

La economía del
**cambio
climático**
en Bolivia

Generación de datos
meteorológicos de alta
resolución para Bolivia

La economía del cambio climático en Bolivia

Generación de datos meteorológicos de alta resolución para Bolivia

Autor: Marcos F. Andrade

Editores: Carlos E. Ludeña y Leonardo Sánchez Aragón



NACIONES UNIDAS

CEPAL



**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Andrade, Marcos F.

La economía del cambio climático en Bolivia: generación de datos meteorológicos de alta resolución para Bolivia / Marcos F. Andrade; Carlos E. Ludeña, Leonardo Sánchez Aragón, editores.

p. cm. – (Monografía del BID; 200)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Environmental economics—Bolivia. I. Ludeña, Carlos E., editor. II. Sánchez Aragón, Leonardo, editor. III. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático y Sostenibilidad. IV. Título. V. Serie IDB-MG-200

Palabras clave: Cambio Climático, Meteorología, Modelos Climáticos, Bolivia

Clasificación JEL: Q54, O54.

Este documento complementa los análisis sectoriales que conforman la serie “La economía del cambio climático en Bolivia” del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el marco del Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático (ERECC) en América Latina y el Caribe, coordinado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y con el apoyo de UKAID del gobierno Británico.

Esta serie fue coordinada por Carlos Ludeña y Alfred Grunwaldt en colaboración con Leonardo Sánchez-Aragón y Prem Jai Vidaurre (BID).

El presente documento fue preparado por Marcos F. Andrade, con los comentarios de Alfred Grunwaldt (BID).

Citar como:

Andrade, M.F. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: generación de datos meteorológicos de alta resolución para Bolivia*. C.E. Ludeña, L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 200, Washington, DC.

Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Se prohíbe el uso comercial no autorizado de los documentos del Banco, y tal podría castigarse de conformidad con las políticas del Banco y/o las legislaciones aplicables.

Copyright ©2014 Banco Interamericano de Desarrollo. Todos los derechos reservados; este documento puede reproducirse libremente para fines no comerciales.

1. Introducción.....	1
2. Datos.....	2
2.1 Reanálisis: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)	2
2.2 Datos satelitales de precipitación: Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)	3
2.3 Datos observacionales de superficie	3
3. Metodología	4
3.1 Datos observacionales	4
3.2 Precipitación	6
3.3 Temperaturas mínima y máxima.....	19
4. Climatologías	23
4.1 Temperatura.....	23
4.2 Precipitación.....	23
5. Análisis de tendencias y periodos para el caso de la precipitación	25
5.1 Análisis de tendencias	25
5.2 Estudio del periodo de lluvias.....	29
6. Análisis de los datos en las cuencas de interés	35
7. Discusión y conclusiones	39
8. Referencias bibliográficas	42
ANEXO 1. Estaciones con información de precipitación, temperatura mínima y máxima (porcentaje).	43

Resumen

Datos meteorológicos como temperatura y precipitación son escasos en Bolivia. La gran extensión del territorio, el fuerte gradiente altitudinal, así como restricciones técnicas han impedido contar con observaciones de superficie de largo plazo y con la densidad adecuada. Este estudio utiliza datos de satélite y del re-análisis, combinados con datos de observaciones en superficie, para generar datos en rejilla de temperatura y precipitación para toda Bolivia, con especial énfasis en las cuencas de las zonas metropolitanas de La Paz y El Alto.

Estos datos son validados comparándolos con datos de superficie, que típicamente son datos “puntuales”. Los datos obtenidos cubren el periodo 1979-2010 y fueron ajustados a nivel mensual porque a ese nivel temporal los datos muestran la mayor coherencia espacial y temporal.

El análisis de los datos en rejilla, como los datos observacionales, sugiere que el periodo de lluvias en la región se ha acortado y que la intensidad de las precipitaciones se ha incrementado en los últimos 30 años.

Los datos también indican que en la región del Altiplano sur la precipitación se ha reducido de manera notable. Es importante recalcar que posiblemente los datos en rejilla no reproduzcan los eventos más extremos observados.

