



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

**DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA ESTIMAR LA DISTRIBUCIÓN
ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL EN ALTA
RESOLUCIÓN EN EL DESIERTO DE ATACAMA (CHILE) A PARTIR
DE PRODUCTOS CHIRPS.**

**DEVELOPMENT OF A METHOD TO ESTIMATE THE SPATIAL
DISTRIBUTION OF MONTHLY PRECIPITATION IN HIGH
RESOLUTION IN THE ATACAMA DESERT (CHILE) FROM CHIRPS
PRODUCTS.**

Tesis para optar al Grado de Magíster en Gestión Territorial de Recursos
Naturales y al Título Profesional de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

GUILLERMO SERVANDO FUENTES JAQUE

Directores de Tesis

Dr. Luis Morales Salinas
Dr. Gerardo Soto Mundaca

Profesores consejeros

Dr. Marco Pfeiffer Jakob.
Dr. Alexis Vásquez Fuentes.

Evaluador externo

Dr. Andrés Moreira Muñoz.

Santiago - Chile
2022

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA ESTIMAR LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL
DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL EN ALTA RESOLUCIÓN EN EL DESIERTO
DE ATACAMA (CHILE) A PARTIR DE PRODUCTOS CHIRPS**

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Grado de Magíster en Gestión
Territorial de Recursos Naturales y al Título Profesional de Ingeniero en Recursos
Naturales Renovables.

GUILLERMO SERVANDO FUENTES JAQUE

	Calificaciones (Memoria de Título)	Calificaciones (Tesis de Grado)
DIRECTORES DE TESIS		
Luis Morales Salinas Profesor de física, Dr.	6.9	6.9
Gerardo Soto Mundaca Ingeniero Agrónomo, Dr.	6.9	6.9
PROFESORES CONSEJEROS		
Marco Pfeiffer Jakob Ingeniero Agrónomo, Dr.	6.9	6.9
Alexis Vásquez Fuentes Geógrafo, Dr.	5.9	5.9

Santiago - Chile
2022

AGRADECIMIENTOS

Aquí, frente a este escritorio, justamente ahora que culmina un ciclo que muchas veces vi tan lejano, las palabras de agradecimiento quedan pequeñas ante el océano de emociones que en este instante invaden mi ser. Es así como no basta con sólo una hoja de papel o una ventana de conferencia para poder expresar lo que desde mi alma aflora. Hay tantos a quienes quisiera agradecer en este momento, que resulta injusto nombrar solo a unos pocos: familia, pareja, amigos, profesores, colegas, tantos cuya presencia ha sido especialmente significativa durante este camino, siendo el viento que inexorablemente tensó mis velas.

En este espacio quisiera agradecer a aquellos que estuvieron a mi lado, compartiendo mis días y mis noches, con quienes compartí mis risas, mis juegos, mis bromas, que muchas veces soportaron mis aburridos chistes, frustraciones o enojos. Aquellos que siempre creyeron en mí, con mis virtudes y defectos, me dieron ánimo, me trajeron fortaleza, acariciaron mi cabello o me dieron palmadas en el hombro para seguir a delante. Con quienes, frente a una hamburguesa, un completo o plato de comida china, planificamos un futuro, pensamos en proyectos, ideas y tantas cosas que siempre lograron sacarme una sonrisa, permitiéndome recobrar la determinación para salir adelante.

Aquellos de quienes aprendí y aquellos a los que enseñé, los cuales han sido fuente de inspiración y crecimiento constante. Reconocer también a quienes decepcioné y aun así me siguieron brindando la oportunidad para mejorar, apoyándome, brindándome sus manos y conocimientos. A aquellos que con la más profunda comprensión y sinceridad se sentaron frente a mí, señalando mis errores y en ese mismo instante me obsequiaron sus consejos para subsanarlos y tratar de evitarlos. A aquellos que siempre me levantaron, que siempre me animaron y siempre vieron en mí lo que yo no podía ver.

Ustedes saben quiénes son, no hace falta mencionarlos. Han sido mi sustento, mi alegría, mi esperanza y mi tesón. Gracias por estar ahí, por ser una parte esencial de mi vida y, sobre todo, por hacer que este camino valga la pena.

“Nous ne sommes pas des mottes de terre glaise et l'important n'est pas ce qu'on fait de nous, mais ce que nous faisons nous-même de ce qu'on a fait de nous”

“Nosotros no somos terrones de arcilla, lo importante no es lo que se hace de nosotros, sino lo que hacemos nosotros mismos de lo que han hecho de nosotros”

Jean-Paul Sartre (1952)

DEDICATORIA

Dedicado a aquellos que, con esfuerzo y perseverancia luchan cada día contra sus fantasmas, no estás solo, no estás sola, tú puedes y lograrás tus metas. No desfallezcas, eres capaz de grandes cosas, aunque sientas que todo está en tu contra, aunque no logres ver fácilmente una salida, cree en ti y en quienes te rodean, confía y sal a delante.

¡SE QUE PUEDES!

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ANTECEDENTES.....	1
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	5
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVOS	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Área de estudio	6
Datos satelitales.....	8
Información meteorológica	9
Construcción y consolidación de la base de datos	10
Procesamiento de la base de datos MODIS.....	11
Corrección del producto CHIRPS	12
Reducción de escala de precipitación mensual	14
Análisis estadístico	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
Base de datos satelital consolidada.....	16
Base de datos meteorológica consolidada.....	17
Producto CHIRPS corregido	22
Método espacialmente explícito de reducción de escala.....	27
CONCLUSIONES	30
LITERATURA CITADA.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio, región comprendida entre Arica y Parinacota y el norte de Coquimbo.....	6
Figura 2. Diagrama de flujo del funcionamiento de Climatol, mostrando sus procesos iterativos.....	11
Figura 3. Esquema metodológico del método de regresión ponderada geográficamente .	13
Figura 4. Distribución espacial del índice NDVI máximo para el periodo a) enero-marzo. b) julio-septiembre y c) anual.	16
Figura 5. Distribución espacial de la precipitación acumulada mensual promedio de a) enero. b) julio y c) anual según el producto CHIRPS.....	17
Figura 6. Ubicación de la red de monitoreo según institución que reporta los datos.....	18
Figura 7. Histograma de valores de errores medios cuadráticos del proceso de homogenización y rellenado	20
Figura 8. Estructura de la base de datos consolidada	21
Figura 9. Cabecera de la base de datos, información de las estaciones y serie de tiempo de precipitación.....	21
Figura 10. Distribución de los errores porcentuales arrojados por el método.....	23
Figura 11. Gráfico de validación observados vs predichos a nivel medio mensual.....	23
Figura 12. Gráfico de validación observados vs predichos a nivel anual.....	24
Figura 13. Diagrama de Taylor estacional al interior de Chile para el periodo 2001-2015	25
Figura 14. Distribución espacial de la precipitación estimada para febrero en años de altos montos en el área de estudio	26
Figura 15. Distribución temporal de precipitación en los paralelos 19S y 28S.....	26
Figura 16. Resumen gráfico del método desarrollado por el estudio	27
Figura 17. Ejemplo de <i>downscaling</i> estadístico aplicado al mes de enero de 2015	28
Figura 18. Resultados del <i>downscaling</i> para febrero en años con altos montos de precipitación.....	29

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resumen del número de estaciones según país e institución.	9
Cuadro 2. Criterios estadísticos usados para la evaluación de la modelación	15
Cuadro 3. Estadística descriptiva sobre los indicadores de la base de datos consolidada y rellena da	19
Cuadro 4. Estadística descriptiva de la corrección de imágenes CHIRPS	22
Cuadro 5. Comparación del método con otros productos disponibles	25

RESUMEN

Durante los últimos años, la precipitación en el Desierto de Atacama ha disminuido considerablemente. La evidencia apunta a que, debido al Cambio Climático, los montos de precipitación proyectados al año 2050 sufrirán una disminución importante. Los eventos de precipitación son críticos para fenómenos como el Desierto Florido, por lo que estudiar los patrones de distribución de la precipitación se vuelve fundamental. Existe una baja densidad de estaciones meteorológicas en la zona, lo que produce incertidumbre al momento de representar espacialmente la precipitación. Los productos derivados de sensores remotos como CHIRPS, han ayudado a reducir este problema, sin embargo, la resolución espacial o temporal de estos productos no es apropiada para estudiar fenómenos a nivel local. Aquí radica la importancia de implementar técnicas de reducción de escala (downscaling). Esta investigación propone que, mediante el desarrollo e implementación de un algoritmo basado en métodos de regresión espacialmente explícitos, utilizando el conjunto de datos de precipitación CHIRPS V2.0 e información meteorológica, es posible conseguir grillas mensuales de precipitación para el Desierto de Atacama a una resolución de 250 m con un nivel de error menor al 20% en el periodo 2001 - 2020. En el estudio se homogeneizaron y rellenaron series de datos mensuales de precipitación para 199 estaciones meteorológicas mediante el paquete Climatol de R, con las cuales se corrigió el producto CHIRPS a escala local. Se les aplicó una reducción de escala mediante la técnica de regresiones geográficamente ponderadas (GWR) sobre las grillas corregidas para finalmente comparar su rendimiento con otras técnicas o productos grillados de precipitación. El método se desarrolló e implementó de manera exitosa con un rendimiento superior en comparación a los productos CHIRPS, ANUSPLIN y CR2MET consiguiendo niveles de error promedio del 9.7% comprobando la hipótesis planteada.

Palabras claves: Modelamiento espacial, Desierto de Atacama, Precipitación, CHIRPS.

ABSTRACT

During the last years, the precipitation in the Atacama Desert has decreased with difficulty. The evidence points to the fact that, due to Climate Change, the amounts of precipitation projected to the year 2050 will suffer a significant decrease. Precipitation events are critical for phenomena such as the Desierto Florido, so studying precipitation distribution patterns becomes essential. There is a low density of meteorological stations in the area, which produces uncertainty when spatially representing precipitation. Products derived from remote sensing, such as CHIRPS, have helped to reduce this problem, however, the spatial or temporal resolution of these products is not appropriate for studying phenomena at the local level. Here lies the importance of implementing downscaling techniques. This research proposes that, through the development and implementation of an algorithm based on spatially explicit regression methods, using the CHIRPS V2.0 precipitation data set and meteorological information, it is possible to obtain monthly precipitation grids for the Atacama Desert at a resolution of 250 m with an error level of less than 20% in the period 2001 - 2020. In the study, monthly precipitation data series for 199 meteorological stations were homogenized and filled in using the Climatol R package, with which the error was corrected. CHIRPS product on a local scale. A scale reduction was applied using the geographically weighted regression (GWR) technique on the corrected grids to finally compare their performance with other techniques or gridded precipitation products. The method was successfully opened and implemented with superior performance compared to the CHIRPS, ANUSPLIN and CR2MET products, achieving average error levels of 9.7%, verifying the proposed hypothesis.

Palabras claves: Spatial modeling, Atacama Desert, Precipitation, CHIRPS.

ANTECEDENTES

En la actualidad es innegable que el planeta se enfrenta a un fenómeno de Cambio Climático, lo cual es respaldado por los múltiples antecedentes que apuntan a la existencia de un calentamiento continuo del sistema (IPCC, 2018), observando un aumento sostenido de las temperaturas registradas a nivel mundial tanto en el aire como los océanos, una notoria disminución del régimen pluviométrico tanto en extensión como en distribución (Garreaud, 2011a; Pachauri & Reisinger, 2007), así como también un aumento en frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos que producen mayor variabilidad climática (Díaz Cordero, 2012).

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático se define como el “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante periodos de tiempo comparables” (IPCC, 2018; ONU, 1992). Es justamente debido a este fenómeno que la expresión espacial del proceso de precipitación se ha visto alterada en los últimos (DMC, 2017), de hecho, según Sarricolea & Romero (2015), para el Desierto de Atacama se espera una reducción de las precipitaciones. Los montos de precipitación podría disminuir en un rango del 10% al 30%, sobre todo, para el periodo estival de la región altiplánica (Garreaud, 2011b; Minvielle & Garreaud, 2011; Urrutia & Vuille, 2009).

El Desierto de Atacama se alimenta de las precipitaciones que se originan en el Altiplano (Garreaud, 2011b; Sarricolea & Romero, 2015). Dicho fenómeno se genera en condiciones de mucho calor latente durante la precipitación en combinación con el alto calor sensible proveniente desde la superficie del suelo, generando inestabilidad vertical y flujos convectivos de arie. Esto ocurre entre los meses de diciembre a marzo (Meseguer-Ruiz et al., 2019), viéndose moderado por la influencia del fenómeno de El Niño (Meza, 2013).

Cabe destacar que el desierto de atacama presenta a lo menos 2 regímenes pluviométricos, en el que el efecto de la altitud sobre los montos de precipitaciones resalta. Por un lado, se puede apreciar el comportamiento exhibido por las estaciones costeras ubicadas a baja altura como Arica y Codpa, dominadas por la circulación atmosférica del Pacífico, las cuales apenas registran lluvias y por otro lado, las altiplánicas, bajo la influencia del monzón sudamericano, estaciones en que los montos anuales pueden superar los 600 mm (Romero et al., 2011).

En este sentido, la precipitación es una variable altamente relacionada con procesos meteorológicos, hidrológicos y ecológicos, así como también, un parámetro altamente relevante en la circulación atmosférica (Mujica et al., 2015). Es preciso mencionar que en regiones clasificadas como áridas o desérticas, tal como es descrita la ecorregión del desierto de Atacama en la zona norte de Chile, la intensidad, cantidad y distribución de las precipitaciones constituye un factor limitante, lo que implica que las respuestas de los fenómenos naturales presentes en el área de estudio sean altamente sensibles a la variación de la precipitación (Sánchez-Cohen & Chebhouni, 2007; Santibáñez et al., 2016).

Un ejemplo de estos fenómenos naturales es el denominado desierto florido, el cual es reconocido mundialmente por las particulares y llamativas características que lo identifican.

Este fenómeno se manifiesta en un corto periodo de tiempo, dando lugar a la germinación de múltiples especies de flora con un alto nivel de endemismo, generando un aumento exponencial de la biodiversidad en todos los niveles tróficos (Gutiérrez, 2008). Es así que, para el estudio de estos fenómenos en áreas de poca cobertura de información meteorológica, se vuelve necesario realizar investigaciones que permitan mejorar la representatividad tanto de la distribución espacial como temporal de las precipitaciones.

