10 en la mayor parte de la cuenca a partir del lag 14. Cabe recordar que los valores del coeficiente de correlación superiores a 0.028 y 0.037 son significativos al 95 % y 99 % respectivamente. Por lo analizado anteriormente,

se puede concluir que el caudal medio diario obtenido en el puerto Iguazú se encuentra mayormente influenciado por la precipitación estimada ocurrida en gran parte de la cuenca media/alta y entre 5 y 7 días después de ocurridos los eventos de precipitación. Sin embargo, vale destacar que las mayores correlaciones comienzan a aparecer a partir del lag 2, momento en el cual los valores se duplican con respecto al lag 0. Estos resultados son consistentes a los observados a partir del estudio de correlación realizado con la precipitación areal (Figura 2 (a)).

Análogamente se llevó a cabo el análisis realizado anteriormente para el puerto Andresito (Figura 4). La escala representada en dicha figura se define a partir del nivel de significancia al 95 % de 0.028. En este caso las mayores correlaciones se encuentran para los lags 2 y 3 (de forma



*Figura 3:* Campos de correlación entre la precipitación estimada en cada punto de retículo del satélite TRMM Versión 3B42RT dentro de la cuenca del Iguazú y el caudal medio diario en el puerto Iguazú. Las correlaciones van desde lag 0 (superior izquierda) hasta lag 16 (inferior). El rango de valores de correlación se define entre 0.028 y 0.30. Los círculos rojos indican la región de la cuenca en donde las correlaciones son máximas.

similar a lo concluido previamente en la Figura 2 (b)) y a lo largo de casi toda la extensión de la cuenca, con los máximos valores de correlación entre 0.25 y 0.30 para la cuenca media y alta (estos valores de correlación son superiores a los obtenidos para el puerto Iguazú). Para el lag 4 la región de máximos se acota a una zona más reducida, abarcando principalmente la cuenca alta y parte de la cuenca media, pero conserva altos valores de correlación en la mayor parte de la cuenca, superiores a 0.20. Entre el lag 5 y 8 se observa una disminución de la correlación de aproximadamente la mitad, alcanzando valores del orden de 0.10 en el lag 8. A partir del lag 9 se observan valores de correlación entre 0.05 y 0.15 con cierta variabilidad espacial, sin un patrón tan definido como en el caso de puerto Iguazú,

destacándose los menores valores de correlación situados en la región de la cuenca baja. Por lo tanto, los resultados indican una mayor relación entre la precipitación estimada en la región de la cuenca media y alta con el caudal del río Iguazú registrado en el puerto Andresito para la mayor parte de los lags mostrados en la figura, con un máximo de correlación entre los lags 2 y 3.

Por último, se lleva a cabo el análisis de las crecidas ocurridas en junio del 2013 y junio del 2014. El evento de crecida en el caso del 2013 ocurrió en la segunda mitad del mes, mientras que en el caso del 2014, en la primera mitad. Vale la pena destacar que en ambos casos hay ciertos patrones de circulación atmosférica, como ser la existencia de trenes de ondas



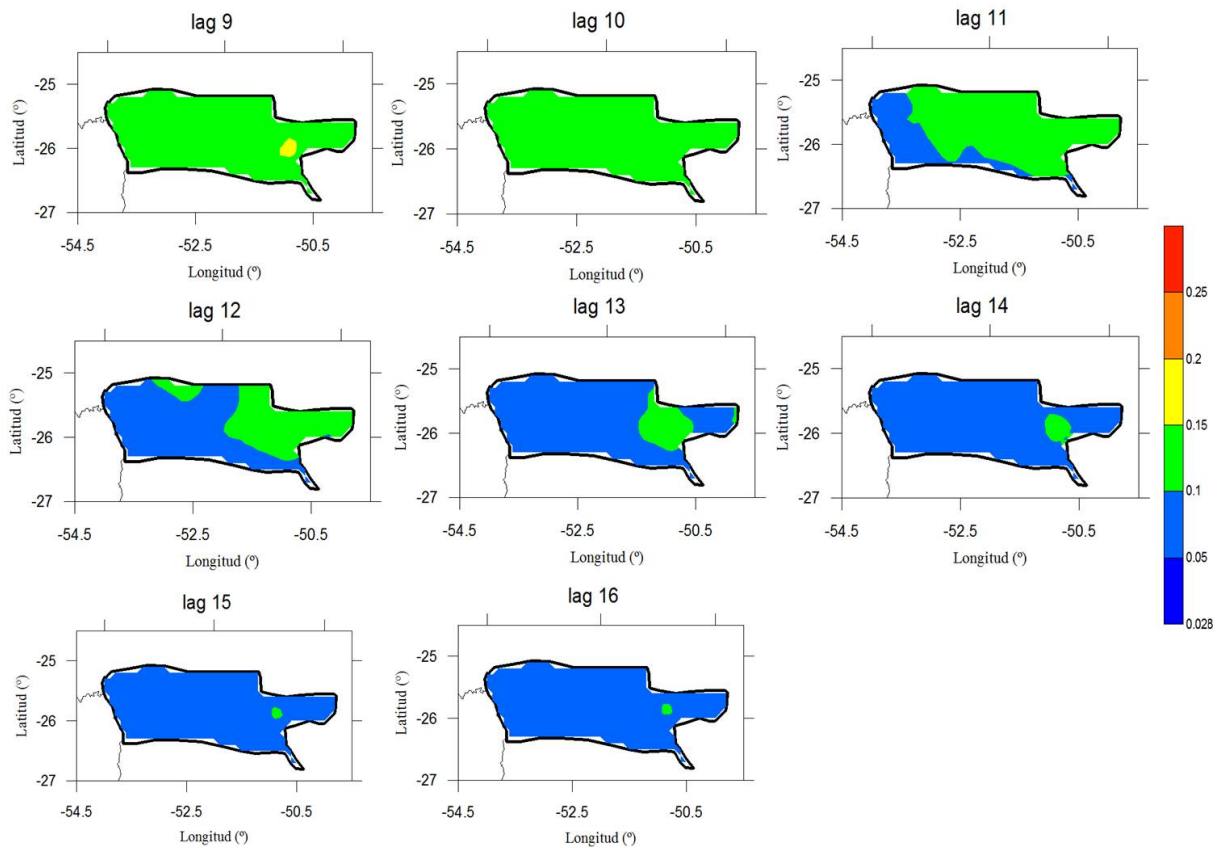


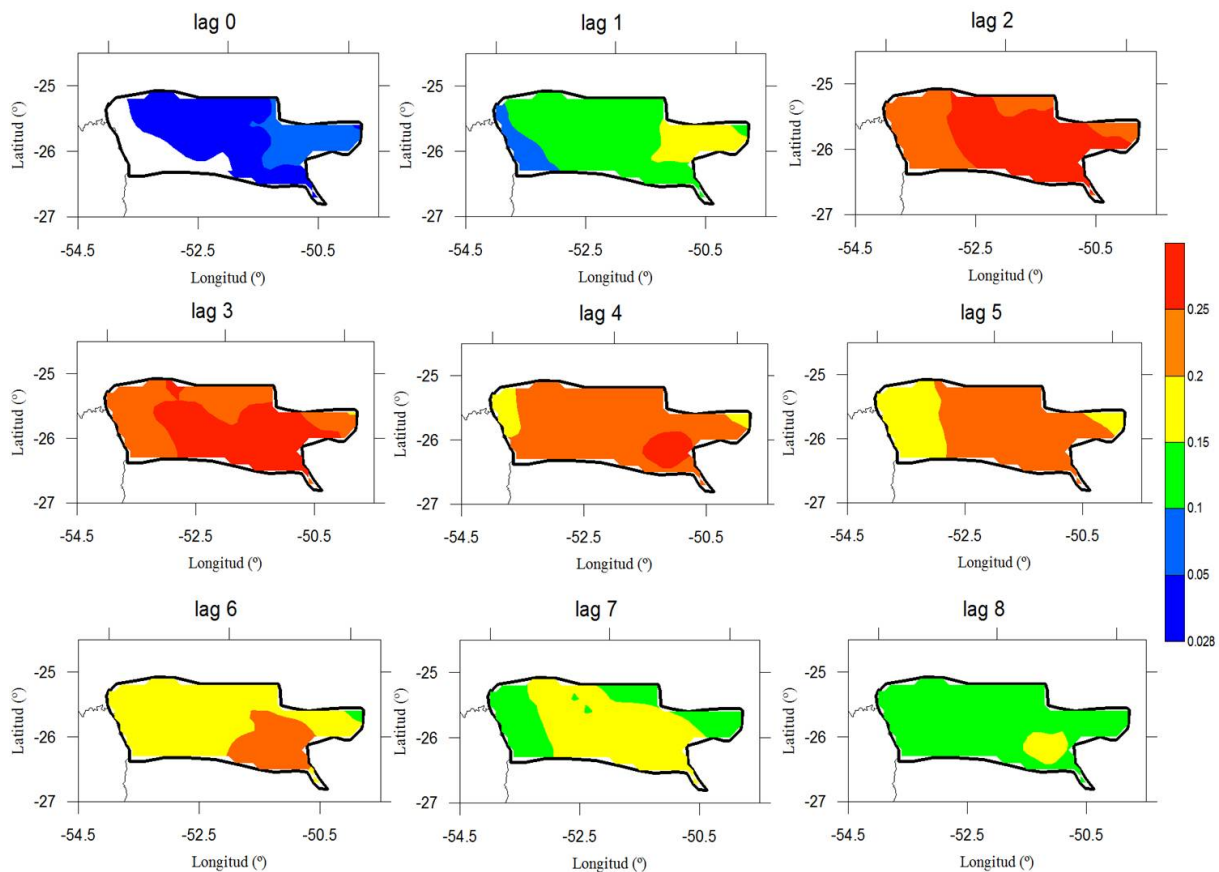
Figura 3: Continuación.

de Rossby y una importante actividad de la Oscilación de Madden Julian (MJO, por sus siglas en inglés) intensificando la variabilidad intraestacional (<http://cawcr.gov.au/staff/mwheeler/maproom/RMM/phasediag.list.htm>) en la región de estudio.

La Figura 5 (a), (b) y (c) muestra los campos diarios de precipitación estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT para los días 18, 19 y 20 de junio 2013. La Figura 5 (d) muestra la evolución temporal de la precipitación diaria observada en la estación Iguazú Aero (en barras) y la marcha del caudal medio diario en el puerto Iguazú (en línea) para el mes de junio de 2013. Cabe destacar que los valores de caudal registrados en el puerto Iguazú se encuentran influenciados también por el aporte del río Paraná, debido a la ubicación de la escala de medición de dicho puerto. Esto no sucede en el puerto Andresito, motivo por el cual hay

diferencias en los órdenes de magnitud de los caudales observados en ambos puertos.

