

NOTAS Y CORRESPONDENCIA

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

Erica Colombani¹, Santiago Behr¹, Laura Brandizi²

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Trelew, Chubut, Argentina.

²Consejo 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 Km²) 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-escorrimento. 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.

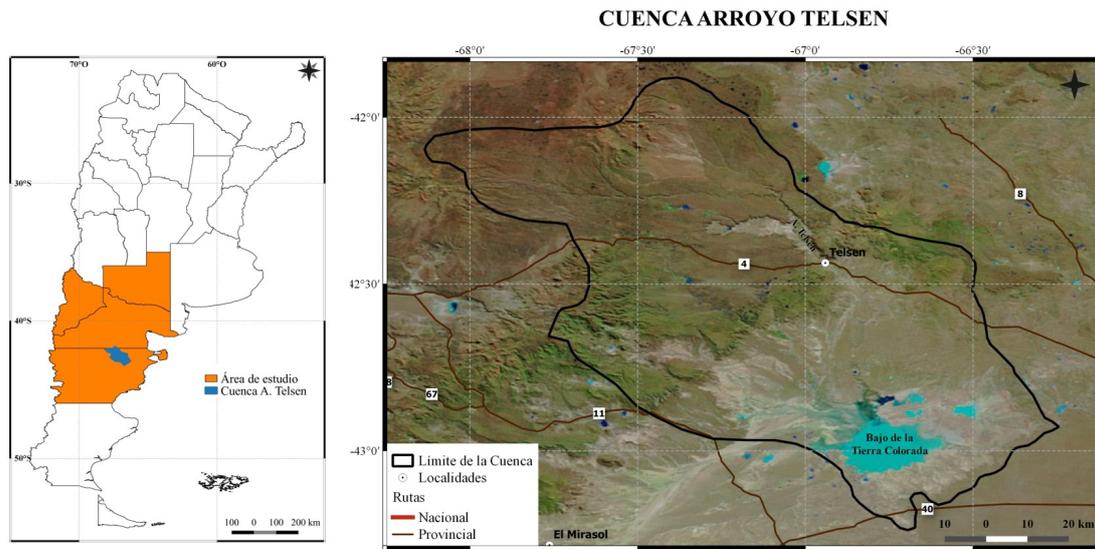


Figura 1: Ubicación geográfica del área de estudio. Izquierda: provincias que abarca el área de estudio y ubicación de la cuenca del arroyo Telsen en la provincia de Chubut. Derecha: límite geográfico de la cuenca del arroyo Telsen y ubicación de la localidad de Telsen, provincia de Chubut.