La baja densidad de estaciones meteorológicas resulta ser un problema al momento de querer conseguir este objetivo, ya que perjudica severamente la representación de la variabilidad espaciotemporal de los datos meteorológicos en el norte de Chile (Zambrano-Bigiarini et al., 2017), así mismo, el análisis de los datos de precipitación ha sido particularmente complejo, debido a la baja calidad de los datos existentes, los cuales impiden generar relaciones representativas en grandes extensiones (Hunziker et al., 2018).

Pese a ello, se han implementado diversos métodos para la representación cartográfica de las variables, que por lo general son realizadas de manera manual y sujeta a criterio experto, como por ejemplo las isoyetas, las cuales son isolíneas que unen puntos con el mismo nivel de precipitación. Estas isolíneas se dibujan en base a un gradiente altitudinal, considerando los valores registrados cada año en los observatorios de la zona, cuya densidad condiciona el intervalo de su trazado (Fernández García, 1996).

Con el avance de la tecnología y como alternativa a este método de representación, se han desarrollado y automatizado diferentes algoritmos para estimar y predecir la distribución espacial de variables ambientales basándose en técnicas como regresión o interpolación a partir de datos puntuales generados por estaciones meteorológicas (Attorre et al., 2007; Hijmans et al., 2005; Hunter & Meentemeyer, 2005). Entre estos métodos es posible distinguir estudios estadísticos simples de regresiones por mínimos cuadrados, métodos de interpolación espacial como por ejemplo inverso ponderado por la distancia o de curvas segmentadas (spline), así como también métodos geoestadísticos como *kriging* o *cokriging*.

La representación de la distribución espacial de las variables, ya sea usando un método tradicional (analógico) o uno automatizado, queda sujeta a la disponibilidad y calidad de información que provienen de estaciones meteorológicas instaladas en ubicaciones particulares del espacio (Morales et al., 2006; Skirvin et al., 2003) las cuales, muchas veces son insuficientes para cubrir la totalidad de una región según los criterios de la organización meteorológica mundial (López Jiménez, 2014; López Jiménez et al., 2019), dejando áreas desprovistas de información.

Ante dicho escenario, es que la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica constituyen poderosas herramientas, ya que estas pueden ser utilizadas en el análisis de la dinámica espaciotemporal de los procesos que ocurren en las diferentes superficies de la tierra, debido a que proporcionan una gran cantidad de información (Melgarejo et al., 2019; Pesquer et al., 2007). Así mismo, es posible estimar la distribución espacial de las variables utilizando campos vectoriales conocidos como Modelos Digitales del Terreno (DTM), que son representaciones espaciales de variables continuas (Daly et al., 2008; Florinsky, 1998).

En este sentido, la información satelital ha permitido producir estimaciones de la precipitación global al combinar diversas fuentes de información, lo que ha logrado mejorar la cobertura global de observación de precipitaciones con una mayor resolución espacial y

temporal (Tian et al., 2009). Es así cómo han surgido bases de datos de precipitación basadas en teledetección, que utilizan información infrarroja de satélites geoestacionarios e información de microondas medida por satélites que se encuentran en órbita terrestre baja.

Entre estas bases de datos podemos mencionar a *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) (Huffman et al., 2007), CMORPH (Joyce et al., 2004), PERSIANN (Hsu et al., 1997), con una resolución espacial de $0,25^\circ$ o más fina; *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) con una resolución de 0.05° (Funk et al., 2015; Funk et al., 2014). A pesar de ser todas bases de datos basadas en satélites, cada producto tiene su enfoque único en aspectos propios concernientes a su calibración, ponderación y utilización de las diversas fuentes de datos, como es el caso de la inclusión de mediciones terrestres para la calibración de estos productos multisensoriales (Tian et al., 2009).

Algunos productos de precipitación resultan inapropiados para su aplicación en estudios locales debido a su baja resolución y a su incapacidad de reproducir fielmente fenómenos relacionados con el microrelieve de una zona determinada. Por este motivo son necesarias las técnicas para reducir la escala de estos productos y así obtener una resolución espacial mayor que pueda ser utilizada en estudios a escala local (Benestad, 2010; Benestad et al., 2007). Habitualmente se usa la técnica de reducción de escala (*downscaling*) para mejorar la resolución espacial de la información clasificando los enfoques de reducción de escala en dinámicos y estadísticos, estos últimos, basados en relaciones empíricas (Brown et al., 2008).

Es común que se utilice esta técnica en lugares con orografía abrupta, diversos usos de suelo o alta variabilidad vegetacional, ya que, a nivel local, estas técnicas permiten incorporar aspectos del microrelieve que explicarían algunas variaciones espaciales de variables medidas. Muchas veces los excesivos tiempos de cálculo e incertidumbres de los modelos complejos son mayores a los beneficios de la técnica de reducción de escala dinámica, por lo que se prefiere la reducción estadística cuando se buscan estimaciones de variables específicas, especialmente a escala local para la toma de decisiones, ya que es el enfoque más simple y eficiente (Benestad et al., 2007; Brown et al., 2008).

El producto de precipitación basado en información satelital *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS), proporciona datos grillados derivados de información satelital con resoluciones temporales diarias, pentadales y mensuales, además de una resolución espacial de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (aproximadamente 5 km) y un registro de datos completo desde 1981 hasta casi el presente (Funk et al., 2015). El producto CHIRPS ha sido ampliamente usado y documentado en diversos estudios a modo de fuente de datos de precipitación, como, por ejemplo, el trabajo desarrollado por Alvial Vásquez et al. (2020) o el producto PISCOp V2.1 descritos en el trabajo de Aybar et al. (2020).

El problema radica en que los productos y métodos para la estimación de la distribución espacial de precipitación existentes hasta la fecha, si bien cuentan con una resolución temporal adecuada para estudiar fenómenos como el desierto florido, su resolución espacial es poco detallada para estudios a nivel de valle, cuenca o quebrada, requiriendo de la implementación de los ya mencionados métodos de *downscaling* para contar con una resolución espacial del orden de 1 km de ancho de píxel a lo menos (Chávez et al., 2019).

Por otro lado, en Chile existe la fuente de datos CR2MET, la cual consiste en capas de información meteorológica (precipitación y temperaturas máximas, mínimas y medias) generadas por el *Center for Climate and Resilience Research* (CR²) de la Universidad de Chile, tanto a nivel diario como mensual, correspondientes a una grilla rectangular de 0.05° o 180 arco segundos (aproximadamente 5 km) para el territorio de Chile continental y el periodo 1979-2016, basado en la regionalización estadística de datos de reanálisis ERA-Interim y modelos estadísticos que consideran la topografía local para la construcción del producto de precipitación (Boisier et al., 2018).

Cabe destacar que el no contar con información apropiada, es decir, precisa, adecuada para el fenómeno a estudiar y actualizada conlleva a la necesidad de generarla mediante diversos medios (Carvajal, 2005). Contar con información de estas características plantea una serie de ventajas al momento de realizar gestión territorial de los recursos naturales, ya que esta información constituye un insumo que reduce la incertidumbre y permite realizar un análisis del territorio fundamentado en datos que poseen una alta certeza probada por algoritmos matemático-estadísticos, permitiendo con esto una adecuada toma de decisiones (Camagni, 2003; Carvajal, 2005).

Dada la importancia de contar con este tipo de información para estudios en la región, es que, a raíz de lo anteriormente mencionado, este estudio pretende diseñar e implementar un nuevo método, basado en un modelo de regresiones espacialmente explícitas, que permita para el conjunto de datos de precipitación CHIRPS V2.0 en el Desierto de Atacama (Chile) realizar una reducción de escala desde los 5 km a 250m en el periodo 2001 a 2020, lo que implica un aumento en su resolución espacial.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible mejorar la resolución espacial de la representación de datos de precipitación basada en CHIRPS para el Desierto de Atacama?

HIPÓTESIS

Mediante el desarrollo de un algoritmo basado en métodos de regresión espacialmente explícitos, utilizando el conjunto de datos de precipitación CHIRPS V2.0 e información meteorológica, es posible conseguir una grilla mensual de datos de precipitación para el Desierto de Atacama a una resolución de 250 m con un nivel de error espacial menor al 20%.¹

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar e implementar un método, basado en regresiones espacialmente explícitas, para realizar una reducción de escala para el conjunto de datos de precipitación CHIRPS V2.0 en el Desierto de Atacama en Chile para el periodo 2001 a 2020, a una resolución espacial de 250m.

Objetivos Específicos

Construir y consolidar una base de datos satelital y meteorológica validada, homogeneizada y estandarizada para el Desierto de Atacama y sus alrededores.

Corregir el producto CHIRPS mediante el uso de regresiones espacialmente explícitas a partir de información meteorológica de la variable precipitación.

Desarrollar y aplicar un método espacialmente explícito de escala regional que permita obtener grillas mensuales en alta resolución de la variable precipitación.

¹ El porcentaje de error planteado viene dado por los valores de error de anteriores proyectos realizados, en los que se estimó la distribución espacial de variables a nivel de superficies teniendo en consideración que estos errores no eran mayores al 20%. Por otro lado, un nivel de error del 20% se considera mayor a la mayoría de los casos de estudio revisados para esta variable en sectores con características similares al área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área en que se desarrollará el proyecto corresponde a la ecorregión conocida como Desierto de Atacama, comprendida entre los 18° 24' y los 29° 55' de latitud sur según Dillon & Hoffmann (1997), lo que correspondería, según la división político-administrativa de Chile, a las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y el norte de Coquimbo tal como se puede apreciar en la Figura 1. Esta región destaca por poseer uno de los ecosistemas más singulares del planeta por sus condiciones extremas de aridez, en el que la vegetación debe lidiar con precipitaciones anuales del orden de los 0,6 mm en Arica o 2,1 mm en Iquique (Dillon & Hoffmann, 1997).

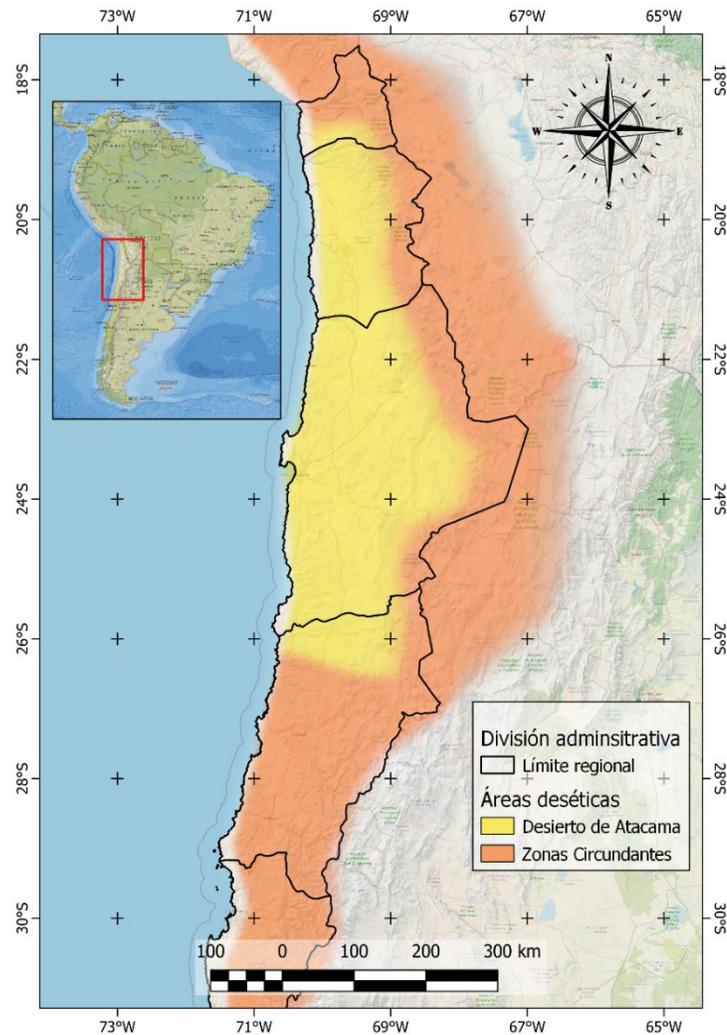


Figura 1. Área de estudio, región comprendida entre Arica y Parinacota y el norte de Coquimbo.

Es posible apreciar que en este ambiente se desarrolló una gran diversidad vegetal en relación con otros sitios en condiciones de precipitación similares, encontrando distintas formaciones vegetacionales como Herbazales, Matorrales e incluso Bosques (Luebert & Plissock, 2006, 2017), así como también un número importante de especies de flora endémica, que han sido muy poco descritas o reconocidas (Guerrero et al., 2013; Larridon et al., 2015; Luebert, 2011). Estas características se explican debido a su heterogeneidad ambiental, producto de una activa historia paleo ambiental y evolutiva (Mujica et al., 2015).

El clima de esta región se encuentra regido por un conjunto de factores que lo vuelven altamente particular (Roig, 1999), donde es posible identificar la presencia de inversión térmica originada por el predominio del anticiclón del pacífico, así como también, por la corriente de Humboldt, surgencias costeras originadas por los vientos del oeste o el efecto de barrera longitudinal que ejerce la cordillera de los Andes (Schulz et al., 2012). Esto condiciona un clima de alta aridez, donde la presencia de precipitaciones es prácticamente nula, sin embargo, esta condición suele cambiar ocasionalmente en temporada invernal, debido al movimiento de los frentes fríos extratropicales, durante periodos Niño, provocando eventos de precipitaciones extremas (Bozkurt et al., 2016).

Según la clasificación climática de Köppen, es posible describir 4 subtipos principales que predominan en la región correspondientes al Clima Desértico Marginal de Altura, Clima de Estepa de Altura, Clima desértico costero nuboso y Clima desértico interior (Inzunza, 2003). Es posible apreciar que al interior del desierto un evento de precipitación por sobre 1 mm puede tener lugar una vez cada 15 o 40 años, inclusive, se han registrado periodos de hasta 400 años sin lluvias medibles. Sin embargo, hay sectores del desierto que se ven afectados entre enero y febrero por el fenómeno denominado “Invierno boliviano”, que puede producir abundantes tormentas eléctricas (Romero et al., 2011).

Los registros de estaciones meteorológicas de los que se dispone en el Norte Grande, por lo general, son escasos temporalmente y poco densos en el espacio, lo que dificultan el establecimiento de tendencias claras durante el siglo XX, referidas a aumentos o disminuciones interanuales de las temperaturas y de las precipitaciones. Estas últimas reflejan una alta irregularidad con alzas y disminuciones asociadas a patrones de teleconexiones como por ejemplo el ENSO (Romero et al., 2011).