A partir de la Figura 5 (d) se observa que, a pesar de que la estación Iguazú Aero registró precipitaciones de aproximadamente 100 mm para el día 18 de junio, el valor de caudal del puerto Iguazú no muestra un importante cambio hacia el día siguiente y lo mismo sucede entre los días 19 y 20 de junio. Observando la Figura 5 (a) se puede apreciar que la mayor cantidad de precipitación ha ocurrido en la cuenca baja, mientras que en la Figura 5 (b) el máximo de precipitación se presenta en la cuenca media. Por otro lado, el campo del 20 de junio (Figura 5 (c)), muestra un máximo generalizado de precipitación en la cuenca alta y media. A partir del día 20 de junio se observa un aumento importante del caudal diario en el puerto Iguazú (Figura 5 (d)), el cual se mantiene hasta llegar a su pico máximo de crecida aproximadamente el día



*Figura 4:* Campos de correlación entre la precipitación estimada en cada punto de retículo del satélite TRMM Versión 3B42RT dentro de la cuenca del Iguazú y el caudal medio diario en el puerto Andresito. Las correlaciones van desde lag 0 (superior izquierda) hasta lag 16 (inferior). El rango de valores de correlación se define entre 0.028 y 0.30.

27, una semana después de las precipitaciones registradas en la cuenca alta el día 20.

Análogamente se analizó el evento ocurrido en junio del 2014 (Figura 6). Las precipitaciones máximas que se produjeron en la cuenca alta y media, particularmente en la cuenca alta, sucedieron los días 07 y 08 de junio (Figura 6 (a) y (b)). A partir del día 08 se observa un importante aumento en el caudal medio diario en puerto Iguazú, hasta alcanzar su pico máximo el día 10 de junio (Figura 6 (d)), cuatro días después de ocurridas las precipitaciones mencionadas anteriormente en la cuenca el día 07. Luego, el caudal disminuye. Por otra parte, cabe destacar que a pesar de que el día 13 de junio se produjeron precipitaciones de casi igual magnitud que el día 07 en la estación Iguazú Aero, el valor de caudal

en el puerto no refleja una importante respuesta a las mismas. Por último, al observar el campo de precipitación del día 13 (Figura 6 (c)), se puede apreciar que las máximas precipitaciones se ubicaron en la parte más baja de la cuenca, sin contribuir a un aumento importante en el flujo de agua en el puerto.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de la sección anterior para el puerto Iguazú permiten concluir que la lluvia areal estimada para un día tiene mayor influencia en el caudal del río entre 5 a 7 días posteriores a la ocurrencia del evento de precipitación, mientras que para Andresito el impacto tiene lugar entre 2 y 3 días después de ocurrido el evento de precipitación. En ambos

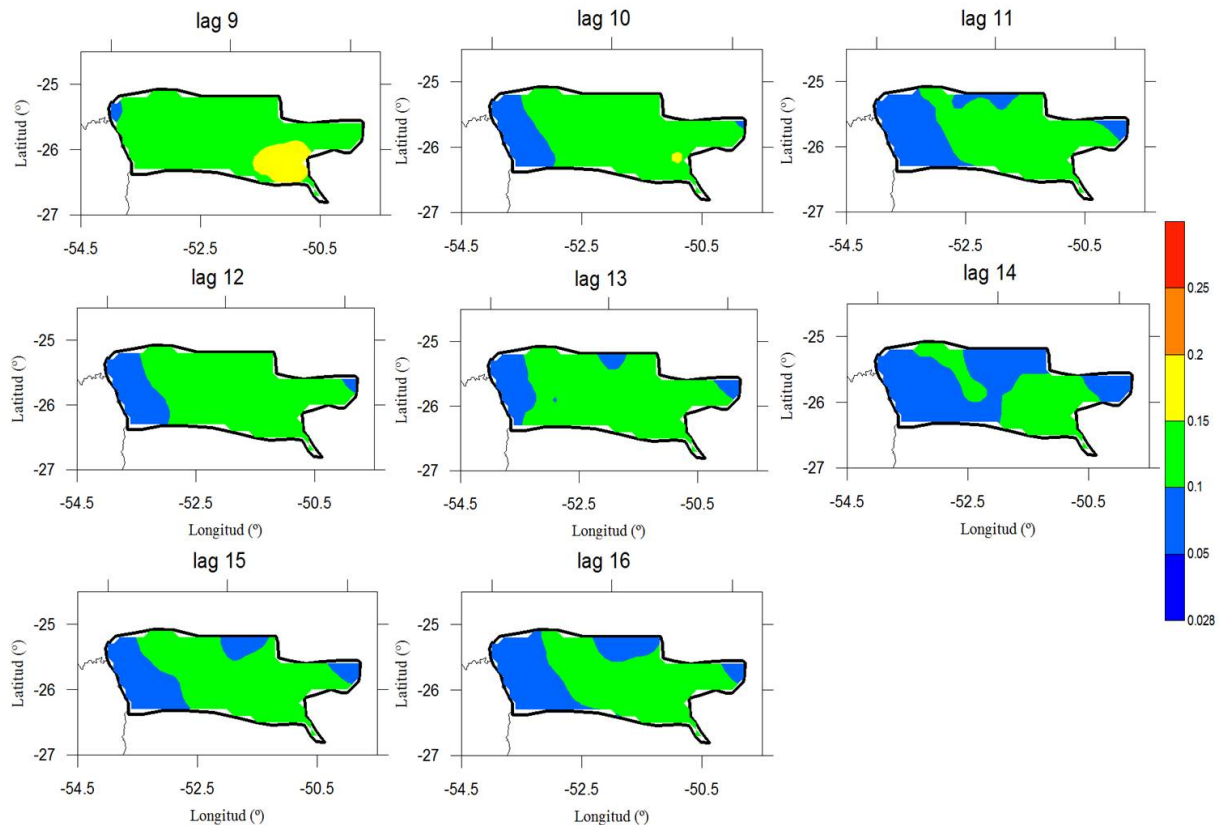


Figura 4: Continuación.

casos se observa que el impacto observado en la tasa de cambio del caudal es más inmediato. En este sentido, se observa que el caudal medio diario en el puerto Iguazú es más sensible a la precipitación diaria ocurrida en la región media/alta de la cuenca, principalmente entre 5 y 7 días después de ocurrido el evento de precipitación, similar al resultado obtenido en el análisis areal. Este efecto puede ser justificado por la topografía de la cuenca (ver Figura 1 (b)), que muestra una mayor altura del terreno en la zona de la cuenca alta, permitiendo un mayor escurrimiento del agua caída en esta zona. Por su parte, para el puerto Andresito, las mayores correlaciones fueron encontradas entre 2 y 4 días posteriores al evento de precipitación en casi toda la extensión de la cuenca, con los máximos valores en la cuenca media y alta. Se destaca la importancia de estos resultados desde el punto de vista operativo, dado que se pueden aplicar al monitoreo diario de precipitación y caudal de ríos, y contribuir a una toma de decisión tanto en

el manejo de cuencas como en potenciales eventos de inundación.

Por otra parte, el análisis de los casos particulares de crecidas de junio 2013 y junio 2014 evidencia resultados consistentes con los obtenidos a partir del análisis de correlación espacio temporal entre la precipitación diaria estimada y el caudal diario en el puerto a partir de 13 años de datos.

Por último, se remarca el rol de la circulación atmosférica en la ocurrencia de estos eventos de crecida del río Iguazú. Según Alvarez y otros (2014), quienes estudian el patrón principal de variabilidad intraestacional para el trimestre junio – julio – agosto (índice SIS\_JJA), en la región del sudeste de Sudamérica y su relación con la precipitación diaria, encuentran para la estación Iguazú más de un 68.4 % de probabilidad que durante una fase positiva del SIS\_JJA se produzcan eventos de 2 y 3 días consecutivos de lluvia. Este resultado podría estar asociado con

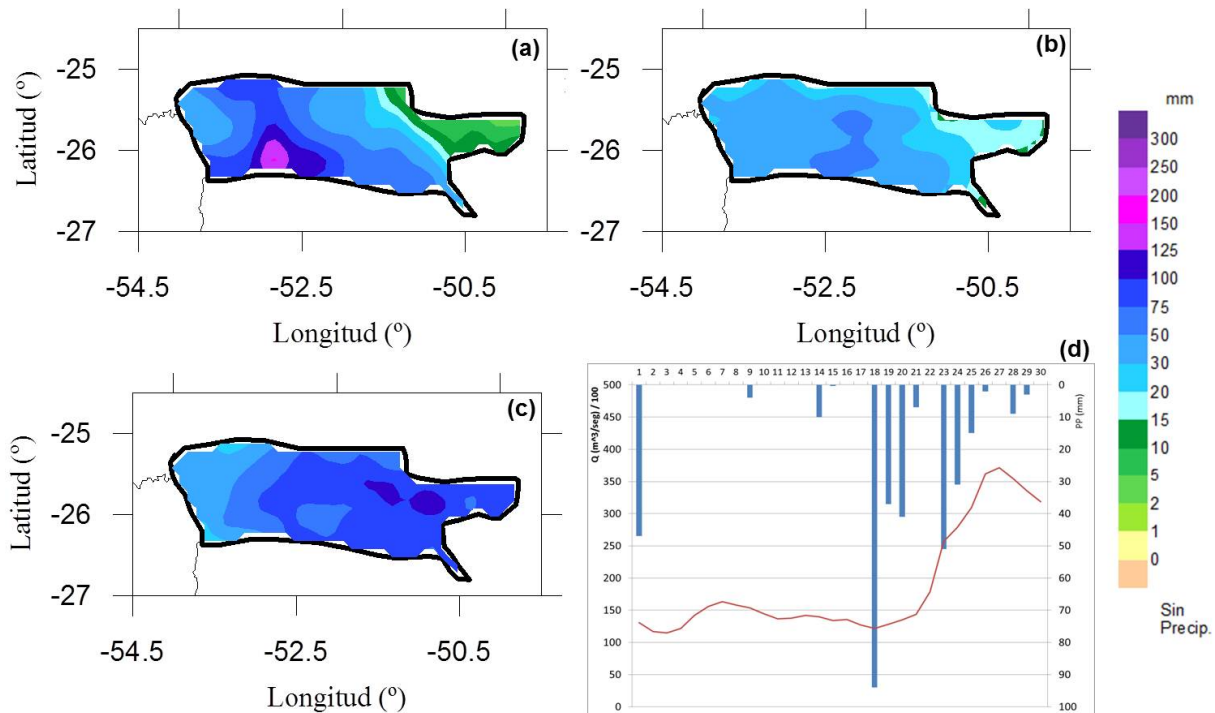


Figura 5: Campos de precipitación estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT en la cuenca del Iguazú y alrededores: (a) 18 de junio 2013, (b) 19 de junio 2013, (c) 20 de junio 2013 y (d) Precipitación diaria (barras azules) en mm y caudal medio diario (línea llena roja) en  $10^2$  m<sup>3</sup>/seg, en la estación Iguazú Aero y el puerto Iguazú respectivamente, para junio 2013.

los casos analizados en este trabajo. De todas maneras, el análisis de esa relación excede los objetivos perseguidos en este trabajo.