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

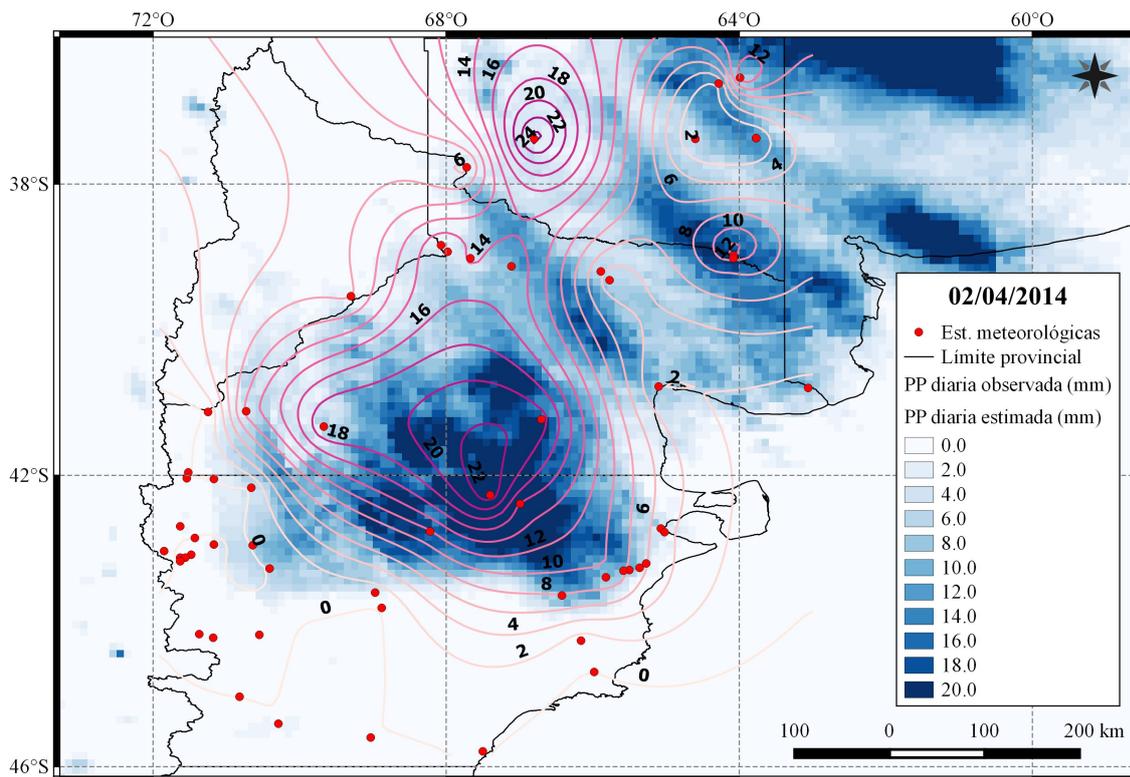


Figura 2: Comparación espacial de la precipitación diaria acumulada estimada a partir de GSMaP (escala de colores) y observada (isohietas de línea llena) (mm) correspondiente al día 2 de abril de 2014 sobre el área de estudio. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas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

