

## NUEVA BASE DE DATOS RETICULADA DE PRECIPITACIÓN PARA LA PROVINCIA DE SANTA CRUZ, ARGENTINA

Leandro Almonacid<sup>1</sup>, Natalia Pessacg<sup>2</sup>, Boris Diaz<sup>3</sup>, Oscar Bonfili<sup>4</sup>, Pablo L. Peri<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup>Municipalidad de Rio Gallegos– CONVENIO INTA.

<sup>2</sup>Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales (IPEEC-CCT CONICET-CENPAT).

<sup>3</sup>Grupo Forestal, Agrícola y Manejo del Agua (FAMA) – EEA Santa Cruz -INTA.

<sup>4</sup>Servicio Meteorológico Nacional – Oficina Rio Gallegos.

<sup>5</sup>Municipalidad de Rio Gallegos– CONVENIO INTA.

(Manuscrito recibido el 7 de noviembre de 2019, en su versión final el 15 de septiembre de 2020)

### RESUMEN

La precipitación es una variable esencial para caracterizar el clima y el ciclo hidrológico de una región. Pero a pesar de su importancia, existen vastas regiones, como Patagonia sur, con redes pluviométricas poco densas que no permiten una adecuada representación de la precipitación a escala regional. El objetivo de este trabajo fue generar una base de datos de precipitación reticulada para la provincia de Santa Cruz. Para ello se realizó un control de calidad y homogeneidad de las series de precipitación disponibles y se utilizó la técnica de Kriging Ordinario para la interpolación, generando un producto de precipitación reticulada anual y estacional para el periodo 1995-2014 con una resolución de 20 km. Esta base de datos de precipitación reticulada para Santa Cruz (BPRSC) mostró un buen desempeño en sus estimaciones al realizar una validación independiente con estaciones pluviométricas no utilizadas en el modelo, además de representar en forma satisfactoria la interacción con la topografía, la circulación atmosférica y la proximidad a los océanos. Por consiguiente, esta nueva base de datos representa una herramienta útil para utilizarla como insumo en modelos hidrológicos y ecológicos. Por otro lado, se utilizaron diferentes estadísticos para evaluar cinco bases de datos globales respecto de estaciones de validación. Los resultados mostraron un mejor desempeño en el producto anual y el promedio de los estacionales para BPRSC, mientras que ERA5 mostro mejor desempeño en la estación de verano y un resultado levemente mejor que BPRSC en la estación de otoño.

*Palabras clave:* Patagonia sur, isohietas medias anuales y estacionales, kriging ordinario, bases globales de precipitación.

### A NEW GRIDDED PRECIPITATION DATABASE FOR SANTA CRUZ PROVINCE, ARGENTINA

#### ABSTRACT

Precipitation is an essential variable to characterize the climate and the hydrological cycle of a region. However, there are vast regions, such as southern Patagonia, with

a lack of rainfall networks for adequate representation of regional precipitation patterns. The objective of this work was to generate a gridded precipitation database for Santa Cruz province (Argentina). For this, a quality control and homogeneity test of available precipitation series was performed, and the Ordinary Kriging technique was used for interpolation. Then, annual and seasonal reticulated precipitation for the period 1995-2014 with a resolution of 20 km was obtained. This gridded precipitation database for Santa Cruz (RPDSC) showed a good performance by performing an independent validation with pluviometric stations not used in the model. Also, RPDSC satisfactorily represented the interaction with topography, atmospheric circulation and proximity to oceans. Therefore, this new database represents a useful tool as an input in hydrological and ecological models. On the other hand, different statistics were used to evaluate five global databases regarding validation stations. The results showed a better performance in the annual product and the average of the seasonal ones for BPRSC, while ERA5 showed better performance in the summer season and a slightly better result than BPRSC in the fall season.

*Keywords: Southern Patagonia, annual and seasonal mean isohyets, ordinary kriging, global precipitation databases.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Las mediciones de precipitación son esenciales para estudios climáticos, agrícolas e hidrológicos y son fundamentales para entender los procesos que relacionan el clima con la cobertura vegetal y el suelo, como la productividad de los ecosistemas, los ciclos de carbono y nitrógeno del suelo y la biodiversidad del hábitat (Gaitán et al., 2014; Peri et al., 2018 y 2019; Rosas et al., 2018; 2019). En regiones áridas y semiáridas es de vital importancia para el estudio de la productividad primaria de pastizales naturales, donde la disponibilidad de agua en el perfil del suelo es condicionante de la diversidad de especies de plantas presentes (Bertiller et al., 1995). Este conocimiento resulta primordial para el manejo de sistemas productivos agropecuarios que dependen de la productividad primaria como lo son las producciones ovina y bovina extensiva, principales actividades agropecuarias de la provincia de Santa Cruz (Peri et al., 2013). También así para la comprensión de los procesos de producción de escorrentía superficial, fuente de la cual se obtiene el recurso para el sostenimiento de buena parte de las actividades

socioeconómicas de la región. Santa Cruz se cubre por 13 grandes regiones hidrográficas entre las que se encuentran 2 unidades endorreicas y arreicas, 7 unidades son exorreicas con escurrimientos de vertiente atlántica de unos  $26,200Hm^3$  anuales y 4 exorreicas de vertiente pacífica con una producción media anual de  $59,700Hm^3$  (Oliva et al., 2017). El río Santa Cruz, principal río de la provincia, supera un caudal de  $23,000Hm^3$  anuales, este es el único que presenta un régimen anual de deshielo con sus cabeceras en el Parque Nacional Los Glaciares (Pasquini y Depetris, 2011), con un pico máximo en el verano tardío-inicio de otoño ocasionado mayormente por el derretimiento glaciar (Masiokas et al., 2019). A este se suman casi  $1,200Hm^3$  año<sup>-1</sup> del río Chico en la región central de la provincia, algo más de  $1,000Hm^3$  año<sup>-1</sup> del Río Gallegos, y unos  $1,000Hm^3$  año<sup>-1</sup> en conjunto entre los sistemas del río Deseado y el río Coyle, todos de vertiente atlántica (Oliva et al., 2017).

Sin embargo, la precipitación es una de las variables más difícil de representar a nivel regional debido a su naturaleza discreta y a la marcada heterogeneidad espacial y temporal que presenta. En Santa Cruz, donde se focaliza

este estudio, se suma a esta problemática que el número de estaciones pluviométricas es escaso. En esta región la población es reducida y dispersa, con amplias extensiones de territorio remoto, de difícil acceso y con clima adverso, por lo que la densidad de estaciones meteorológicas oficiales es baja y con poca continuidad temporal (Villalba et al., 2003; Garreaud, 2009), además de no ser zonas cubiertas por los planes de radarización meteorológica nacional.

En amplias regiones del mundo, frente a la escasez de información meteorológica local se recurre al uso de bases de datos globales o cuasi-globales de precipitación. Estos conjuntos de datos, disponibles con diferentes resoluciones espaciales y temporales, se basan en registros de terreno (a partir de estaciones meteorológicas), estimación remota a partir de satélites, o bien una combinación de ambos, así como también otros parten de modelos matemáticos. Diferentes estudios han demostrado que estas bases globales de precipitación logran representar adecuadamente la distribución espacial de esta variable y las tendencias de largo plazo, pero pueden presentarse diferencias significativas con la distribución real del fenómeno a escalas regionales y para estudios hidrológicos a escala de cuenca (Getirana et al., 2011; Pessacg et al., 2015; Bianchi et al., 2016).

Algunas de estas bases de datos han sido evaluadas en Patagonia. Bianchi et al. (2016), analizaron comparativamente el desempeño de cuatro bases globales de precipitación y temperatura respecto a una base reticulada de datos generados a partir de estaciones meteorológicas independientes, obteniendo resultados disímiles, con sobreestimaciones en la precipitación anual entre los 100 y 300 mm según la base de datos analizada. Pessacg et al., (2015, 2018) analizaron la concordancia de diferentes conjuntos de datos globales de precipitación con información puntual obtenida a partir de estaciones meteorológicas independientes, obteniendo diferencias muy marcadas en la magnitud y la distribución

espacial de las precipitaciones, con valores de sobrestimación en la precipitación anual en el orden del 40 % y hasta el 500 % del valor registrado en regiones cercanas a la cordillera.

Otra alternativa válida para contrarrestar la escasez de estaciones meteorológicas convencionales estandarizadas, como las oficiales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), es la compilación y asimilación de observaciones adicionales de datos registrados en estaciones no convencionales, usualmente no incluidas en estas bases de datos oficiales, previo análisis exhaustivo de homogeneidad y consistencia que permita convalidar sus registros.

En el sur de Patagonia existen pocos antecedentes apropiadamente documentados para caracterizar la distribución de lluvias a partir de registros sistemáticos de estaciones meteorológicas. Uno de los estudios más relevantes para la región fue el realizado por De Fina et al. (1968), quienes a partir de registros de estaciones no convencionales de precipitación y otros procedentes del SMN trazaron las isohietas medias anuales para la provincia de Santa Cruz. Soto (2000), desarrolló un producto similar y, al igual que el antecedente previo, sin presentar un detalle metodológico respecto al número de estaciones utilizadas, su ubicación geográfica, la longitud de series de registros de precipitación o aún el tratamiento aplicado a las series y homogeneidad de las mismas. Hasta el presente se carece aún, tanto de una cartografía climática de precipitación para la provincia de Santa Cruz, como de una descripción detallada del fenómeno, ambos desarrollados a partir de metodologías estandarizadas de tratamiento de datos y su representación espacial.

En las últimas dos décadas, esfuerzos compartidos entre diversas instituciones han permitido la elaboración de un Banco de Datos Hidrometeorológicos regional (BDHM) a partir de la integración de registros climáticos históricos y presentes, principalmente de precipitación y temperatura para el sur de

Patagonia. El BDHM compila, sistematiza y cataloga registros de interés hidrometeorológico para la provincia de Santa Cruz, sur de Chubut y regiones de Chile con recursos hídricos compartidos (Monserrat et al., 2016).

A partir de bases de datos con registros puntuales es posible realizar estimaciones de una variable en particular en regiones con faltante de datos mediante el uso de técnicas de interpolación (Goovaerts, 2000; Lloyd, 2005; Berndt y Haberlandt, 2018). Diversos autores (Tabios y Salas, 1985; Phillips et al., 1992; Goovaerts, 2000) han demostrado que las técnicas de interpolación geoestadísticas (kriging) proveen mejores estimaciones de la precipitación que los métodos convencionales determinísticos. Goovaerts (2000) realizó la interpolación de 36 registros mensuales y anuales de precipitación utilizando dos tipos de técnicas; (1) métodos que utilizan solo los datos generados por la estación pluviométrica (Poligonos de Thiessen, Distancia Ponderada Inversa – IDW- y Kriging Ordinario); así como (2) algoritmos que combinan datos de precipitación con un modelo digital de elevación (Regresión lineal y Co-kriging). Sus resultados confirmaron que, para redes de estaciones pluviométricas de baja densidad, las técnicas geoestadísticas superan a las demás técnicas como IDW o Thiessen, que no tienen en cuenta el patrón espacial de dependencia que es observado usualmente para datos pluviométricos. Por otro lado, encontró que Kriging Ordinario obtuvo mejor desempeño que aquellos que incorporaron como variable auxiliar a la elevación, cuando la correlación entre ambas resulta baja, como ocurre en el sur de Patagonia donde los registros de precipitación no se correlacionan en forma satisfactoria con la elevación.

En este contexto el objetivo del presente trabajo es generar una base de datos reticulada de precipitación media estacional y anual para la provincia de Santa Cruz y compararla con bases de datos globales, con el fin de contar con productos que permitan caracterizar

adecuadamente la precipitación en la región y realizar estudios hidrometeorológicos.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

### 2.1. Área de estudio

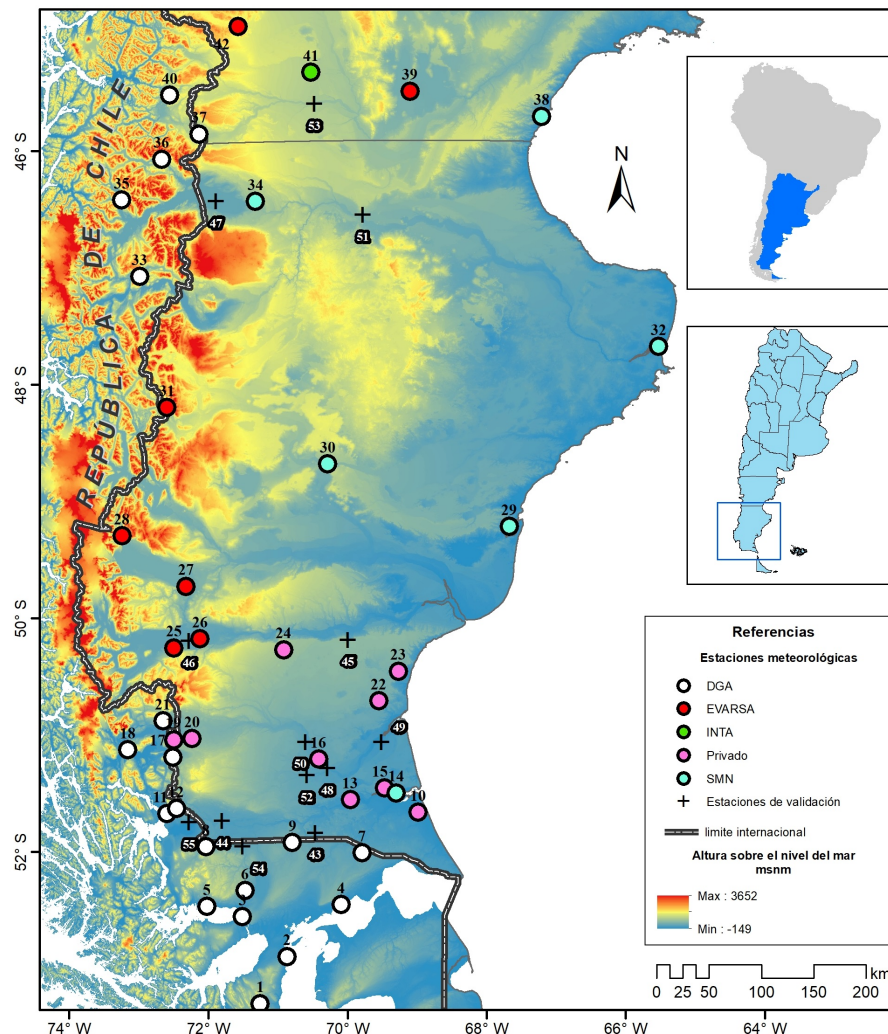
El área de estudio se encuentra en la región sur de la Patagonia continental, entre los paralelos 45° y 53° de latitud sur y los 65° y 72° de longitud oeste, cubriendo la totalidad de la provincia de Santa Cruz (Figura 1).