A futuro se propone analizar esta misma metodología para distintas estimaciones satelitales de precipitación y para distintas cuencas. De esta manera, se busca obtener la respuesta hidrológica de otras cuencas y/o subcuencas de Argentina y por otro lado, realizar un estudio comparativo entre las estimaciones TRMM y otras estimaciones satelitales.

Agradecimientos: Al Ing. Juan A. Borús y parte de su equipo, Lic. Juan F. Bianchi, de la Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico del Instituto Nacional del Agua, por proveer la información referente a la delimitación de las distintas secciones de la cuenca Iguazú y a la variabilidad de la serie histórica de caudales en

los puertos Iguazú y Andresito.

#### REFERENCIAS

- Alvarez M., Vera C., Kiladis G., and Liebmann B., 2014: Intra-seasonal Variability in South America during the Cold Season. *Climate Dynamics*, 42, 3253-3269.
- Barros V., Chamorro L., Coronel G. y Baez J., 2004: The major discharge events in the Paraguay River: Magnitudes, source regions, and climate forcings. *Jour. of Hydrometeorology*, vol 5, 1161-1170.
- Camilloni, I. y Barros, V., 2003: Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing. *Jour. of Hydrology*, 278, 94-106.
- Cerrudo C., Díaz G. y Ferreira L., 2013: Evaluación preliminar de la precipitación estimada por satélite en un conjunto de subcuencas pertenecientes a la Cuenca del Plata. V Simposio Internacional de

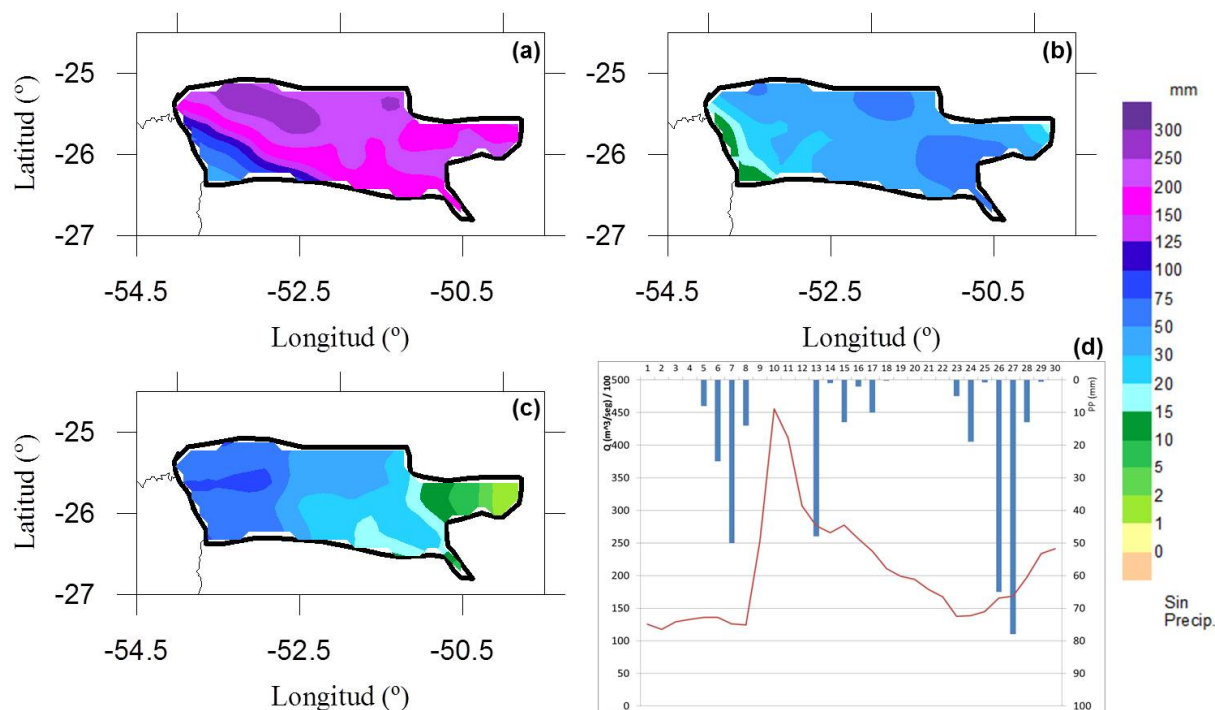


Figura 6: Campos de precipitación estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT en la cuenca del Iguazú y alrededores: (a) 07 de junio 2014, (b) 08 de junio 2014, (c) 13 de junio 2014 y (d) Precipitación diaria (barras azules) en mm y caudal medio diario (línea llena roja) en  $10^2 \text{ m}^3/\text{seg}$ , en la estación Iguazú Aero y el puerto Iguazú respectivamente, para junio 2014.

Climatología. Florianópolis, Brasil.

Chamorro L., 2006: Los principales usos y problemas de los recursos hídricos. El cambio climático en la Cuenca del Plata. Editores: Vicente Barros, Robin Clarke y Pedro Silva Dias. 1era edición. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). 232 p.

Goniadzki D. y Borús J., 2015: Monitoreo hidrológico de la cuenca del río Iguazú. Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico. Instituto Nacional del Agua - Ezeiza, Argentina.

Hobouchian M. P., Salio P., Vila D. y García Skabar Y., 2012: Validación de estimaciones de precipitación por satélite sobre Sudamérica utilizando una red de observaciones de alta resolución espacial. XI Congreso Argentino de Meteorología. Mendoza, Argentina.

Latrubesse E. y Brea D., 2010: Floods in Argentina. Developments in Earth Surface Processes Volume 13, 2009,

Pages 333–349. Natural Hazards and Human-Exacerbated Disasters in Latin America.

Romero P. y González M., 2014: Relación entre caudales y precipitación en algunas cuencas de la Patagonia norte. 2do Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 23 al 26 de septiembre de 2014. Santa Fe, Argentina.

Salio P., Hobouchian, M.P., GarcíaSkabar Y. y Vila D., 2015: Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. Atmospheric Research. 11/2014, 163. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.11.017.

Seneviratne S., Corti T., Davin E., Hirschi M., Jaeger E., Lehner I., Orlowsky B. y Teuling A., 2010: Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Science Reviews 99.125-161.

Su F., Hong Y. y Lettenmaier D.P., 2008: Evaluation of TRMM Multisatellite

Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Jour. of Hydrometeorology*, 9, 4, 622-640.

Wilks D.S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Second Ed., Elsevier Inc., 649 págs.

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.

NOTAS Y CORRESPONDENCIA

**ESTIMACION DE PRECIPITACIONES EXTREMAS A TRAVES DE GSMAP Y APLICACIÓN HIDROLOGICA A LA CRECIDA DEL ARROYO TELSEN, CHUBUT, PATAGONIA ARGENTINA**

Erica Colombani<sup>1</sup>, Santiago Behr<sup>1</sup>, Laura Brandizi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Trelew, Chubut, Argentina.

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

(Manuscrito recibido el 24 de septiembre de 2015, en su versión final el 6 de mayo de 2016)

**RESUMEN**

Las técnicas de procesamiento de datos satelitales podrían ser una fuente de información valiosa para realizar estimaciones de la lluvia para amplias superficies y facilitar la modelación hidrológica en regiones donde los datos de precipitación en tierra son escasos. El objetivo de este trabajo fue evaluar las características de las precipitaciones ocurridas durante los primeros días del mes de abril del 2014 en el norte de la Patagonia y estimar la crecida extraordinaria de la cuenca del arroyo Telsen, mediante la utilización de datos Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) y datos de pluviómetros terrestres. Los resultados de los análisis estadísticos para comparar la precipitación observada y estimada indican un muy buen ajuste que permitiría utilizar datos de precipitación estimada en sitios que no cuentan con datos meteorológicos de campo. A través de ésta técnica, se facilitaría la elaboración de mapas de distribución espacial de la precipitación. Esta metodología permitiría, además, utilizar las estimaciones de precipitación en aplicaciones hidrológicas posibilitando realizar análisis más profundos sobre las problemáticas regionales respecto a los recursos hídricos, aún en los casos en donde no se dispone de datos medidos in situ.

*Palabras clave: sensores remotos, modelo hidrológico, precipitaciones.*

**ESTIMATION OF EXTREME RAINFALL THROUGH GSMAP AND HYDROLOGICAL APPLICATION TO THE FLOOD OF TELSEN STREAM, CHUBUT, ARGENTINEAN PATAGONIA**

**ABSTRACT**

Processing techniques of satellite data could be a source of valuable information for estimating rainfall for large areas and facilitate hydrological modeling in regions where land precipitation data are scarce. The aim of this study was to evaluate the characteristics of rainfall that occurred during the first days of April 2014 in northern Patagonia and estimate the extraordinary flood of the Telsen stream basin, using Global Satellite Mapping of Precipitation data (GSMaP) and data

from terrestrial rain gauges. The results of the statistical analyze to compare the observed and estimated rainfalls indicate a very good fit that would allow to use estimated precipitation data at sites that do not have field weather data. Through this technique, mapping the spatial distribution of precipitation would be facilitated. Moreover, this methodology would also allow using estimates of precipitation in hydrological applications, permitting more in-depth analysis about regional issues regarding water resources, even in cases where no measured in situ data are available.

*Keywords: remote sensing, hydrologic model, precipitation.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la variabilidad de la precipitación es de relevancia en estudios climáticos aplicados a diferentes áreas como agronomía, hidrología y pronóstico. La precipitación es el parámetro de entrada más importante en los modelos de escorrentía de precipitaciones, en modelos de recarga de aguas subterráneas, en escenarios de cambio climático y en modelos hidro-químicos (Abushandi y Merkel, 2011).

Los eventos extremos, con intensidades de precipitaciones muy altas y baja frecuencia, son los de estudio más interesante, dado que pueden generar colapsos en los sistemas de drenaje urbano y desbordamientos de ríos, deslizamientos de laderas y destrucción de infraestructuras. Las inundaciones son uno de los desastres naturales más frecuentes, poniendo en riesgo el bienestar social y, a menudo causan graves pérdidas económicas así como la pérdida de vidas humanas (Morris, 2010).

