

Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina

Nota Técnica SMN 2021-105

María Paula Hobouchian¹, Gonzalo Díaz², Luciano Vidal¹, Yanina García Skabar¹, Lorena Ferreira², Martín Maas³, María Sol Rossi Lopardo², Hernán Veiga⁴ y Martín Rugna¹

¹ Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios. Servicio Meteorológico Nacional.

² Dirección de Servicios Sectoriales, Dirección Nacional de Pronósticos y Servicios para la Sociedad. Servicio Meteorológico Nacional.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

⁴ Dirección Central de Monitoreo del Clima, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios. Servicio Meteorológico Nacional.

Septiembre 2021



Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

Resumen

El rol fundamental de la precipitación en distintas actividades socioeconómicas, las limitaciones en su medición y los desafíos en su representación, motivan la utilización, validación y ajuste de otras fuentes de datos como las estimaciones de precipitación por satélite. En el marco de un proyecto del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina para mejorar la estimación de la precipitación a nivel regional, se impulsó el ajuste de la estimación satelital IMERG con las observaciones pluviométricas disponibles. El producto desarrollado inicialmente, aplica una corrección histórica a partir de la técnica conocida como *PDF-matching* que utiliza las estaciones meteorológicas de mejor calidad, seguida de una corrección diaria a partir de la interpolación del Bias local que suma el valor agregado de todas las estaciones meteorológicas disponibles en escala diaria. Si bien el monitoreo diario del producto y la validación preliminar de una versión previa muestran resultados alentadores, se espera continuar este trabajo con una validación en la región de estudio y con las mejoras continuas de la versión actual en base a la experiencia con los métodos aplicados y las condiciones locales. De este modo, se presenta un producto experimental cuyo proceso de ejecución dura pocos minutos y que se verá favorecido principalmente con la incorporación de nuevos datos pluviométricos de calidad.

Abstract

The fundamental role of precipitation in different socioeconomic activities, the limitations in its measurement, and the challenges in its representation motivate the use, validation, and adjustment of other data sources such as satellite precipitation estimates. This study is part of a project at the National Meteorological Service to improve precipitation estimates in Argentina. This work presents a merged product based on the adjustment of IMERG estimate with rain gauges available at a daily scale. The methodology applies a historical correction with the PDF-matching method which uses the best quality rain gauges, followed by a daily correction with the interpolation of the local Bias that uses all the rain gauges available. The current analysis of the product and preliminary evaluation of a previous version show favorable results. In the short term, this work will continue with the assessment and improvements of the current version.

Palabras clave: precipitación, estimación satelital, PDF-matching, Bias correction.

Citar como:

Hobouchian, M. P., G. Díaz, L. Vidal, Y. García Skabar, L. Ferreira, M. Maas, M. S. Rossi Lopardo, H. Veiga y M. Rugna, 2021: Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105.

Prólogo

Esta Nota Técnica forma parte de una serie que recopila informes realizados en el marco del proyecto “Estimación de precipitación de mejor calidad a partir de la combinación de datos de satélite, radar y estaciones meteorológicas” en el marco del Programa 8.1.1 “Programa de explotación de los datos de sensores remotos” (año 2020). El objetivo final del proyecto es desarrollar e implementar un algoritmo que combine de forma óptima estimaciones de precipitación basadas en sensores remotos (satélite y radar meteorológicos) y observaciones in situ (pluviómetros) para lograr una estimación cuantitativa de precipitación que permita mejorar de manera significativa el monitoreo de la precipitación y otras aplicaciones desarrolladas dentro del Servicio Meteorológico Nacional. Con esta serie de Notas Técnicas se busca documentar el proceso de desarrollo de cada componente del proyecto: 1) observaciones pluviométricas, su integración a través de redes propias y de terceros y el desarrollo de metodologías de evaluación de confiabilidad de esta información y control de calidad en tiempo real, 2) desarrollo de una estimación de precipitación en base a radar meteorológicos, metodologías de control de calidad en tiempo diferido y generación de productos, y 3) desarrollo e implementación de una primera versión de una estimación satelital de precipitación corregida con pluviómetros, cálculo y análisis de distancias de correlación, metodologías de corrección de errores sistemáticos (climatología) y diarios, y validación.

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación tiene un rol fundamental en el ciclo hidrológico, así como en diversas actividades socioeconómicas que dependen de su correcta medición. El desafío asociado a la gran variabilidad espacial y temporal de esta variable, sumado a las limitaciones de las redes de estaciones meteorológicas poco densas en Argentina, motiva la utilización, validación y ajuste de otras fuentes de datos como las estimaciones cuantitativas de precipitación (QPE, por sus siglas en inglés) a partir de sensores remotos (radares meteorológicos en superficie y sensores a bordo de satélites).

Los productos QPE complementan a las observaciones pluviométricas (en adelante, OBS) que son las mediciones directas y puntuales de la precipitación consideradas de referencia. Las estimaciones de precipitación por radar derivan de microondas activas, requieren un tratamiento complejo de la señal y el desarrollo de los algoritmos presenta desafíos locales. Actualmente, el detalle de los avances en el desarrollo de los productos QPE por radar en Argentina se encuentra en Giménez y otros (2021). Por su parte, las técnicas QPE por satélite (en adelante, SQPE) tienen como ventaja principal una cobertura homogénea y una gran disponibilidad de productos globales y regionales con un recorrido sólido en la integración de datos de múltiples sensores satelitales.

Las técnicas SQPE que combinan información satelital del espectro infrarrojo y de microondas en forma óptima tienen un mejor rendimiento que los algoritmos que trabajan por separado las distintas fuentes de datos. A su vez, estos productos mejoran su calidad si incluyen un ajuste pluviométrico. Actualmente, entre las estimaciones de precipitación con ajuste pluviométrico más utilizadas en Sudamérica, se destacan: *Combined Scheme* (CoSch; Vila y otros, 2009); *Combined Technique* (MERGE; Rozante y otros, 2010); *Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS; Funk y otros, 2015); *Bias-Corrected Climate Prediction Center Morphing Technique* (CMORPH; Xie y otros, 2017); *Global Satellite Mapping of*

Precipitation product en su versión Gauge (GSMaP; Mega y otros, 2018); e *Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement* en su versión *Final Run* (IMERG; Huffman y otros, 2020).

Entre los productos regionales, CoSch realiza una combinación de esquemas de corrección del Bias aditiva y multiplicativa para reducir el error de la estimación satelital de base con respecto a las observaciones pluviométricas, mientras que la estimación MERGE utiliza un esquema de corrección de Barnes. Ambas metodologías son variantes de la conocida interpolación con pesos por la distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés) que es una técnica simple de aplicar y rápida de utilizar principalmente en redes con baja densidad de estaciones meteorológicas. A nivel global, CHIRPS aplica una interpolación con pesos que consideran la distancia a las estaciones cercanas y la correlación espacial. En el caso de IMERG *Final Run*, se realiza un ajuste pluviométrico a partir de factores de corrección mensual (relaciones entre las estimaciones satelitales y las observaciones mensuales) que se aplican para generar una estimación de precipitación instantánea corregida. Por su parte, GSmAP *Gauge* define una función de costo para minimizar el error entre la estimación corregida y estimación satelital de base. Por otra parte, CMORPH calcula coeficientes de corrección a partir de la máxima coincidencia entre la Función de Densidad de Probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) de la estimación de base y la de los datos pluviométricos, metodología que se conoce como *PDF-matching*. Este último método es muy utilizado como primer paso de ajuste, debido a que logra mejorar la magnitud estimada y la distribución de frecuencias de eventos de precipitación, con un segundo paso de interpolación local para reforzar el dato observado en el día de interés (Xie y Xiong, 2011). En esta misma línea, en países como Chile, Arabia Saudita e Irán que tienen redes de estaciones similares a la de Argentina, se han realizado trabajos aplicando la técnica de *PDF-matching* histórico por trimestres y regiones, combinada con una interpolación local similar a la técnica de IDW (Yang y otros, 2016; Alharbi y otros, 2018; Katiraie-Boroujerdy y otros, 2020).