La región está bajo la influencia del cinturón de viento del oeste del Hemisferio Sur, siendo al sur de 40°S notablemente persistentes durante todo el año (Villalba et al., 2003). El clima en esta región puede ser definido como templado o frío templado con un patrón de distribución de las isotermas NO-SE, determinado principalmente por la presencia de la cordillera de Los Andes. La temperatura media anual oscila entre los 12°C en la zona noroeste a 3°C hacia el sur (Paruelo et al., 1998). Las interacciones de las masas de aire húmedo provenientes del Pacífico con la cordillera de Los Andes determina un fuerte gradiente oeste – este de precipitación a lo largo de la región alcanzando un máximo estimado cerca de la cresta andina, con valores entre 2.000-4.000 mm año<sup>-1</sup> (Villalba et al., 2003; Garreaud, 2009; Bianchi et al., 2016) hasta más de 9.000 mm año<sup>-1</sup> en el sector del Campo de Hielo Sur (DGA, 1987; Schwikowski et al. 2013; Schaefer et al. 2015; Sauter, 2019). En cambio, la mayor parte de la estepa patagónica, al este de la cordillera, recibe menos de 200 mm año<sup>-1</sup> (Paruelo et al., 1998; Garreaud et al., 2013; Bianchi et al., 2016). Sobre este ambiente, la distancia entre la cordillera y el mar, en el extremo oriental del continente, explica más del 90 % de la variabilidad espacial de la precipitación media anual (Jobbágy et al., 1995).

### 2.2. Base de datos de precipitación

Se utilizaron solamente registros mensuales de precipitación líquida disponibles en el





*Figura 1:* Región de estudio y ubicación de estaciones pluviométricas con 20 años de datos medios mensuales (1995-2014) utilizadas para la construcción de una base de datos reticulados de precipitación y para la validación con 10 años de registro (2005-2014).

Banco de Datos Hidrometeorológicos (BDHM) de la provincia de Santa Cruz (Monserrat et al., 2016), ya que no existen en la provincia estaciones que hayan registrado datos de precipitación sólida. El BDHM fue confeccionado para el registro y organización de datos sobre diferentes variables asociadas a los recursos hídricos, su dinámica natural en cantidad y calidad, su interacción con otros elementos del medio como el suelo, como así también su captación y uso. Este ofrece registros meteorológicos de por lo menos 97 sitios de la provincia de Santa Cruz y regiones vecinas con recursos hídricos compartidos (Monserrat et al.,

2016). Entre éstas se seleccionaron 42 estaciones pluviométricas que cumplieron con un registro temporal de 20 años entre 1995-2014, con no más del 5 % de datos faltantes. Este período es el que aseguró la disponibilidad de series más extensas de registros históricos continuos de precipitación mensual (PM) en la región con menor cantidad de datos faltantes e inconsistencias, así como la mayor confiabilidad en los datos disponibles dado el conocimiento documentado sobre las estaciones que los produjeron. Las estaciones productoras de los datos nativos se encuentran bajo propiedad y responsabilidad de distintos organismos, como la Dirección General de Aguas

(DGA – Chile) a cargo de 18, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN – Argentina) responsable de 6, mientras que las restantes 14 se encuentran bajo responsabilidad de otros organismos nacionales y agentes privados (Tabla I). Todas ellas se distribuyen en un rango altitudinal entre los 3 y 900 msnm (Figura 1), la mayor cantidad de las cuales se ubican en el sur de Santa Cruz y la Región de Magallanes y Antártica Chilena, mientras que otro gran grupo de estaciones se encuentran al sur de Chubut y en la Región de Aysén (Chile). Se seleccionaron estaciones pluviométricas fuera de los límites administrativos de la provincia de Santa Cruz con el fin de obtener una mejor representación de la precipitación en situaciones de borde.

Las estaciones pluviométricas oficiales, tanto de DGA como SMN, disponen mayormente de instrumental automático con registro digital de datos pluviométricos. Algunas estaciones del SMN y la mayor proporción de privadas disponen de instrumental analógico y registro manual de la pluviometría acumulada en lapsos de 24 horas.

El registro temporal del fenómeno difiere entre estaciones pluviométricas. Mientras que en las propias de la DGA y buena parte de las del SMN, dentro del período analizado, los registros son horarios, en los pluviómetros privados el registro consiste en la acumulación de lámina precipitada en 24 horas. En los 42 casos disponibles se calcularon los totales mensuales acumulados a partir de estos registros. Se descartaron secuencias para las cuales se pudieron conocer atributos que permitieran sospechar de la confiabilidad de los datos disponibles, como inapropiada ubicación de pluviómetros o inapropiadas técnicas de observación.

### 2.3. Métodos para el control de calidad y homogeneidad de las series.

El control de calidad de datos climáticos tiene como principal objetivo la identificación de outliers en una determinada serie climática.

NUM	Nombre	Lat.	Long.	Alt. (msnm)	Resp.
1	Lago Parrillar	-53,4	-71,25	320	DGA
2	Punta Arenas en Chabunco	-53	-70,85	37	DGA
3	Río Verde en Escuela G33	-52,65	-71,46	10	DGA
4	San Gregorio	-52,57	-70,07	3	DGA
5	Río Pérez	-52,55	-71,96	5	DGA
6	Villa Tehuelches	-52,43	-71,42	190	DGA
7	Monte Aymond	-52,12	-69,77	160	DGA
8	Río Rubens en Ruta 9	-52,04	-71,94	190	DGA
9	Teniente Merino	-52,03	-70,73	160	DGA
10	Estancia Punta Loyola	-51,78	-68,98	14	Privado
11	Puerto Natales	-51,74	-72,46	45	DGA
12	Casas Viejas	-51,7	-72,33	230	DGA
13	Estancia Laguna Colorada	-51,67	-69,92	26	Privado
14	Río Gallegos Aero	-51,61	-69,28	12	SMN
15	Estancia Killik Aike Norte	-51,57	-69,45	9	Privado
16	Estancia Ruben Aike	-51,31	-70,35	110	Privado
17	Cerro Castillo	-51,26	-72,35	130	DGA
18	Torres Del Paine	-51,17	-72,95	25	DGA
19	Estancia Rupai Pacha	-51,11	-72,07	615	Privado
20	Estancia El Cazador	-51,11	-72,32	350	Privado
21	Cerro Guido	-50,94	-72,46	230	DGA
22	Estancia Ototel Aike	-50,82	-69,52	175	Privado
23	Cañadón De Las Vacas	-50,57	-69,25	295	Privado
24	Estancia La Porfiada	-50,37	-70,79	472	Privado
25	Lago Argentino - Calafate	-50,32	-72,26	186	EVARSA
26	Río Santa Cruz - Charles Fuhr	-50,25	-71,91	188	EVARSA
27	Río La Leona - Hotel La Leona	-49,8	-72,06	251	EVARSA
28	Parque Nacional Los Glaciares	-49,34	-72,88	397	EVARSA
29	Puerto San Julián Aero	-49,32	-67,78	58	SMN
30	Cañadón León - Gdor. Gregores Aero	-48,78	-70,16	356	SMN
31	Río Nansen - Estancia Entre Rios	-48,26	-72,22	481	EVARSA
32	Puerto Deseado Aero	-47,73	-65,92	81	SMN
33	Estancia Chacabuco	-47,12	-72,49	343	DGA
34	Perito Moreno Aero	-46,51	-71,01	429	SMN
35	Bahía Murta	-46,46	-72,67	240	DGA
36	Villa Cerro Castillo	-46,12	-72,16	345	DGA
37	Balmaceda	-45,92	-71,68	525	DGA
38	Comodoro Rivadavia Aero	-45,79	-67,47	58	SMN
39	Sarmiento	-45,58	-69,08	275	EVARSA
40	Coyhaique En Escuela Agrícola	-45,57	-72,03	343	DGA
41	Río Mayo	-45,41	-70,29	538	INTA
42	Río Senguerr-Aserradero La Paulina	-45	-71,17	841	EVARSA
43	Estancia Potrok Aike	-51,94	-70,41	173	INTA
44	Estancia Glencross	-51,82	-71,7	115	Privado
45	Estancia San Ramón	-50,3	-69,91	217	Privado
46	El Calafate Aero	-50,27	-72,05	179	SMN
47	Los Antiguos	-46,5	-71,5	202	INTA
48	Estancia Las Horquetas	-51,39	-70,22	116	Privado
49	Estancia Coy Aike	-51,17	-69,48	64	Privado
50	Estancia Don Ceferino	-51,16	-70,52	171	Privado
51	Estancia San Alberto	-46,64	-69,67	389	Privado
52	Estancia Chank Aike	-51,45	-70,51	163	Privado
53	Río Mayo	-45,68	-70,25	433	EVARSA
54	Penitente en Morro Chico	-52,05	-71,42	177	DGA
55	Río Tranquilo en RN9	-51,82	-72,16	177	DGA

*Tabla I:* Ubicación geográfica de estaciones de precipitación líquida con registros mensuales entre 1995-2014. Latitud (LAT) y Longitud (LONG) expresados en decimal de grado, en el sistema internacional WGS84 (EPSG:4326). Altitud determinada sobre cartografía topográfica oficial E 1:100.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Estos son considerados observaciones muy alejadas del valor medio que pueden ser atribuidas a errores de medición o eventos meteorológicos extremos (González-Rouco et al., 2001).

Para realizar el control de calidad y la homogeneización de la base de datos se utilizó el software ProClimDB y AnClim respectivamente (Štěpánek, 2015). ProclimDB se utilizó para la identificación y evaluación de outliers.

Mediante el uso de ProClimDB se identificaron un total de 353 outliers (3,8 % del total). Cada uno de estos fueron contrastados con los valores obtenidos de estaciones vecinas para el mismo mes donde fue identificado el outlier. Si la estación más próxima presentó para el mismo mes un valor de precipitación mayor al valor promedio de su propia serie, el outlier no se modificó, caso contrario el mismo se etiquetó como un valor perdido, para luego ser rellenado mediante la técnica de UK traditional method (Kashani y Dinpashoh, 2012).

Con respecto a los periodos atípicos de sequía, se clasificaron como “sospechosos” aquellos periodos con más de tres meses consecutivos con precipitación nula. Al sur de Patagonia continental la longitud máxima de una secuencia de días secos puede llegar a más de 150 días (Llano y Penalba, 2011). Este suele ser un error muy común en bases de datos climáticas, donde un valor perdido puede registrarse como un mes sin precipitación asignando el valor “0”. Una vez identificados estos periodos sospechosos, fueron contrastados con estaciones vecinas para corroborar dichos eventos. En el caso de confirmarse el error, se clasificaron dichos meses como dato faltante.

Para realizar el control de calidad de la base de datos y posterior análisis de homogeneidad de las series se procedió al agrupamiento de las estaciones pluviométricas siguiendo el método propuesto por Štěpánek et al. (2009), que considera la distancia entre estaciones y la correlación de los valores de precipitación media mensual. Dos estaciones se consideraron vecinas si ambas se ubicaron a una distancia menor a los 200 km, mientras que el valor mínimo de correlación entre series de precipitación aceptado fue de  $r = 0,5$  como resultado del promedio de correlaciones entre todas las

estaciones más un desvío estándar ( $0,36 \pm 0,18$ ). Por otro lado, se establecieron 9 estaciones pluviométricas como referencia, seleccionadas de acuerdo a la confiabilidad de sus datos y de los procedimientos conocidos de registro (Tabla II): Río Gallegos Aero (SMN, Argentina); Lago Argentino y Sarmiento de la empresa EVARSA, Punta Arenas, Estancia Chacabuco, Río Rubens, Casas Viejas y Balmaceda de la Dirección General de Aguas (DGA – Chile), además de la estación pluviométrica ubicada en la Estancia Cañadón de Las Vacas (Santa Cruz). Un total de 25 estaciones fueron asignadas a diferentes grupos liderados por las mencionadas estaciones de referencia, siendo denominadas estaciones candidatas, las que fueron sometidas a las pruebas de calidad de datos y homogeneidad de sus registros. Mientras que 7 estaciones (Puerto Natales, Puerto Deseado, Puerto San Julián, Comodoro Rivadavia, Gobernador Gregores, Río Nansen y Parque Nacional Los Glaciares) no fueron asignadas a ningún grupo por presentar bajos valores de correlación entre sus registros de precipitación y aquellos de las estaciones seleccionadas de referencia.