El impacto de los eventos extremos dependerá del estado del medio natural que es afectado, ya que el pico de escorrentía se amortiguará o potenciará según las características físicas de una región y el grado de antropización de la misma. Las características físicas relevantes son la pendiente del terreno, la permeabilidad, el uso y la cobertura del suelo. El grado de antropización dependerá de la ocupación de los valles de inundación, de los cauces, de la urbanización de zonas inundables y de la pavimentación de caminos, entre otros.

Dado que la disponibilidad hídrica presenta una marcada variación en el tiempo y en el espacio, (por una parte sucesión de períodos húmedos y secos, por otra escurrimientos altos y bajos con extremos muy variables) resultan necesarios estudios hidrológicos que permitan avanzar en la cuantificación de las incertezas asociadas a la variabilidad de la oferta de agua en una región determinada. Por lo tanto, para una óptima utilización de los recursos hídricos es importante contar con balances hídricos y pronósticos de los procesos hidrológicos en las regiones y escalas de interés, a fin de determinar los volúmenes y la velocidad de respuesta de los procesos precipitación – escurrimiento.

Los modelos hidrológicos permiten simular y evaluar el funcionamiento actual de un sistema hídrico y pronosticar su comportamiento futuro. Es necesaria, para su aplicación, una adecuada cuantificación de las variables que intervienen en el balance hídrico y la precipitación es una de las más relevantes desde el punto de vista hidrológico.

Los registros de precipitación proveen información esencial sobre el balance de agua global. Sin embargo, los datos obtenidos de pluviómetros, solo representan el área circundante y próxima a la estación meteorológica. La formulación de un buen plan de predicción requiere de información de calidad en cuanto a mediciones hidrológicas y meteorológicas, las cuales en la mayoría de los sistemas hídricos se miden puntualmente, con baja densidad espacial, lo cual no provee una base de datos sólida para la interpolación (Mullery Thompson, 2013).



Las técnicas de estimación de precipitación mediante datos satelitales podrían ser una fuente de información valiosa para diferentes áreas de aplicación y aportan un dato de relevancia en regiones en donde los datos de precipitación en tierra son escasos (Ebert et al., 2007). Ofrecen la ventaja de una adecuada cobertura regional, a la vez que permite capturar la variabilidad espacial de las precipitaciones (Ravelo, 2000; Scofield, 1987; Adler y Negri, 1988; Herman et al., 1994).

Los satélites meteorológicos son capaces de ver cada punto de la tierra periódicamente y así hacer una rápida captura de datos, siempre que la variable se pueda medir directamente por los sensores transportados, evitando la necesidad de interpolar datos entre la red de estaciones convencionales de información.

Para corregir posibles errores en las estimaciones satelitales se utilizan datos terrestres. Existen técnicas para combinar observaciones satelitales y de superficie, que se utilizan para mejorar la información, considerando las limitaciones de los satélites como la sensibilidad al tipo de precipitación, tendencia a no registrar nevadas o eventos de corta duración (Huffman et al., 2007). La información satelital conjuntamente con la proveniente de redes pluviométricas está siendo utilizada actualmente en numerosos países, dado que aseguran una cobertura mucho más densa y adecuada para fines agropecuarios (Ravelo, 1979; ArkinyArdanuy, 1989; King et al., 1995).

El objetivo de este trabajo fue evaluar las características de las precipitaciones ocurridas en abril del 2014 sobre las provincias de La Pampa, Río Negro, Neuquén y Chubut y estimar la crecida extraordinaria de la cuenca del arroyo Telsen mediante la utilización de datos GSMaP y datos de pluviómetros terrestres.

## 2. METODOLOGÍA

El área de estudio abarca las provincias de La Pampa, Neuquén, Río Negro y Chubut. Se analizaron datos de lluvia diarios, del 1 al 15 de abril, abarcando días sin precipitaciones y los

días con las precipitaciones máximas ocurridas en el evento del 2014. Se recopiló información pluviométrica de 61 estaciones meteorológicas distribuidas en forma no homogénea en las diferentes provincias del área de estudio. Los datos se extrajeron de diversas fuentes oficiales y privadas: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Servicio Meteorológico Nacional, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, Hidroeléctrica Ameghino y Subsecretaría de desarrollo foresto industrial de la Nación.

El sistema de estimación de precipitaciones mediante información satelital se realizó con datos del proyecto GSMaP (Okamoto et al., 2005) desarrollado en conjunto entre las agencias espaciales norteamericana (NASA) y japonesa (JAXA). Para la estimación de la precipitación, se utilizan los datos de varios radiómetros (GMI, TMI, AMSR2, AMSR-E, SSM/I, SSMIS y AMSU-A/MHS) emplazados en diversas plataformas satelitales, los cuales obtienen información acerca del contenido de vapor de agua, nieve, hielo y temperatura de las nubes, humedad del suelo y temperatura de los océanos. Los sensores están emplazados en satélites de órbita heliosincrónica cuasipolar, con lo cual los datos que se introducen en el algoritmo de estimación de precipitaciones no presentan errores ni anomalías a causa de la latitud, como sí sucede con otros estimadores, por ejemplo TRMM, cuya órbita tiene una inclinación de 35 grados con respecto al Ecuador y no permite estimar precipitaciones en latitudes medias y altas. Con todo lo anterior, se aplican algoritmos que combinan datos de microondas e infrarrojos (Aonashi et al., 2009) que filtran la información no deseada, luego se separan los píxeles donde se considera que no ha habido precipitación, y en los que sí hubo se estima la tasa de precipitación en mm/hora. El sistema funciona en tiempo casi real (sólo 4 horas de retraso) y con una resolución espacial de 0.1 grados decimales (aprox. 11km). El dato corresponde a la precipitación acumulada entre las 00 y las 23:59 hs. Dichos datos fueron descargados desde un sitio FTP del proyecto GSMaP (<ftp://hokusai.eorc.jaxa.jp/>) como una grilla de puntos que luego se rasterizó

tomando los puntos como centroides de cada píxel para conformar imágenes a partir de dichos puntos. Con la misma grilla, aplicando el método de interpolación espacial Kriging (Fortin et al., 2007), se trazaron las isoyetas de datos estimados por satélite para cada día del período analizado.

Las medidas estadísticas utilizadas para comparar los datos de precipitación observada y estimada por satélite es: la raíz del error cuadrático medio RMSE, el sesgo relativo BIAS y el coeficiente de correlación lineal  $r$ , definidos a continuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_e - P_o)^2}{N}} \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (P_e - P_o)}{N} \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (P_e - \bar{P}_e) (P_o - \bar{P}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_e - \bar{P}_e)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_o - \bar{P}_o)^2}} \quad (3)$$

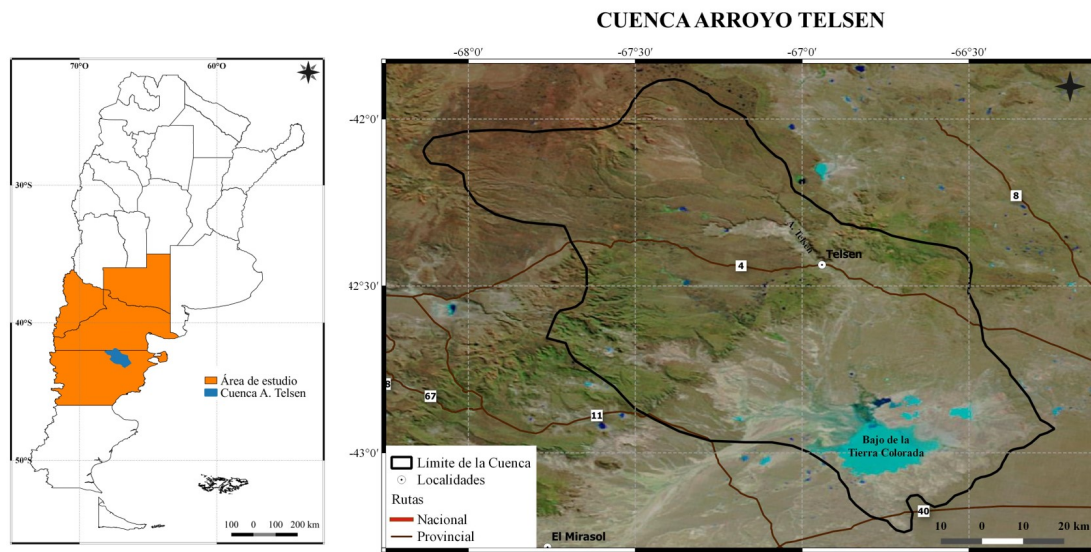
Donde  $P_e$  y  $P_o$  indican precipitación estimada y observada respectivamente, la barra superior indica el valor medio en el período de estudio. La raíz del error cuadrático medio RMSE es un indicador frecuentemente utilizado que proporciona una medida del valor medio de los errores de la estimación en términos de las unidades de la variable calculada. Un valor de  $RMSE = 0$  indica un ajuste perfecto. El sesgo relativo BIAS mide la tendencia media de las estimaciones a ser mayores o menores que los datos observados (Gupta et al., 1999). Valores positivos indican una sobreestimación del producto y valores negativos una subestimación. Se prefieren los valores de menor magnitud. El coeficiente de correlación de Pearson  $R$  es un indicador de la relación lineal que existe entre dos o más variables y no depende de las unidades de las mismas. Adopta valores de -1 a +1, en donde +1 representa una correlación perfecta positiva y -1 una correlación perfecta negativa

(Wilks, 2006).

El estudio hidrológico se realizó en la cuenca del arroyo Telsen, ubicado en el centro norte de la provincia de Chubut (Figura 1). Este arroyo irriga un pequeño valle, cuyo aporte de agua se debe a cañadones intermitentes que colectan agua en épocas de lluvia. La cuenca del arroyo Telsen tiene una superficie total de 52.572 ha (525.72 Km<sup>2</sup>) desde sus nacientes cerca del límite de Chubut con la provincia de Río Negro, en la meseta de Somuncurá, sierras Apas y Talagapa, transitando posteriormente las aguas por la meseta aterrazada, a cuyo límite se forman cañadones que al unirse constituyen el valle del arroyo Telsen propiamente dicho. Esta extensa cuenca situada a más de 600 msnm, presenta un clima árido propio de la estepa patagónica, rodeada por sierras de más de 1000 metros de altura.

Se utilizó el modelo hidrológico Hydrologic Modeling System (HEC-HMS, 2007) para estimar el caudal máximo ocurrido por el evento de precipitación extrema registrado. El modelo está diseñado para simular la respuesta hidrológica de una cuenca a la precipitación, permitiendo establecer componentes interconectados que modelan cada aspecto del proceso lluvia-escurrimiento. El componente de tránsito de caudales se utiliza para representar el movimiento de las ondas de crecida a lo largo del cauce principal proporcionando el hidrograma de salida de la cuenca.