La economía del cambio climático en Bolivia

Generación de datos meteorológicos de alta resolución para Bolivia

1. Introducción

Datos meteorológicos como temperatura y precipitación son relativamente escasos en Bolivia. La gran extensión del territorio boliviano, el fuerte gradiente altitudinal (con las características del clima de microescala asociadas a este hecho), así como restricciones técnicas han impedido hasta ahora contar con observaciones de superficie de largo plazo y con la densidad adecuada para diversos estudios relacionados con el clima del país.

A la fecha existen distintas fuentes de datos meteorológicos, desde las tradicionales observaciones obtenidas con estaciones meteorológicas convencionales de superficie, datos interpolados a partir de estas observaciones de superficie a través de elaborados procesos estadísticos, pasando por datos obtenidos por instrumentos a bordo de satélites de observación de parámetros atmosféricos hasta datos obtenidos, combinando información observacional (incluyendo datos de distintas fuentes) con modelos numéricos del sistema atmosférico. Todos estos datos, sin embargo, tienen ventajas y desventajas: los instrumentos de superficie, por ejemplo, permiten obtener los datos con alta precisión en un lugar puntual, mientras que los datos satelitales entregan información con gran cobertura espacial pero no necesariamente con la precisión o exactitud requerida (estos datos se obtienen generalmente a través de algoritmos de inversión y por tanto no son medidas directas).

El presente estudio pretende utilizar datos de satélite y del re-análisis, combinados con datos de observaciones en superficie, para generar datos en rejilla de temperatura y precipitación para toda Bolivia, con especial énfasis en el área de interés del “Proyecto Multipropósito de Recursos Hídricos para el área Metropolitana de La Paz y El Alto”. Los datos generados con esta información tienen una resolución espacial de 25 km y una resolución temporal a nivel diario. Más adelante se explican las razones para usar estas resoluciones.

El set de datos de temperatura y precipitación producido es coherente e internamente consistente a una resolución espacial de $0,25^{\circ}$ lat x $0,25^{\circ}$ lon y a la mejor resolución temporal posible. La validación y posibles correcciones se hacen, sin embargo, a nivel diario. Los datos son producidos para un área que cubre por lo menos todas las cuencas de las zonas metropolitanas de La Paz y El Alto, incluyendo las siguientes microcuencas: Khara Khota, Taipychaca (Khullu Cachi), Janchalani, Jacha Waquiwiña, Chojña Jipiña, Condoriri, Tuni, Huayna Potosi, y las cuencas de Milluni: Chacaltaya y Choqueyapu, Incachaca y Hampaturi.

El presente documento está organizado del siguiente modo: En el inciso 2 se explican los datos usados para este trabajo, en el inciso 3 el método usado para producir los datos deseados, y la bondad de los datos generados, el inciso 4 detalla las climatologías, el 5 las tendencias obtenidas a partir de los datos generados, en el inciso 6 se discuten los resultados aplicados a la cuenca de interés y finalmente en el inciso 7 se discuten las conclusiones y limitaciones del set de datos producidos en este estudio.

2. Datos

2.1 Reanálisis: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)

Desde 1996 se han puesto a disposición de la comunidad científica “datos” del denominado *reanálisis* (Kalnay et al., 1996 y Kistler et al., 2001). El propósito general de este proyecto fue el de producir representaciones globales multianuales de última generación de estados de la atmósfera. Estas representaciones son generadas por un modelo “congelado” (que no cambia en el tiempo) y un sistema de asimilación de datos también constante. El uso de un modelo constante tiene por objetivo el de eliminar tendencias espurias producto de cambios en los modelos y/o en los sistemas de asimilación de datos (Saha et al., 2010).