Sin embargo, según Sarricolea & Romero (2015), los Modelos Climáticos Globales (GCM) por sus siglas en inglés y Regionales (RCM) construidos bajo los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y variabilidad natural, apuntan a un aumento significativo de las temperaturas y escasos niveles de confianza sobre las tendencias de las precipitaciones de fines del siglo XXI (Fuenzalida et al., 2007). Sin perjuicio de lo anterior, en el trabajo de Minvielle & Garreaud (2011) se menciona un debilitamiento de los flujos desde la cuenca amazónica, y por tanto, una disminución de la precipitación altiplánica, lo que es consistente con los resultados publicados por el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC.

Por último, estudios recientes efectuados en el Norte Grande en los cuales se ha aplicado el peor escenario de emisiones del AR5 del IPCC (2013), señalan un incremento de las temperaturas entre 2 °C y 5 °C, y una reducción de las precipitaciones de entre un 10% y un 30%, a excepción de una franja desértica del interior entre la costa y la precordillera (Garreaud, 2011b; Minvielle & Garreaud, 2011; Sarricolea & Romero, 2015).

Datos satelitales

Las grillas de precipitación fueron obtenidas del *Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations* (CHIRPS, versión 2) mediante el uso del paquete *heavyRain* de R, el cual los obtiene a partir de la página web de <http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>, para los valores medios mensuales, a una resolución espacial de $0,05^\circ$ (Aproximadamente 5.5 km), utilizando datos en el intervalo temporal contemplado entre el 1 de enero de 2001 y el 31 de diciembre de 2020.

Cabe destacar que la cobertura de los datos del producto CHIRPS abarca una extensión terrestre entre los 50° S a los 50° N y que estos son calculados a partir de datos terrestres de estaciones meteorológicas con los conjuntos de datos de *Climate Hazards Group Infrared Precipitation* (CHIRP) usando un algoritmo de ponderación de distancia inversa modificado (Funk et al., 2015; Toté et al., 2015).

Adicionalmente, se utilizaron datos de los satélites TERRA y AQUA, correspondientes a información espacial registrada por el sensor MODIS, el cual cuenta con aproximadamente 34 productos generados por la NASA a partir de los datos recolectados de este sensor (Didan et al., 2015). El producto utilizado en cuestión correspondió al MOD13Q1 en su versión 6.0, el cual contiene, entre otros, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), obtenidos cada 16 días con aproximadamente 250 m de resolución espacial, presentando estos datos un procesamiento nivel 3, lo que corresponde a productos de valor agregado derivados de variables geofísicas mapeadas por MODIS (Huete et al., 2002).

Dicho producto corresponde a la última versión que cuenta con registros completos para el área y periodo de estudio, contando además con niveles de validación y corrección rigurosos y ampliamente usados por la comunidad científica. Por otro lado, tanto la escala temporal como espacial de los datos, permite una correcta evaluación del fenómeno estudiado según los trabajos de Chávez et al. (2019)

Cabe destacar que el NDVI se basa en el comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionando la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta (Díaz Cordero, 2012). Los valores entre los cuales oscila este índice están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético (Kawabata et al., 2001), mostrando así la respuesta espectral que presenta la vegetación sana, en la que intervienen la banda roja (RED) y el Infrarrojo Cercano (NIR) como se muestra en la ecuación (1) (Tucker, 1979).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Para la obtención de la variable altitud o altura sobre el nivel medio del mar, se utilizó el producto ASTER-GDEM, el cual es un modelo digital de elevación (DEM) correspondiente a una grilla de cobertura global, que posee una resolución espacial de aproximadamente

30x30 m² de superficie dependiendo de la ubicación de dicho píxel. Éste DEM es obtenido en base a un algoritmo que utiliza como principal variable de entrada los datos adquiridos por el sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer* (ASTER). Se trata de un proyecto que desarrolla el *Ministry of Economy, Trade and Industry* (METI) de Japón, en conjunto con la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

Información meteorológica

La información utilizada como referencia terrestre correspondió a datos de precipitación acumulada mensual para todo el periodo de estudio, obtenidos a partir de sensores ubicados en las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) pertenecientes a la Red Agrometeorológica Nacional (RAN), los cuales fueron empleados como fuente para la calibración de los datos CHIRPS en cada mes del año.

Adicionalmente, para complementar la base de datos y tener una distribución más representativa, se debió incorporar información desde la base de datos del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², la cual posee datos de precipitación acumulada mensual entre los años 1930 y 2020, provenientes de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), la Dirección General de Aguas (DGA) y *Global Historical Climatology Network* (GHCN).

Del mismo modo, se incorporaron datos provenientes del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología tanto del Estado de Bolivia como del Perú (SENAMHI). Dichos datos se encuentran distribuidos tanto al interior como en torno al área de estudio, para el mismo rango de fechas que las imágenes satelitales según disponibilidad.

El resumen de los datos recopilados desagregados según el país de procedencia y la institución informante se pueden apreciar en el Cuadro 1, mientras que el detalle de las estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio se puede apreciar y descargar desde el repositorio de github con nombre clave CHIRPS-HRCP (*CHIRPS High Resolution Corrected Product*) <https://github.com/djwillichile/CHIRPS-HRCP>.

Cuadro 1. Resumen del número de estaciones según país e institución.

País	Institución	Estaciones
Chile	Dirección Meteorológica de Chile	72
Chile	Dirección General de Aguas	134
Chile	Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas	2
Bolivia	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología	23
Bolivia	Global Historical Climatology Network	3
Perú	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología	19
Perú	Global Historical Climatology Network	1
Total		254

Construcción y consolidación de la base de datos

A partir de la información recopilada de precipitación acumulada mensual, se generó una base de datos consolidada con el fin de verificar la variación espaciotemporal de la precipitación y su relación con los datos CHIRPS. Para subsanar las inconsistencias y diferencias extremas entre estaciones, presumiblemente por falta de mantención o mal funcionamiento, se debió realizar un proceso de revisión, depuración y validación de los datos en varias etapas.

La norma seleccionada para dicho proceso correspondió a la norma española AENOR 500540 que consiste en realizar 7 tipos de validaciones sucesivas sobre los datos meteorológicos, las que son numeradas en niveles desde 0 (cero) a 6 (seis), siendo los niveles 0 y 1 de carácter obligatorios. Únicamente se califican en calidad de no válidos, los datos que no superen la prueba de estructura de registro de datos (nivel 0) o la prueba de límites rígidos (Nivel 1). Por otro lado, se consideran sospechosos aquellos registros que no pasen los niveles sucesivos discerniendo por inspección visual la calidad de estos últimos (Estévez Gualda, 2010; Estévez et al., 2011; Estévez & Gavilán, 2006, 2008; Guajardo-Panes et al., 2017).

Se consideró cómo límites físicos para la precipitación mensual valores entre 0 y 350 mm/mes según un análisis exploratorio de datos e información de literatura del área de estudio. Respecto al nivel 5, correspondiente a la coherencia espacial o el contraste de cada estación con otra, se llevó a cabo mediante el uso de paquetes automatizados para la homogenización de datos.

Para la homogeneización y relleno de datos de precipitación se utilizó el paquete *Climatol* de R, que contiene una serie de funciones para el control de calidad, homogeneización y relleno de los datos faltantes en un conjunto de series de cualquier variable meteorológica mediante la aplicación del *Standard Normal Homogeneity Test* o SNHT (Alexandersson, 1986), a partir de estimaciones calculadas en base a las series más próximas y que contengan datos. En la Figura 2 es posible apreciar el diagrama de flujos que utiliza *Climatol* para desarrollar la homogeneización y relleno de datos, donde las líneas negras hacen referencia a flujos de procesos iterativos (J. A. Guijarro, 2016; Pastor, 2015).

Para esto, se leyeron tanto la ubicación de las estaciones como los registros de éstas y se guardaron estos datos en el formato que requiere *Climatol*. Luego se procedió a realizar un análisis exploratorio de los datos para estimar los SNHT aplicado a ventanas superpuestas, removiendo series de tiempo que interfieran con el proceso de homogeneización, lo cual es realizado de manera automática por el paquete. Una vez finalizado el procedimiento, se debe aplicar la homogeneización utilizando los SNHT obtenidos y aplicándolos a las series de tiempo completas para finalmente rellenar los datos ausentes y grabar los datos obtenidos tal como se describe en el trabajo de Guijarro (2016).

Es preciso mencionar que el paquete *Climatol* ha sido utilizado como método tanto para realizar el control de calidad de los datos, homogeneizar y evaluar series de tiempo, así como también para completar datos faltantes en una serie (J. Guijarro, 2018; Pastor, 2015). Este procedimiento ha sido utilizado en estudios de análisis sinópticos como aquel mencionado en el trabajo de Meseguer-Ruiz et al. (2020) o en estudios conducentes a

determinar la distribución espacial de la variable como en el trabajo de Meseguer-Ruiz et al. (2019), ambos realizados en el norte de Chile. Por otra parte, se han realizado trabajos en el extranjero, cómo el presentado por Kuya et al. (2022) el cual aplica Climatol para homogeneizar y rellenar series de datos de precipitación en Noruega.

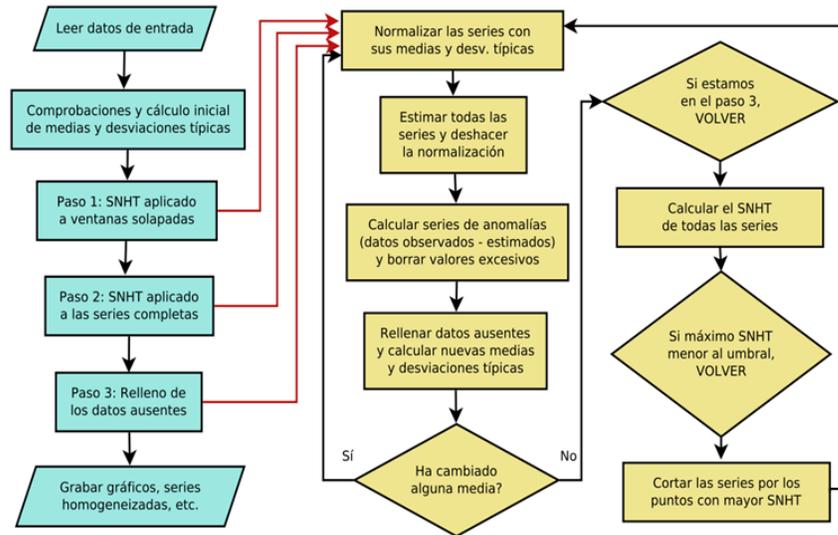


Figura 2. Diagrama de flujo del funcionamiento de Climatol, mostrando sus procesos iterativos.

Cabe resaltar que Climatol devuelve una serie de indicadores de proceso para cada estación, éstos son porcentaje original de datos de la estación (pod), índice original de la estación (ios), valores críticos de la SNTH relativas a la serie homogeneizada (snht), los errores medios cuadráticos del proceso de homogeneización y relleno de las series de datos (rmse) y la operatividad de la estación (ope), esta última representa una variable *booleana* con un valor de 0 en el caso de no estar operativa en el último periodo de estudio y 1 en el caso contrario, es decir, de estar operativa.

Procesamiento de la base de datos MODIS

Para la base de datos MODIS, se obtuvieron registros de los productos ya mencionados para un intervalo temporal de 20 años comprendidos entre los años 2001 y 2020. Estas imágenes fueron ajustadas según el factor de corrección recomendado por MODIS (Wan, 2008), para luego ser recortadas delimitando el área de interés y proyectándose al sistema de referencia geográfica con Datum WGS84 en coordenadas esféricas.

Corrección del producto CHIRPS

Para estimar la distribución espacial de las precipitaciones, se utilizó la base de datos meteorológica sistematizada y corregida. La integración de los datos de las estaciones e imágenes satelitales permite, a través del ajuste de modelos estadísticos, calibrar el registro de precipitación de superficie, para posteriormente, mediante modelos espacialmente explícitos y geoestadística, extender la estimación a toda el área de estudio.

Tradicionalmente se utilizan regresiones globales que, mediante una ecuación única, buscan conocer el comportamiento espacial de una variable, sin embargo, los coeficientes de esta ecuación no varían espacialmente (Morales, 1997; Morales et al., 2006, 2007, 2010). Esta búsqueda es realizada mediante una metodología denominada mínimos cuadrados ponderados por la distancia, siendo estos pesos ponderadores una función de la distancia entre cada punto y el resto (Berry & Feldman, 1985; Fotheringham et al., 2002). Debido fundamentalmente a que los métodos basados en ajustes estadísticos muestran variabilidad espacial de los parámetros que lo definen (inestabilidad paramétrica), se usa el denominado método de regresiones geográficamente ponderadas o *Geographically Weighted Regression* (GWR) (Montaner-Fernández et al., 2020).

Este tipo de métodos son útiles para realizar regresiones espaciales afectadas por el fenómeno de inestabilidad paramétrica con buenos resultados. Además, es capaz de generar mapas de los parámetros ajustados a escala global (Draper & Smith, 1981; Fotheringham et al., 1997, 2000; 2002; Morales et al., 2010). La Figura 3 muestra un diagrama del procedimiento para la predicción espaciotemporal de una variable meteorológica usando GWR, siendo la ecuación (2) aquella que describe esta estimación.

$$y_i = a_0(u_i, v_i) + \sum_k a_k(u_i, v_i)x_{ki} + \delta_i \quad (2)$$

Donde (u_i, v_i) indica las coordenadas del punto i ésimo en el espacio, y_i es el valor de la variable dependiente, x_{ki} es una variable independiente descriptora en el punto i , $a_k(u_i, v_i)$ es un parámetro de la regresión en cada punto de la variable independiente, y δ_i es el error en el punto i . Por otro lado, los coeficientes $a_k(u_i, v_i)$ se determinan por una ecuación vectorial dependiente de una función de pesos $W_{i,j}$.