Para estimar el caudal generado por las sub-cuencas de aporte se utilizó el método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (S.C.S) complementado con el respectivo hidrograma sintético triangular de Campos (1982, 1991) y se seleccionó el modelo de propagación de onda de Muskingum - Cunge (Ponce, 1989). Los parámetros hidrológicos e hidráulicos necesarios para realizar la simulación se recopilaron de diferentes bases de datos incluyendo el informe de Coronel (2002) del cual se obtuvieron las características geomorfológicas de la cuenca.



*Figura 1:* Ubicación geográfica del área de estudio. Izquierda: provincias que abarca el área de estudio y ubicación de la cuenca del arroyo Telsen en la provincia de Chubut. Derecha: límite geográfico de la cuenca del arroyo Telsen y ubicación de la localidad de Telsen, provincia de Chubut.

### 3. RESULTADOS

El evento meteorológico estudiado fue uno de los más intensos registrados en los últimos años en la región Patagónica. La persistencia de una masa de aire relativamente cálido y húmedo sumado a un sistema de baja presión provocó intensas lluvias en dos zonas específicas, uno ubicado en la región pampeana, desplazándose hacia la costa sur bonaerense y otro centro ubicado en la provincia de Neuquén y la zona oeste de Río Negro, desplazándose hacia el sudeste.

La evolución diaria de éste fenómeno se llevó a cabo a través de la digitalización de las precipitaciones observadas en los diferentes sitios con el método de interpolación espacial Kriging (Fortin et al., 2007).

En la provincia de La Pampa las precipitaciones comenzaron el día 1 de abril intensificándose hacia el día 3, con valores de precipitación acumulada diaria que alcanzaron los 50 mm el día 3 de abril en la ciudad de General Pico y Dorila. La localidad de Chacharramendi registró

el día 2 de abril un total de 25,4 mm donde se puede observar en la Figura 2 las isoyetas que representan estas intensas precipitaciones. El día 4 de abril se puede observar (Figura 3) que en las localidades de Alpachiri y Victorica (centro este de la provincia) se presentaron intensas precipitaciones, coincidiendo con los datos estimados con GSMaP.

El día 5 de abril la ciudad de General Pico presentó el registro máximo del día, con una precipitación acumulada de 83 mm, la localidad de Chacharramendi registró una precipitación total de 61,7 mm y en cuanto Intendente Alvear y Dorila registraron una precipitación total de 60 mm en el mismo día. Una disminución importante en la intensidad de las precipitaciones se presentaba el día 6 de abril, con una precipitación acumulada máxima de 38 mm para la ciudad de Chacharramendi. Durante los días 7 y 8 de abril, las lluvias se intensificaron en la mayoría de los puntos analizados de la provincia, con registros máximos de precipitación acumulada de 95 mm durante el día 8 en la localidad de Intendente Alvear y 75 mm para Dorila (Figura

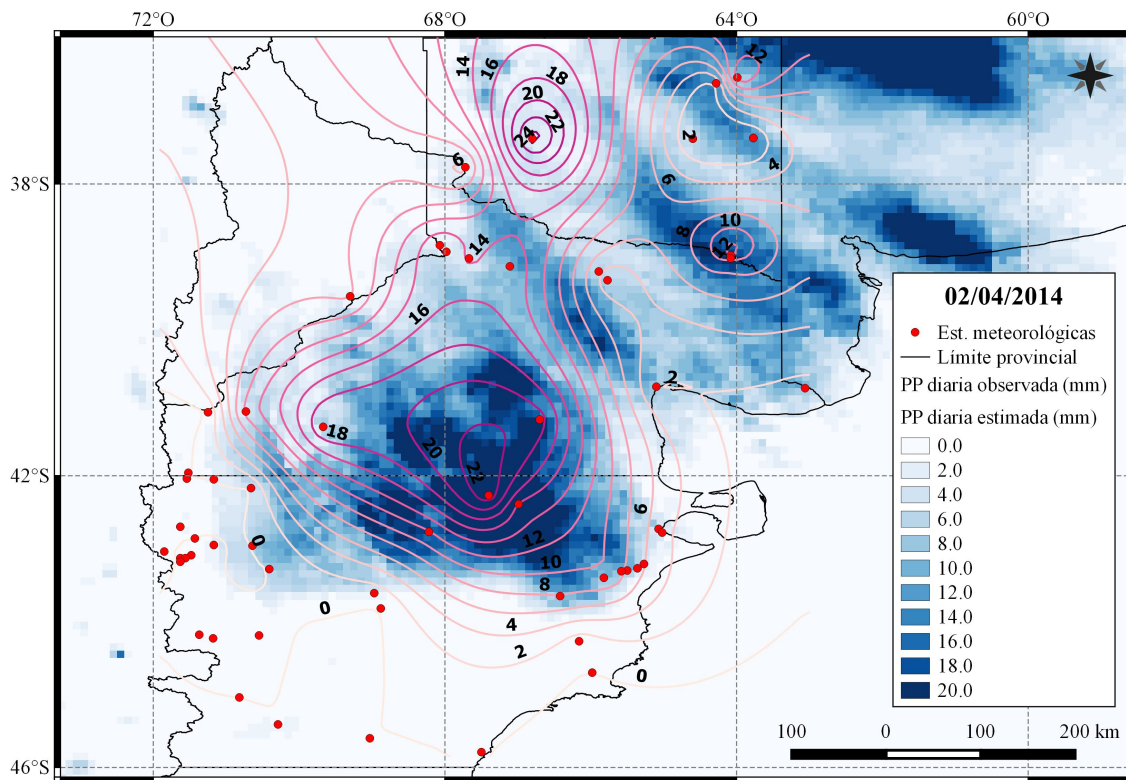


Figura 2: Comparación espacial de la precipitación diaria acumulada estimada a partir de GSMaP (escala de colores) y observada (isohietas de línea llena) (mm) correspondiente al día 2 de abril de 2014 sobre el área de estudio. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas en el análisis.

4). La ciudad de Dorila fue la que presentó los mayores registros pluviométricos, con un total de 260 mm en el período de estudio, le siguió la localidad de Intendente Alvear con 248 mm y General Pico con 244 mm.

El centro de tormenta ubicado en las provincias de Neuquén y Río Negro comenzó a intensificarse el día 2, con precipitaciones diarias que superaron los 20 mm en las localidades de Maquinchao y Jaccobaci (Figura 2). Las isoyetas de la Figura 2 nos muestran gran coincidencia con los datos estimados por GSMaP.

El día 4, al igual que en la provincia de La Pampa, las lluvias comenzaron a intensificarse, con registros de precipitación diaria de 53 mm en San Antonio Oeste (Figura 3). El día 5 la

ciudad de Maquinchao al sudeste de la provincia de Río Negro, registró el valor máximo del resto de las localidades de la provincia con un registro diario de 25 mm, seguido por la ciudad de Cinco Saltos con 24 mm. El día 6 de abril comenzaron nuevamente las precipitaciones más intensas, con registros diarios de 87 mm para la ciudad de Chipolleti, seguido por la localidad de Río Colorado que registró 31 mm en el día.

El día 7 (Figura 4) los registros de precipitaciones diarias fueron los más intensos de toda la serie analizada para la provincia de Río Negro, superando los 86 mm en la ciudad de Maquinchao y un registro de 78 mm para Coronel Belisle, provocando pérdidas económicas en los sistemas productivos y gran parte de las ciudades afectadas por inundaciones, más de 1500

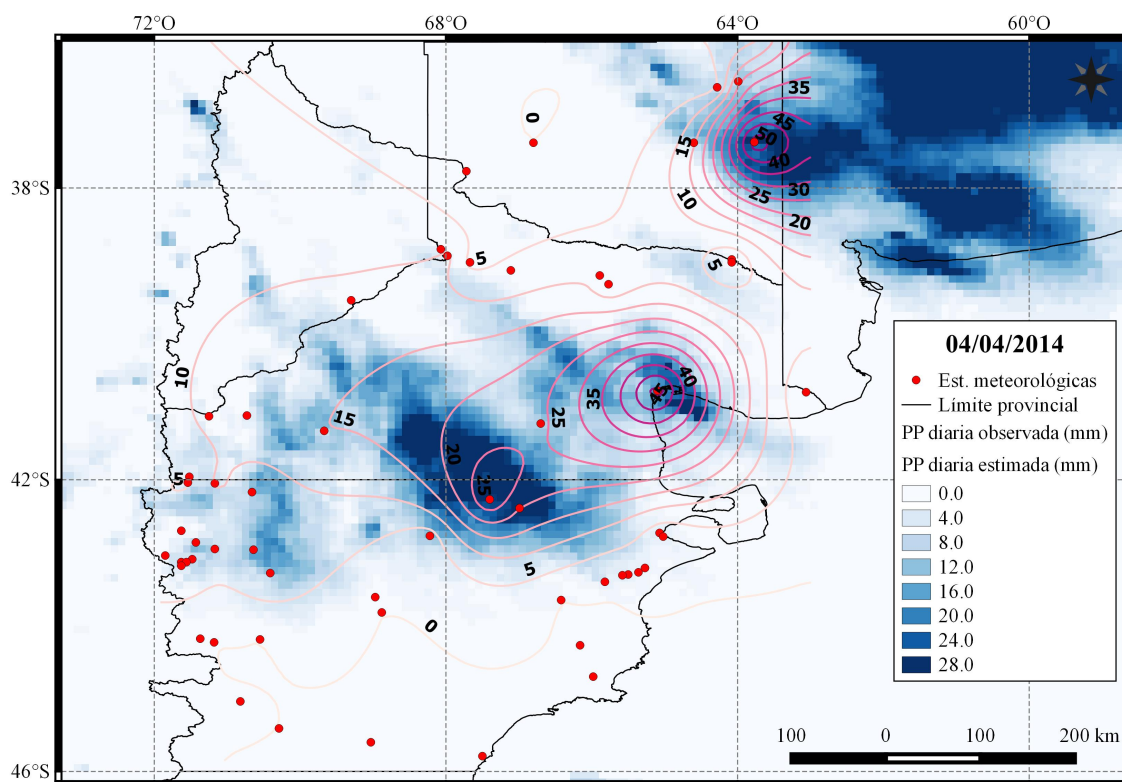


Figura 3: Comparación espacial de la precipitación diaria acumulada estimada a partir de GSMaP (escala de colores) y observada (isohietas de línea llena) (mm) correspondiente al día 4 de abril de 2014 sobre el área de estudio. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas en el análisis.