Los datos del reanálisis son una combinación de datos observacionales de diferente procedencia (satelitales, radiosondas, boyas, etc.) con un modelo numérico del tiempo a través de una técnica denominada *asimilación de datos*. Como se mencionó previamente, este modelo se mantiene “congelado” para el periodo de análisis para evitar sesgos artificiales que podrían aparecer por solo modificar el modelo (como pasaba con los modelos operacionales). Una característica interesante de este set de datos es que el método proporciona un conjunto grande de parámetros atmosféricos, y, más importante, coherentes entre sí. Los primeros datos del reanálisis, sin embargo, aunque tenían una buena resolución temporal (seis horas) tenían una resolución espacial pobre (2,5° lat x 2,5° lon) que para muchos fines prácticos no eran suficientes.

En los últimos años se ha producido una segunda generación de datos del reanálisis en la que se ha logrado mejorar la física del modelo meteorológico usado y su resolución espacial, así como la resolución temporal. En particular, en el presente estudio se usan datos provenientes del NCEP Climate Forecast System Reanalysis, CFSR (Saha et al., 2010). Esta nueva generación de reanálisis incluye mejoras sustanciales como el acoplamiento entre la atmósfera y el océano para la generación del campo inicial (*first guess*), un modelo océano-hielo interactivo y asimilación de radiancias provenientes de instrumentos a bordo de satélites a través de un esquema avanzado de interpolación.

La resolución horizontal del modelo atmosférico usado por CFSR es del orden de 38 km con 64 niveles verticales que se extienden hasta 0,26 hPa (es decir, abarca prácticamente toda la atmósfera). Por otro lado, el modelo oceánico tiene una resolución horizontal de 0,25° cerca al ecuador y alrededor de 0,5° en las regiones extratropicales y 40 capas verticales hasta una profundidad de 4.737 m. El modelo global de superficie tiene cuatro niveles de suelo y el modelo de océano-hielo tres niveles. Adicionalmente, el modelo atmosférico tiene en cuenta observaciones de la concentración de CO₂ así como de otros gases de efecto invernadero en el periodo de análisis. Así mismo toma en cuenta la concentración de aerosoles (partículas en suspensión como polvo, hollín, etc.) presentes en la atmósfera.

Todas las observaciones convencionales y satelitales disponibles fueron incluidas en este producto de reanálisis (ver <http://rda.ucar.edu/pub/cfsr.html> o Saha et al., 2010 para mayores detalles). Las observaciones satelitales se usaron en forma de radiancias, es decir antes de que se apliquen algoritmos de recuperación (*retrievals*) de información a fin de reducir incertidumbres en el proceso. Sesgos y errores de tipo sistemático fueron corregidos antes de usar estas radiancias en el proceso de asimilación de datos. También se usaron mecanismos dirigidos a permitir una transición suave cuando existieron cambios en el sistema de observación de satélites (por mejoras, introducción o salida de ciertos satélites, etc.)

Los parámetros usados, disponibles en los archivos de datos, fueron la tasa de precipitación en superficie y las temperaturas máximas y mínimas a 2 m de altura. Estos datos se hallan a una resolución temporal de 6 h pero fueron agregados a nivel diario para fines de comparación con los datos observacionales.

2.2 Datos satelitales de precipitación: Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

Un set de datos ampliamente usado en el área de ciencias de la atmósfera es el producido por las misiones TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) a través de radares e instrumentos que trabajan en el rango de las microondas a bordo de satélites desde el año 1998. Estos datos, como prácticamente todos los producidos por instrumentos satelitales, deben ser contrastados con información de superficie para poder proporcionar información correcta.

Uno de los productos basados en datos de TRMM es el denominado “TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis” (TMPA) que proporciona la estimación de precipitación a nivel cuasiglobal (50N-50S) a una resolución espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Datos acumulados cada tres horas son producidos en este caso. Este producto consiste en la tasa de precipitación horaria en superficie. El método utilizado permite combinar una estimación de precipitación de cuatro sensores pasivos de microondas (2A-12, SSMI, AMSR y AMSU) que se denomina HQ. Estos sensores se encuentran a bordo de diferentes satélites y se hallan calibrados por el radar de precipitación de TRMM (Scheel et al., 2011). Estimaciones de precipitación obtenidas de sensores infrarrojos (IR) a bordo de satélites geoestacionarios también son usadas calibrando la “temperatura de brillo” (*brightness temperature*) con las estimaciones obtenidas de HQ. Una característica importante de este set de datos es que está calibrado y combinado con información de estaciones de tierra a una resolución temporal mensual y después temporalmente reescalado a intervalos de tres horas (Huffman et al., 2007).