La prueba de homogeneidad tiene como objetivo asegurar que las variaciones detectables en las series fueran causadas exclusivamente por cambios en el fenómeno y no en los procedimientos de medición o registro (Gonzalez-Rouco, 2001; Aguilar et al., 2003). Esto significa que las mediciones han sido consistentemente registradas. Para su práctica se realizó el test relativo de homogeneidad SHNT (Test Estandarizado de Homogeneidad Normalizada) de Alexandersson (1986). Esta prueba está incluida en el software AnClim y permite identificar inhomogeneidades en series a partir de otras que actúan como referencia (Štěpánek, 2003). Solo se analizaron aquellas inhomogeneidades identificadas con un nivel de significancia del 95 %, cumpliéndose además la regla que el índice de correlación ( $r$ ) para el año identificado como corte de homogeneidad tuviera un  $r > 0,5$  entre la estación de referencia y la estación candidata. Sobre estas

E. Re.	E. Ca.	r	Dist. (km)
Rio Gallegos	Kilik Aike	0,86	12
	Punta Loyola	0,81	28
	Laguna Colorada	0,77	44
	Monte Aymond	0,72	66
	Ruben Aike	0,59	81
Lago Argentino	Rio la Leona	0,58	60
	Rio Santa Cruz	0,53	26
Punta Arenas	Lago Parrillar	0,67	52
	Rio Perez	0,51	90
	Rio Verde	0,50	57
Rio Rubens	Rupai Pacha	0,50	73
Casas Viejas	Torres del Paine	0,52	73
Cerro Castillo	Cerro Guido	0,55	36
Sarmiento	Rio Mayo	0,53	96
	Perito Moreno	0,50	181
Balmaceda	Villa Cerro Castillo	0,67	43
	Coyaique	0,89	47
	Bahía Murta	0,69	97
Cañadón de las Vacas	Ototel Aike	0,75	34
	La Porfiada	0,55	112

*Tabla II:* Estaciones pluviométricas de referencia y candidatas para el análisis de homogeneidad de series para el periodo 1995-2014. E. Re: Estación de referencia; E. Ca: Estación candidata; r: Correlación de pearson; Dist: Distancia.

series inhomogéneas se aplicó el coeficiente de ajuste según la prueba de SHNT (Štěpánek, 2003).

Para el rellenado de datos perdidos de una serie determinada se utilizó la información contenida en una serie de referencia a la misma, es decir que este lo suficientemente cercana y tenga un coeficiente de correlación mayor a  $r > 0,5$  en sus valores mensuales de precipitación. El dato perdido se calculó mediante la metodología UK traditional method, donde se multiplico el valor de la serie de referencia por el promedio de la serie candidata, dividiendo el resultado por el promedio de la serie de referencia (Kashani y Dinpashoh, 2012).

## 2.4. Método de interpolación.

Para la representación espacial continua de la precipitación a partir de registros puntuales (discretos) se utilizó la interpolación espacial. Las técnicas más comúnmente utilizadas para

estimar variables espaciales son diversas y pueden ser clasificadas en deterministas o geoestadísticas. La principal diferencia entre éstas reside en el criterio utilizado para asignar los pesos de interpolación. En los métodos determinísticos, los pesos dependen de la distancia geométrica entre puntos mientras que, en los métodos geoestadísticos (también denominados “Kriging”), se utiliza una función de semivarianza para su estimación (Li y Heap, 2008; Bianchi et al., 2016).

Dentro de las técnicas geoestadísticas disponibles se utilizó el método “Kriging Ordinario” (KO), uno de los más robustos y comúnmente utilizados para predecir el comportamiento de variables en regiones con escasez de datos (Webster y Oliver, 2007; Berndt y Haberlandt, 2018.). Las estimaciones obtenidas a partir del KO son promedios ponderados de las observaciones, con los pesos derivados a partir del grado de correlación espacial entre éstas (Lloyd, 2005). Utiliza un modelo geoestadístico de la realidad y asume que la función de tendencia del modelo geoestadístico entre puntos es constante. La correlación espacial del modelo geoestadístico depende de la distancia entre la ubicación de las observaciones (datos) y que las variables de interés tengan una distribución normal. Así, la densidad espacial de los datos de partida y su distribución, como una función de la variabilidad esperada para el fenómeno bajo modelización resultan críticos para la confiabilidad final de los resultados.

En el presente trabajo se obtuvieron los promedios mensuales de los 42 registros de precipitación para el periodo 1995-2014. A partir de la base de registros de PM se realizaron las interpolaciones para cada mes, estación y año dentro de la serie temporal propuesta para el periodo 1995-2014. La resolución espacial del producto reticulado logrado fue de  $20km$ . Este producto fue denominado “Base de Datos de Precipitación Reticulada para Santa Cruz” (BPRSC). La misma se encuentra disponible para consulta vía mail.



Para todos los productos generados se utilizó el semivariograma lineal, siendo seleccionado entre los modelos Gaussiano, esférico y exponencial; al presentar mejor performance. La performance fue medida mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE) generado a partir del método “leave-one-out” (Berndt y Haberlandt, 2018).

## 2.5. Bases de datos globales de precipitación

Se seleccionaron diversas bases de datos globales de precipitación (BDGP) para estudiar como representan a la variable en la región y luego ser comparadas con la BPRSC: CRU TS v. 4.03 (Harris et al., 2014), UDEL v. 5.01 (Willmott y Matsuura, 2001), TERRACLIMATE (Abatzoglou et al., 2018), PERSIANN-CDR (Ashouri et al., 2015) y ERA5 (Hersbach et al., 2019). Sus principales características se resumen en la Tabla III.

Las bases de datos CRU y UDEL tienen como fuente de información distintas redes integradas por estaciones meteorológicas terrenas, administradas por organismos públicos nacionales. CRU TS v4.03 utiliza un total de 11.800 estaciones en todo el mundo, compiladas a partir de dos fuentes principales: la WMO (World Meteorological Organization) y la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) a través de sus redes de estaciones meteorológicas asociadas, mientras que UDEL utiliza la base de datos GHCN2 (Global Historical Climatology Network, en su versión 2 con más de 34.000 estaciones). PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks – Climate Data Record) consiste en un producto generado exclusivamente a partir de información satelital con datos generados por los satélites GOES (Geostationary Operational Environment Satellite), Meteosat (European Meteorological Satellite) y GMS (Geostationary Meteorological Satellite de la agencia japonesa). TERRACLIMATE utiliza 3 fuentes de datos para la creación de la base de precipitación;

WORLDCLIM v.2 (Fick y Hijmans, 2017), CRU TS 4.0 (Harris et al., 2014) y JRA-55 (Japanese 55 Year Reanalysis), (Kobayashi et al., 2015). Por último, ERA5 resulto la única base de datos de reanálisis estudiada. La misma es producida con un esquema secuencial de asimilación de datos, avanzando en el tiempo con el uso de ciclos de análisis de 12 horas. En cada ciclo, observaciones disponibles (datos de estaciones meteorológicas) son combinados con información previa de un modelo de predicción para estimar el estado evolutivo de la atmosfera global y su superficie subyacente (Hersbach et al., 2019).

## 2.6. Análisis de errores y evaluación de desempeño

La variabilidad de las 42 series de precipitación fue analizada mediante el coeficiente de variación (CV %).

$$CV(\%) = \frac{\sigma}{x} \times 100 \quad (1)$$

Donde  $\sigma$  es el desvío estándar de la muestra y  $x$  representa la media aritmética.

La Base de Datos de Precipitación Reticulada para Santa Cruz, y las cinco bases globales de precipitación fueron sometidas a un análisis de desempeño a través de una validación independiente a partir de registros de precipitación líquida mensual de 13 estaciones que cumplieran con al menos 10 años de registro continuo, contemporáneos a las bases de datos y que no formaron parte del reticulado de precipitación (Figura 1). Este desempeño se analizó a partir del desvío medio porcentual (PBIAS, Wagner et al., 2012), el error relativo medio absoluto (RMAE, Li y Heap, 2008) y la raíz del error cuadrático medio relativo (RRMSE, Li y Heap, 2008). Para realizar este análisis se respetó la resolución espacial nativa de cada base reticulada.

$$PBIAS(\%) = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)}{\sum_{i=1}^n o_i} \quad (2)$$

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(p_i - o_i)/o_i| \quad (3)$$

BDGP	Resolución	Frecuencia	Periodo	Fuente de datos	Algoritmo o método de interpolación	Estaciones meteorológicas en la región	Referencia
CRU TS v 4.03	0,5°	Mensual	1901-2015	Estaciones meteorológicas	Distancia ponderada (ADW)	12	Harris et al. 2014
UDEL v. 5.01	0,5°	Mensual	1900-2014	Estaciones meteorológicas	Interpolación climatológicamente ayudada (CAI)	10	Willmott y Matsuura, 2001
TERRACLIMATE	1/24°	Mensual	1958-2015	Estaciones meteorológicas + Satélite	Interpolación climatológicamente ayudada (CAI)	-	Abatzoglou et al., 2018
PERSIANN-CDR	0,25°	Diario	1983-presente	Satélite	Redes neuronales artificiales	-	Ashouri et al., 2015
ERA5	0,28°	Horaria	1950-presente	ECMWF	Reanálisis/ensamble 4D/VAR	-	Hersbach et al., 2019

*Tabla III:* Características de las Bases de Datos Globales de Precipitación (BDGP) testeadas para la provincia de Santa Cruz en el periodo 1995-2014.

$$RRMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ([p_i - o_i]/o_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Donde  $O$  es el valor observado,  $P$  es el valor predicho o estimado.

Por otro lado, para evaluar las diferencias de cada BDGP respecto a la BPRSC, se calcularon el PBIAS (1), RMAE (2) y RRMSE (3) comparando pixel a pixel los valores calculados por la BPRSC y cada BDGP. Se confeccionó un Diagrama de Taylor para la evaluación comparativa simultanea de las BDGP, tomando como referencia a la BPRSC. Este diagrama sintetiza los principales estadísticos, el error cuadrático medio centrado (ECMC), coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y el desvío estándar, para diferentes bases de datos (Taylor, 2001).

Cada BDGP, con distinta resolución nativa; desde los  $\approx 5km$  (TERRACLIMATE) a los  $\approx 50km$  (CRU, UDEL); fue remuestreada a una resolución de  $20km$  mediante la técnica de Interpolación Bilineal, con el fin de poder ser comparada con la BPRSC. Esta es una metodología muy común para la comparación de

bases globales con distintas resoluciones (Sun et al., 2018).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Base de datos de estaciones meteorológicas

El promedio anual de precipitación líquida en la región oscilo entre  $117 \text{ mm año}^{-1}$  para la estación ubicada en el río Santa Cruz hasta los  $1200 \text{ mm año}^{-1}$  en la estación chilena de Bahía Murta, ubicada sobre la costa pacífica.

La franja costera atlántica de Santa Cruz presento un promedio de precipitación anual de entre  $194 - 280 \text{ mm año}^{-1}$ , con un gradiente creciente de norte a sur (Figura 2). Hacia el interior del territorio la precipitación media disminuyo a un promedio de entre  $110$  y  $150 \text{ mm año}^{-1}$ , para incrementarse hasta valores de entre los  $500$  y  $1200 \text{ mm año}^{-1}$  en las estribaciones orientales de la cordillera y en la región noroeste de Magallanes y Antártica Chilena.

La variabilidad interanual de la precipitación, representada por el coeficiente de variación

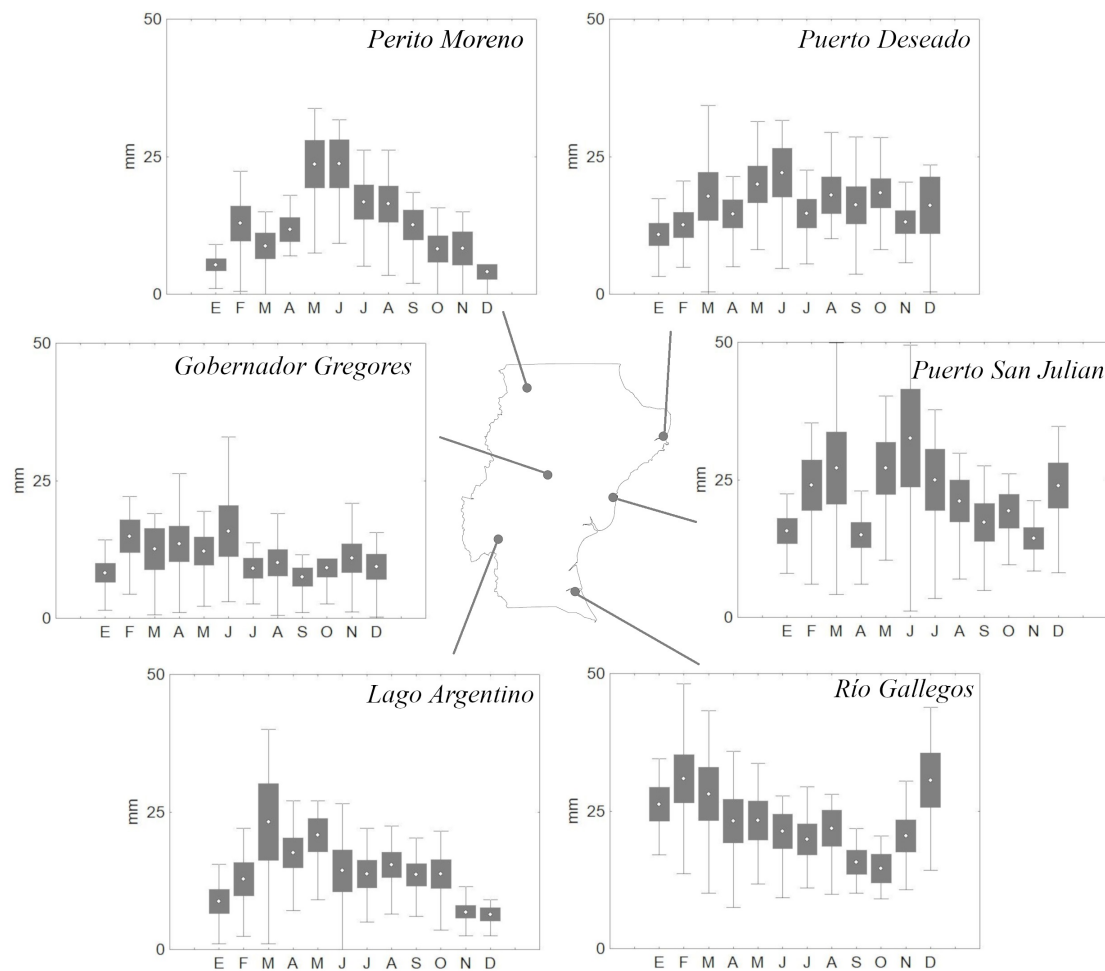


Figura 2: Precipitación media mensual de principales localidades de Santa Cruz para el periodo 1995-2014.