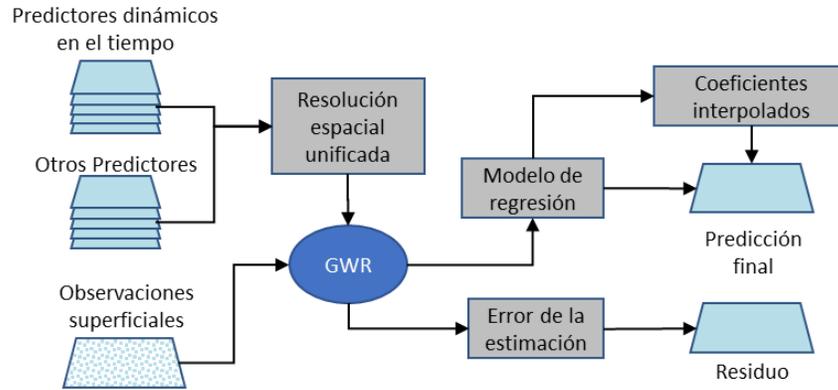


Figura 3. Esquema metodológico del método de regresión ponderada geográficamente

Sobre la base de este método es que se procede a estimar la precipitación acumulada mensual, utilizando como variable dependiente la información de la base de datos meteorológica puntual de precipitación y como variable descriptora, se utilizan las imágenes mensuales de CHIRPS sobre los píxeles que cubren cada estación, para conocer la relación que existe entre la precipitación estimada por CHIRPS y la precipitación medida en cada una de las estaciones superficiales. Es así como el modelo que describe la precipitación acumulada queda descrita según la ecuación (3) en virtud de la variable predictora.

$$PPM(x, y) = a_0(x, y) + a_1(x, y) \cdot CHIRPS(x, y) + \varepsilon(x, y) \quad (3)$$

Donde $a_0(x, y)$ y $a_1(x, y)$ corresponde a los coeficientes de la regresión, y $\varepsilon(x, y)$ el error, además (x, y) representa la variabilidad espacial. Como resultado de este proceso, cualesquiera sean los datos incluidos en los modelos, se obtiene una ecuación que permite predecir la precipitación local a partir del valor de los píxeles de CHIRPS registrados sobre la estación modelada (Gutiérrez-Puebla et al., 2012).

Sin embargo, utilizando esta ecuación, los valores de precipitación cercanos a 0 tienden a ser subestimados, a pesar de ser valores predominantes en la región del desierto de atacama, por lo que fue necesario realizar una transformación logarítmica de los datos tanto para la variable dependiente (Precipitación mensual), cómo la variable independiente (precipitación mensual satelital CHIRPS), tal como se aprecia en la ecuación (4)

$$\ln(PPM + 1) \sim \ln(CHIRPS + 1) \quad (4)$$

Es preciso mencionar que los coeficientes (a_0 y a_1) de las ecuaciones fueron interpolados utilizando el paquete *automap* de R, mediante la aplicación de *cokriging* en bloque con

ajuste de variograma automático, utilizando como covariables la altitud y la distancia a la costa del pacífico y considerando como modelos del variograma teórico sólo el esférico (Sph), pentaesférico (Pen) y exponencial (Exp), obteniendo así grillas mensuales ajustadas a los valores de las estaciones recopiladas y una resolución espacial de 5 km de ancho de pixel.

Reducción de escala de precipitación mensual

Cabe destacar que una vez obtenidas todas las capas de precipitación a partir de CHIRPS se procedió a densificarlas mediante la aplicación del método de modelación espacialmente explícita usando como variables descriptoras las capas de NDVI mensual y el modelo digital de elevación Aster GDEM, tal como se aprecia en la ecuación (5). Los coeficientes del modelo topoclimático obtenidos después de aplicar el método GWR correspondiente a cada píxel fueron interpolados mediante el uso de *kriging* ordinario con ajuste de variograma automático, obteniendo así grillas mensuales con una resolución de 250 m (Montaner-Fernández et al., 2020).

$$PPM(x, y) = \beta_0(x, y) + \beta_1(x, y) \cdot NDVI(x, y) + \beta_2(x, y) \cdot ALT(x, y) + \varepsilon(x, y) \quad (5)$$

Análisis estadístico

El análisis de los resultados se realizó mediante la comparación de los valores entregados por el método (tanto espacial como temporalmente), con los valores medidos en las distintas estaciones dentro del área de estudio. Para dicho análisis se utilizaron los estadísticos error sistemático (BIAS), valor medio del error absoluto (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el RMSE relativo porcentual (PRMSE) que corresponde al cociente entre el RMSE y el rango de valores observados. Además, se realizó un análisis de regresión lineal para obtener la prueba de homogeneidad de pendiente y calcular el coeficiente de determinación (R^2) y se calcularon otros índices estadísticos, como el índice de acuerdo (d) y el Criterio de Información de Akaike (AIC). En el Cuadro 2 se muestran los estadísticos usados para estimar el rendimiento de cada modelo, donde N representa el número de observaciones, O es el valor observado, P es el valor predicho y k el número de parámetros o variables independientes utilizadas.

Cuadro 2. Criterios estadísticos usados para la evaluación de la modelación

Descripción	Símbolo	Formula
Error sistemático o Bias	BIAS	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)$
Error absoluto medio	MAE	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n O_i - P_i $
raíz del error medio cuadrático	RMSE	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}$
Coefficiente de determinación	R ²	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$
Índice de acuerdo o <i>Agreement</i>	d	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$
Criterio de información de Akaike	AIC	$2 \cdot k - N \cdot \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N} \right)$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Base de datos satelital consolidada

Luego de los procesos mencionados fue posible contar con una base de datos filtradas y procesadas de imágenes satelitales con un total de 238 capas de imágenes CHIRPS a una resolución espacial de 5 km, 470 capas de NDVI MOD13Q1 con resoluciones tanto de 1 km como de 250 m y finalmente 1 capa DEM de ASTER con resoluciones de 5 km, 1 km, 250 m y 90 m, todas en formato GeoTIFF para toda la extensión del área de estudio. Todas estas, se encuentran disponibles para usos particulares en los servidores del laboratorio LARES Universidad de Chile a las cuales se pueden acceder previa solicitud formal.

Es posible apreciar en la Figura 4 la distribución espacial del NDVI promedio para los valores máximos de los periodos enero - marzo, julio - septiembre y anual a lo largo de área de estudio, sin embargo, tal como se mencionó anteriormente, estas imágenes representan sólo una muestra de la base de datos de NDVI, ya que se cuenta con un conjunto completo de imágenes mensuales y cada 16 días para toda el área de estudio entre el año 2001 y 2020.

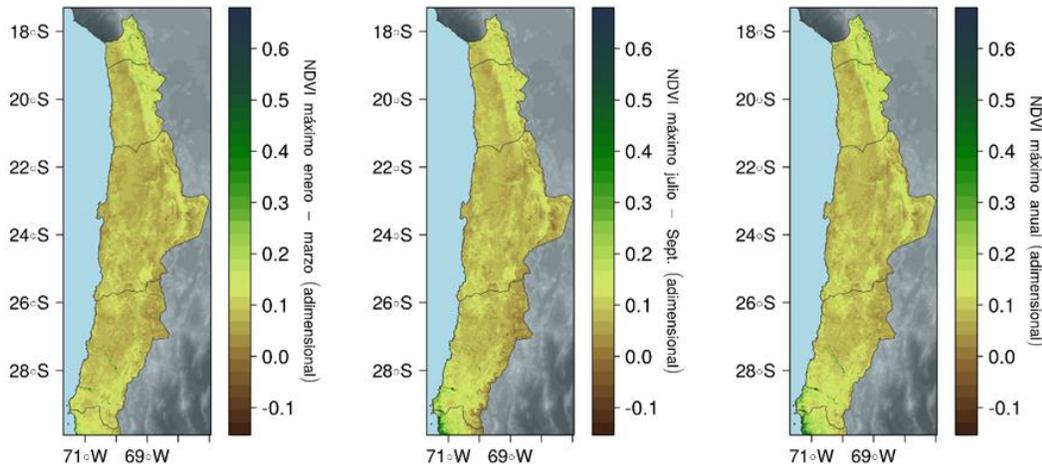


Figura 4. Distribución espacial del índice NDVI máximo para el periodo a) enero-marzo. b) julio-septiembre y c) anual.

La zona norte del área de estudio, en particular, la región altiplánica presenta un aumento del valor del índice en el período enero-marzo, mientras que, en la zona sur del área de estudio, más en específico la región costera, la vegetación prolifera durante los meses de junio-agosto, periodo en que el índice presenta sus mayores valores en la parte baja del desierto de atacama, es decir, en latitudes mayores a los 27°S.

Es posible apreciar un quiebre abrupto en zonas las de precordillera a altiplano en relación con la zona costera, debido fundamentalmente al tipo de vegetación más densa que aparece en estas zonas. Formaciones de tola, queñoa y pajonales son frecuentes de encontrar y

aumentan considerablemente sobre los 3000 metros que es donde se registra este quiebre. Cabe decir que hacia el sur este quiebre altitudinal se atenúa producto de la disminución de esta diferencia en la región de Antofagasta. En la región de Copiapó, se puede apreciar formaciones vegetacionales costeras más densas como los bosques costeros cercanos a la zona sur de Huasco, así como los valles del río Copiapó y el río Huasco.

Del mismo modo, la Figura 5 denota la distribución espacial de la precipitación acumulada media mensual para los meses de enero y julio, así como también el valor anual representadas por las imágenes del producto CHIRPS. Tal como para el NDVI, la imagen representa sólo una muestra de la base de datos CHIRPS recopilada y procesada, ya que se cuenta con un conjunto completo de imágenes mensuales para toda el área de estudio entre el año 2001 y 2020.

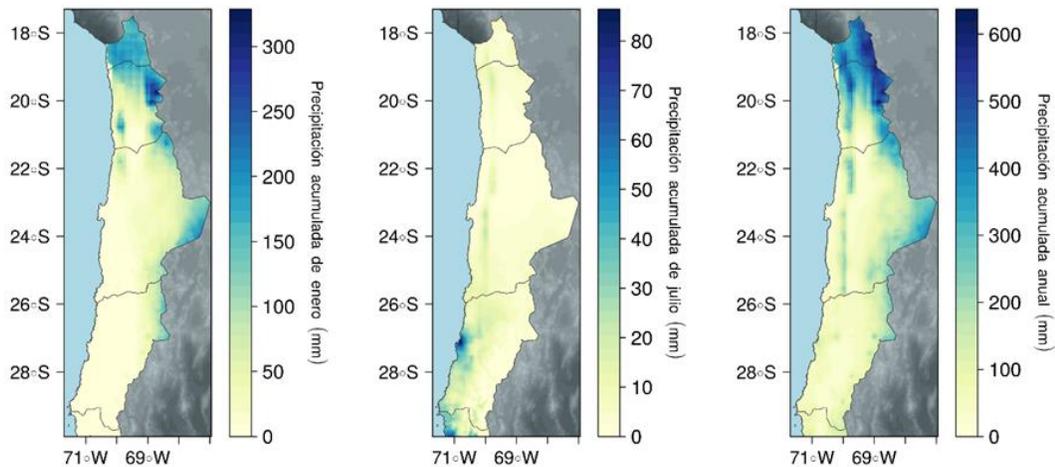


Figura 5. Distribución espacial de la precipitación acumulada mensual promedio de a) enero. b) julio y c) anual según el producto CHIRPS.

Base de datos meteorológica consolidada

La base de datos de precipitación mensual sistematizada, filtrada y rellenada consta de 199 estaciones meteorológicas tal como se puede apreciar en la Figura 6. Estas se encuentran distribuidas por toda el área de estudio, 17 de Bolivia, 20 de Perú y 162 de Chile. A pesar de ser una red de estaciones numerosa para una región desértica, es posible apreciar su concentración principalmente en zonas de importancia estratégica, como por ejemplo sectores agrícolas, sin embargo, su distribución es poco densa, dejando extensas áreas sin cubrir al interior del desierto.

Esta distribución de estaciones de medición no se encuentra en línea con las directrices propuestas por la Organización mundial de meteorología (WMO por sus siglas en inglés), la cual plantea que se debería contar con a lo menos una estación Climatológica Ordinaria cada 50 km, mientras que la distancia entre estaciones pluviométricas o pluviográficas debería ser de entre 25 y 30 km en terrenos planos, reduciéndose esta distancia a la mitad en áreas montañosas (López Jiménez, 2014; López Jiménez et al., 2019).

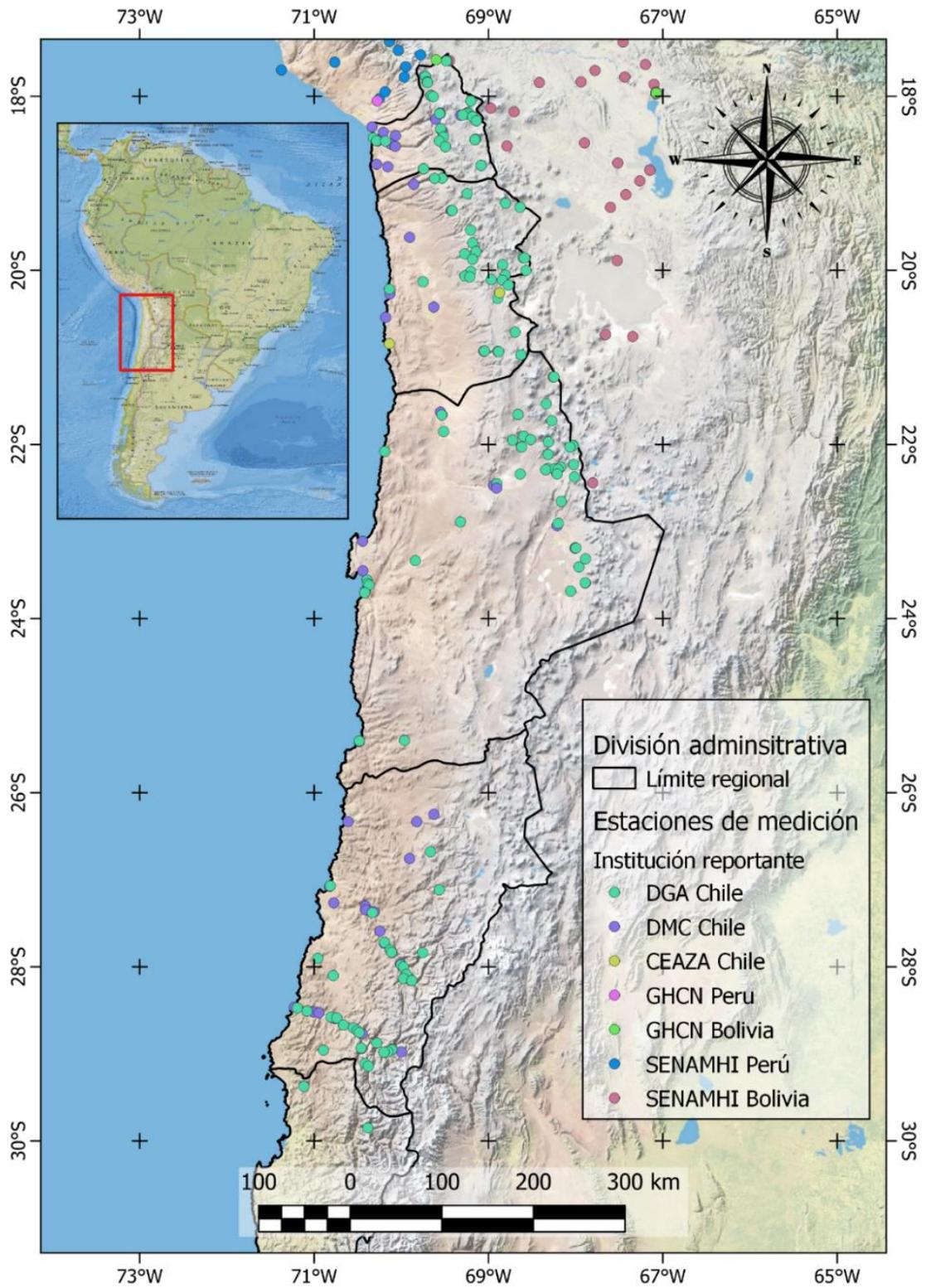


Figura 6. Ubicación de la red de monitoreo según institución que reporta los datos