Aunque la resolución temporal más alta es de tres horas, en el presente trabajo se decidió usar valores diarios calculados a partir de estos datos, que fueron obtenidos de <http://mirador.gsfc.nasa.gov>. En principio se usó la versión 6 de los datos TMPA. Existen muchos trabajos publicados con esta versión de datos, que permiten comparar y explicar los resultados obtenidos (por ejemplo, Buarque et al., 2011). En Junio del 2012 la versión siete fue puesta a disposición del público por la NASA y por tanto se utilizó esta versión para crear la versión final de los datos de precipitación.

2.3 Datos observacionales de superficie

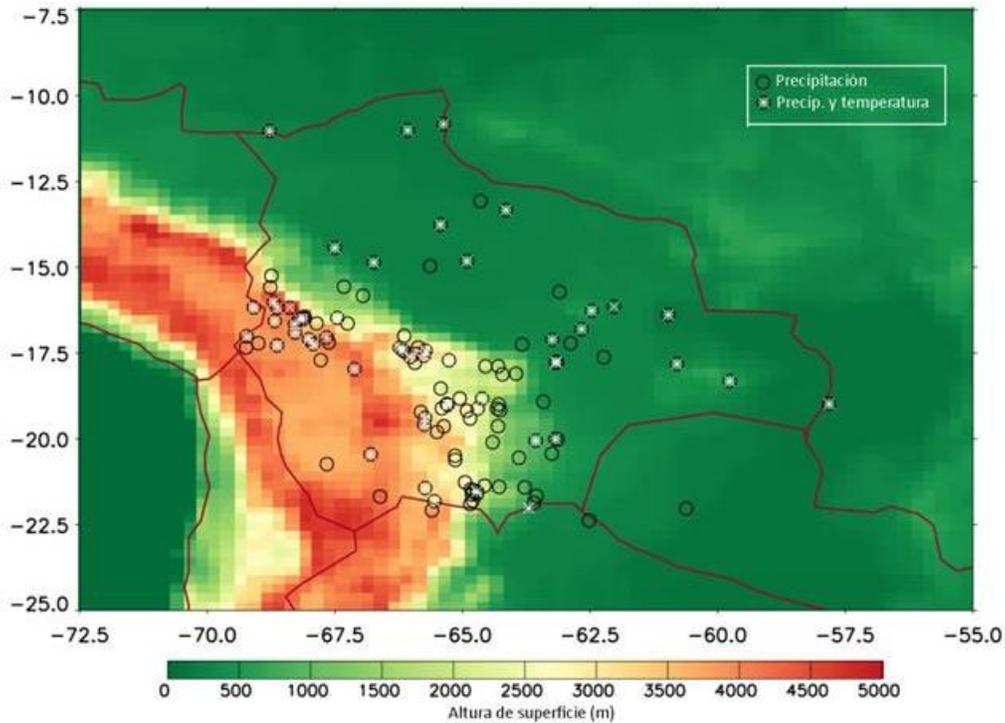
Los datos de estaciones de superficie, tanto de precipitación como de temperatura mínima y máxima, fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia. Esta información está disponible a nivel diario en <http://www.senamhi.gob.bo/sismet/>. La información meteorológica se obtiene tanto en estaciones meteorológicas convencionales, donde observadores la colectan manualmente, como en estaciones automáticas, donde la información es colectada de forma automática en *data loggers*. Los parámetros colectados típicamente son: precipitación, temperatura del aire (mínima y máxima diaria), velocidad y dirección del viento, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica y nubosidad. No todas las estaciones miden todos estos parámetros, pues depende del tipo de estación y, naturalmente, de la condición de los sensores de la estación meteorológica.