(CV %), oscilo entre el 18 – 52 %, donde la mayor variabilidad se obtuvo en estaciones con menos de 200 mm año<sup>-1</sup>. La estación ubicada en el Lago Argentino (suroeste de Santa Cruz) presento como extremos de precipitación anual 64 mm para el año más seco y 340 mm para el año más húmedo, esta variabilidad interanual se repitió para muchas estaciones de la región (Figura 3).

### 3.2. Base de datos de estaciones meteorológicas

El desempeño de todas las bases reticuladas se evaluó a partir de la comparación con los valores de precipitación registrados por

las estaciones meteorológicas seleccionadas de validación (Figura 1). Los estadísticos calculados indicaron que la BPRSC es la base reticulada que mejor se ajustó a los datos de validación en escala anual (Figura 4).

De las bases globales analizadas; ERA5 es la que mostró un muy buen desempeño en la región, mientras que PERSIANN fue la base con menor precisión de todas las analizadas. Para las tres estaciones de validación con valores de precipitación media anual mayor a 300 mm año<sup>-1</sup> (estaciones N° 44, 55 y 54, Figura 1) ERA5 ajustó mejor en Río Tranquilo (estación N° 55), BPRSC ajustó mejor para Penitente en Morro Chico (estación N° 54), mientras que en



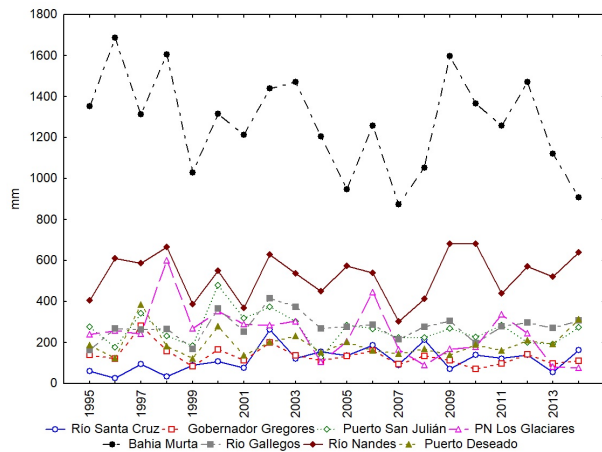


Figura 3: Series de precipitación anual para el periodo 1995-2014 para estaciones pluviométricas de Patagonia sur.

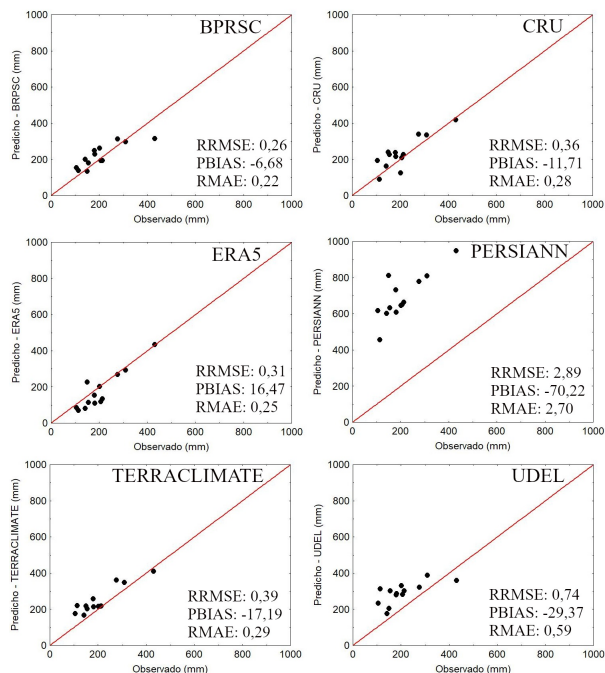


Figura 4: Evaluación del desempeño del producto anual para seis bases de datos reticuladas de precipitación en comparación a las estaciones de validación para el periodo 2005-2014. RRMSE: Raíz del error medio cuadrático relativo; PBIAS: Desvío medio porcentual; RMAE: Error relativo medio absoluto.

Glencross (estación N° 44) ambas bases de datos ajustaron muy bien a los datos de validación. La

región donde se ubican estas estaciones presenta un gradiente de precipitación muy marcado que es complejo de capturar por las bases de datos (entre Río Tranquilo y Glencross hay una distancia de 30km aproximadamente y una diferencia en la media anual de precipitación el orden de los 120 mm). Para las estaciones más secas, con medias anuales inferiores a los 250 mm  $\text{año}^{-1}$ , la base de datos BPRSC sobreestimó los datos de validación (19%) mientras que ERA5 subestimó los datos de validación (21%).

En escala estacional, BPRSC mostró un mejor desempeño en promedio que las bases de datos globales (Tabla IV). Sin embargo, en particular para la estación de verano es evidente un mejor desempeño de ERA5. Durante el otoño, que es la estación con precipitaciones acumuladas mayores, si bien el RMAE y el RRMSE son inferiores para ERA5 que para BPRSC, el desvío calculado con ERA5 fue mucho mayor.

El producto anual de BPRSC sobreestimó en promedio la precipitación para la región de interés, respecto a la precipitación líquida real, en un 13 % aproximadamente comparado con las estaciones de validación (Figura 5), oscilando entre una sobreestimación máxima del 47 % en el extremo norte de la provincia y una subestimación de un poco más del 26 % en el extremo suroeste bajo estudio, siendo este último uno de los sectores más húmedos de la región. A lo largo de la cordillera, en donde se registran las mayores precipitaciones acumuladas, se presenta la mayor variabilidad espacial y temporal del fenómeno debido principalmente al impacto de la orografía en la circulación regional de vientos húmedos procedentes del Pacífico Sur. Las restantes bases globales sobreestimaron en promedio a la precipitación líquida entre un 68 % y 17 % para Terraclimate y CRU respectivamente, salvo PERSIANN, que presentó un error de sobreestimación promedio de 270 %, oscilando entre 120-486 % (Figura 5), donde la mayor sobreestimación se da en las estaciones con una lámina anual acumulada menor a 150 mm (Río Mayo y El Calafate). ERA5 es la única base

	Verano			Otoño			Invierno			Primavera			Promedio		
	RMAE	RRMSE	PBIAS	RMAE	RRMSE	PBIAS	RMAE	RRMSE	PBIAS	RMAE	RRMSE	PBIAS	RMAE	RRMSE	PBIAS
<b>BPRSC</b>	0,36	0,36	-22,32	0,30	0,37	0,83	0,21	0,24	-6,77	0,24	0,34	-0,89	0,28	0,33	-7,29
<b>CRU</b>	0,38	0,38	-26,86	0,41	0,52	-9,37	0,35	0,42	-23,65	0,27	0,40	6,28	0,35	0,43	-13,40
<b>ERA5</b>	0,27	0,27	6,71	0,27	0,30	20,47	0,27	0,32	22,92	0,34	0,46	4,80	0,29	0,34	13,73
<b>PERS</b>	3,37	3,37	-269,39	2,78	3,13	-212,78	2,57	2,68	-237,18	3,08	3,75	-229,61	2,95	3,23	-237,24
<b>TERRA</b>	0,47	0,47	-24,58	0,42	0,53	-23,45	0,40	0,49	-37,72	0,26	0,36	3,90	0,39	0,46	-20,46
<b>UDEL</b>	0,89	0,89	-55,25	0,59	0,74	-32,79	0,58	0,67	-50,92	0,62	0,92	-29,40	0,67	0,80	-42,09

Tabla IV: Evaluación de desempeño de seis bases reticuladas de precipitación en sus productos estacionales.

que predijo en promedio menores valores a los registrados por las estaciones de validación, subestimando un 16 % de la precipitación anual, obteniendo los mayores valores de subestimación (42 %) en las estaciones con menos de 200 mm año<sup>-1</sup>.

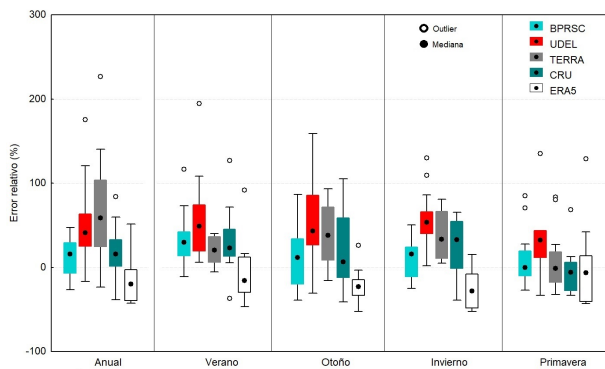


Figura 5: Distribución de los errores relativos (%) para cinco bases de datos reticuladas de precipitación en el producto anual y estacionales en comparación a las estaciones de validación para el periodo 2005-2014.

Cabe aclarar que cada estación de validación presenta un sesgo propio debido a la gran variabilidad regional en la precipitación, con un  $CV(\%)$  que vario entre el 7 % y 30 %, donde la menor variabilidad se dio en estaciones con una precipitación líquida anual mayor.

El verano y la primavera presentaron outliers para BPRSC (Figura 5), con el 116 % y 85 % de sobreestimación respectivamente, ambos valores obtenidos en la estación de Río Mayo. Por otro lado, en el otoño, la época más húmeda para la región, se encontró la mayor variabilidad en

los errores presentados por la BPRSC, llegando a subestimar la precipitación media estacional (PME) en un 40 % hasta una sobreestimación cercana al 80 %. Con respecto al desempeño de los productos estacionales, el verano representó la estación con mayor sobreestimación en la PME (30 %), donde la mayoría de los puntos de validación oscilan entre una sobreestimación del 70 % y una subestimación del 11 % (Figura 5). Los mayores errores de sobreestimación en el verano se dieron en aquellas estaciones con menor precipitación acumulada para ese periodo (enero-marzo), tal es el caso de la estación de validación de Río Mayo, donde BPRSC predijo una lámina acumulada de verano de 30 mm, cuando en realidad precipitaron 14 mm. En este caso Río Mayo se encuentra en una situación de borde para BPRSC, ubicándose al extremo norte del producto generado. Por otro lado, la primavera representó la estación con menor desvío relativo en comparación a las estaciones de validación, oscilando entre una sobreestimación del 28 % y una subestimación del 27 % para la mayoría de las estaciones de validación (Figura 5).

ERA5 resultó ser la única base global que subestimó en promedio a la PME en las cuatro estaciones, donde el verano fue la estación con un menor valor (4 %), mientras que en el invierno se presentó la mayor subestimación media con un 25 % (Figura 5).

Al profundizar las comparaciones en la zona de cordillera, entre los paralelos 74 ° y 72° de longitud oeste, se verificaron grandes diferencias en la representación de la precipitación según la

base reticulada analizada (Figura 6). Esta región no cuenta con registros de precipitación tomados a partir de estaciones meteorológicas para el periodo de estudio analizado, contando con solo algunas estaciones recientemente instaladas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA-Chile) con registros no del todo confiables, ni completos desde el año 2014 ubicadas sobre el plateau del Campo de Hielo Sur (Bravo et al., 2019). Esta falta de registros disminuye la confiabilidad de los diferentes productos reticulados disponibles, no pudiendo aseverar cuál de las bases testeadas representa de mejor forma a la precipitación en una región sin registros y con uno de los más fuertes gradientes de precipitación en el mundo (Garreaud et al., 2013). Algunos antecedentes revelan una precipitación anual de 10.000 mm año<sup>-1</sup> para la cresta andina y 7.000 mm año<sup>-1</sup> hacia la costa pacífica (DGA, 1987).

Hacia el sur del Campo de Hielo Sur, se encuentra la región conocida como “Parque Nacional Torres del Paine”. En ella la DGA cuenta con cinco estaciones meteorológicas en el área de influencia, siendo todas ellas utilizadas para la confección de BPRSC (Figura 1). Según los registros de precipitación anual media para el periodo 1995 – 2014 precipitan en la región entre 280 y 780 mm año<sup>-1</sup>, aumentando hacia el oeste, donde se encuentra la estación del Parque Nacional Torres del Paine (Figura 6). En esta región la mayoría de las BDGP presentan gran diferencia con la precipitación real, excepto ERA5, presentando valores entre 250 – 1000 mm año<sup>-1</sup>. Por ejemplo, CRU estimo una precipitación media anual entre 250 – 500 mm año<sup>-1</sup>, mientras que PERSIANN la estimo entre 1000 a 1500 mm año<sup>-1</sup>. En el caso de BPRSC, la precipitación media anual para esta región oscila entre 250 a 750 mm año<sup>-1</sup>, con los mayores valores hacia el oeste.

Al centro oeste de la región encontramos el Campo de Hielo Sur, que se distribuye entre los paralelos 51,6° y 48,3° de latitud sur. Como se mencionó anteriormente, no existen estaciones meteorológicas de largo registro asociadas al

campo de hielo, salvo tres estaciones que se ubican sobre el plateau del mismo con tan solo unos años de datos incompletos. La estación meteorológica con mayor cantidad de datos del lado este del Campo de Hielo Sur, se ubica sobre el lado argentino, denominándose Parque Nacional Los Glaciares, perteneciente a la empresa EVARSA (Tabla I). Para el periodo 1995 – 2014 se calculó para dicha estación una precipitación media anual de 247 mm año<sup>-1</sup>; en este punto la mayor parte de las bases globales de precipitación sobreestiman la precipitación real, llegando a cuadruplicar dicho valor en el caso de PERSIANN. En este caso CRU fue la base con menor desvío respecto al valor real de precipitación, calculando el doble de la precipitación real. Luego hacia la cresta andina la mayoría de las bases globales aumentan sus predicciones de precipitación anual, llegando hasta los 1500 mm año<sup>-1</sup> para el caso de ERA5 y Terraclimate; mientras que los menores valores se obtuvieron por BPRSC y CRU, con 500 mm año<sup>-1</sup> (Figura 6).