Cuadro 3. Estadística descriptiva sobre los indicadores de la base de datos consolidada y rellenada

Estadística descriptiva	Porcentaje de datos original	SNTH relativas de la serie	RMSE del rellenado	Máximos de la serie
Promedio	54,196	7,552	7,027	94,385
Desv. estándar	23,213	6,575	9,519	103,899
Mediana	63	5,6	2,7	40,2
Trimmed	55,988	6,406	5,062	76,221
Desv. mediana abs.	16,309	4,448	3,707	40,475
Mínimo	4	0,5	0	8,7
Máximo	95	49	41,6	350
Asimetría	-0,697	2,186	1,723	1,228
Curtosis	-0,910	7,770	2,276	0,291
Error estándar	1,646	0,475	0,675	7,365
IQR	40	7,15	8,75	127,35
Q1	33	2,77	0,50	17,30
Q3	73	9,92	9,25	103,89

El Cuadro 3 da cuenta de la estadística descriptiva calculada para los principales indicadores de la base de datos rellenada, donde el porcentaje original de datos varió de un 4% a un 95%, lo que denota una heterogeneidad en la red de estaciones en lo concerniente a la disponibilidad de datos existentes. Del mismo modo, la mitad de las estaciones cuentan con una cantidad de datos faltantes poco menor al 40%, descrito por una mediana del 63%. Así mismo, el cuartil 1 y 3 fue de un 33% y un 73% respectivamente con una asimetría hacia la izquierda de la media, por lo que la información disponible para análisis es restringida. Esto último conlleva a la necesidad de aplicar métodos de homogenización y rellenado de datos sobre la información extraída de esta red de estaciones en la región, lo que permite mantener consistencia en los datos de entrada a los modelos que utilicen esta información (Meseguer-Ruiz et al., 2019; Meseguer-Ruiz et al., 2020; Pastor, 2015).

Respecto a los valores máximos de las series de datos rellenadas, se puede identificar lo diversas que son las condiciones meteorológicas al interior del área de estudio, teniendo estaciones en que su máximo histórico para el periodo 2001-2020 no alcanzó los 9 mm y otras en que los instrumentos registran montos de precipitación altos, alcanzando los 350 mm. El grueso de las estaciones, alrededor de un 75%, presentan máximos históricos por debajo de 144,65 mm y un cuarto del total de estaciones, no registra montos superiores a 17,3 mm, siendo un número restringido de sectores que presentan valores altos, principalmente ubicados en la región altiplánica y en el sector costero de Atacama.

Respecto de los valores críticos de la prueba normal estándar de homogeneidad (SNTH) se destaca que los indicadores estadísticos tienden a concentrarse en torno a valores menores a 8, donde, el 75% de los datos se encuentra por debajo de 9,92 y su valor mínimo fue de 0,5, con un intervalo Inter cuartil de 7,15 y un coeficiente de variación de aproximadamente un

85%, lo que puede ser explicado mediante sus valores extremos, ya que el valor máximo es de 49, mientras que las medidas de tendencia central del SNTH varía aproximadamente entre 5,6 y 7,6 según el cuadro mencionado anteriormente. El comportamiento descrito se debe no solo a la heterogeneidad de la variable al interior del área de estudios, sino que también a que existe inconsistencia en los datos al interior de las series de tiempo, tanto en el registro de cada estación, cómo entre estaciones cercanas. Esta es la razón por la cual utilizar la información extraída de las bases de datos sin una previa homogenización podría conllevar a introducir ciertos grados de incerteza en los modelos aplicados a la estimación de la precipitación (Meseguer-Ruiz et al., 2019).

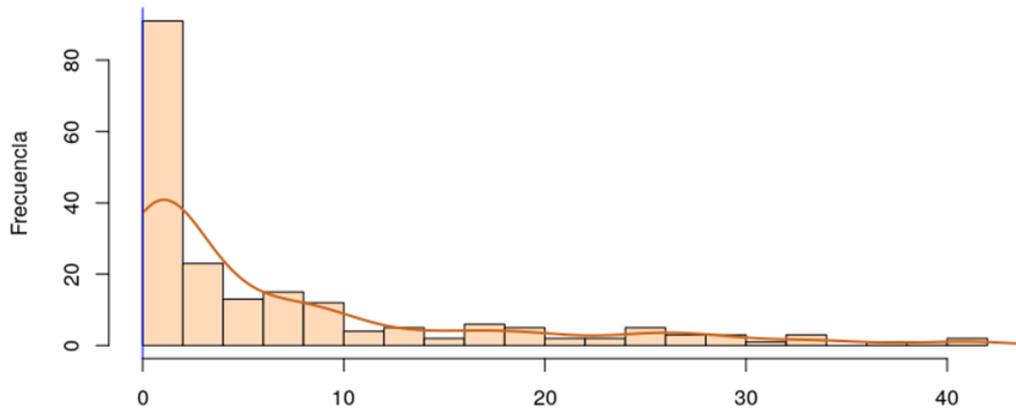


Figura 7. Histograma de valores de errores medios cuadráticos del proceso de homogenización y rellenado

Por otro lado, es posible apreciar errores medios cuadráticos del proceso de homogenización y rellenado de las series de datos en cada estación que varían entre 0 mm y 41,6 mm, un promedio y mediana de 7,03 mm y 2,7 mm respectivamente, un error estándar del orden de 0,68 mm con una asimetría hacia la derecha de la media, así como también, se aprecia que los cuartiles 1 y 3 fueron de 0,50 mm y 9,25 mm respectivamente, lo que implica que en más del 75% de las estaciones rellenadas el proceso devolvió un RMSE menor a 10 milímetros para toda la serie de datos. Lo anterior es congruente con lo que se aprecia en la Figura 7, denotando que los valores de RMSE tienden a concentrarse por debajo de los 4 mm, con un *peak* en torno a 1 mm según su distribución de densidad, lo que deja resalta la fiabilidad del método de rellenado.

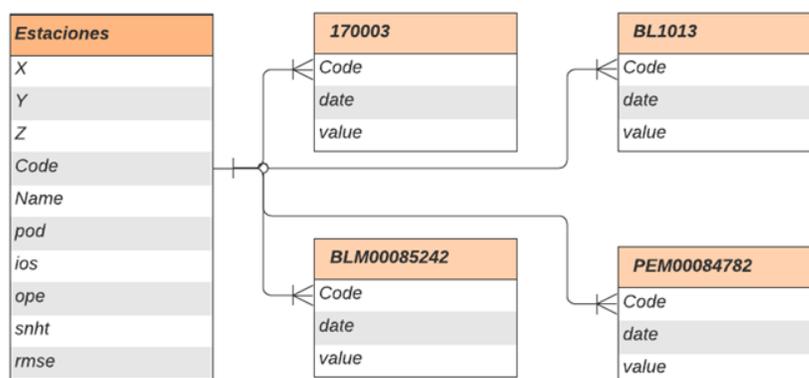


Figura 8. Estructura de la base de datos consolidada

La estructura de la base de datos viene definida por el diagrama entidad-relación que se aprecia en la Figura 8. Así mismo, en la Figura 9 se aprecian los encabezados de la base de datos ya consolidada y rellena, la cual consta de una tabla de estaciones y múltiples tablas con datos, la primera recopila información puntual de cada estación meteorológica utilizada para el estudio. Las variables X, Y y Z corresponden a información geográfica, es decir, longitud, latitud y altitud respectivamente; las variables *Code* y *Name* hacen referencia respectivamente al código identificador y el nombre de la estación de medición; mientras que los encabezados *pod*, *ios*, *ope*, *snht*, y *rmse* corresponden a los indicadores de la base de datos.

X	Y	Z	Code	Name	pod	ios	ope	snht	rmse								
-69.4485	-17.5912	4074	BL0420	Charaña_A	67	1	0	16.4	27.4								
-67.4572	-17.3781	3965	BL0431	Conchamarca	17	2	0	2.6	3.2								
-67.7786	-17.7044	3746	BL0462	San Jose Alto	71	3	0	21.8	25.7								
-67.5167	-18.7667	3676	BL0501	Andamarca	44	4	0	9.6	19.5								
-67.0800	-17.9719	3706	BL0502	Cabaña Forestal Oruro	66	5	0	24.4	18.4								
-68.7064	-18.4164																
			date	BL0420	BL0431	BL0462	BL0501	BL0502	BL0508	BL0510	BL0511	BL0513	BL0514	BL0515	BL0519	BL0521	BL1003
			2001-01-01	179.1	14.3	234.4	140.9	182.7	141.8	222.4	180.8	199	142.6	350	188	159.2	87.9
			2001-02-01	275	10.2	113.4	120.9	144	151.3	197.9	139.9	186	126.5	350	235.3	128.2	350
			2001-03-01	111.7	3.9	47	60.5	41.7	113.1	116.7	81.4	114.5	79.7	200.8	221.8	133.2	350
			2001-04-01	31.6	0.5	10.7	18.2	6.2	16.2	11.4	8.6	0	8	29.7	10	8.6	4.1
			2001-05-01	0.9	0.2	0.3	0	0	4.7	0	0.8	0	0.1	0.2	0.8	0.2	0.3
			2001-06-01	0	0.2	8	2.7	2.5	21	0	5.3	0	3.6	11.9	8	6.7	0
			2001-07-01	0	0.4	17.2	0	2.7	18.7	0	7.5	0	0.4	13.1	0.4	1.4	0

Figura 9. Cabecera de la base de datos, información de las estaciones y serie de tiempo de precipitación

Las otras tablas de datos se pueden combinar mediante un *join* dando paso a una única tabla que contenga las series de tiempo rellenas de cada estación meteorológica, donde el primer encabezado corresponde a la fecha y los consecutivos a los códigos de su respectiva estación, con el objetivo de poder hacer cruces en función del identificador de cada punto y la fecha. La base de datos consolidada, tal como se muestra en la figura anterior, es posible

ser consultada de manera online desde el repositorio público de *github* con nombre clave CHIRPS-HRCP (*CHIRPS High Resolution Corrected Product*)².

Producto CHIRPS corregido

En el Cuadro 4 se detalla la estadística descriptiva mensual calculada al relacionar los valores observados y predichos por el método. En él se logra apreciar que el error porcentual no superó el 7% observándose un mayor error en el mes de enero con un 6,2% y su valor más bajo en el mes de septiembre con un 2% respectivamente, esto da cuenta de un error bajo al momento de implementar el método. Así mismo, se aprecia que el coeficiente de determinación varió entre un 67,5% en julio y un 93,3% en febrero.

Cuadro 4. Estadística descriptiva de la corrección de imágenes CHIRPS

MONTH	BIAS	MAE	RMSE	PRMSE	R ²	D	AIC
Jan	3,420	8,650	21,70	6,2	0,9280	0,772	28100
Feb	3,300	8,810	21,10	6,0	0,9330	0,793	27800
Mar	1,720	4,580	13,60	3,9	0,9230	0,767	24900
Apr	0,768	1,550	4,59	5,7	0,8440	0,648	16000
May	0,444	0,874	3,87	3,3	0,7220	0,502	13200
Jun	0,319	0,702	2,94	3,3	0,8280	0,630	12800
Jul	0,465	1,050	4,93	2,2	0,8170	0,627	15800
Aug	0,478	0,963	5,12	2,9	0,6750	0,425	14900
Sep	0,408	0,737	4,20	2,0	0,7460	0,584	13200
Oct	0,564	0,909	4,10	4,8	0,7440	0,551	13500
Nov	0,992	1,430	6,06	4,5	0,6930	0,539	14100
Dec	1,840	3,540	11,30	5,8	0,9100	0,756	21900
Global	1,230	2,820	10,80	3,1	0,9340	0,797	27900

Extrayendo los valores del error porcentual a partir del *relative root mean square error* (PRMSE) luego de comparar los valores observados y predichos por el método es que es posible construir un histograma con la distribución del error.

² url del repositorio de *github* <https://github.com/djwillichile/CHIRPS-HRCP>

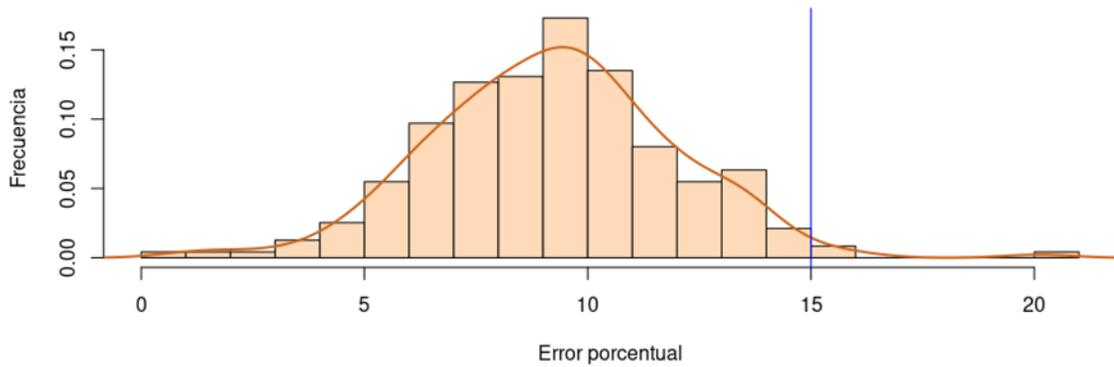


Figura 10. Distribución de los errores porcentuales arrojados por el método

La Figura 10 describe la distribución estadística de los errores porcentuales obtenidos mensualmente por el método GWR, dicha distribución según la prueba de Shapiro corresponde a una distribución normal con media 9,7%, donde el 99,5% de los datos de encuentran por debajo de 15% y tan solo un 0,17% de los errores porcentuales se encuentran entre los valores 19% y el 21%.