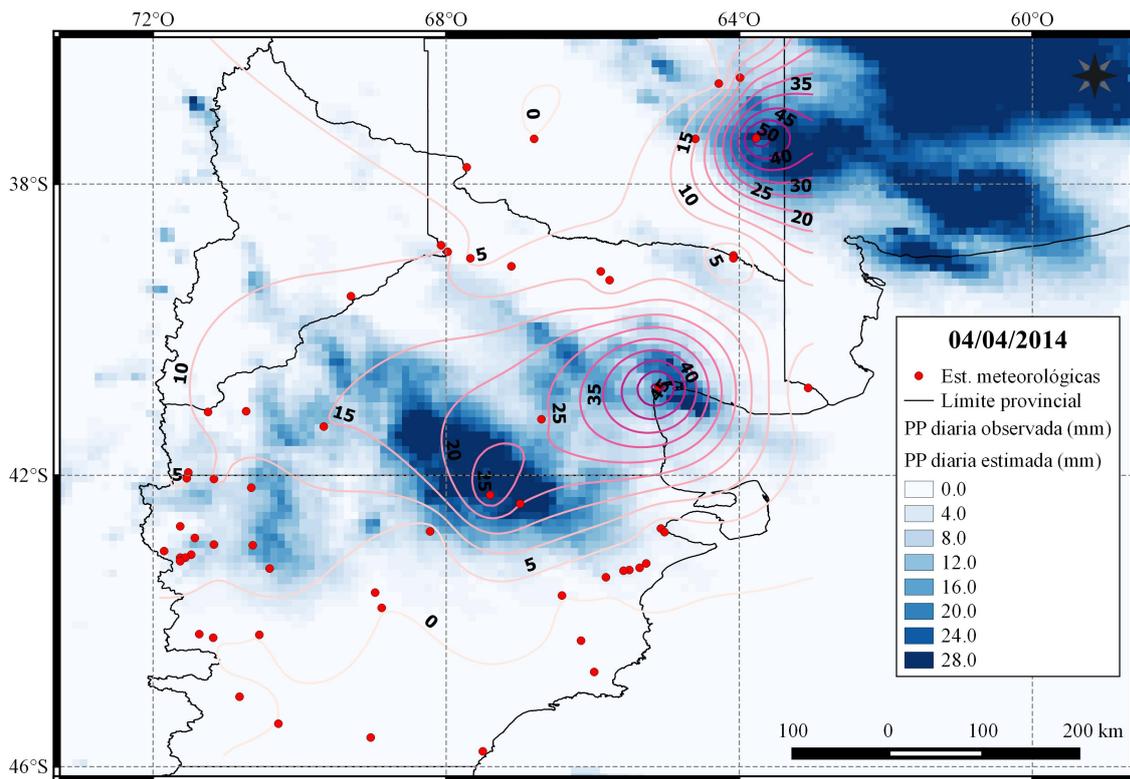


Figura 3: Comparación espacial de la precipitación diaria acumulada estimada a partir de GSMaP (escala de colores) y observada (isohietas de línea llena) (mm) correspondiente al día 4 de abril de 2014 sobre el área de estudio. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas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

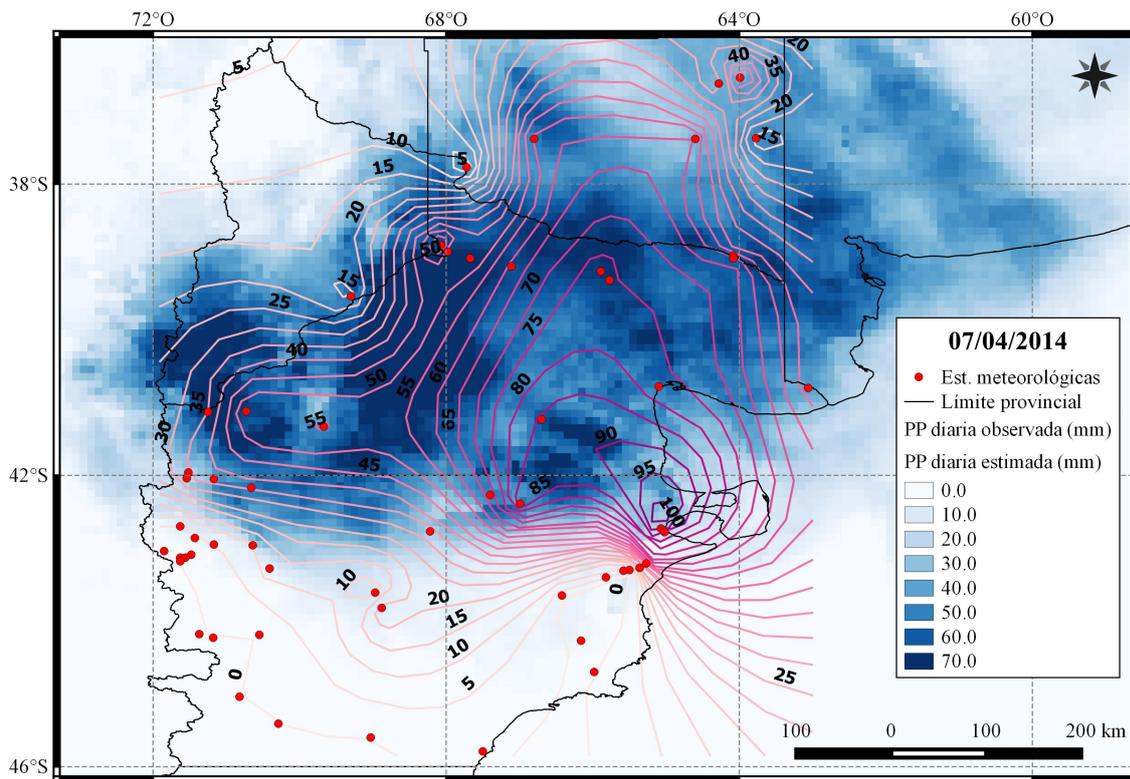


Figura 4: Comparación espacial de la precipitación diaria acumulada estimada a partir de GSMaP (escala de colores) y observada (isohietas de línea llena) (mm) correspondiente al día 7 de abril de 2014 sobre el área de estudio. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas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