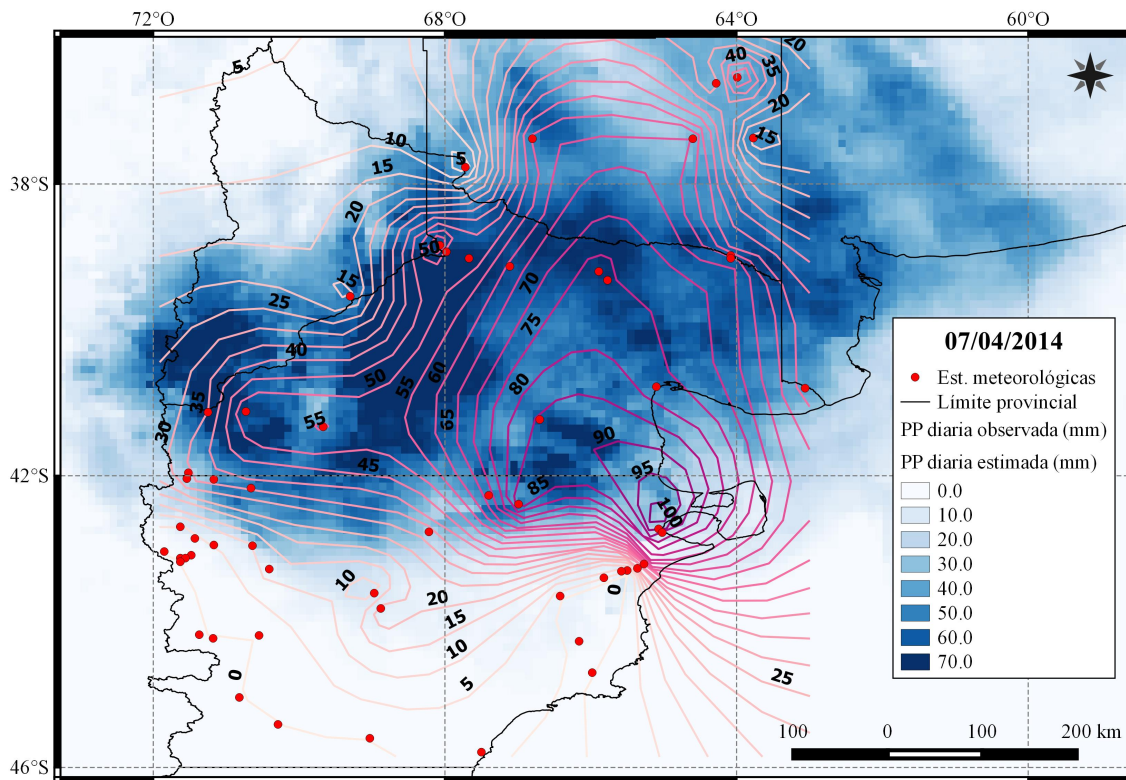
evacuados y el registro de un fallecido. Los datos de las isoyetas concuerdan en gran medida con los datos estimados por GSMaP. En el día 8 de abril la intensidad disminuye en todas las localidades de la provincia (Figura 5).

El registro máximo de precipitación acumulada en la serie analizada, fue en Cipolletti con 199 mm. Según el informe del Servicio Meteorológico Nacional del 30 de abril de 2014, la ciudad de Neuquén se posicionó en segundo lugar del ranking mensual histórico, con una precipitación acumulada para el mes de abril de 229 mm, datos correspondientes al período 1947-2014.

Las lluvias en la provincia de Chubut se manifestaron intensamente el 7 de abril por la noche y durante la madrugada del día 8

con un centro de tormenta en el noreste de la provincia y una cobertura total de 150 km de radio aproximadamente.

La localidad de Telsen fue la más afectada de la provincia de Chubut, con un valor de precipitación acumulada, en la serie analizada, de 248 mm, ocasionando una crecida repentina y extraordinaria del arroyo homónimo que desbordó hacia ambos márgenes. Según el informe realizado por Escobar (2014) en una recorrida de la zona luego del desastre, el ancho de cauce en algunos sectores alcanzó valores superiores a los 800 metros cuando habitualmente corre por un cauce que escasamente supera los 3 metros. Según el relato de los pobladores más antiguos del lugar, fue un hecho nunca antes visto, donde el agua comenzó a desplazarse conformando una



*Figura 4:* Comparación espacial de la precipitación diaria acumulada estimada a partir de GSMaP (escala de colores) y observada (isohietas de línea llena) (mm) correspondiente al día 7 de abril de 2014 sobre el área de estudio. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas en el análisis.

pared que arrasaba con toda estructura que se encontrara en el camino.

La zona quedó incomunicada con el resto de la provincia por anegación en las rutas, más de 30 familias evacuadas y dos fallecidos. Las ciudades de Puerto Madryn, Trelew y Gaiman también sufrieron graves consecuencias por las intensas lluvias, con zonas anegadas, evacuados y daños materiales.

En el día 1 se registraron en promedio para el área de estudio, precipitaciones no mayores a 0,9 mm. Los datos estimados con GSMaP y analizados fueron en promedio de 2,5 mm con un coeficiente de correlación de 0,86 y un valor de Bias de 1,53 mm (Tabla I).

Los datos de precipitaciones estimados por satélites y las lluvias registradas para el día 2, coinciden en gran medida, principalmente el centro de la tormenta ubicado en el sur de la provincia de Río Negro y norte de Chubut (Figura 2). Los valores máximos de precipitaciones para ese día fueron de 23,6 mm para la Aldea Escolar de Sepaual a unos 35 km de la localidad de Telsen y los estimados fueron de 20 mm. El coeficiente de correlación fue de 0,57 con un Bias de -0,25 mm, lo cual nos estaría indicando que las lluvias ocurridas fueron superiores a las estimadas con GSMaP. En la provincia de La Pampa, se observan intensas precipitaciones en la localidad de Chacharramendi y no se observaron en los datos estimados por GSMaP.

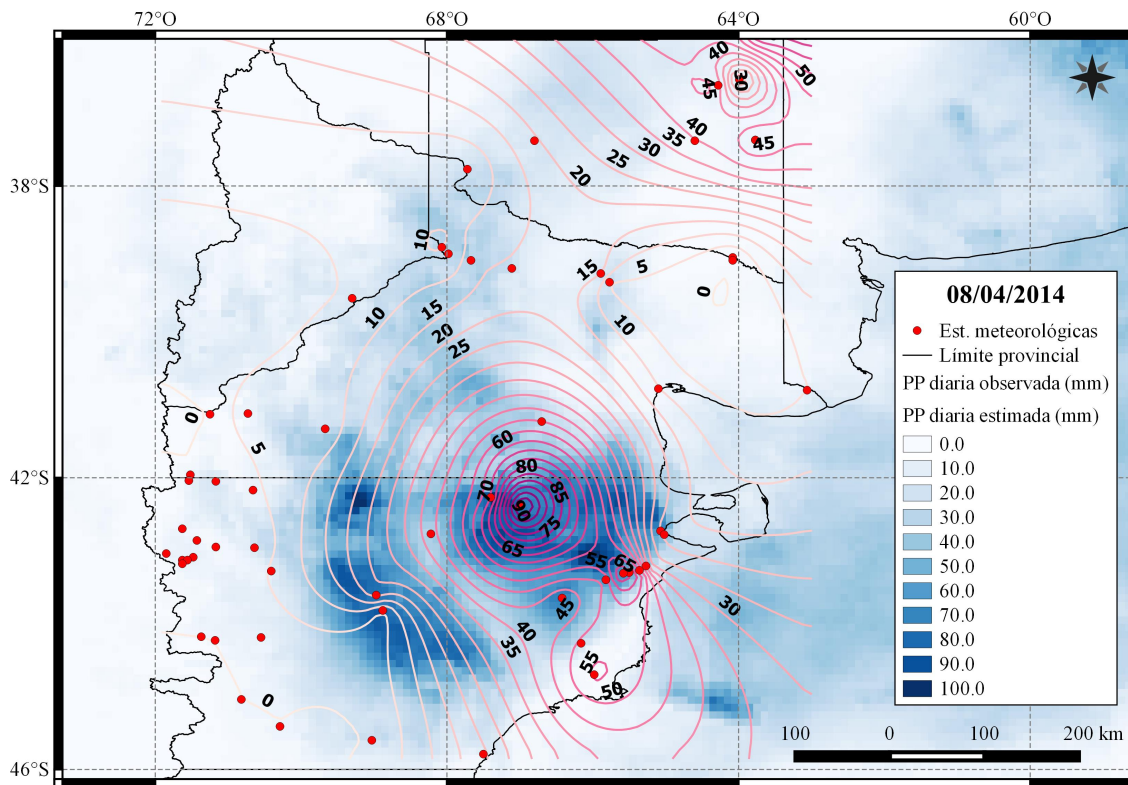


Figura 5: Comparación espacial de la precipitación diaria acumulada estimada a partir de GSMaP (escala de colores) y observada (isohietas de línea llena) (mm) correspondiente al día 8 de abril de 2014 sobre el área de estudio. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas en el análisis.

En el día 3 se registraron precipitaciones en San Antonio Oeste y algunos puntos de La Pampa, en estos últimos el centro de tormenta coincidió con lo estimado en los datos satelitales, no ocurriendo lo mismo con los registros para la localidad costera. El coeficiente de correlación encontrado fue de 0,73 con un Bias de -2,67 mm (Tabla I).

En la Figura 3 se puede observar que los centros de mayores registros pluviométricos del día 4 coincidieron mayormente con lo estimado por GSMaP, el coeficiente de correlación calculado para ese día fue de 0,6 y el Bias de -4,1 mm, remarcando una subestimación del valor pluviométrico estimado por los datos satelitales.

El día 7, con la intensificación de las lluvias en todos los centros de tormenta, las precipitaciones

estimadas no superaban los 70 mm, sin embargo se registraron valores superiores a los 100 mm (Puerto Madryn con 109 mm) (Figura 4). El coeficiente de correlación encontrado fue de 0,58 y el Bias de 0,15 mm.

Las precipitaciones ocurridas en el día 8 también fueron intensas en varios de los puntos analizados. Telsen fue la localidad que reportó los valores más altos, con 109,7 mm. El valor estimado en ese punto era de 73 mm. El Bias promedio para todos los puntos registró un valor de -0,52 mm y un coeficiente de correlación de 0,42. En el mapa realizado (Figura 5) se puede observar una gran coincidencia entre los valores observados y el centro de tormenta del noreste de la provincia de Chubut, con precipitaciones estimadas de 100 mm en algunos pixeles.