A nivel local, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina tiene un amplio recorrido de trabajo con los productos SQPE desde que se implementó la técnica Hidroestimador (Scofield y Kuligowski, 2003) en el año 2013. En relación al Hidroestimador, se realizó una validación diaria y se analizaron las posibles mejoras del producto (Hobouchian y otros, 2017a). A su vez, se ganó experiencia en el estudio y evaluación de los productos SQPE más utilizados estableciendo su calidad por regiones y trimestres (Salio y otros, 2015). Este último trabajo continuó con un estudio extendido sobre los Andes subtropicales para analizar la dependencia de los errores con la elevación del terreno y ubicación relativa a la topografía (Hobouchian y otros, 2017b). Asimismo, se evaluó el uso de los productos SQPE para usuarios específicos como los seguros agropecuarios en el centro de Argentina (Hobouchian y García Skabar, 2017) y se realizó una validación diaria de algunos productos derivados de la misión *Global Precipitation Measurement* por regiones (Hobouchian y otros, 2018). En línea con estos trabajos, se mantiene actualizada en el SMN una base de datos de diferentes agencias que desarrollan estimaciones satelitales con acceso libre. Las características principales de las estimaciones disponibles en el SMN se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1 Información de las estimaciones de precipitación por satélite disponibles en el SMN. La estimación muestra la sigla de cada producto y la agencia que lo genera. El tipo indica los datos que utiliza el algoritmo por sus siglas en inglés: infrarrojo (IR), microondas pasivas (PMW), microondas activas (DPR), observaciones pluviométricas (OBS) y pronósticos numéricos de humedad relativa (HR) y agua precipitable (PW).

Estimación	Resolución	Latencia	Tipo	Cobertura-periodo
HDROESTIMADOR (SMN)	4 km-10 min	5 min	IR-HR-PW	Regional/2013-Actualidad
IMERG ER (NASA)	0.1°-30 min	4 h	IR-PMW-DPR	Global/2000-Actualidad
IMERG LR (NASA)	0.1°-30 min	12 h	IR-PMW-DPR	Global/2000-Actualidad
IMERG FR (NASA)	0.1°-30 min	3 meses	IR-PMW-DPR-OBS	Global/2000-Actualidad
GSMaP NRT (JAXA)	0.1°-1 h	4 h	IR-PMW-DPR	Global/2000-Actualidad
GSMaP Gauge (JAXA)	0.1°-1 h	4 h	IR-PMW-DPR-OBS	Global/2000-Actualidad
ABI RRQPE (NOAA)	2 km-10 min	5 min	IR-PMW	Global/2018-Actualidad
CHIRPS (CHG)	0.05°-24h	6 días	IR-OBS	Global/1981-Actualidad

En el año 2019, se originó un proyecto de colaboración interinstitucional entre el SMN y el Instituto Nacional del Agua (INA) cuyo objetivo es la combinación óptima de distintas fuentes de datos disponibles (pluviómetros, radares y satélites meteorológicos) para mejorar la estimación de precipitación en Argentina y los pronósticos hidrológicos. En el marco de este proyecto, la componente satelital está enfocada en el ajuste de una estimación de precipitación por satélite con observaciones pluviométricas en Argentina. La elección de la estimación satelital que será usada como base está condicionada por su tiempo de latencia que debe ser menor a las 6 horas, tanto para el monitoreo de la precipitación diaria como por su utilidad en el pronóstico hidrológico. Las evaluaciones en distintas regiones de Argentina mencionadas previamente, permitieron seleccionar como base inicial a la estimación satelital IMERG en su versión *Early Run* (en adelante, IMERG ER; Huffman y otros, 2020) que tiene baja latencia en los datos y mejor rendimiento con respecto a productos similares (Hobouchian y otros, 2018).

De este modo, el objetivo de este trabajo es documentar el desarrollo e implementación del producto denominado inicialmente *SQPE-OBS* que incorpora un ajuste local con observaciones pluviométricas a la estimación de precipitación satelital IMERG ER. La idea es aplicar un conjunto de metodologías reconocidas en trabajos previos adaptándolas a las posibilidades de la región en una primera versión documentada *v1.0* que pueda seguir mejorando. A su vez, este producto integra redes de estaciones meteorológicas automáticas en forma experimental como valor agregado local a los productos globales que ya tienen un ajuste pluviométrico con menos información disponible.

2. REGIÓN DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS

En esta sección se describe la región de estudio y las regiones climáticas definidas inicialmente para aplicar la metodología de ajuste de la estimación de precipitación satelital con observaciones pluviométricas en Argentina. Del mismo modo, se detallan los distintos datos ingresados en el algoritmo para obtener el producto *SQPE-OBS*.

2.1 Dominio de interés y regiones climáticas

La región de estudio seleccionada para desarrollar el producto SQPE-OBS corresponde al área al sur de Sudamérica que se muestra en la Fig. 1. A su vez, se observan las regiones climáticas que se definieron inicialmente para utilizar en la metodología del producto. Estas regiones climáticas se utilizan en el SMN para el modelo estadístico de pronóstico trimestral y parten de un estudio previo de clusterización con las anomalías de precipitación mensual en el periodo 1961-2014 a partir de las estaciones convencionales de referencia en Argentina. De este modo, las estaciones con su región climática asignada se ubicaron en el punto de retícula IMERG más cercano. En base a la proximidad de la información disponible, se obtuvo el número de región climática en cada punto de retícula IMERG para usar en el código del producto. Es importante notar que esta determinación inicial expande arbitrariamente las regiones climáticas a los países limítrofes y sobre el océano, donde no se usaron o no hay estaciones meteorológicas para estudiar el régimen de precipitación.

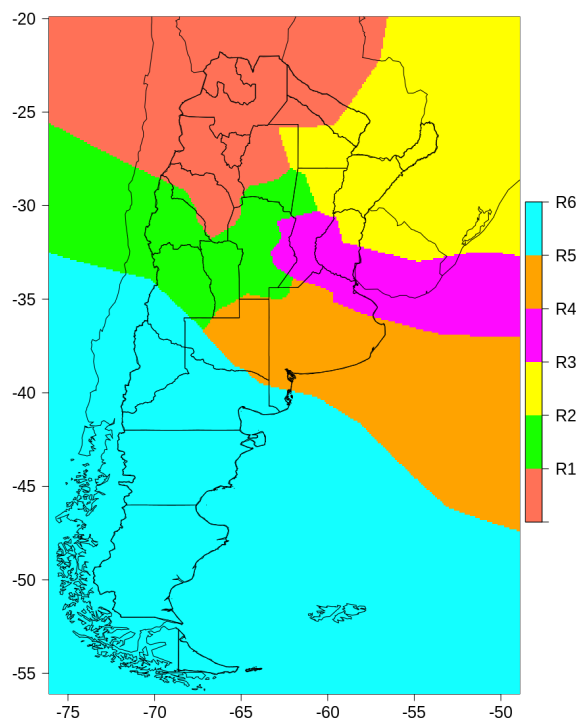


Fig. 1 Dominio de interés y regiones climáticas definidas inicialmente a partir del estudio realizado por la Dirección Central de Monitoreo del Clima sobre la precipitación mensual en las estaciones meteorológicas convencionales de Argentina.