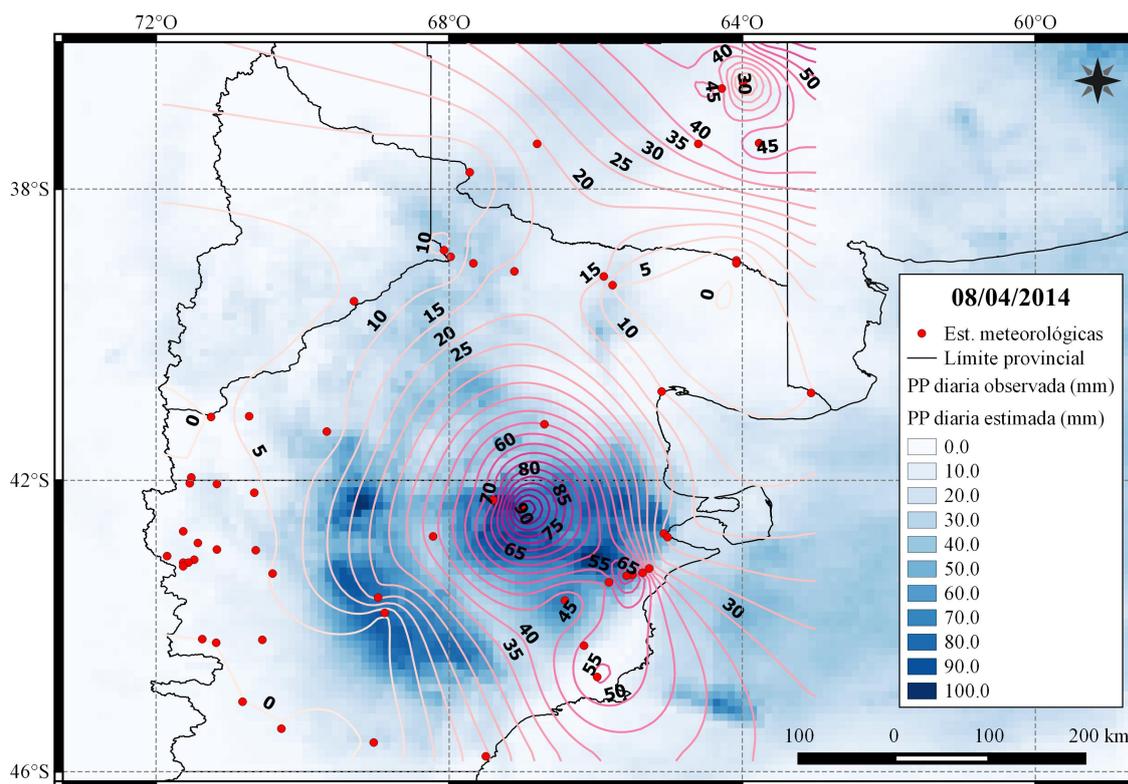


Figura 5: Comparación espacial de la precipitación diaria acumulada estimada a partir de GSMaP (escala de colores) y observada (isohietas de línea llena) (mm) correspondiente al día 8 de abril de 2014 sobre el área de estudio. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas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

Día	BIAS	CC	RMSE
01/04/2014	1,53	0,86	12,0
02/04/2014	-0,25	0,57	1,9
03/04/2014	-2,67	0,73	20,9
04/04/2014	-4,10	0,60	32,0
05/04/2014	-3,36	0,78	26,3
06/04/2014	-1,91	0,56	14,9
07/04/2014	0,15	0,58	1,2
08/04/2014	-0,52	0,42	4,0
09/04/2014	-1,15	0,00	9,0
10/04/2014	-0,84	0,00	6,5
11/04/2014	-1,75	0,63	13,7
12/04/2014	-0,21	0,24	1,7
13/04/2014	0,20	0,14	1,6
14/04/2014	-0,03	-0,02	0,2
15/04/2014	-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 m³seg⁻¹ utilizando los datos de estaciones meteorológicas y 377,1 m³seg⁻¹ 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 m³seg⁻¹ para un tiempo de retorno de 25 años y 453 m³seg⁻¹ para un tiempo de retorno