Día	BIAS	CC	RMSE
<b>01/04/2014</b>	1,53	0,86	12,0
<b>02/04/2014</b>	-0,25	0,57	1,9
<b>03/04/2014</b>	-2,67	0,73	20,9
<b>04/04/2014</b>	-4,10	0,60	32,0
<b>05/04/2014</b>	-3,36	0,78	26,3
<b>06/04/2014</b>	-1,91	0,56	14,9
<b>07/04/2014</b>	0,15	0,58	1,2
<b>08/04/2014</b>	-0,52	0,42	4,0
<b>09/04/2014</b>	-1,15	0,00	9,0
<b>10/04/2014</b>	-0,84	0,00	6,5
<b>11/04/2014</b>	-1,75	0,63	13,7
<b>12/04/2014</b>	-0,21	0,24	1,7
<b>13/04/2014</b>	0,20	0,14	1,6
<b>14/04/2014</b>	-0,03	-0,02	0,2
<b>15/04/2014</b>	-0,89	0,61	7,0

*Tabla I:* Estadísticos totales para todos los puntos del área de estudio, correspondiente a los días del 1 al 15 de abril del 2014.

El Bias para casi todos los días del 1 al 15 está por debajo de cero (Tabla I), existe una tendencia a la subestimación por parte de los datos calculados por satélite. Sin embargo, estimando un Bias promedio de -1.05 mm para todos los puntos analizados del período de estudio, se puede considerar que los datos de precipitación estimada por satélite subestiman los datos de precipitación observada en superficie. Datos similares fueron reportados por Vila et al. (2005), quien analizó un período de cinco meses de precipitaciones diarias en la cuenca del río Uruguay, con la técnica Hydroestimador; encontrando valores de Bias del orden de los -3,5 mm subestimando los valores observados por datos pluviométricos de campo.

En la Figura 6 se puede observar la distribución del valor de Bias en el área de estudio del 1 al 15 de abril, donde la mayor superficie está representada por un valor negativo, es decir que la estimación subestima la precipitación diaria

observada en superficie.

Los coeficientes de correlación obtenidos del área se pueden observar en la Figura 7, el 42,6 % de los sitios de estudio presentan valores mayores a 0,9 y el 31 % presenta coeficientes entre 0,5 y 0,89 entre los datos observados y los estimados.

El caudal pico se registró el día 8 de abril. Los caudales máximos simulados por el modelo HEC resultaron de 444,8 m<sup>3</sup>seg<sup>-1</sup> utilizando los datos de estaciones meteorológicas y 377,1 m<sup>3</sup>seg<sup>-1</sup> utilizando los datos satelitales (Figura 8). La diferencia de la estimación por satélite se debe a que, los datos de precipitación estimados por GSMaP son menores que los registrados por las estaciones meteorológicas en la región de Telsen (Figura 6). Los caudales simulados son comparables a los caudales de diseño utilizados para calcular obras de infraestructura en el año 2002: 378 m<sup>3</sup>seg<sup>-1</sup> para un tiempo de retorno de 25 años y 453 m<sup>3</sup>seg<sup>-1</sup> para un tiempo de retorno



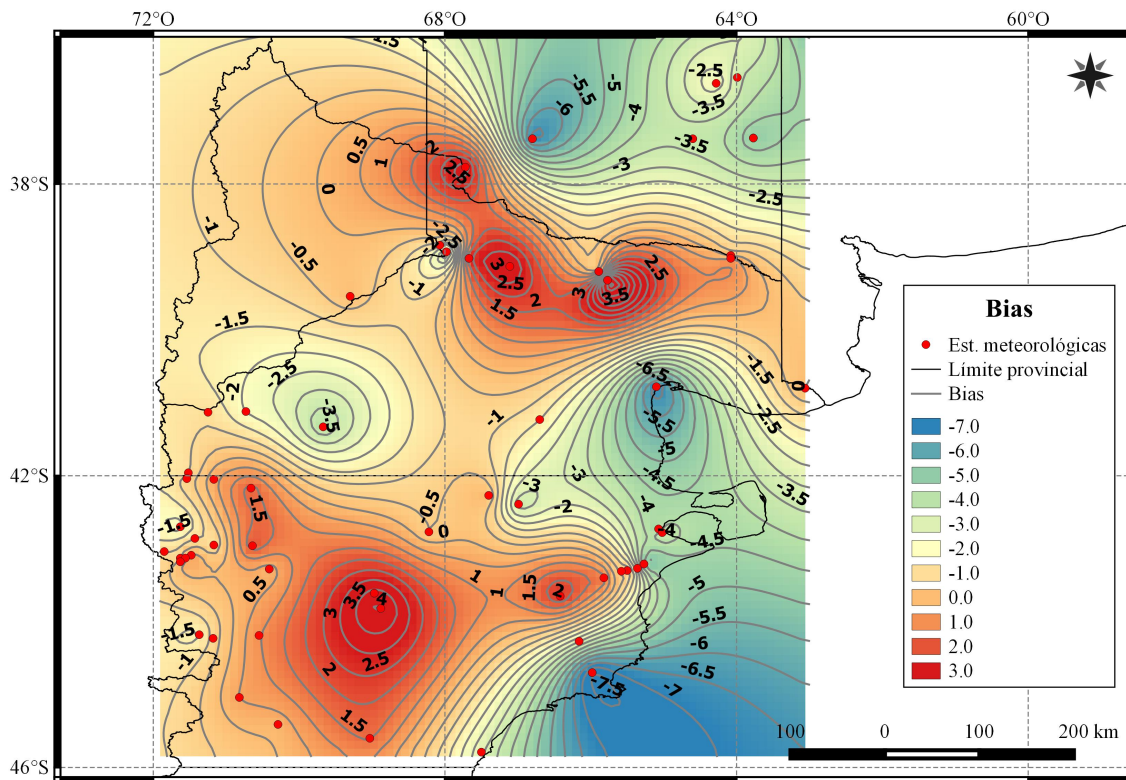


Figura 6: Distribución espacial del Bias promedio para el área de estudio correspondiente al período 1 al 15 de abril de 2014 (mm). Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas en el análisis.

de 50 años.

En el mes de abril del año 1998 se registró un evento extremo de precipitación con un total de lluvia caída de 164 mm en 48 hs para la localidad de Telsen, y un caudal pico de  $360 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ . En el año 1992 se registró el mismo caudal pico con un total de lluvia de 103 mm caída en 72 horas. En este evento se registraron 130 mm durante las 48 horas antes del pico máximo de caudal, aguas arriba de la localidad de Telsen. El caudal simulado es coherente con los registros obtenidos en años anteriores.

En la simulación se consideró el aporte aguas arriba de la localidad de Telsen sin tener en cuenta el potencial aporte a la escorrentía producto de la precipitación registrada en la estación meteorológica (198 mm en 48 horas).

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se compararon los datos de precipitación registrados en estaciones meteorológicas con los datos estimados de imágenes satelitales durante el evento de precipitaciones intensas ocurrido entre los días 1 y 15 de Abril de 2014 en las provincias de La Pampa, Río Negro, Neuquén y Chubut.

Las estimaciones de precipitación derivadas de sensores remotos, específicamente del proyecto GSMaP, tienen suma importancia en zonas con una red de observaciones poco densa e irregular, ya que cubren regiones desprovistas de información, resultando de gran utilidad en numerosas áreas de la meteorología y sus aplicaciones.

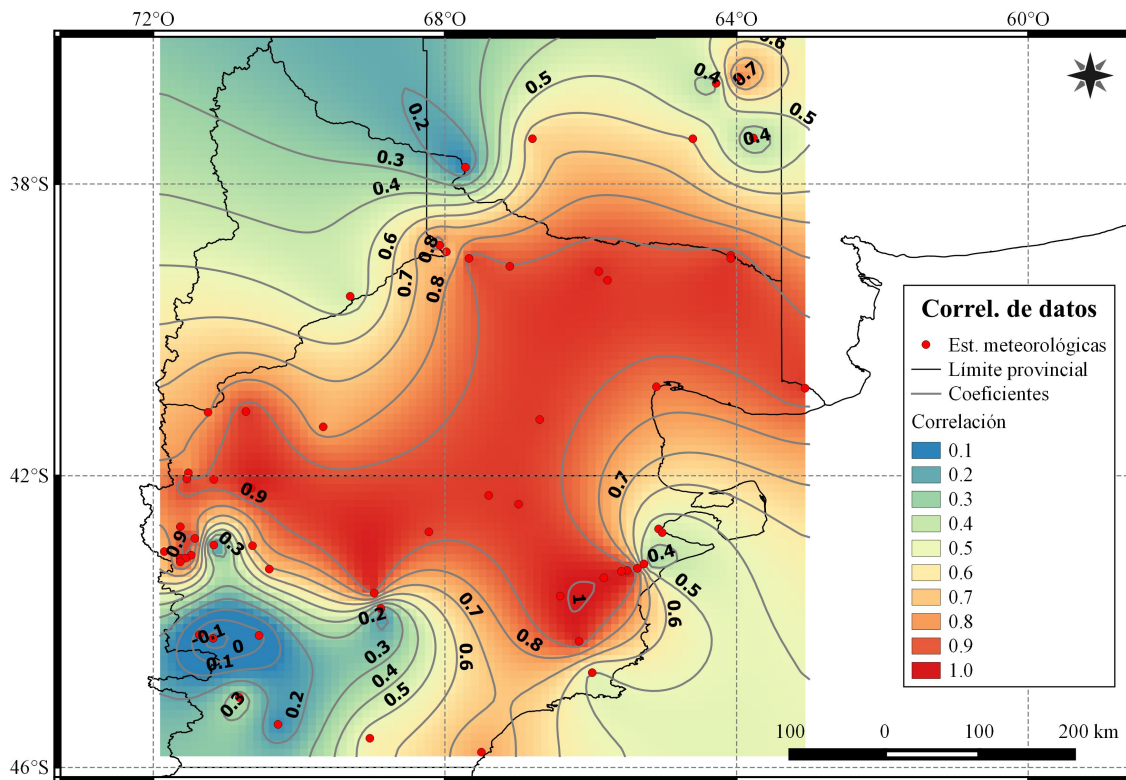


Figura 7: Distribución espacial del coeficiente de correlación para el área de estudio correspondiente al período 1 al 15 de abril de 2014. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas en el análisis.

Los resultados obtenidos demuestran que las estimaciones generan cierta confiabilidad para obtener información de la precipitación en sitios en donde no se cuenta con datos de estaciones meteorológicas. Las correlaciones obtenidas entre la precipitación observada y la estimada resultaron satisfactorias. El promedio del error Bias resultó  $-1.1$ ; cercano a cero y con signo negativo indica que en promedio las estimaciones subestiman las observaciones. Promediando los catorce días del evento, existe un error medio de  $10.2$  mm en las estimaciones.