Hacia el norte de la región encontramos al Campo de Hielo Norte, que se distribuye entre los paralelos 47,5° y 46,5° de latitud sur aproximadamente. Para el periodo de estudio no se encontraron registros de estaciones instaladas sobre este campo de hielo, si hacia el este del mismo, donde se encuentran las estaciones chilenas de Villa Cerro Castillo, Bahía Murta y Estancia Chacabuco. Esta región presenta un marcado gradiente pluviométrico, donde en menos de 75 km la precipitación aumenta de 175 mm año<sup>-1</sup> (Estancia Chacabuco) hasta los 1275 mm año<sup>-1</sup> en Bahía Murta, ubicada en cercanías al Campo de Hielo Norte. Este gradiente no fue captado por las distintas bases globales, presentando valores entre 500 y 1500 mm año<sup>-1</sup> (Figura 6). ERA5 presentó para esta zona valores entre 500 – 1000 mm año<sup>-1</sup>, mientras que BPRSC mostró valores entre 250 y 1250 mm año<sup>-1</sup>.

El comportamiento de cada una de estas bases globales es distinto de acuerdo a su ubicación relativa a la cordillera de Los Andes.

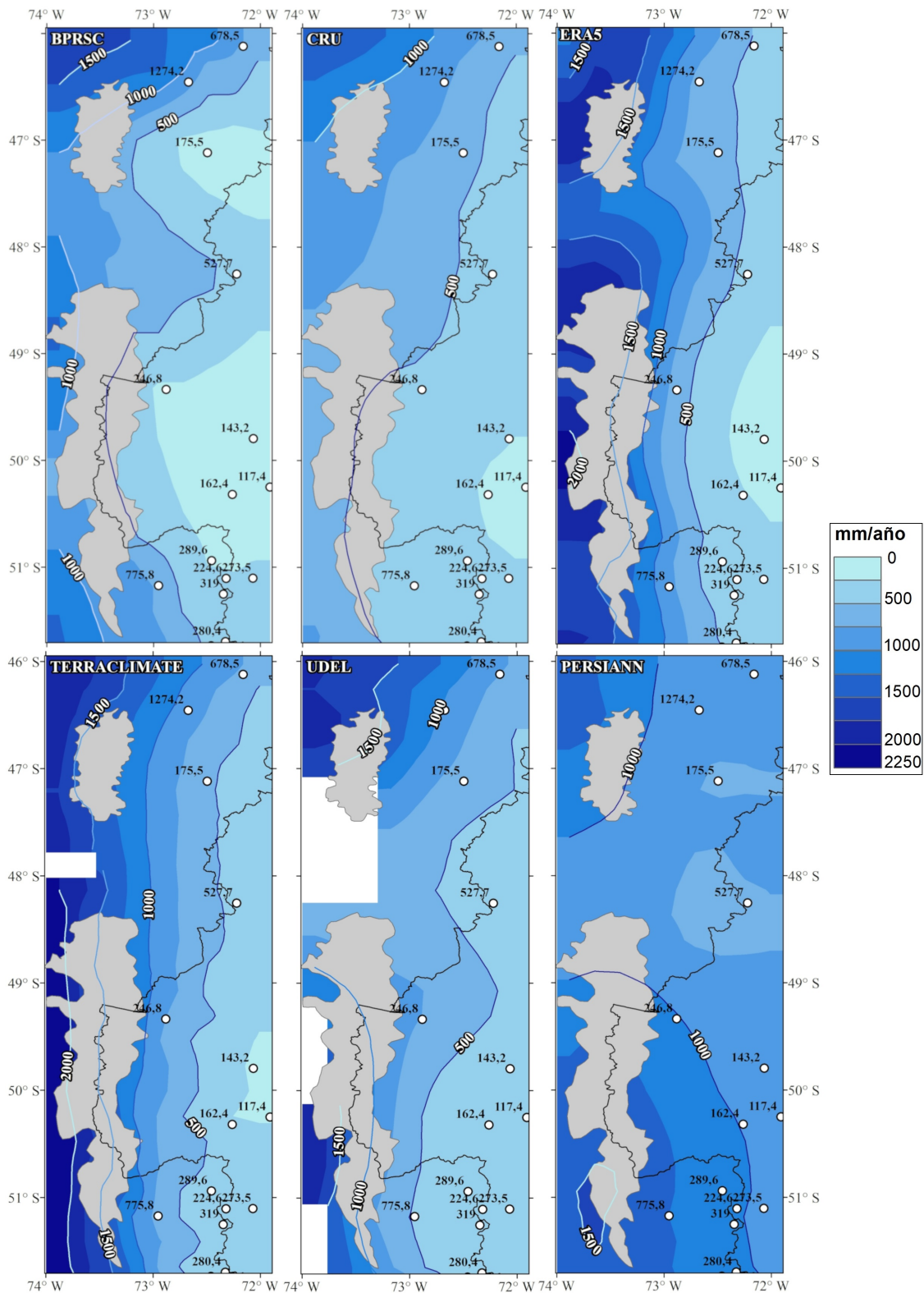


Figura 6: Precipitación media anual para el periodo 1995-2014 en la zona de los Campos de Hielo (sombreado en gris) representado por seis bases de datos reticuladas de precipitación. Puntos en blanco representan la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para la confección de BPRSC, con sus valores de precipitación media anual para el periodo 1995-2014. En blanco se presentan zonas sin datos.

Los resultados más similares entre las bases globales se obtuvieron desde la cordillera hacia la costa este de Santa Cruz donde la precipitación anual no excede los 800 mm año<sup>-1</sup> (Figura 7). Las diferencias entre las bases reticuladas son más marcadas en latitudes más altas. TERRACLIMATE y UDEL por ejemplo llegaron a estimar hasta 2000 mm año<sup>-1</sup> hacia la cordillera a los 51° de latitud sur (Figura 7), cuando la precipitación real esta región no excede los 750 mm año<sup>-1</sup> (Figura 6 y 7). En todos los cortes longitudinales analizados (46°, 49° y 51° sur) se observa que BPRSC se mantiene con valores intermedios en comparación a las cinco bases globales analizadas. Según se avanza hacia el sur se pudo observar el mayor gradiente de precipitación en cercanías de la cordillera.

### 3.3. Comparación entre las bases de datos globales y BPRSC

Todas las bases globales presentaron una alta correlación ( $r > 0,7$ ) con BPRSC en el producto anual, salvo PERSIANN con una correlación de  $r = 0,6$ . CRU, en comparación a las demás BDGP, fue la que presentó menores diferencias con respecto a la BPRSC en la distribución espacio-temporal de la precipitación media en la provincia de Santa Cruz, obteniendo el menor valor de RRMSE global (RRMSE=0,4), (Figura 8) y una diferencia menor al 2 % para el producto anual respecto a la BPRSC.

La base de datos PERSIANN fue la que mostró las mayores diferencias en comparación con la nueva base de datos generada BPRSC, tomando siempre un mayor valor en la precipitación media anual de todos los puntos de la provincia, al compararlo con la BPRSC. Esta base es la única de las analizadas que utiliza solamente estimaciones de satélite. En general este producto presenta una importante utilidad práctica en diversos estudios hidrometeorológicos, en especial de los que requieren una base diaria u horaria de registro, si bien es frecuente en regiones diversas, que los datos sintetizados en una

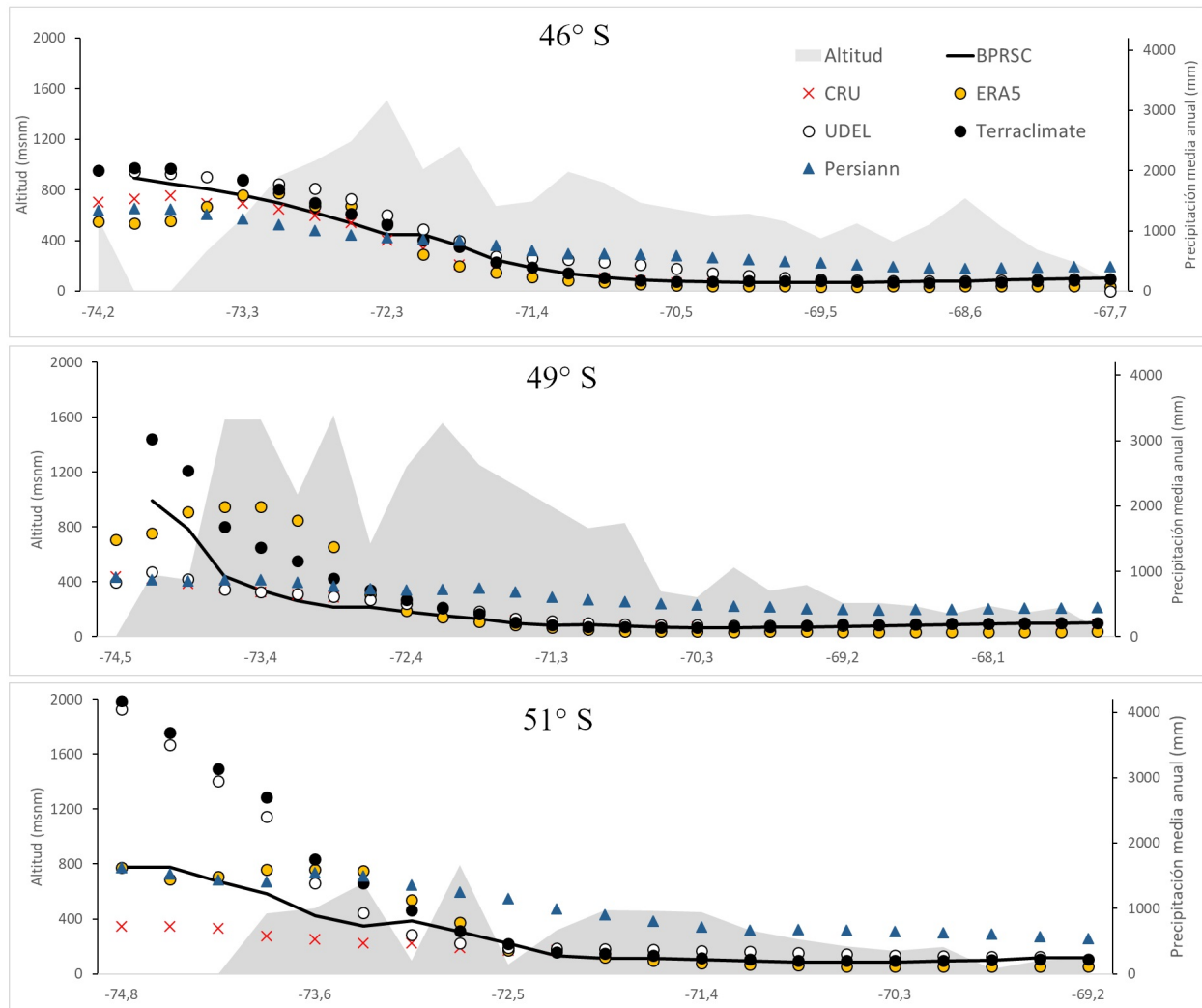
frecuencia mensual presenten sesgos de sobre o subestimación variables y que exigen de una evaluación local para su eventual utilización (Ashouri et al., 2014; Nguyen et al., 2018). Incluso, la calidad predictiva presenta un sesgo a partir de la influencia topográfica, esperándose mejor desempeño en áreas planas y relativamente onduladas respecto a regiones montañosas (Liu et al., 2019). En el presente trabajo las mayores diferencias con PERSIANN se obtuvieron progresivamente hacia el oeste de Santa Cruz al compararlo con la BPRSC (Figura 9).

En cuanto a la distribución de las diferencias relativas de cada BDGP respecto a la BPRSC, PERSIANN presentó la mitad de sus valores con un 160 – 280 % más de precipitación anual calculada, tomando similar comportamiento para los productos estacionales (Figura 10), mientras que CRU mantuvo el 50 % de sus valores con un 25 % por debajo de lo calculado por BPRSC y un 14 % por encima para el producto anual calculado.

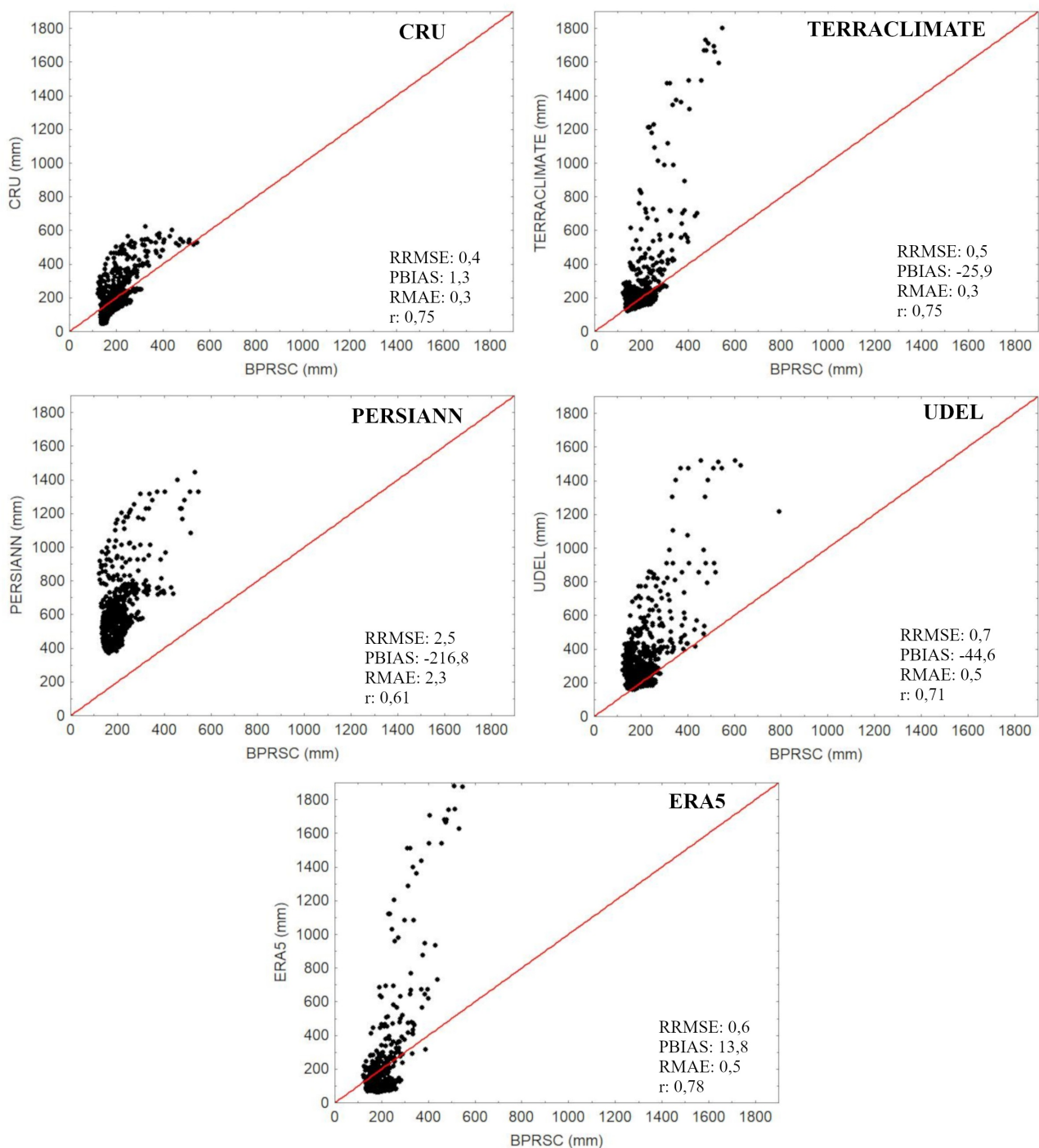
Las cinco BDGP comparadas con la BPRSC presentaron las diferencias mayores principalmente al oeste de la provincia de Santa Cruz, con valores superiores a los calculados por BPRSC, siendo entre 50 y 100 % para CRU y de 400 a 600 % para PERSIANN, ubicándose las mayores diferencias en la zona de los lagos Argentino y Viedma (Figura 9). CRU y ERA5 fueron las bases de datos que presentaron mayor superficie con valores menores a los calculados por la BPRSC (50 a 100 % menos de lo calculado), sobre todo en la región central y costera de la provincia, donde la precipitación anual es muy baja.