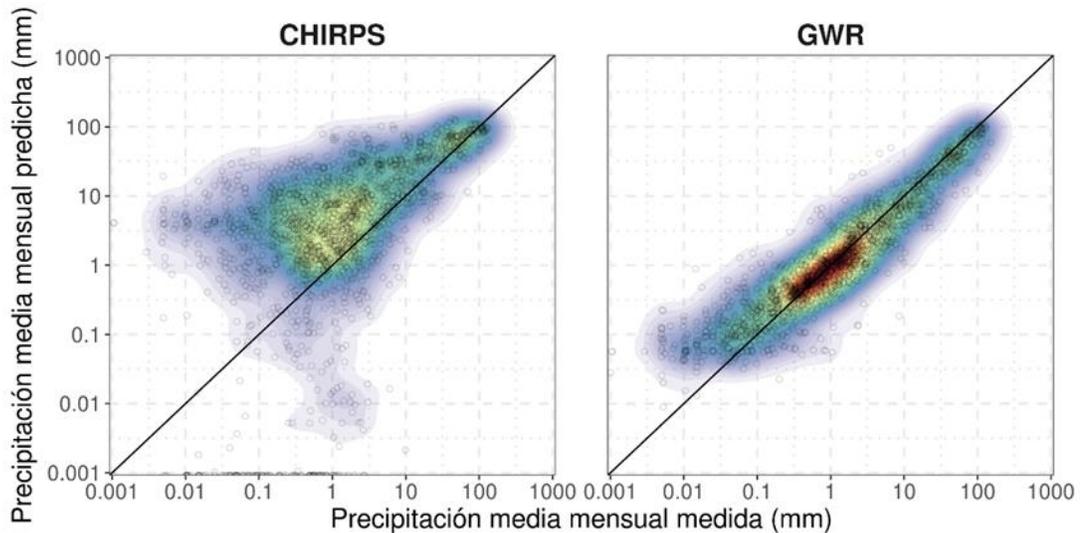


Figura 11. Gráfico de validación observados vs predichos a nivel medio mensual

Los datos de precipitación a nivel mensual tal como se puede apreciar en la Figura 11, presentan un mayor ajuste utilizando el método GWR, con un BIAS, MAE RMSE, PRMSE, R^2 y D de 1,23 mm, 2,82 mm, 10,8 mm, 3,1%, 79,7% y 93,4% respectivamente en contraposición al desempeño obtenido mediante CHIRPS en donde se pueden apreciar valores del orden de los -6,28 mm, 9,74 mm, 20,1 mm, 5,7%, 47,9% y 80,8% respectivamente. Mejorando ligeramente a nivel medio mensual con valores de PRMSE, R^2

y D del orden de los 4,3%, 90,1% y 96,3% respectivamente para GWR y de 9,6%, 64,7% y 86,8% para CHIRPS.

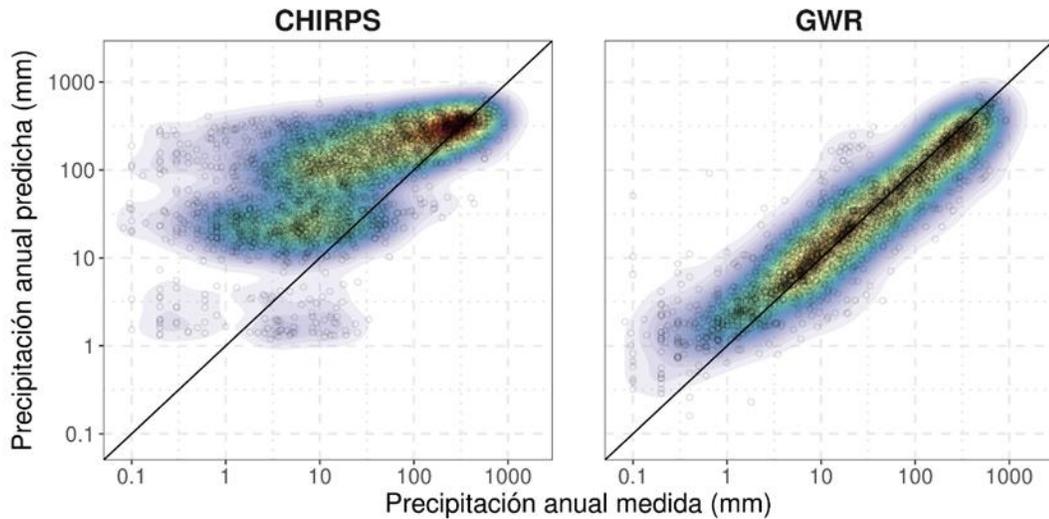


Figura 12. Gráfico de validación observados vs predichos a nivel anual

Así mismo, en la Figura 12, se logra apreciar que los datos de precipitación a nivel anual también presentan un mayor ajuste utilizando el método GWR, con un BIAS, MAE, RMSE, PRMSE, R^2 y D de 14,7 mm, 26 mm, 59,7 mm, 6,5%, 83,4% y 93,6% respectivamente en comparación al desempeño obtenido con CHIRPS en donde sus valores fueron de -75,3 mm, 94,9 mm, 133 mm, 14,5%, 44,9% y 76,3% respectivamente.

Los resultados anteriores denotan la capacidad del método para ajustarse a los valores observados en las estaciones de medición, debido principalmente a la variación espacial de sus parámetros, ya que la región observada presenta heterogeneidad en su geografía, permitiendo mayor plasticidad en la predicción que métodos con parámetros espacialmente estáticos.

Otro resultado que salta a la vista es que el rendimiento tanto de CHIRPS como de GWR mejora a media que la escala temporal aumenta, esto se debe a que al aumentar la resolución temporal, los datos medidos tienden a presentar mayor variabilidad tanto espacial como temporalmente. Por ende, el rendimiento de los métodos tiende a ser mejor a nivel anual que a nivel medio mensual y este también es mejor que al predecir los valores mensuales.

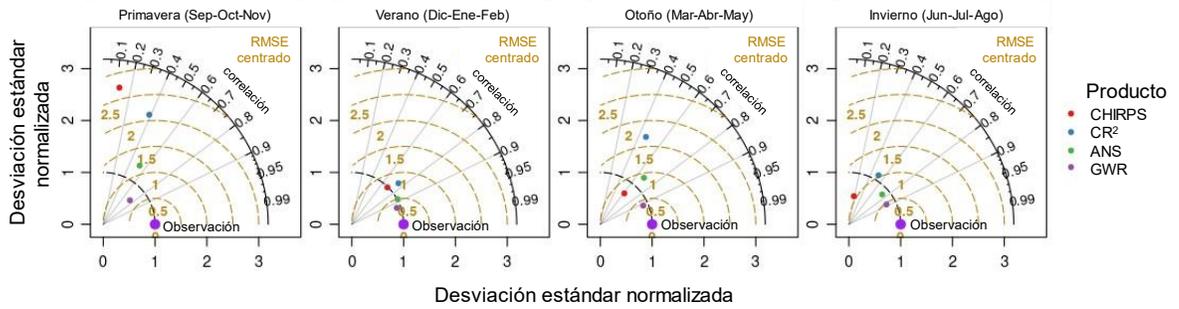


Figura 13. Diagrama de Taylor estacional al interior de Chile para el periodo 2001-2015

El diagrama presente en la Figura 13 da cuenta del buen rendimiento del método GWR, ya que es aquel que presenta menor desviación respecto a los valores observados, el que presenta mayores niveles de correlación y un RMSE más bajo. Es posible apreciar que tanto para la temporada de invierno como la de verano, los productos con mejor rendimiento en orden descendente son GWR, ANUSPLIN (ANS), CHIRPS y CR2MET (CR^2) respectivamente, en otoño, el producto CHIRPS para a quedar en segunda posición y CR2MET en cuarto puesto, mientras que, para primavera, CHIRPS queda en cuarto lugar, mientras que CR2MET queda en tercero. Cabe destacar que, para todas las estaciones del año, el método GWR presentó el mejor rendimiento de entre los 4 métodos comparados.

Cuadro 5. Comparación del método con otros productos disponibles

ESTADÍSTICOS	CHIRPS	CR ²	ANS	GWR
BIAS	5,4741	1,3113	0,6816	0,0204
MAE	8,5222	3,4669	2,5735	1,9469
RMSE	17,0134	19,8597	11,5483	6,9629
PRMSE	5,0%	5,8%	3,4%	2,0%
D	80,4%	78,9%	91,6%	96,7%
R ²	47,0%	46,1%	71,5%	88,0%

Tal como se puede apreciar en el Cuadro 5, el método planteado presenta el mejor rendimiento en comparación con los productos CHIRPS, CR2MET o ANUSPLIN, a una resolución espacial de 5 km y una resolución temporal mensual. Cabe destacar que para este análisis estadístico sólo se utilizaron estaciones de monitoreo que se encontraran al interior de Chile, además, el periodo utilizado para esto fue 2001-2015, debido a la disponibilidad del producto CR2MET de precipitación. Se consideró también estudiar la performance del método geoestadístico *Kriging*, sin embargo, se sabe que este método es utilizado en la misma confección del producto CHIRPS de precipitación, por lo que se corre el riesgo de sobreajuste y sobre estimar los indicadores estadísticos.

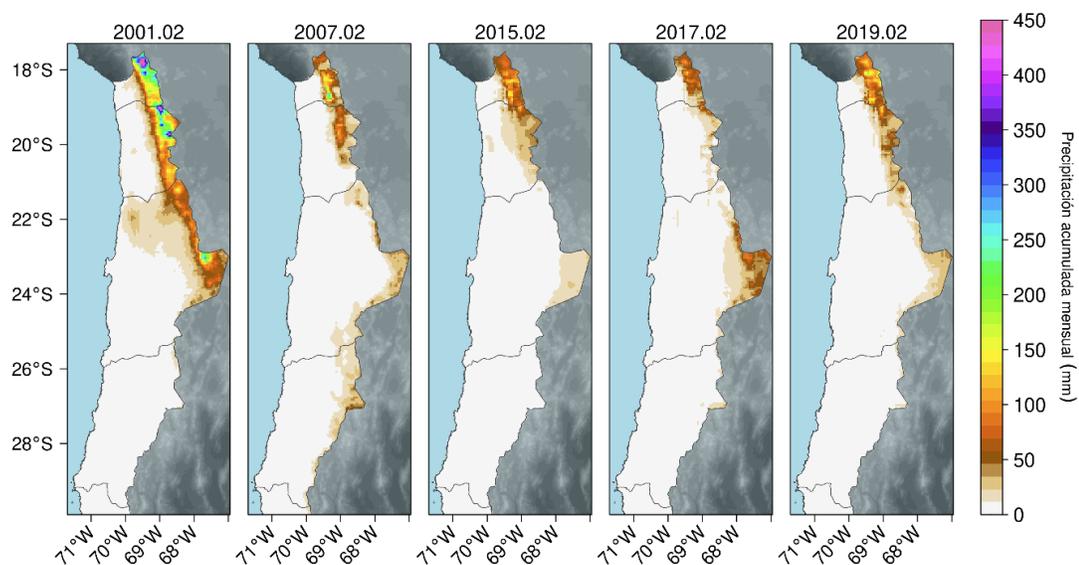


Figura 14. Distribución espacial de la precipitación estimada para febrero en años de altos montos en el área de estudio

La Figura 14 presenta la distribución espacial de la precipitación estimada por el método en baja resolución para el mes de febrero de los años 2001, 2007, 2015, 2017 y 2019. En esta figura se puede apreciar que los mayores montos de precipitación se distribuyen en la zona de alta cordillera, sobre todo en la región altiplánica, a diferencia de las imágenes entregadas por CHIRPS, que presentaban notorios artefactos en zonas medias y costeras. Esto último podría deberse posiblemente a una calibración con menor número de estaciones de monitoreo y la sensibilidad de sus sensores a humedad al nivel de superficie como podría ser el fenómeno de camanchaca. cabe destacar que la precipitación en latitudes más bajas se ve subrepresentada, ya que en estas zonas la precipitación se expresa con mayor intensidad entre los meses de julio y octubre, así mismo, los montos son notoriamente inferiores a las zonas altiplánicas, del orden de los 15 mm/mes.

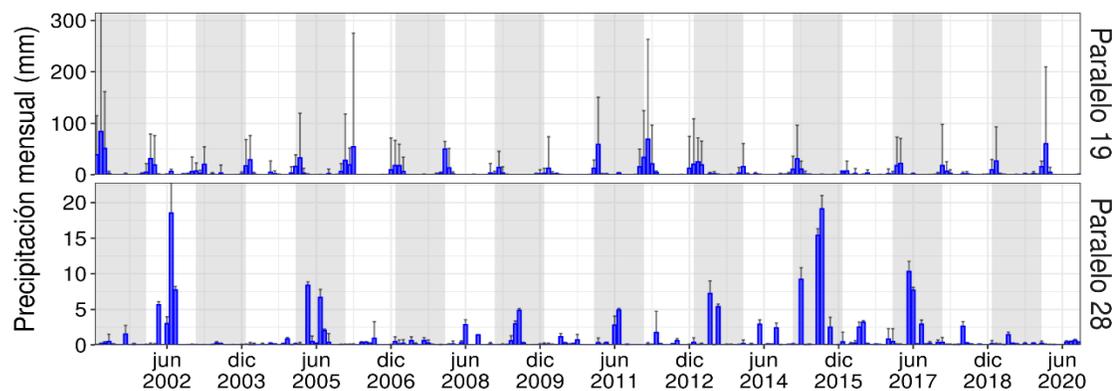


Figura 15. Distribución temporal de precipitación en los paralelos 19S y 28S

La Figura 15 representa el comportamiento temporal de los montos de precipitación presentes en el paralelo 19 y 28 sur. En esta es posible apreciar que los eventos ocurren en momentos distintos del año entre estos 2 paralelos, además los valores de precipitación observados concuerdan con lo descrito en el trabajo de Chávez et al. (2019).