Los datos colectados en las estaciones meteorológicas son recepcionados en las oficinas regionales de SENAMHI e introducidos en una base datos. A la fecha el SENAMHI usa el Sistema de Procesamiento de Datos Meteorológicos (SisMet) desarrollado por la institución. Es importante remarcar que la información introducida en la base de datos es solamente revisada por errores básicos de transcripción pero no ha sido, hasta la fecha, sistemáticamente homogeneizada ni analizada en la consistencia de la información colectada (aunque ha habido esfuerzos aislados de realizar este tipo de procesos).

Los datos usados en el presente trabajo se eligieron a partir del criterio de completitud de los mismos. En este caso se eligieron estaciones con más de 90% de datos diarios (no necesariamente continuos) entre 1979 y 2010. Bajo este criterio se usaron, en primera instancia, 123 estaciones de toda Bolivia (no solamente de la región de interés) para precipitación diaria, 56 para el caso de la temperatura mínima y 56 para el caso

de la temperatura máxima. La localización de las estaciones se muestra en la figura 1 y la lista de las mismas en el anexo 1. Dado que los datos guardados en SisMet no pasaron controles de consistencia, es posible encontrar en ellos “saltos” irregulares debido a cambios de lugar y/o instrumentos, errores de funcionamiento de los sensores, etc. Por esta razón se decidió revisar los datos estación por estación de forma gráfica (ver sección de metodología). Luego de dicha revisión se decidió usar 119 estaciones para precipitación, 45 para la temperatura mínima y 50 en el caso de temperatura máxima.

Figura 1. Localización de las estaciones de superficie usadas en el estudio.



Nota: Los círculos blancos indican estaciones con datos de precipitación solamente, mientras que círculos con asteriscos dentro muestran estaciones con datos de precipitación y temperatura.

3. Metodología

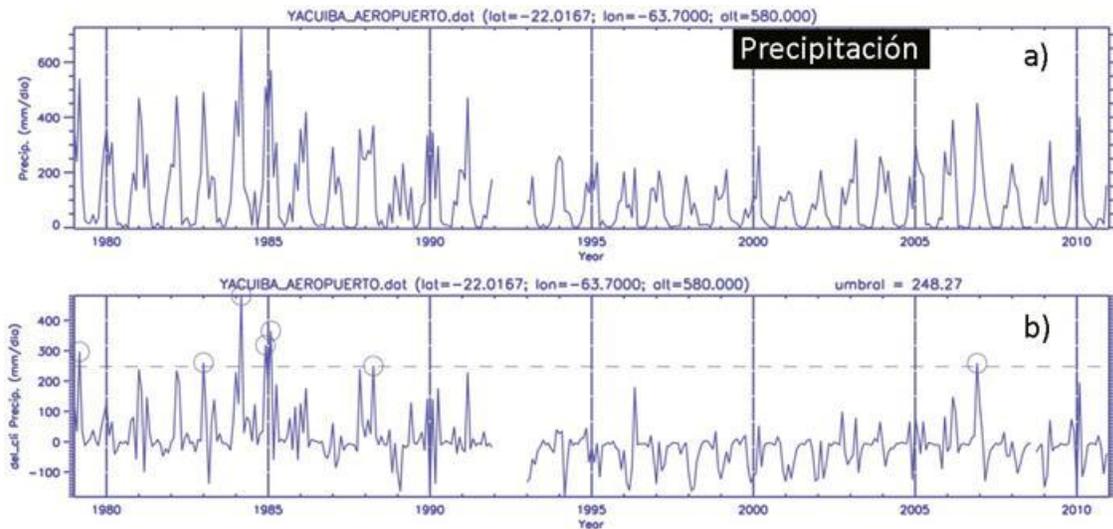
3.1 Datos observacionales

Como se mencionó anteriormente, se seleccionaron observaciones reportadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia, disponibles en su portal *web*. El criterio usado para elegir las fue la completitud del registro entre 1979 y 2010. Se decidió usar aquellas estaciones que tuvieran registros diarios con más de 90% de datos en el mencionado periodo. Lo ideal para la posterior selección de buenas series temporales de datos debería estar relacionada con homogeneización de los datos y búsqueda de puntos de quiebre en los mismos. Esto, sin embargo, requiere un estudio mucho más profundo y exhaustivo fuera del alcance de la presente consultoría. Por ese motivo se decidió hacer un análisis simple de la

información preseleccionada. Para ello se graficaron los valores promedio mensual tanto de precipitación como temperatura, sus anomalías (desviaciones respecto del valor “climatológico”) y posibles *outliers*.