A partir del análisis del Diagrama de Taylor y tomando como referencia a la BPRSC se evidencia que la base de datos CRU es la que presenta el comportamiento más similar a BPRSC, tanto en su producto anual como en los estacionales respecto de las demás BDGP (Figura 11). CRU presentó menores diferencias con respecto a la BPRSC en las estaciones



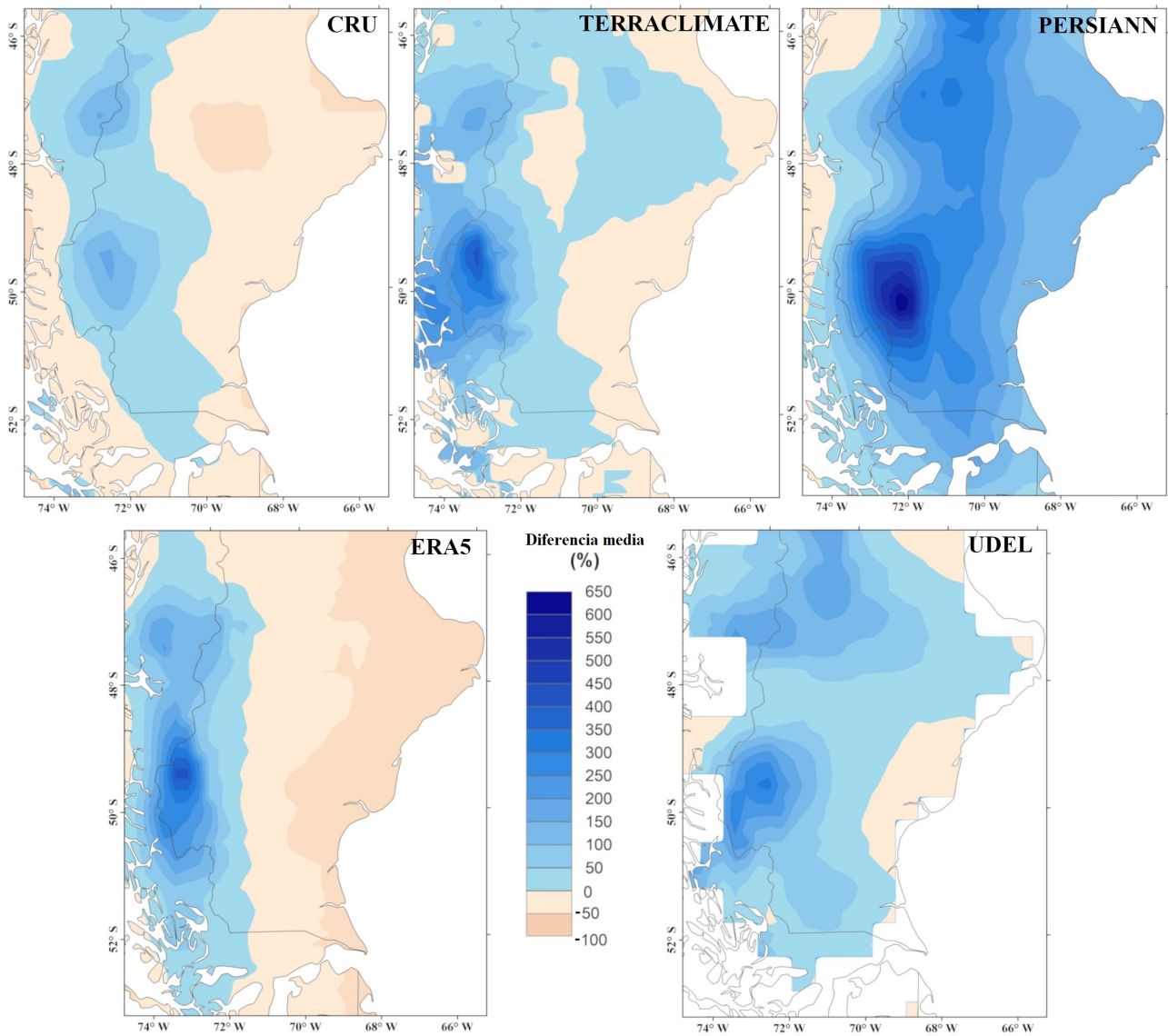


*Figura 7:* Transectas longitudinales de precipitación media anual (mm) a los 46°, 49° y 51° de latitud sur expresada para la Base de Precipitación Reticulada para Santa Cruz (BPRSC) y cinco bases globales reticuladas de precipitación. En gris se representa la topografía (msnm) a lo largo de la transecta a partir de modelo digital de elevaciones SRTM (90 m).

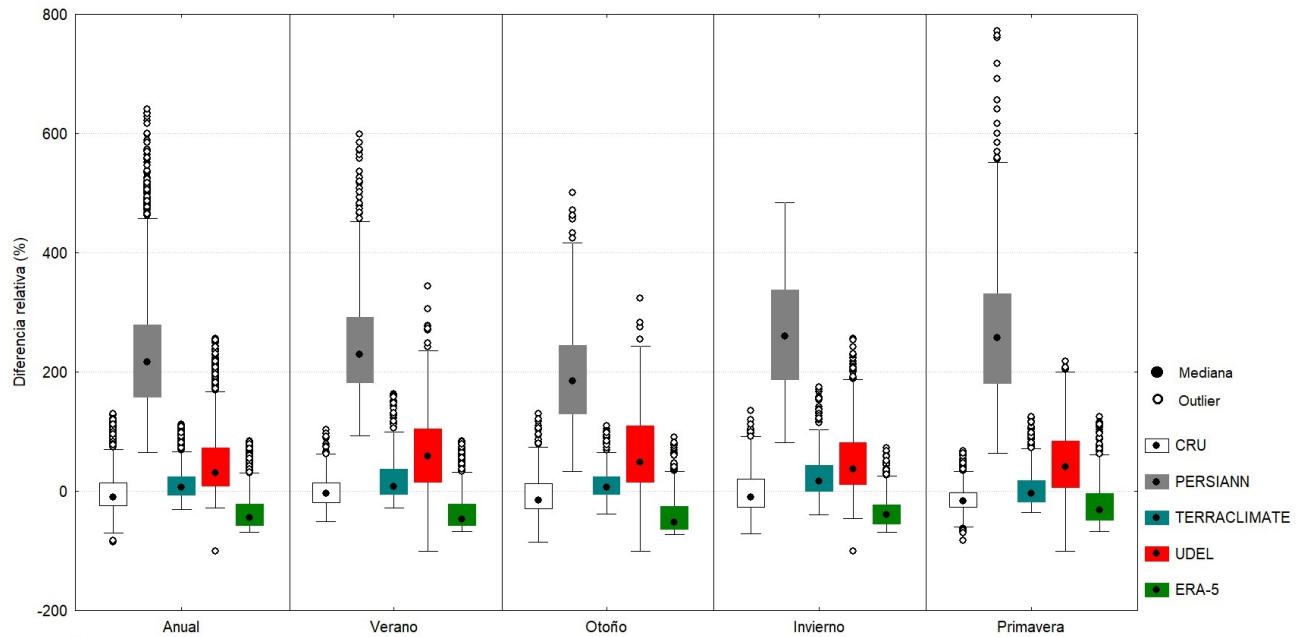


*Figura 8:* Comparación de la Base de Precipitación Reticulada para Santa Cruz (BPRSC) con cinco Bases de Datos Globales de Precipitación (BDGP) en su producto anual para el periodo 1995-2014.





*Figura 9:* Diferencia media (%) de Bases Globales de Precipitación en comparación a la Base de Precipitación Reticulada para Santa Cruz (BPRSC). Valores negativos indican menor valor de precipitación media anual, mientras que valores positivos indican mayor valor de precipitación media anual de las bases de datos globales respecto a BPRSC.



*Figura 10:* Distribución de las diferencias relativas para los productos anual y estacionales de las Bases de Datos Globales de Precipitación (BDGP) en comparación a la Base de Precipitación Reticulada para Santa Cruz (BPRSC) para el periodo 1995-2014.

con menores precipitaciones (primavera-verano) mientras que en otoño-invierno disminuyeron su grado de representatividad dado que aumentaron sus valores de desvío estándar y ECMC.

### 3.4. Distribución anual y estacional de la precipitación representada por BPRSC

La precipitación media anual (PMA) para la provincia de Santa Cruz osciló entre los 130 mm año<sup>-1</sup> en el centro-norte de la provincia y los 750 mm año<sup>-1</sup> para en el suroeste (Figura 12), alcanzando valores máximos en el orden de los 1000 mm año<sup>-1</sup>. Más del 60 % del territorio provincial recibe anualmente menos de 200 mm año<sup>-1</sup>, mientras que el mayor gradiente se presentó acercándose a la cordillera de Los Andes, donde en una distancia de menos de 100 km respecto a su eje central, la PMA aumentó desde 200 mm año<sup>-1</sup> a 750 mm año<sup>-1</sup>, de este a oeste. La figura 7 muestra la variación de la precipitación anual a lo largo de transectas longitudinales a los 46°, 49° y 51° sur, donde se puede observar el mayor gradiente de

precipitación en cercanías de la cordillera. Este gradiente se hace menos evidente hacia el sur de la región, donde se encuentran diferencias altitudinales no mayores a los 800 msnm de oeste a este. La costa marítima, al este de la provincia, presentó una PMA mayor que la zona central mediterránea, con un régimen de precipitación entre 200 y 300 mm año<sup>-1</sup> (Figura 12).

Por otro lado, otoño resultó ser la estación con mayor precipitación media estacional (PME) para la provincia de Santa Cruz, con un valor promedio de 77 mm, mientras que la primavera con 53 mm fue la estación más seca (Figura 12). Según la ubicación geográfica existe cierta estacionalidad en la precipitación media. La zona sureste de la provincia, en cercanías a la ciudad de Río Gallegos, mostró una precipitación levemente mayor en el verano que en las demás estaciones. Esta estacionalidad también se manifestó en la zona centro-este en cercanías a la localidad de Puerto San Julián, donde la mayor precipitación se dio en el otoño. En cambio, no existe una marcada estacionalidad sobre la cordillera, encontrándose