Método espacialmente explícito de reducción de escala

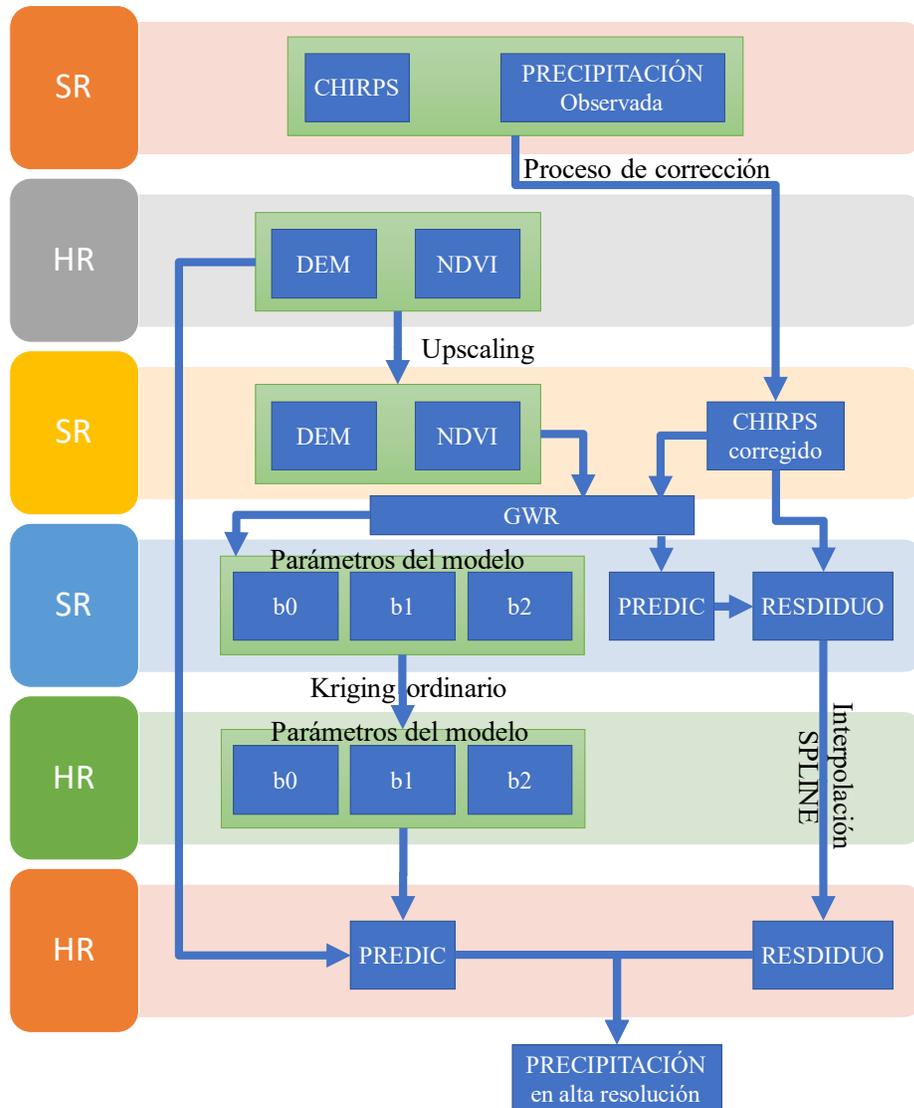


Figura 16. Resumen gráfico del método desarrollado por el estudio

La Figura 16, resume el diagrama de flujo del método desarrollado, debido a que es objetivo principal de la investigación y por lo tanto un resultado de ésta. En el diagrama, es posible apreciar cómo es que a partir de imágenes sin corregir de baja resolución espacial o

a la resolución del sensor (SR), se pueden obtener imágenes para el todo el área de estudio con un alta resolución (HR) corregidas a nivel local.

Si bien este método ha sido implementado para obtener imágenes HR con una resolución de 250 m a partir de imágenes SR de 5 km de resolución espacial, es posible aplicarla sobre resoluciones de distinto nivel, por ejemplo, de 5 km a 1 km o de 1 km a 250 m.

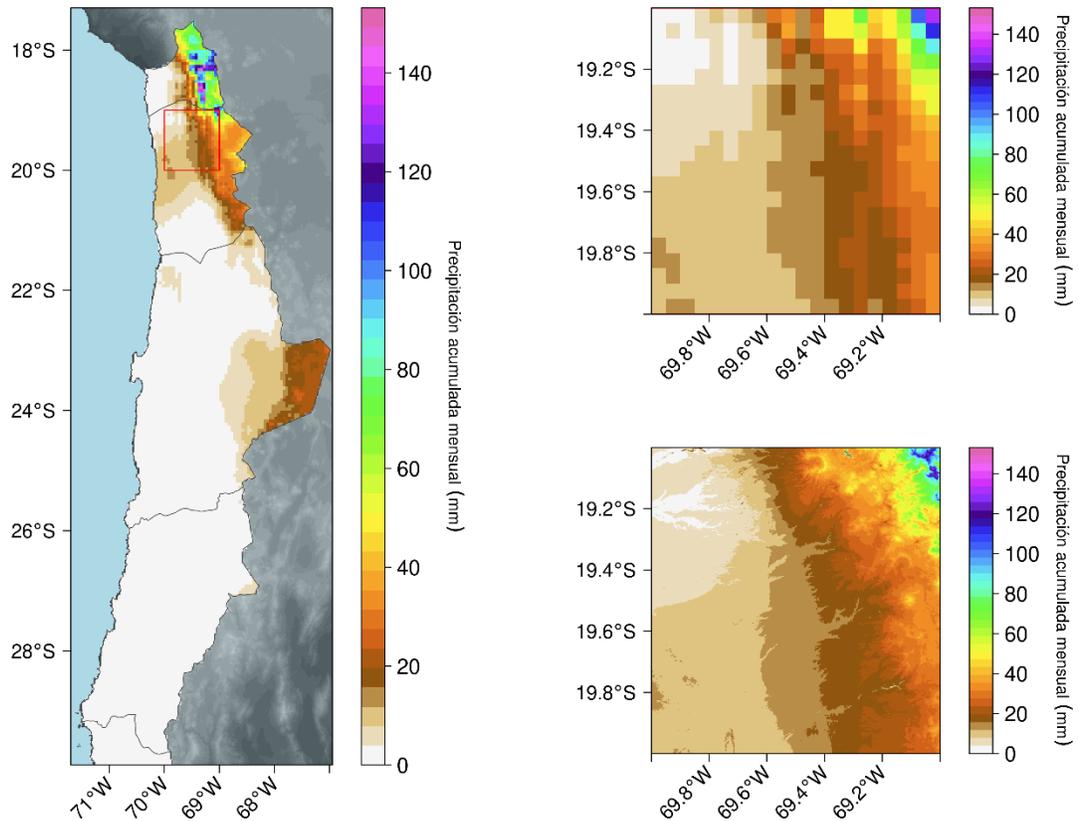


Figura 17. Ejemplo de *downscaling* estadístico aplicado al mes de enero de 2015

Es posible apreciar cómo es que mejora considerablemente la resolución espacial de la variable según lo presentado en la Figura 17, mantiene la distribución espacial e incorpora la variabilidad propia del terreno con un mejor nivel de detalle para toda la extensión. Esto es fundamental sobre todo en zonas del norte de Chile, en las cuales, es posible apreciar cambios orográficos abruptos en extensiones menores a los 2 kilómetros de distancia.

Dicho esto, la propuesta metodológica de reducción de escala que se plantea tiene la capacidad de capturar la compleja y espacialmente variable relación entre la precipitación, la elevación y el índice de vegetación NDVI, pudiendo cuantificar los montos de precipitación con una resolución espacial adecuada para un análisis hidrológico y

ecológicos avanzado, en regiones con una escasa presencia de datos observados y una baja densidad de estaciones de monitoreo.

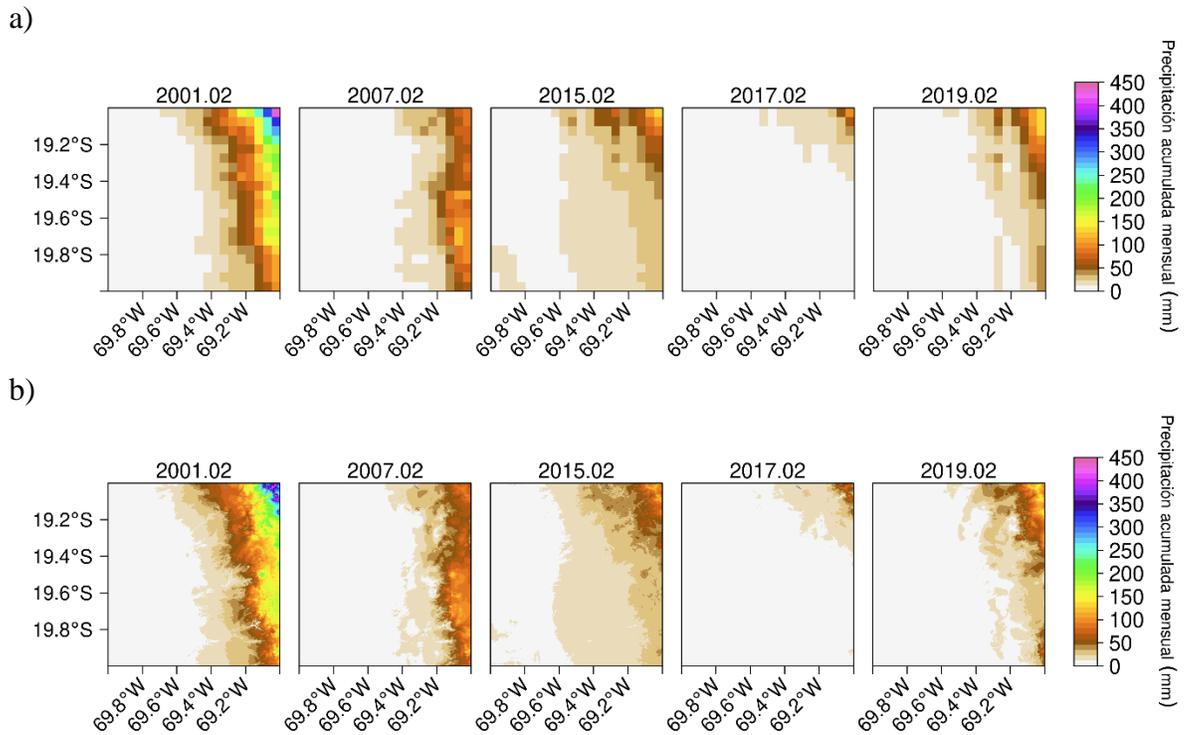


Figura 18. Resultados del *downscaling* para febrero en años con altos montos de precipitación

El nivel de detalle que se puede apreciar en la Figura 18, da cuenta de la resolución espacial que se alcanza una vez implementado el método sin perder la capacidad de representar la tendencia espacial que se observa en las imágenes de baja resolución, consiguiendo así que estos datos puedan ser utilizados a modo de insumo, no solo para la toma de decisiones respecto a la gestión territorial, sino que también, en estudios relacionados a la agricultura, ecología, hidrología, urbanismo y planificación.

CONCLUSIONES

Aunque se puede obtener información precisa sobre la precipitación a partir de información en terreno, es decir, mediciones de pluviómetros, generalmente hay pocos disponibles en el área de estudio, por ende, representar especialmente, la distribución espacial de las precipitaciones presenta un desafío considerable para esta región con pluviómetros escasos y un régimen climático de alta variabilidad. En principio, los satélites son instrumentos precisos y versátiles para evaluar la precipitación, pero su baja resolución espacial (que a menudo varían de 20 km a 5 km) no permite un uso directo sin realizar una reducción de escala adecuada.

Esta investigación desarrolló un enfoque simple y práctico para la estimación de la precipitación mensual con una resolución espacial de 250 m utilizando como base el producto satelital CHIRPS V02. El desarrollo e implementación del método fue exitoso, logrando estimar los montos de precipitación que afectan al desierto de atacama con un error espacial promedio de 9,7%. A pesar de que este método fue implementado en la zona norte de Chile, de igual forma está diseñado para funcionar en todo el mundo, dado a que se auto calibra según los datos de terreno. Tanto la base de datos corregida como el conjunto de imágenes de alta resolución, quedan disponible bajo demanda en repositorios locales para el acceso a estos.

Se lograron identificar las principales fuentes de incerteza del método, pudiendo mejorar incorporando una red más densa y consistente de estaciones de monitoreo. La capacidad predictiva del método fue alta por los elementos ya mencionados, mejorando a medida que la resolución temporal es menor. La principal ventaja de este método radica en su simplicidad. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta metodología se basa en numerosas suposiciones, y se debe tener precaución al manejar los resultados de la validación debido al volumen limitado de mediciones del terreno.

A partir de los hallazgos y resultados obtenidos en este estudio, existe evidencia suficiente para aceptar la hipótesis planteada, ya que fue posible conseguir una grilla mensual de datos de precipitación para el Desierto de Atacama a una resolución de 250 m con un nivel de error menor al 20% a partir de un método de regresión espacialmente explícitos, utilizando el conjunto de datos CHIRPS V2.0 e información meteorológica.

LITERATURA CITADA

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Alvial Vásquez, F.-J., Abarca-del-Río, R., & Ávila, A. I. (2020). High-Resolution Precipitation Gridded Dataset on the South-Central Zone (34° S–41° S) of Chile. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.519975>
- Attorre, F., Alfo', M., de Sanctis, M., Francesconi, F., & Bruno, F. (2007). Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale. *International Journal of Climatology*, 27(13), 1825–1843. <https://doi.org/10.1002/joc.1495>
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Benestad, R. E. (2010). Downscaling precipitation extremes. *Theoretical and Applied Climatology*, 100(1–2), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0158-1>
- Benestad, R. E., Hanssen-Bauer, I., & Førland, E. J. (2007). An evaluation of statistical models for downscaling precipitation and their ability to capture long-term trends. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(5), 649–665.
- Berry, W. D., & Feldman, S. (1985). *Multiple Regression in Practice. Quantitative Applications in the Social Sciences 50*. Sage Publications, Beverly Hills.
- Boisier, J. P., Álvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vasquez, N. A., & Rondanelli, R. (2018). *CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile*.
- Bozkurt, D., Rondanelli, R., Garreaud, R., & Arriagada, A. (2016). Impact of Warmer Eastern Tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama Floods. *Monthly Weather Review*, 144(11), 4441–4460. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0041.1>
- Brown, C., Greene, A. M., Block, P. J., & Giannini, A. (2008). *Review of downscaling methodologies for Africa climate applications*.
- Camagni, R. (2003). Incertidumbre, capital social y desarrollo local: enseñanzas para una gobernabilidad sostenible del territorio. *Investigaciones Regionales-Journal of Regional Research*, 2, 31–57.
- Carvajal, S. F. (2005). *Gestión de la Información y Toma de Decisiones en el Territorio 2005: Gestión de la Información y Toma de Decisiones en el Territorio 2005*.