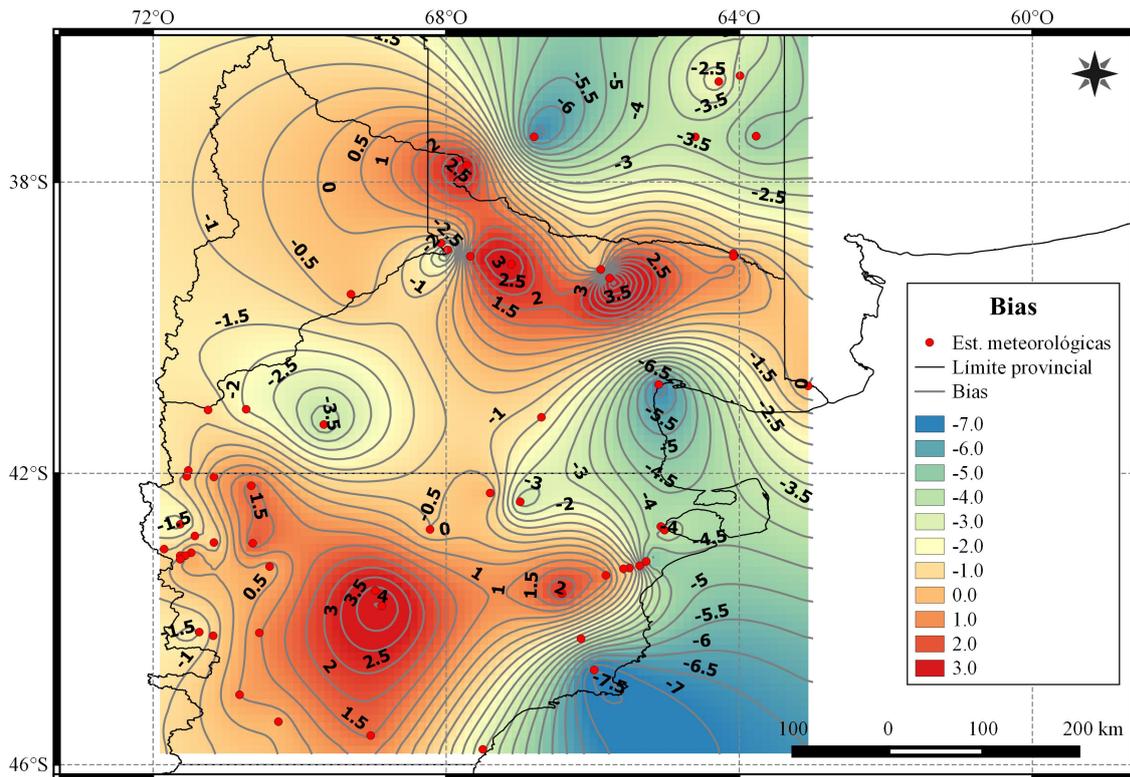


Figura 6: Distribución espacial del Bias promedio para el área de estudio correspondiente al período 1 al 15 de abril de 2014 (mm). Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas en el análisis.

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.