En localidades puntuales se requiere de un estudio más detallado para detectar si las diferencias obtenidas en las medidas estadísticas se deben a un error en la estimación satelital o un error en los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas. Como resultado se espera mejorar

la toma de registros pluviométricos así como también mejorar las técnicas de estimación satelital mediante calibración.

En una próxima etapa se experimentará realizar un análisis de regresión entre la información satelital y los registros pluviométricos para establecer ecuaciones de estimación de las precipitaciones a partir de información satelital. Mejorar la técnica de estimación de precipitación facilitaría la elaboración de mapas de distribución de precipitaciones.

Utilizar las estimaciones de precipitación en aplicaciones hidrológicas permite ampliar los análisis de las problemáticas regionales respecto a los recursos hídricos, aún en los casos en donde no se disponen de datos medidos in situ. Como aplicación hidrológica, se utilizaron los

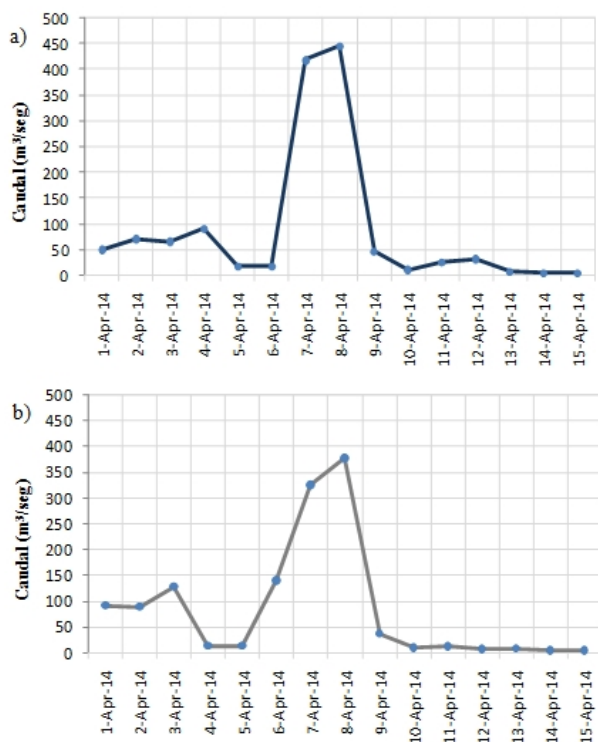


Figura 8: Caudal máximo simulado con el modelo HEC-HMS en la localidad de Telsen, utilizando datos de estaciones meteorológicas (a) y datos de satélite (b).

datos observados y estimados para realizar la estimación del pico de caudal que transitó por la localidad de Telsen.

Los caudales obtenidos de la simulación hidrológica en la localidad de Telsen brindan una primera estimación de la crecida que originó la tormenta extraordinaria. La magnitud de los daños ocurridos en esta región requiere de estudios hidrológicos e hidráulicos más detallados del evento teniendo en cuenta los diversos factores que afectan el funcionamiento del sistema hidrológico como por ejemplo el arrastre de sedimentos provocado por la crecida.

## REFERENCIAS

Abushandi, E. and Merkel, B. 2011. Rainfall estimation over the Wadi Dhuliel arid catchment, Jordan from GSMaP\_MVK+. Hydrol. EarthSyst. Sci. Discuss., 8, págs.

1665-1704.

Adler, R.F. and Negri, A.J. 1988. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. J. Appl. Meteor., 27: págs. 30-51.

Aonashi, K., Awaka, J., Hirose, M., Kozu, T., Kubota, T., Liu, G., Shige, S., Kida, S., Seto, S., Takahashi N. and Takayabu, Y. 2009. GSMaP passive, microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation. J. Meteor. Soc. Japan, 87A, págs. 119-136.

Arkin, P.A. and Ardanuy, P.E. 1989. Estimating climatic-scale precipitation from space: a review. J. Climate, 2: págs. 1229-1238.

Campos, A.D.F. 1982. Manual para la estimación de avenidas máximas en cuencas y presas pequeñas. Dirección General de Obras Hidráulicas e Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural, S.A.R.H. México.

Cuarta Sección, capítulo 4: Métodos hidrológicos. págs. 85-114.

Campos, A.D.F. 1991. Programa para el método del hidrograma unitario triangular de estimación de crecientes. Memoria del XVII Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, A. C. 18 al 20 de Septiembre de 1991. Monterrey, México. págs. 109-113.

Coronel, O.F. 2002. Control de inundaciones y mejora del sistema de riego valle de Telsen provincia de Chubut, Argentina. Proyecto, informe final. SAGPyA-PROSAP.

Ebert, E.E., Janowiak, J. and Kidd, C. 2007. Comparison of near real time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. Bull. Amer. Met. Soc., 88, págs. 47-64.

Escobar, J.M. 2014. Informa de la recorrida por sitios afectados por las precipitaciones torrenciales de abril de 2014. Informe interno. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria INTA Chubut.

Fortin, M.J. and Dale, M. 2007. Spatial Analysis. A Guide for ecologists. Cambridge University Press. UK., págs. 165-173.

Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic

- models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering* 4 (2), 135-143.
- HEC HMS. Us Army Corps of Engineers. 2007. Hydrologic Modeling System.
- Herman, A., Arkin, P.A. and Miskus, D. 1994. Ten-day rainfall estimates for the African Sahel using combination of high resolution METEOSAT infrared and raingauge data for the 1993 growing season. Proc. 7th. Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, págs. 206-214.
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Wolff, D.B., Adler, R.F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.P. and Stocker, E.F. 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): quasiglobal, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeorology*; 8(1), págs. 38-55.
- King, P.W.S., Hogg, W.D. and Arkin, P.A. 1995. A note on the relationship between satellite visible and infrared measurements and rain-rate. *J. Applied Meteor.*, 34: págs. 1608-1621.
- Morris, R.E. 2010. Interactions among flood predictions, decisions, and outcomes: synthesis of three cases. *Nat. Hazards Rev.* 11(3), págs. 83-96.
- Müller, M.C and Thompson, S.E. 2013. Bias adjustment of satellite rainfall data through stochastic modeling: Methods development and application to Nepal. *Advances in Water Resources* 60 (2013), págs. 121-134.
- Okamoto, K., Iguchi, T., Takahashi, N., Iwanami, K. and Ushio, T. 2005. The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) project, 25th IGARSS Proceedings, págs. 3414-3416.
- Ponce, V.M. 1989. *Engineering Hydrology, Principles and practices*. Prentice Hall. ISBN 0-13-277831-9.
- Ravelo, A.C. 1979. Evaluation of satellite rainfall estimates for Haiti. Edit. University of Missouri/AID-OFDA. Págs. 18.
- Ravelo, A.C. y J.A. Santa. 2000. Estimación de las precipitaciones utilizando información satelital y terrestre en la provincia de Córdoba (Argentina). *AGRISCIENTIA*, 2000, VOL. XVII: págs. 21-27.
- Scofield, R.A. 1987. The NESDIS operational convective precipitation technique. *Mon.Wea.Rev.* 115(8): págs. 1773-1792.
- Vila, D., Irigoyen, M., Simonet, D., y Zamanillo, E. 2005. Evaluación del uso operativo de las estimaciones satelitales de precipitación. Citado de: <http://www.aprh.org.py/>, vigente al 09/02/2015.
- Wilks, D.S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, London, 627pp.

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:	Ines Mercedes Leyba
VOCALES TITULARES:	Maria Soledad Osoros Magdalena Falco Lorena Judith Ferreira
VOCALES SUPLENTE:	Osman Marisol Natalia Edith Tonti Alberto Flores

### TRIBUNAL DE HONOR

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

### COMISIÓN REVISORA DE CUENTAS

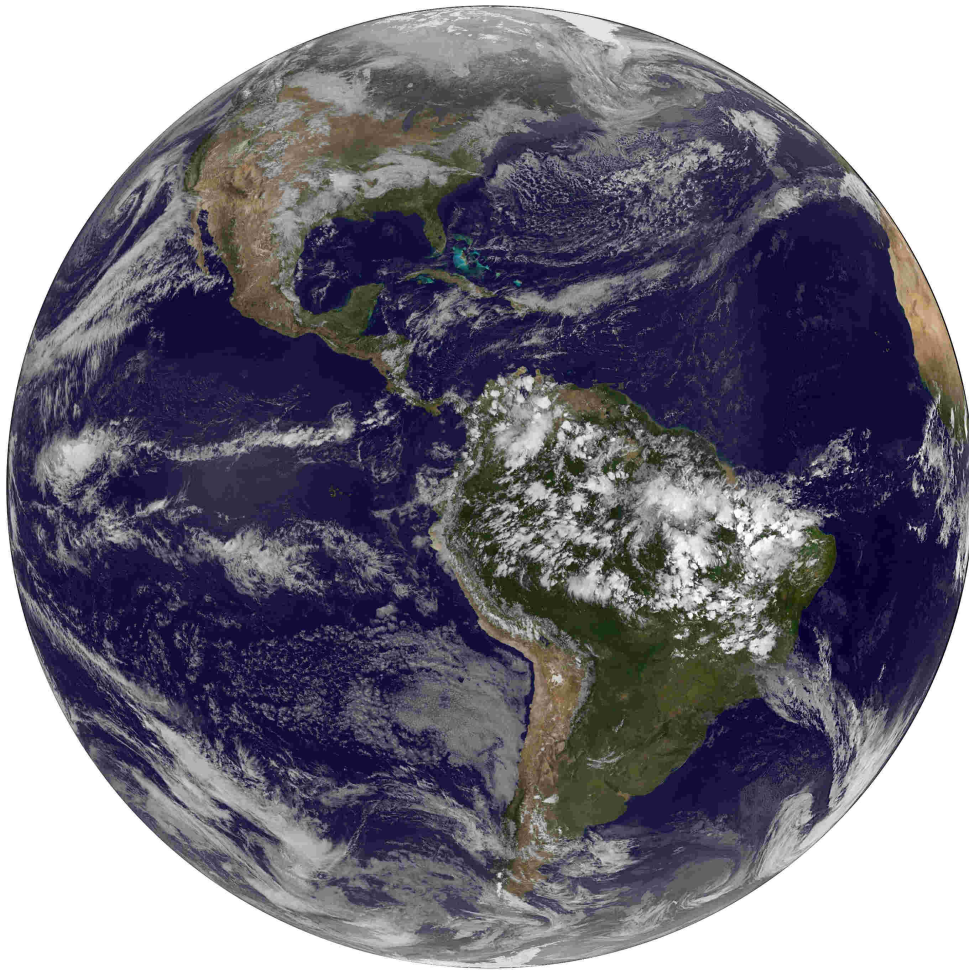
Marcela Torres Brizuela  
María Laura Bettolli

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

ISSN 1850-468X



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