La figura 2 muestra, como ejemplo, el caso de precipitación para la estación situada en el aeropuerto de Yacuiba. Como puede observarse, en ella hay un periodo sin datos, entre 1992 y 1993, después del cual los datos muestran un comportamiento claramente diferente al periodo previo. Esto induce a pensar en un cambio de instrumento y/o lugar del mismo. Por esta razón se decidió no usar estos datos en el análisis.

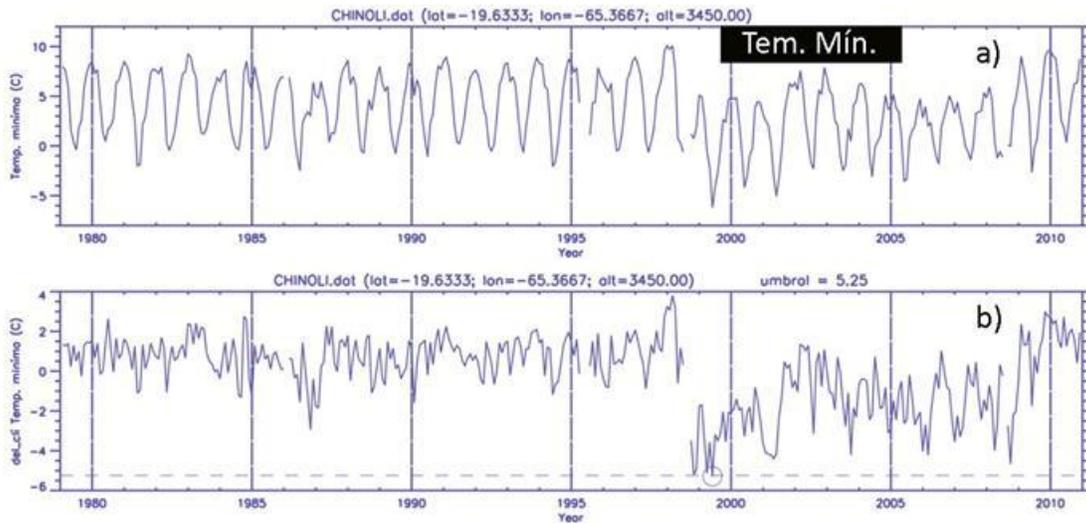
Figura. 2 Datos de precipitación acumulada mensual, 1979-2010.



La figura 2 muestra los datos para la estación ubicada en el aeropuerto de Yacuiba Yacuiba (22,0167°S, 63,7000°O; 580 msnm). El panel (a) muestra los datos acumulados mensualmente y, el (b) anomalías (diferencia entre cada dato mensual y el correspondiente valor climatológico). El caso de la temperatura es relativamente más fácil de analizar pues saltos anómalos son más simples de detectar. Por ejemplo, la figura 3 muestra valores mensuales promedio de la temperatura mínima así como sus correspondientes anomalías para el periodo de interés para la estación localizada en Chinoli.

En este caso hay un periodo relativamente corto sin datos en 1998. Una vez más se observa (figura 3a) un “salto” en el comportamiento de los datos. La figura 3b muestra claramente este hecho, pues las anomalías sufren un cambio brusco de aproximadamente 4-5°C. Esto sugiere un comportamiento irreal de los datos por lo que se decidió descartar esta estación. Esto se ve reforzado por otro salto observado en los datos después de otro corto periodo sin datos el año 2008. Después de esa fecha los datos muestran valores similares a los observados previos al corte de 1998.

Figura. 3 Temperaturas mínimas, promedio mensual, 1979-2010.