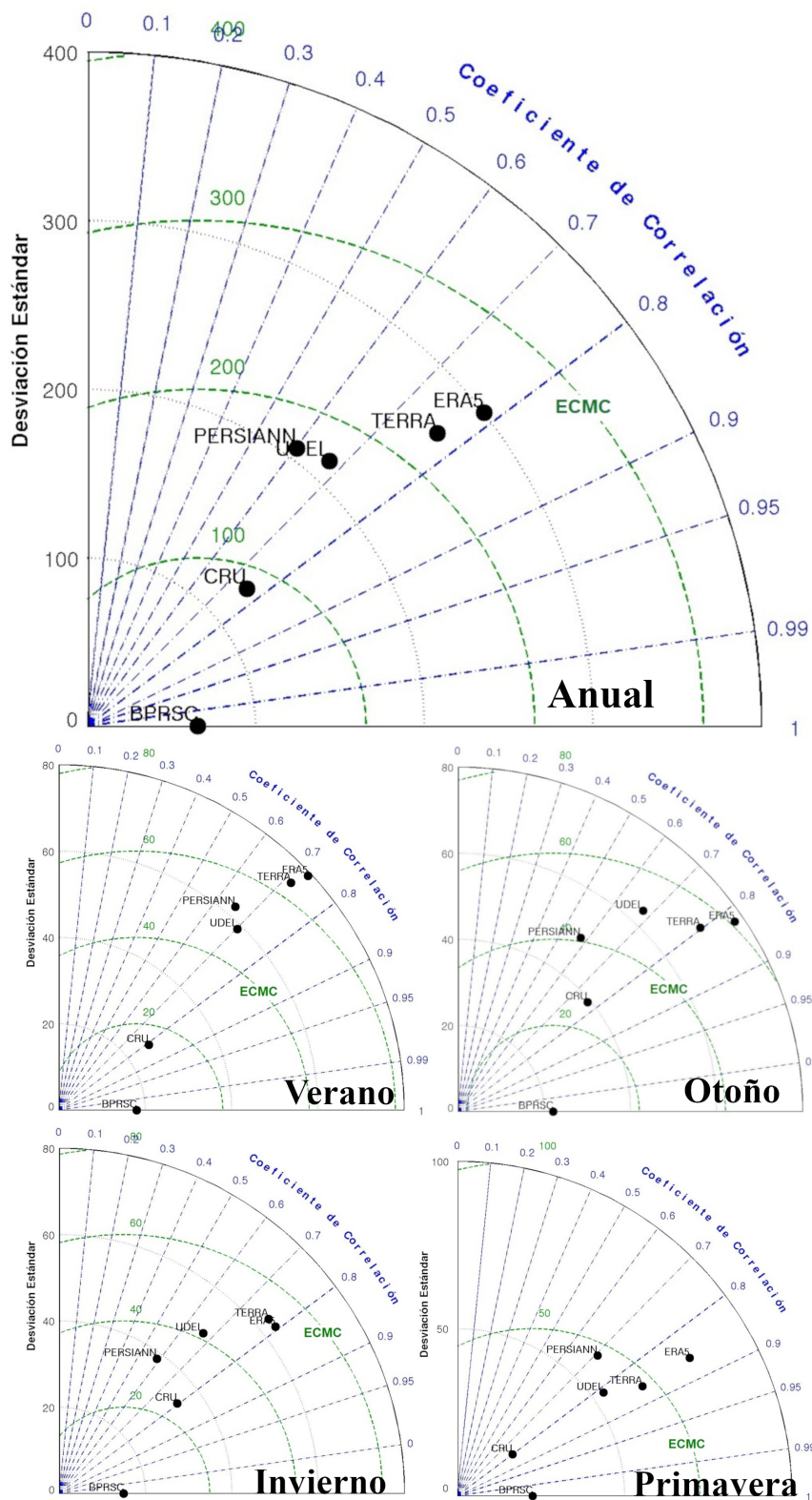
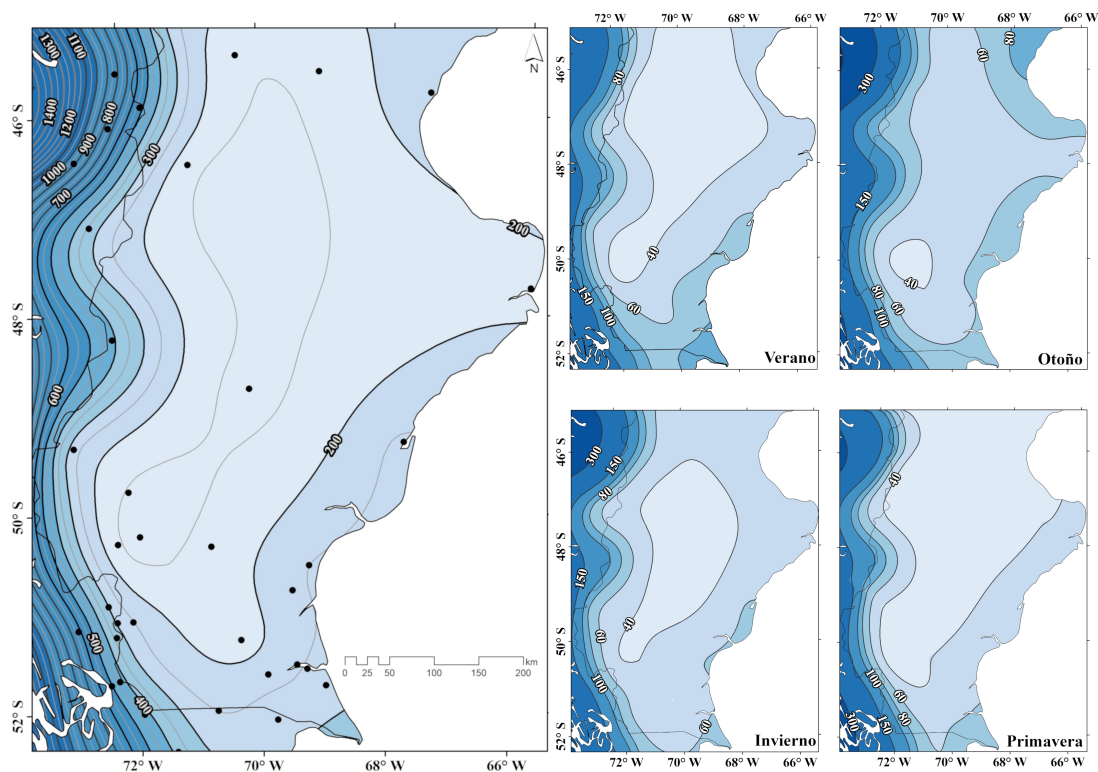


Figura 11: Diagrama de Taylor para la evaluación de cinco Bases de Datos Globales de Precipitación en comparación a la Base de Precipitación Reticulada para Santa Cruz (BPRSC) en su producto anual y estacionales.



*Figura 12:* Distribución anual (Izq.) y estacional (Der.) de la precipitación media para la Provincia de Santa Cruz. Isohietas cada 50 mm. Los puntos negros indican la ubicación de estaciones utilizadas para la interpolación.

los valores de PME entre 100 y 150 mm para las cuatro estaciones del año. Sin embargo, pudo observarse un aumento en la precipitación media del otoño en la zona de precordillera con valores entre 80 y 100 mm, mientras que en la estación más seca (primavera) se registraron valores entre 40 y 80 mm.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Lo registros de precipitación precisos y confiables son valiosos no solo para el estudio de las tendencias en el clima y su variabilidad, sino también para la planificación del manejo y conservación de los recursos hídricos y la previsibilidad del tiempo, el clima, la hidrología, los sistemas productivos, la industria y el manejo de emergencias (Larson y Peck, 1974; Ebert et al., 2007; Yilmaz et al., 2010; Jiang et al., 2012; Liu et al., 2017) A partir del análisis y procesamiento

de los datos pluviométricos disponibles en el Banco de Datos Hidrometeorológicos de la Provincia de Santa Cruz se pudo obtener el primer antecedente regional útil para la caracterización y cartografiado de la distribución espacio-temporal de la precipitación líquida a partir de procedimientos estandarizados para el tratamiento y modelización geoestadística de datos. De todas formas, sigue siendo un producto que representa en forma incompleta a la precipitación regional, dado que no se incluye a la precipitación sólida, variable muy importante para la región, pero sobre la cual no existen antecedentes documentados sobre sus mediciones. Hasta el momento solo se disponía de dos antecedentes en la región que caracterizan la precipitación líquida media anual proponiendo una distribución genérica de isohietas en cartografía de muy baja resolución (De Fina, 1968; Soto, 2000).



Ambos antecedentes carecen de una descripción metodológica clara y estandarizada para describir apropiadamente la variación espacio – temporal del fenómeno, proponiendo el uso de grandes bases de datos pluviométricos si bien de procedencia no documentada, series discontinuas, sin conocimiento de los protocolos particulares de captura y registro de datos u observación y con series temporales no contemporáneas. Si bien los registros utilizados para la elaboración de tales descripciones no resultan contemporáneos al presentado en este trabajo, es de interés destacar algunas diferencias con los mismos. De Fina (1968); quien concentro sus estudios en el periodo 1921-1950; obtuvo los menores valores de precipitación ( $< 150 \text{ mm año}^{-1}$ ) en la zona centro oeste de la provincia y los máximos en la zona del Parque Nacional Los Glaciares, registrando valores cercanos a los  $1500 \text{ mm año}^{-1}$  de precipitación media anual, mientras que en nuestro trabajo la zona con menos de  $150 \text{ mm año}^{-1}$  se distribuye por toda la región central y las precipitaciones medias mensuales no superan los  $700 \text{ mm año}^{-1}$ . Por otro lado, los resultados de Soto (2000) identifican zonas con precipitaciones mayores a los  $300 \text{ mm anuales}$  en la zona centro-sur de la provincia, donde nuestro trabajo estima precipitaciones medias anuales de  $150$  a  $200 \text{ mm año}^{-1}$ . Además, Soto (2000) describe la región oeste de la provincia como aquella con mayor precipitación media anual, distribuyéndose las mismas entre los  $300 - 1200 \text{ mm año}^{-1}$ , mientras que para la misma región nuestro trabajo estima precipitaciones anuales entre  $200 - 700 \text{ mm año}^{-1}$ . De todas formas, no es posible descartar que las diferencias encontradas puedan ser debidas a cambios en los regímenes de precipitación, dado que no son estudios contemporáneos. La Base de Precipitación Reticulada para la Provincia de Santa Cruz (BPRSC) representó en forma satisfactoria la interacción de factores como la topografía, la circulación atmosférica y la proximidad a los océanos en los patrones espaciales de la precipitación. Los mayores valores de precipitación anual se obtuvieron en la proximidad de la cordillera de Los Andes,

donde es de esperar que las precipitaciones sean mayores y su variabilidad menor (Jobbágy et al., 1995). Por otro lado, se puede evidenciar la influencia en la zona este de Santa Cruz de las masas de aire provenientes del Océano Atlántico, donde se registran valores de precipitación mayores que en la región central, como fue descripto previamente por Paruelo et al. (1998). Capturar este comportamiento es relevante ya que la influencia de las masas de aire provenientes del Atlántico contribuyen a la formación de precipitaciones convectivas esporádicas en las regiones cercanas a la costa, principalmente en verano y principios de otoño (Bianchi et al., 2016). La anomalía de circulación ciclónica implica un menor flujo de aire desde la cordillera contribuyendo al aumento de la precipitación sobre la costa este de Patagonia y actúa como una fuente adicional de humedad durante eventos intensos de precipitación (Berman et al., 2012; Agosta et al., 2015). Se presentan no obstante dos importantes limitaciones en el producto logrado con la modelización que deben tomarse en consideración tanto para la interpretación del producto BPRSC logrado como durante su utilización como referencia comparativa de los modelos globales de precipitación propuestos. Una de estas es la longitud de la serie de tiempo trabajada, ya que en pos de lograr la más amplia base de datos confiable de registros de precipitación líquida solo pudo restringirse a un lapso continuo de 20 años y dentro de un período arbitrario, de utilidad local, entre los años 1995 – 2014. Los estándares internacionales aceptados para la descripción de variables climáticas indican la necesidad de contar con no menos de 30 años de registros de datos de preferencia en el período 1961 – 1990 (WMO, 2011). Aun así, la base de datos lograda representa un importante avance en materia de conocimiento del fenómeno de precipitaciones líquidas regionales, pudiendo actuar como apoyo a estudios de variabilidad climática a partir de establecerse una base de referencia comparativa futura. La segunda limitación la impone el desequilibrio en la distribución espacial de estaciones de registro

pluviométrico, resultando demasiado baja en la región de mayor variabilidad temporal esperada para el fenómeno, la cordillera occidental de Los Andes. Tal es así, que la BPRSC puede causar una importante subestimación a medida que se acerca a la cordillera, obteniendo mejor representación del fenómeno en zonas con menor precipitación líquida anual. En este caso, la robustez del procedimiento de interpolación propuesto, Kriging Ordinario, permitió lograr mejores resultados respecto a lo que podría esperarse con otras metodologías habituales (Maglione et al., 2019), si bien la calidad final del producto es altamente dependiente de la representatividad de los puntos seleccionados en relación con la variabilidad natural del fenómeno y su correlación espacial (Kravchenko, 2003). La escala de la modelización también juega un importante papel en el producto final. Así, la bondad de ajuste evaluada a nivel puntual entre unas pocas estaciones discretas, dentro del modelo, es altamente sensible a la variabilidad espacial del fenómeno, la que tiende a atenuarse cuando el producto se analiza en escalas geográficas grandes (Maglione et al., 2019). Las Bases de Datos Globales de Precipitación (BDGP) poseen una serie de ventajas en relación a la información terrena como ser de libre acceso, de confiabilidad comprobada en algunas regiones del mundo, contar con registros temporales largos de datos y ofrecer modelos continuos de la distribución espacial del fenómeno meteorológico de interés, todos aspectos atractivos para su inmediata utilización en regiones en las cuales los datos terrenos resultan escasos, usualmente poco accesibles, con series cortas, dispersas o incompletas, o bien con importantes incertidumbres sobre la calidad de la captura de datos. La base de datos CRU, por ejemplo, contiene información modelizada desde el año 1901 a la fecha, sobre una base mensual lo que permite realizar una diversidad de análisis no solo de caracterización sino también de tendencias. Disponer de datos modelizados confiables resulta de gran valor en amplias regiones del mundo en las cuales, como la Patagonia Austral argentina, no se dispone de secuencias confiables y continuas de registros

terrenos de estaciones pluviométricas. Existen antecedentes para Patagonia norte en donde se ha analizado la precisión en la estimación de la precipitación anual de diversas BDGP, con buenos resultados (Bianchi et al., 2016; Pessacg et al., 2015). En el presente estudio, al comparar el desempeño de cinco bases globales además de la BPRSC en contraste con 13 estaciones de validación independientes, fue posible aseverar el mejor desempeño de la BPRSC en su producto anual y en el promedio de los productos estacionales. Sin embargo, es relevante destacar que durante el verano ERA5 fue la base de datos que mostró el mejor ajuste respecto a los valores registrados en las estaciones de validación. En otoño ERA5 también mostro buenos resultados, donde dos de los tres estadísticos utilizados mostraron un mejor ajuste que las demás bases de datos incluyendo a BPRSC; sin embargo, el desvío porcentual (PBIAS) mostro peor resultado que BPRSC, tomando un valor promedio del 20 % de subestimación, mientras que BPRSC puede causar una subestimación del 1 % en promedio para esta estación del año. Por otro lado, CRU resultó ser la base de datos más ajustada a los valores modelados de precipitación descriptos en la BPRSC. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Pessacg et al., (2015) donde CRU se presentó como la segunda mejor BDGP luego del producto satelital TRMM para la cuenca del río Chubut. Bianchi et al. (2016) en cambio encontró que CRU tenía el mayor desvío medio para la zona de Patagonia norte, causando gran sobreestimación en la zona de cordillera. UDEL, ERA5, TERRACLIMATE y PERSIANN presentaron diferencias importantes, con valores mayores que se incrementan hacia la cordillera al ser comparadas con la BPRSC. Esta es una zona de gran incertidumbre para la región, donde no existen registros pluviométricos confiables de larga extensión, y donde a pesar de ello muchas bases globales ofrecen datos en forma continua, presentando grandes diferencias entre sí, principalmente en las zonas de los campos de hielo y alrededores. Estas diferencias están asociadas con las dificultades en la representación del fuerte gradiente de

precipitación que existe sobre esta área, donde la precipitación media anual oscila entre 6000 mm año<sup>-1</sup> sobre la costa chilena a menos de 300 mm año<sup>-1</sup> en la costa este Argentina (Smith y Evans, 2007). Las diferencias entre las bases globales de datos pueden deberse a la calidad de los datos de partida, su origen y las técnicas de interpolación utilizadas (Faiz et al., 2018; Sun et al., 2018), sumado a la baja cantidad de estaciones meteorológicas del sur de Patagonia incluidas en la red global GCOS (Sistema de Observación Global del Clima) utilizada para la confección de los productos reticulados (Bianchi et al., 2016). Por ello resulta de importancia no utilizar estas bases globales de datos en forma indiscriminada sin un previo análisis del desempeño de las mismas según la región geográfica donde se las analice, pudiendo llevar a conclusiones erradas sobre las condiciones climáticas de un determinado lugar.