2.2 Red de estaciones meteorológicas de referencia

Con el fin de aplicar la técnica de *PDF-matching* histórico que se describe en la Sección 3, se utilizaron las estaciones meteorológicas convencionales (en adelante, EMCs) de la red de observación de superficie del SMN y las estaciones meteorológicas de los países limítrofes (Chile, Bolivia, Paraguay, Brasil y Uruguay)

incluidas en el Sistema de Telecomunicación Global (GTS, por sus siglas en inglés). Asimismo, se calcularon los valores de precipitación de estas estaciones meteorológicas en escala diaria en el período 2001-2019 para su posterior procesamiento en la metodología.

2.3 Red de estaciones meteorológicas disponibles diariamente

Las estaciones meteorológicas que el producto SQPE-OBS utiliza diariamente varían en base a su disponibilidad y calidad para cada día específico (Rossi y otros, 2021). Las estaciones que se utilizan para el producto diario SQPE-OBS son las estaciones meteorológicas de referencia (EMCs del SMN y GTS), a las que se le suman las estaciones meteorológicas automáticas (en adelante, EMAs) propias del SMN y pertenecientes a terceros (Fig. 2). En particular, la red de EMAs de la provincia de Córdoba fue recientemente evaluada en forma preliminar con el fin de cuantificar el grado de confiabilidad de esta información (Díaz y otros, 2021) previo a ser considerada en el producto SQPE-OBS en tiempo real. A futuro, se espera extender este tipo de estudios a otras redes de EMAs disponibles en Argentina que se incorporen en modo experimental al producto SQPE-OBS.

Algunas de las EMAs pertenecientes a terceros se encuentran integradas al repositorio interno de datos del SMN (en adelante, GeoNode), mientras que otras son obtenidas a partir de servicios externos al SMN. La Tabla 2 muestra cuáles son las EMAs consideradas para el producto SQPE-OBS junto con su identificación (id), la región que abarcan, si se encuentran integradas al GeoNode o si se obtienen de servicios web externos y la cantidad de registros diarios totales de las estaciones de cada red para poder calcular el valor de precipitación acumulada diaria.

Tabla 2 Redes de EMAs de terceros utilizadas diariamente en el producto SQPE-OBS, con su número de id, la región que abarcan, si se encuentran integradas a la red interna del SMN y el registro total de datos de precipitación por día.

id	Red de EMAs de terceros	Región que abarcan	Observaciones	Registros por día de precipitación
1	Bolsa de Cereales de Córdoba	Córdoba	Integradas a GeoNode	144 (6 registros por hora)
2	Bolsa de Cereales de Entre Ríos	Entre Ríos	Integradas a GeoNode	144 (6 registros por hora)
4	AySA	Buenos Aires	Integradas a GeoNode	96 (4 registros por hora)
7	SINARAME	Todo el país	Integradas a GeoNode	144 (6 registros por hora)
8	INTA	Buenos Aires, La Pampa y Río Negro	Integradas a GeoNode	144 (6 registros por hora)
10	Ministerio de Producción de Corrientes	Corrientes	Integradas a GeoNode	144 (6 registros por hora)
11	Proyecto SOBA	Buenos Aires	Integradas a GeoNode	24 o 48 (1 o 2 registros por hora)
-	Represa Salto Grande	Corrientes, Entre Ríos y Uruguay	Servicio web externo	1 (0 registros por hora)
-	Universidad de La Punta	San Luis	Servicio web externo	24 (1 registro por hora)

El proceso que se ejecuta para generar el ingreso de datos de precipitación de las EMCs y las EMAs al producto SQPE-OBS es de código abierto y se encuentra disponible en el siguiente vínculo de GitLab del SMN: <https://gitlab.smn.gov.ar/gdiaz/genera-datos-obs-qpem>. Este proceso tiene un parámetro de configuración que define la cantidad de datos faltantes que se permite para calcular la precipitación diaria y puede ser modificado por el usuario (<https://gitlab.smn.gov.ar/gdiaz/func-bajo-registro-de-datos>). Es así que el valor umbral permitido de registros faltantes podría variar en cada red de estaciones. Actualmente, el umbral permitido es de 140 registros por cada estación y se mantiene constante para las EMAs de las redes que cuentan con 144 registros por día (Tabla 2). Es decir, las estaciones de estas redes que tienen menos de 140 registros (aproximadamente 1 hora de registros faltantes) en el día, no son consideradas para la ejecución del producto SQPE-OBS.

La Fig. 2 muestra la ubicación de todas las estaciones meteorológicas que se encuentran disponibles para la elaboración del producto diario SQPE-OBS. Las EMAs pertenecientes a terceros aportan a una mejor representación de la precipitación principalmente en la región de San Luis, Córdoba, Entre Ríos, Corrientes y Uruguay. Las redes externas involucradas en esta región son las de la Bolsa de Cereales de Córdoba, la Bolsa de Cereales de Entre Ríos, la Represa Salto Grande y la Universidad de La Punta. Por otro lado, hay una buena distribución de observaciones en la provincia de Buenos Aires debido a la conjunción de las EMCs del SMN, las EMAs del SMN y las EMAs de terceros.

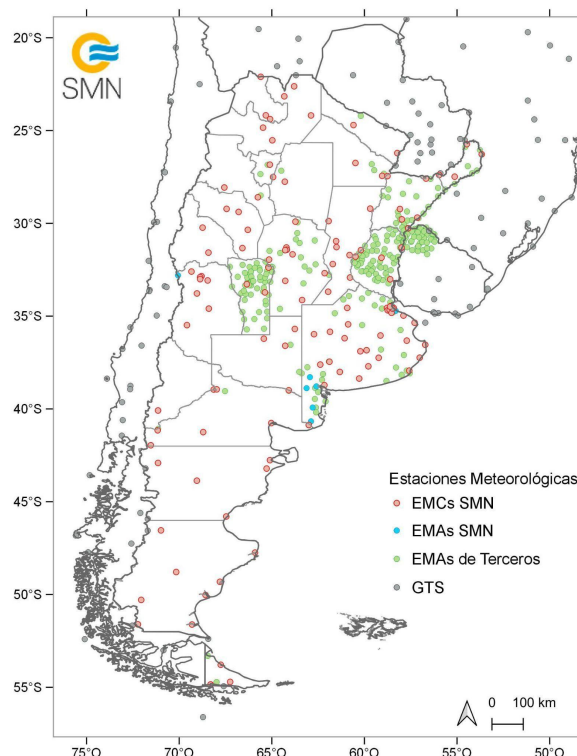


Fig. 2 Red de estaciones meteorológicas disponibles compuesta por las EMCs del SMN (círculos rojos), las EMAs del SMN (círculos celestes), las EMAs de terceros (círculos verdes) y las estaciones meteorológicas de los países limítrofes (círculos grises) incorporadas a través del GTS.