La figura 3 muestra los datos para la estación ubicada en Chinoli ($19,6333^{\circ}\text{S}$, $65,3667^{\circ}\text{O}$; 3.450 msnm). El panel (a) muestra los datos correspondientes al promedio mensual y, el (b) anomalías (diferencia entre cada dato mensual y el correspondiente valor climatológico). A través de inspección visual se eliminaron cuatro estaciones con datos de precipitación, 11 con datos de temperatura mínima y seis estaciones con datos de temperatura máxima. El anexo 1 muestra la lista de estaciones usadas en este trabajo para cada una de las tres variables usadas para el análisis: precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima.

3.2 Precipitación

A fin de producir datos a nivel diario y con resolución horizontal de 25 km se usaron datos de la nueva generación del reanálisis (ver inciso 2), datos derivados en instrumentos a bordo de satélites y datos de superficie. Los pasos seguidos fueron:

Creación de datos de CFSR a nivel diario.

Para ello se usaron los datos generados para periodos de seis horas (00, 06, 12, 18 Z) para generar datos acumulados de precipitación y valores mínimos y máximos de precipitación.

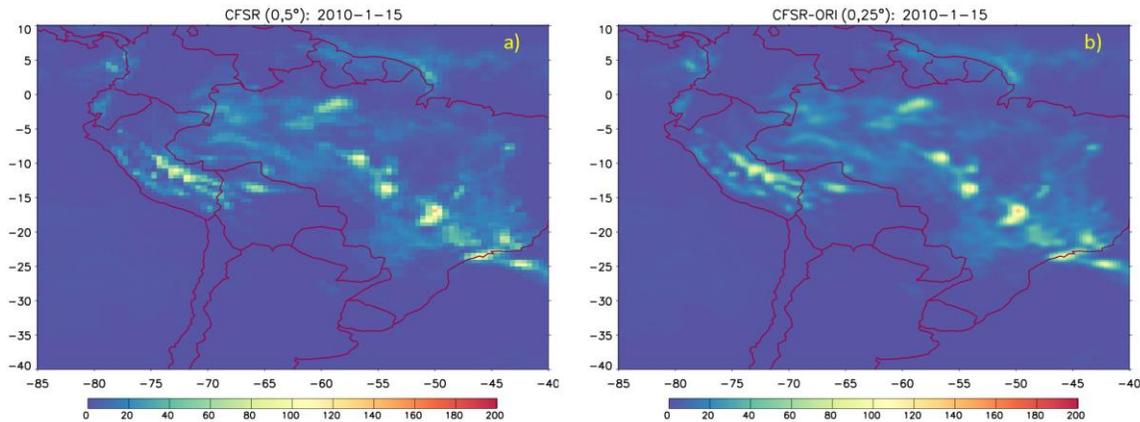
Interpolación de los datos de CFSR a 0,25° de resolución.

Los datos diarios calculados en 3.1 fueron interpolados a través una interpolación cúbica (cubic spline) para obtener un campo sin saltos bruscos, principalmente en el caso de la precipitación. El producto obtenido quedó a una resolución de $0,25^{\circ}$ tanto de latitud como de longitud. Se tuvo especial cuidado de eliminar datos espurios (i.e. valores negativos de precipitación) producto de la interpolación. La figura 4 muestra tanto los datos originales como los datos interpolados. Como puede apreciarse, los datos son consistentes, por lo que a partir de este paso se usarán los datos a una resolución horizontal de $0,25^{\circ}$. Este set de datos se denomina CFSR-ORI (ver tabla 1).

Tabla 1. Nombres y descripción de los set de datos usados y generados en el presente estudio.

Set de datos	Descripción
TRMM	Datos satelitales de precipitación (Tropical Rainfall Measuring Mission)
CFSR-ORI	Datos originales del reanálisis CFSR interpolados a 25 km
CFSR-MOD	Datos CFSR-ORI ajustados por la ec. (1)
CFSR-FIN	Datos CFSR-MOD ajustados por las ecuaciones (7) y (8). Estos son los datos finales usados en análisis posteriores.