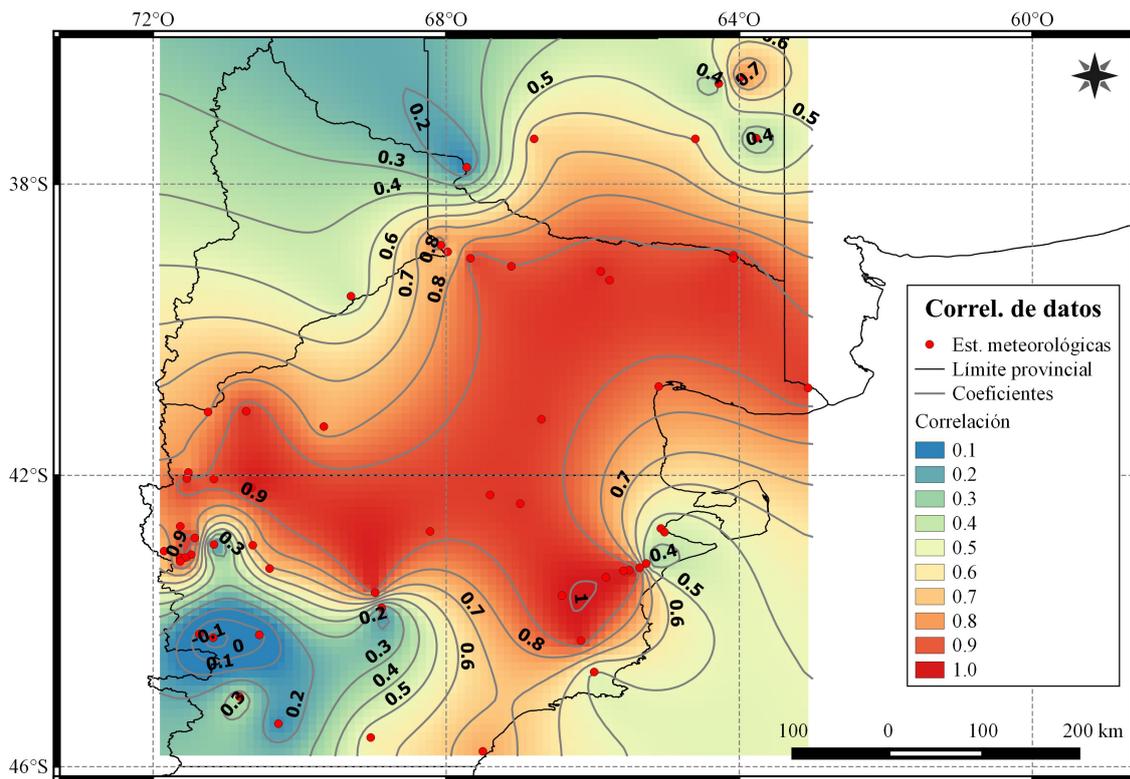


Figura 7: Distribución espacial del coeficiente de correlación para el área de estudio correspondiente al período 1 al 15 de abril de 2014. Los puntos rojos indican la ubicación de las estaciones pluviométricas consideradas en el análisis.

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

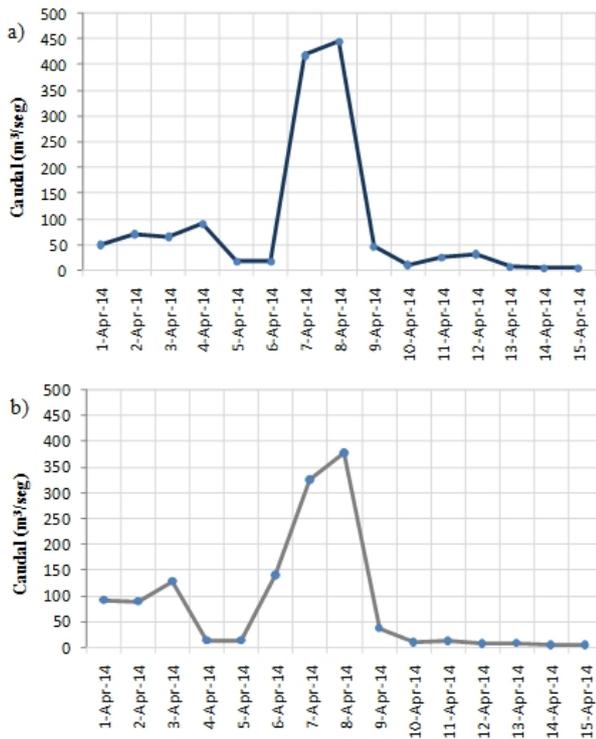


Figura 8: Caudal máximo simulado con el modelo HEC-HMS en la localidad de Telsen, utilizando datos de estaciones meteorológicas (a) y datos de satélite (b).

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.