2.4 Estimación de precipitación por satélite

Como se mencionó anteriormente y en línea con la evaluación diaria de las técnicas SQPE en el sur de Sudamérica, la estimación base del producto SQPE-OBS corresponde a IMERG ER (Huffman y otros, 2020) desarrollada por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Este producto tiene el objetivo de calibrar, unir e interpolar las estimaciones de precipitación satelital derivadas de datos de microondas e infrarrojos disponibles a nivel global. Estos datos son de acceso libre con una cobertura global entre 60°N y 60°S de latitud, una resolución espacial de 0.1°, una resolución temporal de 30 min y una latencia aproximada de 4 horas (Tabla 1). Actualmente, para que el producto funcione con la menor latencia posible, se calcula la precipitación correspondiente al día pluviométrico con IMERG ER a las 13:30 HOA. Es decir, a esa hora se encuentran disponibles los datos necesarios para obtener la precipitación acumulada diaria entre las 09:00 HOA del día anterior y las 09:00 HOA del día actual de ejecución.

2.5 Distancias de correlación espacial de la precipitación

Por otra parte, en el producto SQPE-OBS se utilizan las distancias de correlación espacial de la precipitación para los trimestres diciembre-enero-febrero (DEF), marzo-abril-mayo (MAM), junio-julio-agosto (JJA) y septiembre-octubre-noviembre (SON) en el sur de Sudamérica. Estos valores se calcularon en un estudio previo de Hobouchian y otros (2021) para conocer la estructura espacial de la precipitación en Argentina según la época del año, e indican la distancia a partir de la cual la correlación entre un punto de interés con el resto en el entorno, decae significativamente. Las distancias de correlación se calcularon con la estimación satelital IMERG FR de mejor calidad por su ajuste pluviométrico, y aplicando una metodología que incluye principalmente la correlación espacial de Kendall y un modelo de ajuste de decaimiento exponencial de tres parámetros. Estas distancias de correlación contribuyen en el producto SQPE-OBS como radios de influencia de la precipitación en el proceso de interpolación del Bias (medida de error sistemático entre los valores estimados y observados de precipitación) para corregir la estimación satelital de base IMERG ER con las estaciones meteorológicas disponibles. De este modo, el radio de influencia utilizado en el paso de corrección diaria del Bias local varía según la región y época del año en acuerdo con la variabilidad espacial y temporal de la precipitación.

3. METODOLOGÍA

En esta sección se describen los métodos estadísticos aplicados en el producto experimental SQPE-OBS v1.0 que se encuentra funcionando en el SMN. Para el desarrollo e implementación de este producto se utilizó el lenguaje y entorno de programación libre R (R Core Team, 2020) orientado al análisis estadístico y visualización de datos.

3.1 PDF-matching histórico

El primer paso del producto desarrollado consiste en aplicar una corrección histórica a partir de la coincidencia entre la distribución estimada y observada mediante la técnica conocida como *PDF-matching*. Este método estadístico permite remover el Bias de la estimación satelital mejorando tanto la magnitud estimada como la distribución de frecuencias de eventos de precipitación. En esta línea, se siguieron trabajos de referencia en la temática en distintas partes del mundo (Xie y otros, 2017; Xie y Xiong, 2011; Yang y otros, 2016; Alharbi y otros, 2018; Katiraie-Boroujerdy y otros, 2020), que se adaptaron a las condiciones locales y la posible aplicación del método en el corto plazo. Se espera ir mejorando la utilización de este método con la experiencia y la integración de nuevas redes de estaciones meteorológicas de calidad en la región de estudio.

En este trabajo se utilizaron las estaciones meteorológicas convencionales de referencia que tienen controles de calidad confiables para asegurar la calidad de la corrección histórica a la estimación satelital IMERG ER. A su vez, se aplicó el método por regiones climáticas (Fig. 1) y por trimestres (DEF, MAM, JJA y SON) en el periodo coincidente de años completos 2001-2019 para los pares de datos observación-estimación en las PDFs.

Los factores de corrección se obtuvieron a partir de la coincidencia de la Función de Distribución Acumulada (CDF, por sus siglas en inglés) observada y estimada para los distintos percentiles de precipitación (Gudmundsson y otros, 2012). Actualmente, se usa la opción de *smoothing spline* para la transformada estadística que ajusta la CDF de la estimación satelital. Esta opción permite equilibrar el ajuste si se tiene un conjunto de datos ruidosos como es el caso de la baja densidad de observaciones pluviométricas en algunas regiones climáticas. Además, se aplica una corrección constante con regresión lineal local solo en los casos en que la variable se aparta del rango usado para corregir. Esta combinación de transformadas está asociada a la extrapolación de los factores de corrección sobre montaña, océano o regiones sin datos para corregir en donde no es recomendable usar el *smoothing spline* ya que se generan valores extremos fuera de rango en la estimación final ajustada.

En la Fig. 3 se muestran como ejemplo las Distribuciones de Probabilidad del Volumen de Precipitación (conocidas como PDFs volumétricas) en la región climática R3 al noreste de Argentina y los distintos trimestres en el periodo 2001-2019. Estos gráficos comparan las distribuciones de precipitación estimada original (línea naranja), estimada ajustada con *PDF-matching* (línea verde) y observada (línea negra) en los pares de puntos donde hay observaciones pluviométricas. Las PDFs volumétricas consideran la contribución relativa de cada intervalo de precipitación al volumen total de la precipitación en escala decibel ($\text{dBR}=10 \log(R/1\text{mmdía}^{-1})$; $[R]=[\text{mmdía}^{-1}]$) y son menos sensibles a diferentes límites de detección en los datos analizados (Amitai y otros, 2012). En todos los trimestres, se observa un corrimiento hacia los eventos de precipitación más intensa en la estimación original y una correspondencia de la distribución estimada ajustada con la distribución observada. Es importante aclarar que en esta versión inicial de SQPE-OBS, los factores de corrección obtenidos con esta metodología en una región climática, se aplican al resto de los puntos de retícula satelital que forman parte de la misma región.