Agradecimientos: Agradecemos a la empresa Enap Sipetrol Argentina S.A por el aporte de recursos al proyecto de investigación, a la Municipalidad de Río Gallegos (Santa Cruz) y, en especial, a Mariano Bertinat, Secretario de Estado de Ambiente de la provincia.

## REFERENCIAS

- Agosta, E., Compagnucci, R., Ariztegui, D., 2015. Precipitation linked to Atlantic moisture transport: clues to interpret Patagonian palaeoclimate. *Climate Research*, Vol. 62, 219 – 240.
- Alexandersson, H., 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, Vol. 6, 661 – 675.
- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., Hegewisch, K. C., 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data* 5:170191.
- Aguiar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T.C., Wieringa, J., 2003. Guidelines on climate metadata and homogenization. World Meteorological Organization, WMO-TD No. 1186, WCDMP No. 53, Geneva, Switzerland, 55.
- Ashouri, H., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., Nelson, B. R., Prat, O. P., 2015. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin American Meteorological Society*, 96, 69–83.
- Berman, A.L., Silvestri, G., Compagnucci, R., 2012. Eastern Patagonia seasonal precipitation: Influence of southern hemisphere circulation and links with subtropical south American precipitation. *Journal of Climate*, Volume 25, pp 6781-6795.
- Berndt, C., Haberlandt, U., 2018. Spatial interpolation of climate variables in Northern Germany – Influence of temporal resolution and network density. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15: 184 – 202.
- Bertiller, M.B., Elissalde, N.O., Rostagno, C.M., Defossé, G.E., 1995. Environmental patterns and plant distribution along a precipitation gradient in western Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 29: 85-97.
- Bianchi, E., Villalba, R., Viale, M., et al., 2016. New precipitation and temperature grids for northern Patagonia: Advances in relation to global climate grids. *Journal of Meteorological Research*, 30: 38 – 52.
- Bravo, C., Quincey, D. J., Ross, A. N., Rivera, A., Brock, B., Miles, E., Silva, A., 2019. Air temperature characteristics, distribution, and impact on modeled ablation for the south Patagonia icefield. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 907-925.
- De Fina, A. L., Garbosky, A. J., Giannetto, F., Sabella, L. J., 1968. Difusión geográfica de cultivos índices en la provincia de Santa Cruz y sus causas. INTA-Suelos. Publicación 111:29, 1968.
- DGA, 1987. Balance Hídrico de Chile, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile. <https://snia.mop.gob.cl/sad/SUP1540.pdf>
- Ebert, E., Janowiak, J., Kidd, C., 2007. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *Bulletin of American*



- Meteorological Society. 88, 47–64.
- Faiz, M. A., Liu, D., Fu, Q., et al., 2018. How accurate are the performances of gridded precipitation data products over Northeast China? *Atmospheric Research* 211 (2018) 12 – 20.
- Fick, S. E., Hijmans, R. J., 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37, 4302–4315.
- Garreaud, R. D., 2009. The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences.*, 22, 3–11.
- Garreaud, R. D., Lopez, P., Minvielle, M., Rojas, M., 2013. Large-Scale Control on the Patagonian Climate. *American Meteorological Society*, Vol. 26, 215-230 pp.
- Gaitán, J. J., Oliva, G. E., Bran, D. E., Maestre, F. T., Aguiar, M. R., Jobbágy, E. G., Massara, V., 2014. Vegetation structure is as important as climate for explaining ecosystem function across patagonian rangelands. *Journal of Ecology*, 102(6), 1419-1428.
- Getirana, A., Espinoza, J.C., Ronchail, J., RotunnoFilho, O.C., 2011. Assessment of different precipitation datasets and their impacts on the water balance of the Negro River basin. *Journal of Hydrology* 404 (3–4), 304–322.
- González-Rouco, J. F., Jiménez, J. L., Quesada, V., Valero, F., 2001. Quality control and homogeneity of precipitation data in the southwest of Europe. *Journal of Climate* 14 (2001) 964 – 978.
- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228 (2000) 113 – 129.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., Lister, D. H., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology* 34, 623–642.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., 2019. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. *Meteorology* section, ECMWF, N°159, 17-24 pp.
- Hu, Z., Hu, Q., Zhang, C., Chen, X., Li, Q., 2016. Evaluation of reanalysis, spatially interpolated and satellite remotely sensed precipitation data sets in central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 5648–5663.
- Jiang, S., Ren, L., Hong, Y., Yong, B., Yang, X., Yuan, F., Ma, M., 2012. Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method. *Journal of Hydrology*, 452–453, 213–225.
- Jobbágy, E. G., Paruelo, J. M., León, R. J., 1995. Estimación del régimen de precipitación a partir de la distancia a la cordillera en el noroeste de la Patagonia. *Ecología Austral*, 5, 47–53.
- Kashani, M. H., Dinpashoh, Y., 2012. Evaluation of efficiency of different estimation methods for missing climatological data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 26: 59-71.
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., 2015. The JRA-55 reanalysis. General specifications and basic characteristics. *Journal of. Meteorological Society of Japan*, vol. 93, 5–48 (2015).
- Kravchenko N.A., 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of American Journal*, 67:1564-1571.
- Larson, L. W., Peck, E. L., 1974. Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 10(4), 857–863.
- Li, J., Heap, A. D., 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Australia, Record* 2008/23, 137 pp.
- Liu J., Xia J., She D., Lingcheng L., Wang Q., Zou L., 2019. Evaluation of six satellite-based precipitation products and their ability for capturing characteristics of extreme precipitation events over a climate transition

- area in China. *Remote Sensing*, 11, 1477.
- Liu, X., Yang, T., Hsu, K., Liu, C., Sorooshian, S., 2017. Evaluating the streamflow simulation capability of PERSIANN-CDR daily rainfall products in two river basins on the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 169–181.
- Llano, M.P., Penalba, O., 2011. A climatic analysis of dry sequences in Argentina. *International Journal of Climatology*, 31: 504–513.
- Lloyd, C. D., 2005. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. *Journal of Hydrology* 308 (2005) 128 – 150.
- Maglione D., Soto J., Sáenz J.L., Bonfili O., 2019. Utilización de diferentes metodologías para la construcción de un mapa de precipitación acumulada en la provincia de Santa Cruz. *Revista ICT – UNPA*, 16p. <http://doi.org/10.22305/ict-unpa.v11i1.779>
- Masiokas, M. H., Cara, L., Villalba, R., Pitte, P., Luckman, B H., Toum, E., Christie, D. A., Le Quesne, C., Mauget, S., 2019. Streamflow variations across the Andes (18°-55°S) during the instrumental era. *Scientific Reports*, Nature Research, 9:17879.
- Montserrat, M. C., Diaz, B. G., Bonfili, O., Almonacid, L., 2016. Banco de datos hidrometeorológicos de Santa Cruz. Presentado en: 3er encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos (IFRH, 2016), 6 y 7 de octubre de 2016, Ezeiza, Buenos Aires, 8 pp.
- Nguyen P., Ombadi M., Sorooshian S., Hsu K., AghaKouchak A., Braithwaite D., Ashouri H., Thorstensen A.R., 2018. The PERSIANN family of global satellite precipitation data: A review and evaluation of products. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(11):5801–5816.
- Oliva, G., García, G., Ferrante, D., Massara, V., Rimoldi, P., Díaz, B., Paredes, P., Gaitán, J., 2017. Estado de los Recursos Naturales Renovables en la Patagonia Sur Extra andina. 66 pp. INTA Centro Regional Patagonia Sur. Trelew. [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_estado\\_de\\_los\\_recursos\\_renovables\\_en\\_la\\_patagonia\\_sur\\_extraandina.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_estado_de_los_recursos_renovables_en_la_patagonia_sur_extraandina.pdf).
- Paruelo, J. M., Beltrán, A., Jobbágy, E., Sala, O., Golluscio, R. A., 1998. The climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic processes. *Ecología Austral*, 8, 85–101.
- Pasquini, A.I., Depetris, P.J., 2011. Southern Patagonia's Perito Moreno glacier, lake Argentino, and Santa Cruz river hydrological system: An overview. *Journal of Hydrology*, 405 (2011) 48–56.
- Peri, P.L., Lencinas, M.V., Martinez Pastur, G., Wardell-Johnson, G.W., Lasagno, R., 2013. Diversity patterns in the steppe of Argentinean southern Patagonia: Environmental drivers and impact of grazing. En: *Steppe Ecosystems*, Chapter 4, pp 73–95. Nova Science Publishers, Inc. ISBN: 978-1-62808-298-2.
- Peri, P.L., Rosas, Y. M., Ladd, B., Toledo S., Lasagno, R. G., Martínez Pastur, G., 2018. Modelling soil carbon content in South Patagonia and evaluating changes according to climate, vegetation, desertification and grazing. *Sustainability* 10(2), 438.
- Peri, P. L., Rosas, Y. M., Ladd, B., Toledo, S., Lasagno, R. G., Martínez Pastur, G., 2019. Modeling soil nitrogen content in South Patagonia across a climate gradient, vegetation type, and grazing. *Sustainability* 11, 2707.
- Pessacg, N., Flaherty, S., Brandizi, S., Solman, S., Pascual, M., 2015. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data. *Science of Total Environment* 537 (2015) 225 – 234.
- Pessacg, N., Flaherty, S., Brandizi, S., Rehencq, M., Garcia Asorey, M., Castiñeira, L., Solman, S., Pascual, M., 2018. Producción de agua en la Cuenca del río Limay: Modelado y calibración. *Revista Meteorológica*, 43(2):3–23.
- Phillips, D.L., Dolph, J., Marks, D., 1992. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 119–141.
- Rosas, Y. M., Peri, P. L., Martínez

- Pastur, G., 2018. Potential biodiversity map of lizard species in Southern Patagonia: environmental characterization, desertification influence and analyses of protection areas. *Amphibia-Reptilia* 39: 289-301.
- Rosas, Y. M., Peri, P. L., Carrara, R., Flores, G. E., Pedrana, J., Martínez Pastur, G., 2019. Potential biodiversity map of darkling beetles (Tenebrionidae): Environmental characterization, land-uses and analyses of protection areas in Southern Patagonia. *Journal of Insect Conservation* 1–13.
- Sauter, T., 2019. Revisiting extreme precipitation amounts over southern South America and implications for the Patagonian Icefields. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 225, 20 pp.
- Schaefer M., Machguth H., Falvey M., Casassa G., Rignot E., 2015. Quantifying mass balance processes on the Southern Patagonia Icefield. *The Cryosphere* 9(1), 25–35 (doi:10.5194/tc-9-25-2015).
- Schwikowski M., Schläppi M., Santibañez P., Rivera A., Casassa G., 2013. Net accumulation rates derived from ice core stable isotope records of Pío XI glacier, Southern Patagonia Icefield. *The Cryosphere* 7(5), 1635–1644 (doi:10.5194/tc-7-1635-2013)
- Smith, R., Evans, J., 2007. Orographic precipitation and water vapor fractionation over the Southern Andes. *Journal of Hydrometeorology* 8, 3–19.
- Soto, J., 2000. Mapa de clima: Atlas de la República Argentina. Isohietas medias anuales. Las condiciones climáticas de la provincia de Santa Cruz. En *El Gran Libro de la Provincia de Santa Cruz* 2000, pag.1321.
- Štěpánek, P., 2003. AnClim - software for time series analysis. Dept. of Geography, Fac. of Natural Sciences, MU, Brno. 1.47 MB.
- Štěpánek, P., Zahradníček, P., Skálák, P., 2009. Data quality control and homogenization of air temperature and precipitation series in the area of the Czech Republic in the period 1961 – 2007. *Advances in Science and Research*, 3, 23 -26, 2009.
- Štěpánek, P., 2015. AnClim and ProClimDB software for data quality control and homogenization of time series. *Geophysical Research Abstracts*, Vol.17. www.climahom.eu.
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., Hsu, K.-L., 2018. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Review of Geophysics*, 56, 79 – 107.
- Tabios, G., Salas, J. A., 1985. Comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*, 1985, 21, 365-380.
- Taylor, K. E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, 7183 – 7192 pp.
- Villalba, R., Lara, A., Boninsegna, J. A., et al., 2003. Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years. *Climatic Change*, 59, 177–232.
- Webster, R., Oliver, M. A. 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons, Ltd (Second, Vol. 1).
- Willmott, C. J. y Matsuura, K., 2001. *Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950 - 1999)*.
- WMO, 2011. *Guide to climatological practices*. WMO-No. 100, World Meteorological Organization, Geneva, 2011. ISBN 978-92-63-10100-6, pp 117.
- Yilmaz, K. K., Adler, R. F., Tian, Y., Hong, Y., Pierce, H. F., 2010. Evaluation of a satellite-based global flood monitoring system. *International Journal of Remote Sensing*, 31(14), 3763–3782.