- Chávez, R. O., Moreira-Muñoz, A., Galleguillos, M., Olea, M., Aguayo, J., Latín, A., Aguilera-Betti, I., Muñoz, A. A., & Manríquez, H. (2019). GIMMS NDVI time series reveal the extent, duration, and intensity of “blooming desert” events in the hyper-arid Atacama Desert, Northern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.013>
- Daly, C., Halbleib, M., Smith, J. I., Gibson, W. P., Doggett, M. K., Taylor, G. H., Curtis, J., & Pasteris, P. P. (2008). Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. *International Journal of Climatology*, 28(15), 2031–2064. <https://doi.org/10.1002/joc.1688>
- Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227–240. <https://doi.org/10.22206/cys.2012.v37i2.pp227-240>
- Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., & Huete, A. (2015). MODIS vegetation index user’s guide (MOD13 series). *University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab*.
- Dillon, M., & Hoffmann, A. E. (1997). Lomas formations of the Atacama Desert, northern Chile. In S.D. Davis, V.H. Heywood, O. Herrera-MacBryde, J. Villa-Lobos, and A.C. Hamilton, editors. *Centres of Plant Diversity: A guide and Strategy for their Conservation*. WWF, IUCN, Oxford, U.K. (pp. 528–535).
- Dirección Meteorológica de Chile (DMC). (2017). *Resumen Climático, Chile 2016*. Oficina de Cambio Climático.
- Draper, N., & Smith, H. (1981). Applied regression analysis. Series in probability and mathematical statistics. Wiley.
- Estévez Gualda, J. (2010). *Diseño de un sistema integrado para el control de calidad de datos de estaciones meteorológicas automáticas*.
- Estévez, J., & Gavilán, P. (2006). Quality control procedures in the Agroclimatic Information of Andalusia. *4th International Conference on Experiences with Automated Weather Stations*.
- Estévez, J., & Gavilán, P. (2008). Procedimientos de validación de datos de estaciones meteorológicas automáticas. aplicación a la red de información agroclimática de andalucía. *II Jornadas de Agrometeorología*.
- Estévez, J., Gavilán, P., & Giráldez, J. V. (2011). Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. *Journal of Hydrology*, 402(1–2), 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.031>
- Fernández García, F. (1996). Manual de climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación. Madrid, Editorial Síntesis.
- Florinsky, I. v. (1998). Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. *Progress in Physical Geography*, 22(1), 33–60.

- Fotheringham, A. S., Brunson, C., & Charlton, M. (2000). *Quantitative geography: perspectives on spatial data analysis*. Sage.
- Fotheringham, A. S., Charlton, M., & Brunson, C. (1997). Measuring Spatial Variations in Relationships with Geographically Weighted Regression. In P. D. M. M. Fischer & P. D. A. Getis (Eds.), *Recent Developments in Spatial Analysis* (pp. 60–82). Springer Berlin Heidelberg.
- Fotheringham, S., Brunson, C., & Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships* (Edición: N). John Wiley & Sons.
- Fuenzalida, H., Aceituno, P., Falvey, M., Garreaud, R. D., Rojas, M., & Sánchez, P. (2007). Study on Climate Variability for Chile During the 21st Century. Technical Report Prepared for the National Environmental Committee. In *Santiago de Chile*.
- Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, J. D., Romero, B. E., Husak, G. J., Michaelsen, J. C., & Verdin, A. P. (2014). A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. *US Geological Survey Data Series*, 832(4), 1–12.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Garreaud, R. (2011a). Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro-INIA*, 93, 14. <http://www.dgf.uchile.cl/rene>
- Garreaud, R. (2011b). The climate of northern Chile: Mean state, variability and trends. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 41.
- Guajardo-Panes, R. A., Granados-Ramírez, G. R., Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., & Barbosa-Moreno, F. (2017). Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(5), 157–177. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-11>
- Guerrero, P. C., Rosas, M., Arroyo, M. T. K., & Wiens, J. J. (2013). Evolutionary lag times and recent origin of the biota of an ancient desert (Atacama–Sechura). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(28), 11469–11474. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308721110>
- Guijarro, J. (2018). Homogeneización de series climáticas con Climatol. Versión 3.1. 1. *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), DT En Islas Baleares, España. Recuperado de Http://Www. Climatol. Eu/Homog_climatol-Es. Pdf.*
- Guijarro, J. A. (2016). *Automatización de la homogeneización de series climáticas: nuevas funciones del paquete Climatol 3.0.*

- Gutiérrez, J. R. (2008). El desierto florido en la Región de Atacama. *Libro Rojo de La Flora Nativa y de Los Sitios Prioritarios Para Su Conservación. Región de Atacama. La Serena: Ediciones Universidad de La Serena*, 285–291.
- Gutiérrez-Puebla, J., García-Palomares, J. C., & Daniel-Cardozo, O. (2012). Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) y estimación de la demanda de las estaciones del Metro de Madrid. *XV Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica*, 1–13.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978.
- Hsu, K., Gao, X., Sorooshian, S., & Gupta, H. v. (1997). Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology*, 36(9), 1176–1190.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., & Stocker, E. F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38–55.
- Hunter, R. D., & Meentemeyer, R. K. (2005). Climatologically aided mapping of daily precipitation and temperature. *Journal of Applied Meteorology*, 44(10), 1501–1510.
- Hunziker, S., Brönnimann, S., Calle, J., Moreno, I., Andrade, M., Ticona, L., Huerta, A., & Lavado-Casimiro, W. (2018). Effects of undetected data quality issues on climatological analyses. *Climate of the Past*, 14(1), 1–20. <https://doi.org/10.5194/cp-14-1-2018>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climatic Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). Calentamiento Global de 1.5°C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. In *Anexo 1: Glosario*. Cambridge University Press.

- Inzunza, J. (2003). Climas de Chile, Capítulo 15. In *Meteorología descriptiva y aplicaciones en Chile* (pp. 421–451). Universidad de Concepción. Departamento de Física de la Atmósfera y del Océano.
- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., & Xie, P. (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5(3), 487–503.
- Kawabata, A., Ichii, K., & Yamaguchi, Y. (2001). Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, 22(7), 1377–1382. <https://doi.org/10.1080/01431160010028490>
- Kuya, E. K., Gjeltén, H. M., & Tveito, O. E. (2022). Homogenization of Norwegian monthly precipitation series for the period 1961–2018. *Advances in Science and Research*, 19, 73–80. <https://doi.org/10.5194/asr-19-73-2022>
- Larridon, I., Walter, H. E., Guerrero, P. C., Duarte, M., Cisternas, M. A., Hernández, C. P., Bauters, K., Asselman, P., Goetghebeur, P., & Samain, M.-S. (2015). An integrative approach to understanding the evolution and diversity of *Copiapoa* (Cactaceae), a threatened endemic Chilean genus from the Atacama Desert. *American Journal of Botany*, 102(9), 1506–1520. <https://doi.org/10.3732/ajb.1500168>
- López Jiménez, V. L. (2014). Propuesta Metodológica para el Rediseño de una Red Meteorológica en un Sector de la Región Andina Colombiana. *Publicaciones e Investigación*, 8(1), 55. <https://doi.org/10.22490/25394088.1281>
- López Jiménez, V. L., Rojas Castro, M. A., & Pérez Prieto, K. G. (2019). Propuesta para el mejoramiento de la red agrometeorológica en el departamento de Cundinamarca. *Publicaciones e Investigación*, 13(1), 63–78. <https://doi.org/10.22490/25394088.3266>
- Luebert, F. (2011). Hacia una fitogeografía histórica del Desierto de Atacama. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50, 105–133. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022011000300007>
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*. Editorial Universitaria.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2017). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile* (Vol. 2). Santiago, Chile: Editorial Universitaria.
- Melgarejo, J., Romero, L., & Ojeda, I. (2019). *Aplicaciones Satelitales para la Meteorología* (5th ed., Vol. 198). APOLONIA XXI.
- Meseguer-Ruiz, O., Ponce-Philimon, P. I., Baltazar, A., Guijarro, J. A., Serrano-Notivoli, R., Olcina Cantos, J., Martín-Vide, J., & Sarricolea, P. (2020). Synoptic attributions of extreme precipitation in the Atacama Desert (Chile). *Climate Dynamics*, 55(11–12), 3431–3444. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05455-4>

- Meseguer-Ruiz, O., Ponce-Philimon, P. I., Guijarro, J. A., & Sarricolea, P. (2019). Spatial distribution and trends of different precipitation variability indices based on daily data in Northern Chile between 1966 and 2015. *International Journal of Climatology*, *39*(12), 4595–4610. <https://doi.org/10.1002/joc.6089>
- Minvielle, M., & Garreaud, R. D. (2011). Projecting Rainfall Changes over the South American Altiplano. *Journal of Climate*, *24*(17), 4577–4583. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00051.1>
- Montaner-Fernández, D., Morales-Salinas, L., Rodríguez, J. S., Cárdenas-Jirón, L., Huete, A., Fuentes-Jaque, G., Pérez-Martínez, W., & Cabezas, J. (2020). Spatio-Temporal variation of the urban heat island in Santiago, Chile during summers 2005–2017. *Remote Sensing*, *12*(20), 3345.
- Morales, L. (1997). *Evaluación y zonificación de riesgo de heladas mediante modelización topoclimática*. Universidad de Concepción.
- Morales, L., Canessa, F., Mattar, C., & Orrego, R. (2007). Comparison of stochastic and regression geostatistics interpolation methods for detection of microclimatic areas. In *5th International Symposium on Spatial Data Quality*.
- Morales, L., Canessa, F., Mattar, C., Orrego, R., & Matus, F. (2006). Caracterización y zonificación edáfica y climática de la Región de Coquimbo, Chile. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, *6*(3), 52–74.
- Morales, L., Parra, J. C., & Espinosa, J. (2010). Generation of continuous rasters of climatological variables using geographic weighted regression. *Proceeding Book 3rd Recent Advances in Quantitative Remote Sensing. Publicaciones Universidad de Valencia. España*.
- Mujica, M. I., Latorre, C., Maldonado, A., González-Silvestre, L., Pinto, R., de Pol-Holz, R., & Santoro, C. M. (2015). Late Quaternary climate change, relict populations and present-day refugia in the northern Atacama Desert: a case study from Quebrada La Higuera (18° S). *Journal of Biogeography*, *42*(1), 76–88. <https://doi.org/10.1111/jbi.12383>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. ONU.
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. *Contribución de Los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático*. IPCC, Ginebra, Suiza, 104.
- Pastor, J. A. G. (2015). Automatización de la homogeneización de series climáticas: nuevas funciones del paquete Climatol 3.0. *Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación Del Territorio*, 153–160.

- Pesquer, L., Masó, J., & Pons, X. (2007). Integración SIG de regresión multivariante, interpolación de residuos y validación para la generación de rásters continuos de variables meteorológicas. *Revista de Teledetección*, 28, 69–76.
- Roig, V. G. (1999). Atacama desert. In M. A. Mares (Ed.), *Encyclopedia of deserts* (p. 54). University of Oklahoma Press, Norman.
- Romero, H., Mendonça, M., Méndez, M., & Smith, P. (2011). Multiescalaridade, relações espaciais e desafios ecológico-sociais da climatologia sulamericana. O caso do Deserto de Atacama. *Revista Brasileira de Climatologia*, 8. <https://doi.org/10.5380/abclima.v8i0.25785>
- Sánchez-Cohen, I., & Chebhouni, G. (Eds.). (2007). *Procesos hidrológicos en zonas áridas y semiáridas. De la investigación a la acción* (Libro Científico 3). INIFAP-CENID RASPA, IRD, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.
- Santibáñez, F., Santibáñez, P., & González, P. (2016). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. La transición hacia la gestión del agua en los nuevos escenarios climáticos de Chile. Informe final. Consultoría Odepa. In *Santiago, ODEPA*.
- Sarricolea, P., & Romero, H. (2015). *Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile 1*. 183, 169–183.
- Schulz, N., Boisier, J. P., & Aceituno, P. (2012). Climate change along the arid coast of northern Chile. *International Journal of Climatology*, 32(12), 1803–1814.
- Skirvin, S. M., Marsh, S. E., McClaran, M. P., & Meko, D. M. (2003). Climate spatial variability and data resolution in a semi-arid watershed, south-eastern Arizona. *Journal of Arid Environments*, 54(4), 667–686.
- Tian, Y., Peters-Lidard, C. D., Eylander, J. B., Joyce, R. J., Huffman, G. J., Adler, R. F., Hsu, K., Turk, F. J., Garcia, M., & Zeng, J. (2009). Component analysis of errors in satellite-based precipitation estimates. *Journal of Geophysical Research*, 114(D24), D24101. <https://doi.org/10.1029/2009JD011949>
- Toté, C., Patricio, D., Boogaard, H., van der Wijngaart, R., Tarnavsky, E., & Funk, C. (2015). Evaluation of Satellite Rainfall Estimates for Drought and Flood Monitoring in Mozambique. *Remote Sensing*, 7(2), 1758–1776. <https://doi.org/10.3390/rs70201758>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Urrutia, R., & Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the

21st century. *Journal of Geophysical Research*, 114(D2), D02108. <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>

Wan, Z. (2008). New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 112(1), 59–74.

Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., & Ribbe, L. (2017). Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 1295–1320. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1295-2017>

FUENTE DE FINANCIAMIENTO

Nombre Proyecto: *Two biodiversity hotspots at a crossroad: conservation biogeography of a South American “Rand Biota”*

Código: 1180211

Director proyecto: Andrés Moreira Muñoz

Fuente de financiamiento: FONDECYT