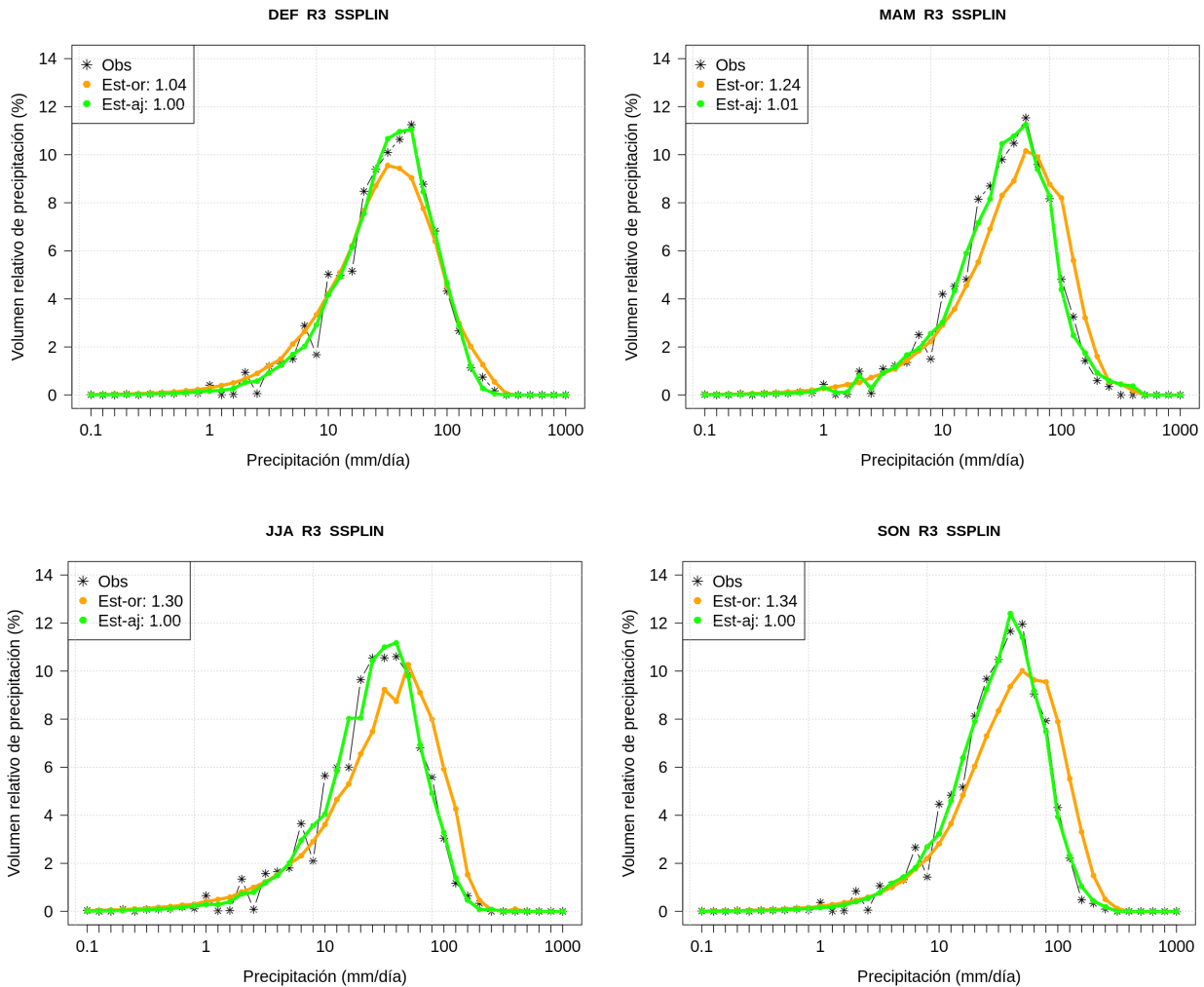


Fig. 3 PDFs volumétricas correspondientes a la región climática R3 al noreste de Argentina en los trimestres DEF (panel superior izquierdo), MAM (panel superior derecho), JJA (panel inferior izquierdo), SON (panel superior izquierdo). Se compara la distribución de precipitación estimada original (línea naranja), la estimada ajustada con PDF-matching (línea verde) y la observada (línea negra).

3.2 Corrección diaria del Bias local

El segundo paso de la metodología tiene como objetivo reforzar la medición directa observada en el día de interés e incluir el valor agregado de las estaciones meteorológicas automáticas disponibles. En este caso, se adaptó la corrección del Bias local con observaciones pluviométricas implementada en el sistema *Multi-Radar/Multi-Sensor* desarrollado por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (Zhang y otros, 2011). Este método es una modificación de la conocida interpolación IDW que considera la distancia entre la observación pluviométrica y el punto de retícula de la estimación satelital, como así también la densidad de la red de datos utilizada. Los pasos del proceso de corrección se describen a continuación:

1. En primer lugar, se calculan los errores aditivos diarios e_i en los puntos donde hay observaciones pluviométricas o_i . Estos errores contienen la diferencia entre la estimación satelital de base corregida previamente con la técnica de PDF-matching s_i y su par de observación o_i más cercano:

$$e_i = s_i - o_i \quad (1)$$

2. Luego, se calcula una validación cruzada en el día de interés para obtener el exponente de los pesos en la interpolación por regiones que se detalla en el paso 3. En este paso y en los pasos 3 y 4, se utilizan las distancias de correlación del trimestre correspondiente como radios de influencia y las regiones climáticas definidas previamente. La validación cruzada consiste en obtener la diferencia entre el error de la estimación satelital interpolado y el error real en la estación en cada punto de retícula donde hay una observación pluviométrica cercana y para distintas opciones de exponente de los pesos utilizadas en las referencias: 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3. El valor de exponente de los pesos que minimiza el error cuadrático medio es seleccionado para cada región en el día de interés en que se realiza el ajuste.
3. Una vez resuelto el punto 2, se realiza la interpolación del Bias local por regiones:

$$w_i = \frac{1}{d_i^b}, \quad d_i \leq D \quad (2)$$

$$BIAS_{int} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i e_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

En este caso, $BIAS_{int}$ es el error de la estimación satelital interpolado en cada punto de retícula a partir de las n observaciones pluviométricas disponibles en el radio de influencia; w_i son los pesos asignados por la distancia; d_i es la distancia entre la observación pluviométrica i y el punto de retícula de interés; b es el exponente que domina los pesos calculado en el paso 2 por validación cruzada; y D es la distancia de correlación del trimestre correspondiente utilizada como radio de influencia.

Por último, la interpolación incluye un factor α (ecuación 4) que atenúa el impacto de la interpolación en redes poco densas y normaliza los errores:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{d_i^2}{(D/2)^2}\right) \quad (4)$$

Si este factor es mayor o igual que 1 se considera que hay suficiente cantidad de observaciones pluviométricas para la interpolación, en cambio si es menor que 1 se le da más peso a la estimación satelital. Es importante aclarar que en los puntos de retícula donde no hay observaciones para la interpolación, se mantiene la estimación satelital solo corregida con PDF-matching. A su vez, en los puntos de retícula que tienen su par de observación cercano, se mantiene el valor de la observación sin interpolar para conservar las mediciones directas de la precipitación.

4. Posterior a la interpolación, se aplica un método de consistencia espacial para eliminar errores groseros en los datos pluviométricos observados, principalmente provenientes de las EMAs incorporadas en el día de interés. La consistencia espacial filtra las observaciones pluviométricas cuya diferencia entre el Bias real (ecuación 1) respecto del Bias interpolado (ecuación 3) en el radio de influencia es mayor a un umbral de error (actualmente se utiliza la raíz del error cuadrático medio por regiones) en un porcentaje alto de los puntos (> 90 %). El umbral de error y de porcentaje son arbitrarios y pueden ser modificados. En la versión actual, se determinaron estos valores a partir de las recomendaciones en la bibliografía y la exploración local del método, buscando que se eliminen datos erróneos, pero descartando la menor cantidad posible de observaciones.
5. Si la consistencia espacial filtra observaciones, se repiten los pasos de validación cruzada seguido de la interpolación del Bias local para finalmente aplicar la corrección de la estimación satelital (ecuación 5). Si la consistencia espacial no filtra ninguna observación pluviométrica, se procede directamente con la corrección en cada punto de retícula disponible:

$$SQPE_{final\ con\ OBS} = SQPE_{PDF-matching} - BIAS_{int} \quad (5)$$

3.3 Diagrama de flujo del producto SQPE-OBS

En la Fig. 4 se muestra el diagrama de flujo del producto SQPE-OBS v1.0 que se encuentra funcionando en el SMN. El diagrama incluye los diferentes pasos de la metodología implementada, los datos necesarios para generar el ajuste final y algunas instancias de decisión del proceso mencionadas previamente, con la finalidad de unir y resumir los métodos aplicados para facilitar la interpretación del producto.

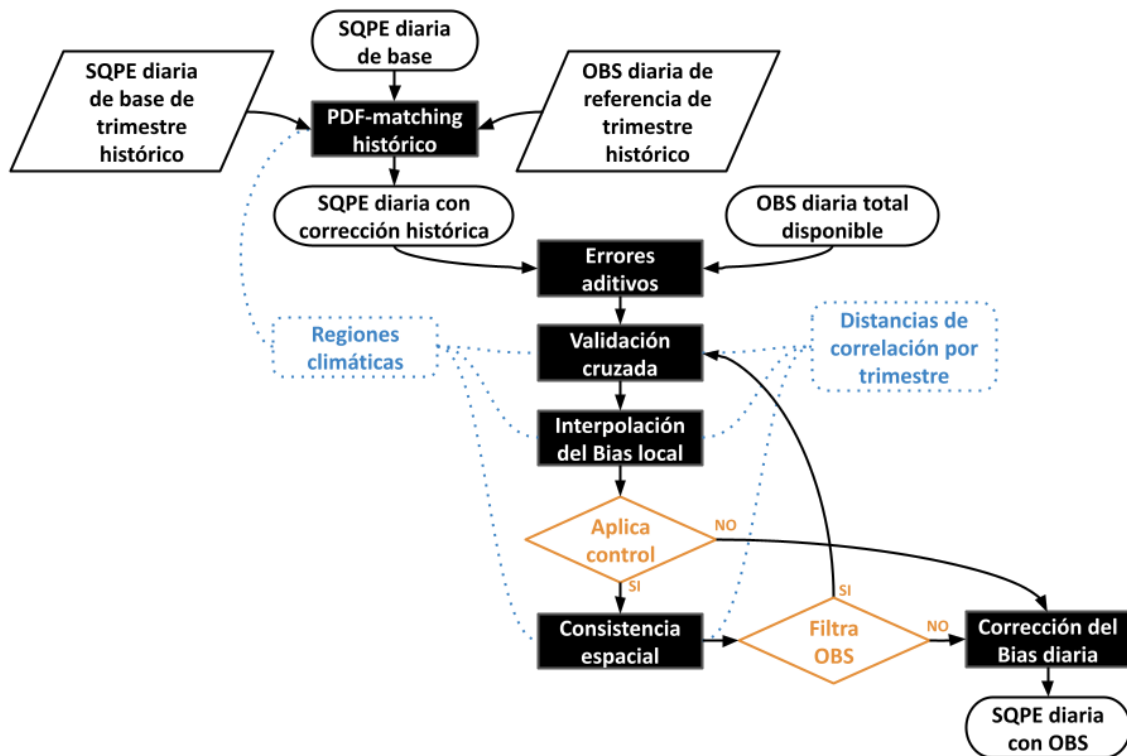


Fig. 4 Diagrama de flujo del producto SQPE-OBS v1.0 con los pasos de la metodología marcados en rectángulos llenos negros, los datos de precipitación de entrada/salida e históricos tienen borde negro, otros datos fijos asociados a procesos alternos utilizados en varios pasos se muestran en azul y las instancias de decisión se muestran en naranja.

4. RESULTADOS

El producto presentado en este trabajo actualmente se ejecuta a las 13:30 HOA para tener la menor latencia posible que depende del último dato de IMERG ER disponible, y dura aproximadamente 5 minutos. La salida numérica del ajuste final se encuentra en formato GeoTIFF y NetCDF. A su vez, se generan varias imágenes de visualización del producto que se describen a continuación con un evento de precipitación diaria como ejemplo correspondiente al día pluviométrico 10 de abril de 2021.

En la Fig. 5 se muestra la SQPE de base IMERG ER (panel izquierdo), su corrección inicial con el método de PDF-matching histórico (panel central) y su corrección final al aplicar ambas metodologías implementadas en el producto SQPE-OBS con el PDF-matching histórico y la corrección del Bias local (panel derecho). En el caso del PDF-matching histórico inicial, se observa como en general se reduce la magnitud de la precipitación en algunas zonas que IMERG ER podría estar sobreestimando la precipitación en línea con las validaciones previas en la región. Al incluir la corrección del Bias local, se observa una estimación de precipitación en el centro y noreste de Argentina (flechas rojas orientativas en la imagen) que no aparece o se subestima en la SQPE de base. Este resultado proviene del aporte de todas las redes de estaciones meteorológicas disponibles para este día en particular.

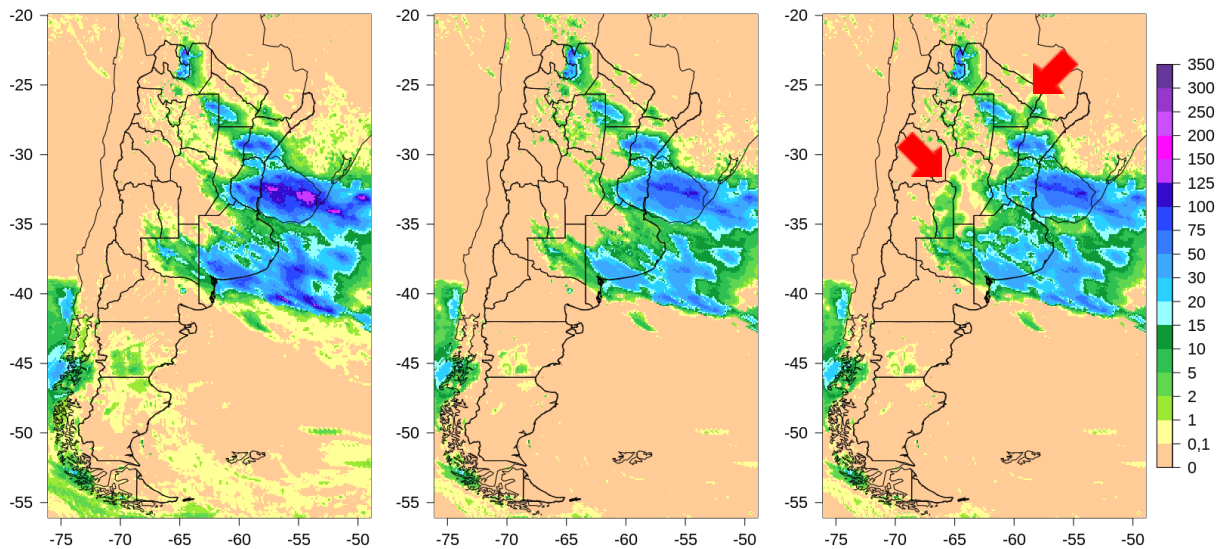


Fig. 5 Producto SQPE de base IMERG ER (panel izquierdo) y SQPE con ajuste inicial a partir del método de PDF-matching histórico (panel central) y SQPE con ajuste que combina un PDF-matching histórico y una corrección del Bias local (panel derecho), en el sur de Sudamérica para el día pluviométrico del 10 de abril de 2021.

Por otro lado, en la Fig. 6 se muestra la red total de observaciones pluviométricas para la fecha de ejemplo (panel superior izquierdo) con el Bias interpolado al considerar todas las observaciones disponibles (panel superior derecho). Asimismo, se presentan las observaciones pluviométricas finales utilizadas para el ajuste luego de filtrar 45 observaciones con el método de consistencia espacial para este día en particular (panel inferior izquierdo). De este modo, el Bias interpolado final (panel inferior derecho) reduce el ruido en algunas regiones más notorias como la provincia de Entre Ríos, donde varios de los datos filtrados corresponden a posibles falsos ceros. A su vez, algunos valores máximos del Bias como en el centro de Uruguay y Noroeste de Buenos Aires, se eliminan para obtener un mapa con mayor consistencia espacial. En esta misma línea, es fundamental mencionar que en algunos eventos de precipitación diaria que no se muestran en este trabajo, aparecen errores en las EMAs con valores de precipitación extrema fuera de rango que afortunadamente son eliminados con la consistencia espacial.

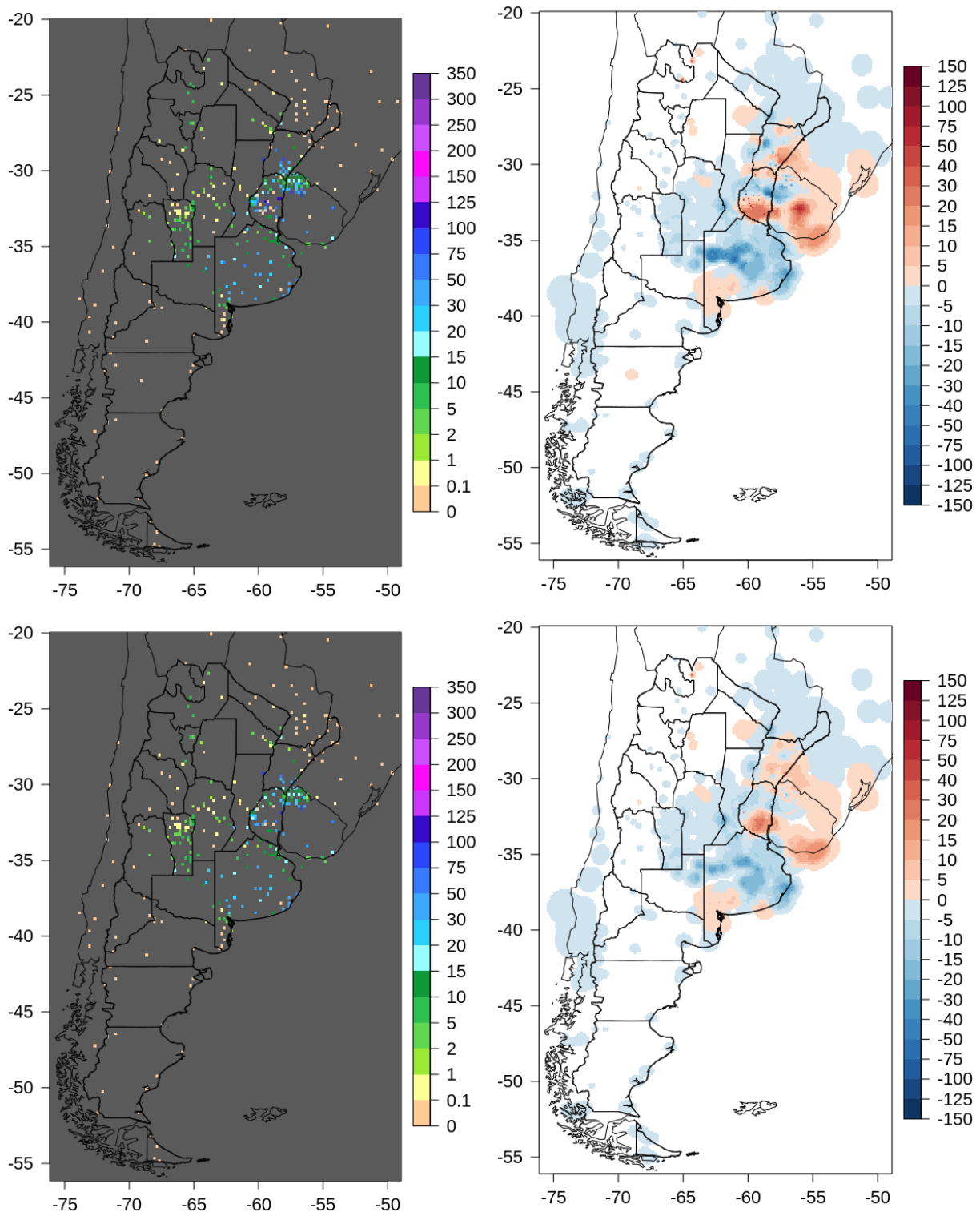


Fig. 6 Mapa de OBS totales disponibles (panel superior izquierdo) con el Bias interpolado por la corrección del Bias local (panel superior derecho) y mapa de OBS finales disponibles luego de la consistencia espacial que filtró 45 observaciones en este día en particular (panel inferior izquierdo) con el Bias interpolado por la corrección del Bias local (panel inferior derecho), en el sur de Sudamérica para el día pluviométrico del 10 de abril de 2021. Los mapas de OBS se muestran en la retícula regular de 0.2° solo a efectos de visualizar la información, mientras que los mapas de Bias se muestran en la retícula regular de 0.1° que es la que se usa en el producto SQPE-OBS.

Es importante aclarar que este producto es una primera versión de desarrollo experimental sobre la que se espera seguir avanzando con la producción de nuevas versiones que mejoren la estimación de precipitación obtenida. A su vez, el producto SQPE-OBS v1.0 se encuentra en una etapa operativa experimental lo cual implica que no cuenta con soporte técnico que solucione posibles inconvenientes que puedan surgir. En el corto plazo, se espera poder trabajar en un pase a operaciones que garantice un soporte las 24 horas y continuidad en la disponibilidad del producto.

Si bien se realizó una validación preliminar de una versión anterior del producto con buenos resultados en un periodo de 2 años en el centro de Argentina (no se muestra en este trabajo), dicha versión contemplaba únicamente la corrección del Bias local. Por este motivo, el paso siguiente es realizar la evaluación del producto SQPE-OBS v1.0 con la mayor solidez posible en la región de estudio.

5. CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se presentó el desarrollo e implementación del producto SQPE-OBS como componente satelital para mejorar la estimación de precipitación en Argentina. El producto combina la estimación de precipitación satelital IMERG ER de base con las observaciones pluviométricas disponibles diariamente en el SMN.

En la versión actual se aplica una corrección histórica con el método conocido como *PDF-matching* o corrección de IMERG ER a partir de la coincidencia de la distribución estimada y observada con las estaciones meteorológicas convencionales, que además suma una corrección diaria del Bias local a partir de la interpolación del Bias entre la estimación y la observación de todas las estaciones meteorológicas disponibles en el día de interés.

El valor agregado local de las redes meteorológicas de superficie que se van integrando en la región, hace la diferencia con otros productos avanzados de agencias globales que tienen ajustes pluviométricos, pero con menor cantidad de información disponible. Además, la gran mayoría de los productos globales con ajuste pluviométrico disponible, tienen mayor latencia en los datos en comparación con el producto aquí presentado.

Si bien se mencionaron las limitaciones de los datos pluviométricos disponibles y de la metodología aplicada inicialmente, el monitoreo diario del producto en algunos eventos de interés, la validación preliminar de una versión anterior y la utilización experimental del producto en aplicaciones hidrológicas (no se muestran), obtienen resultados alentadores. Se espera que la validación de la versión actual del producto confirme la gran utilidad de esta información para los usuarios dentro y fuera del SMN.

Entre las fortalezas del producto, se destaca que la metodología es simple de seguir mejorando con la incorporación de nuevos datos pluviométricos de calidad, la utilización de una mejor estimación satelital de base a futuro y la experiencia de los métodos adaptados en forma local. Además, se destaca el bajo costo computacional y la corta duración del proceso de ajuste (aproximadamente 5 minutos).

En este sentido, las tareas prioritarias sobre las que se avanzará incluyen resolver las discontinuidades de la estimación de precipitación en los bordes de las regiones climáticas en algunos casos aislados siguiendo

metodologías como la propuesta por Siqueira y Vila (2019) y realizar una validación del producto en base a la experiencia previa y las condiciones locales.

Por otro lado, las mejoras posibles identificadas para explorar a futuro en la metodología incluyen el uso de otras transformadas estadísticas, la incorporación de un *PDF-matching* en tiempo real, la aplicación del *PDF-matching* en forma puntual sin depender de las regiones climáticas, el uso de un exponente de los pesos histórico en la corrección del Bias local, como la implementación de otra interpolación diaria recomendable para reforzar las observaciones pluviométricas.

Por último, es fundamental resaltar que el producto SQPE-OBS v1.0 es un desarrollo experimental que funciona en forma automatizada sin soporte técnico en tiempo real. Esta condición actual y los desafíos principales relacionados con la baja densidad de datos pluviométricos en algunas regiones para el ajuste, la falta de datos de superficie sobre el océano y los errores inherentes de toda estimación de una variable meteorológica, deberán tenerse en cuenta para un uso apropiado por parte de diferentes aplicaciones y usuarios.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen las sugerencias y aportes de: Ramón de Elia del Servicio Meteorológico Nacional, Paola Salio y Juan Ruiz de la Universidad de Buenos Aires, Daniel Vila del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales, Paula Brown de Colorado State University, Pingping Xie de la National Oceanic and Atmospheric Administration y Lukas Gudmundsson del Institute for Atmospheric and Climate Science, que contribuyeron a avanzar en el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

Alharbi, R., K. Hsu and S. Sorooshian, 2018. Bias adjustment of satellite-based precipitation estimation using artificial neural networks-cloud classification system over Saudi Arabia. *Arab J Geosci* 11, 508.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3860-4>

Amitai, E., W. Petersen, X. Llort and S. Vasiloff, 2012. Multiplatform comparisons of rain intensity for extreme precipitation events. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 50, 3, 675–686.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2011.2162737>

Díaz, G., M. Vita, M. P. Hobouchian, L. Ferreira y L. Giordano, 2021: Expansión de la red de referencia empleando los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas automáticas de terceros. Nota Técnica SMN 2021-90.
URI: <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1541>

Funk, C., P. Peterson, M. Landsfeld et al., 2015: The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2, 150066. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Giménez, D., M. Rugna, L. Vidal, R. de Elía y L. Giordano, 2021: Desarrollo e implementación del producto RQPE-RMA. Nota Técnica SMN 2021-104. URI:

Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen and T. Engen-Skaugen, 2012: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3383–3390.
DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>

Hobouchian, M. P., R. de Elía, Y. García Skabar, L. Vidal, J. Ruiz y M. Maas, 2021: Distancias de correlación espacial de la precipitación en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-96. URI: <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1604>

- Hobouchian, M. P., Y. García Skabar, P. Salio, M. Viale y C. Matsudo, 2018: Evaluación de estimaciones de precipitación por satélite en el sur de Sudamérica. XIII Congreso Argentino de Meteorología, Rosario, Argentina. URL disponible [1 de marzo 2021]: http://cenamet.org.ar/congremet/wp-content/uploads/2018/11/T0115_HOBOUCHIAN.pdf
- Hobouchian, M. P., Y. García Skabar., D. Barrera, D. Vila y P. Salio, 2017a: Validación de la estimación de precipitación por satélite aplicando la técnica Hidroestimador. Revista Meteorológica, 42, 19-37. ISSN: 1850-468X. URL disponible [1 de marzo 2021]: http://www.meteorologica.org.ar/wp-content/uploads/2017/07/Hobouchian_Vol42-N1.pdf
- Hobouchian, M. P., P. Salio., Y. García Skabar, D. Vila and R. Garreaud, 2017b: Assessment of Satellite Precipitation Estimates over the Slopes of the Subtropical Andes. Atmospheric Research, 190, 43-54. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.006>
- Hobouchian, M. P. y Y. García Skabar, 2017: Evaluación de estimaciones de precipitación por satélite para su utilización en seguros agropecuarios. Nota Técnica SMN 2017-43. URI: <http://hdl.handle.net/20.500.12160/629>
- Huffman, G. J., D. T. Bolvin, E. J. Nelkin and J. Tan, 2020: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation. URL disponible [1 de marzo 2021]: https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-10/IMERG_doc_201006.pdf
- Katiraie-Boroujerdy, P. S., M. Rahnamay Naeini, A. Akbari Asanjan, A. Chavoshian, K. L. Hsu and S. Sorooshian, 2020: Bias Correction of Satellite-Based Precipitation Estimations Using Quantile Mapping Approach in Different Climate Regions of Iran. Remote Sens. 2020, 12, 2102. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12132102>
- Mega, T., T. Ushio, T. Matsuda, T. Kubota, M. Kachi and R. Oki, 2018: Gauge-Adjusted Global Satellite Mapping of Precipitation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57, 1928 – 1935. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2018.2870199>
- R Core Team, 2020: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL disponible [1 de marzo 2021]: <https://www.R-project.org/>.
- Rossi Lopardo, M. S., H. Veiga, G. Díaz, M. P. Hobouchian y L. Ferreira, 2021: Control de calidad de datos pluviométricos en tiempo real. Nota Técnica SMN 2021-98. URI: <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1607>
- Rozante, J. R., D. Soares Moreira , L. G. De Goncalves and D. Vila, 2010: Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. Weather Forecast, 25, 885–894. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>
- Salio, P., M. P. Hobouchian, Y. García Skabar and D. Vila, 2015: Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over Southern South America using a dense rain gauge network. 6th IPWG Special Issue Atmospheric Research, 163, 146–161. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.11.017>
- Scofield, R. A. and R. J. Kuligowski, 2003: Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme-precipitation events. Mon. Wea. Rev., 18, 1037-1051. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<1037:SAOOOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<1037:SAOOOS>2.0.CO;2)
- Siqueira, R. A. and D. Vila, 2019: Hybrid methodology for precipitation estimation using Hydro-Estimator over Brazil. International Journal of Remote Sensing, 40, 4244-4263. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1562262>
- Vila, D., L. De Goncalves, D. L. Toll and J. R. Rozante, 2009: Statistical evaluation of combined daily gauge observations and rainfall satellite estimates over continental South America. Journal of Hydrometeorology, 10, 533–543. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008JHM1048.1>
- Xie, P., R. Joyce, S. Wu, S. Yoo, Y. Yarosh, F. Sun and R. Lin, 2017: Reprocessed, bias-corrected CMORPH global high-resolution precipitation estimates from 1998. Journal of Hydrometeorology, 18, 1617-1641. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0168.1>
- Xie, P. and A. Y. Xiong, 2011: A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses, J. Geophys. Res., 116, D21106. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JD016118>



Yang, Z., K. Hsu, S. Sorooshian, X. Xu, D. Braithwaite and K. M. J. Verbist, 2016: Bias adjustment of satellite-based precipitation estimation using gauge observations: A case study in Chile, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 3790–3806. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015JD024540>

Zhang, J., K. Howard, S. Vasiloff, C. Langston et al., 2011: National Mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system: description, results and future plans. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 92, 1321-1338. DOI: <https://doi.org/10.1175/2011BAMS-D-11-00047.1>

Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía (rdelia@smn.gov.ar), Luciano Vidal (lvidal@smn.gov.ar) o Martín Rugna (mrugna@smn.gov.ar) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo (macevedo@smn.gov.ar).