Figura 4. Ejemplo de datos de precipitación obtenidos del reanálisis CFSR para el 1º de enero de 2010



Nota: El panel (a) muestra los datos originales a 0,5º de resolución horizontal; y el (b) datos interpolados a 0,25º de resolución horizontal.

Búsqueda de una relación estadística entre datos de CFSR y TRMM.

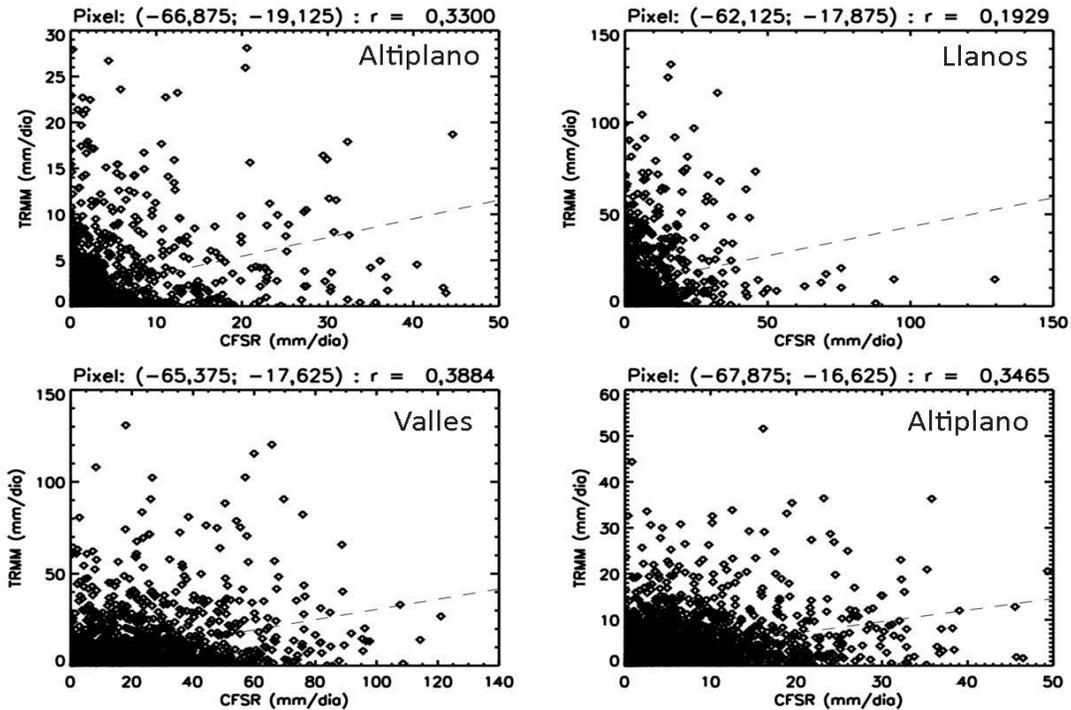
Dado que el record de precipitación obtenido de TRMM comienza en 1998 y se requiere la serie temporal más larga posible, se decidió buscar una relación de tipo estadístico entre estos set de datos. En primera instancia se exploró, pixel por pixel, la correlación lineal entre estos set de datos a nivel diario. La figura 5 muestra ejemplos de estas correlaciones para las series temporales de cuatro pixeles dentro del territorio boliviano centrados en las siguientes coordenadas (Tabla 2):

Tabla 2. Coordenadas de los pixeles usados de ejemplo en las figuras 5 y 6.

Longitud	Latitud	Observaciones
-67,875	-16,625	Altiplano
-66,875	-19,125	Altiplano
-65,375	-17,625	Valles
-62,125	-17,875	Llanos

Los pixeles tienen un tamaño de 0,25º x 0,25º en latitud y longitud respectivamente.

Figura 5. Relación entre datos diarios de CFSR (interpolados a 25 km de resolución horizontal) y TRMM.



La línea punteada muestra una curva de ajuste lineal entre los datos. Las coordenadas del punto central de cada pixel para los que se grafican los datos se encuentran en la parte superior de cada gráfico, así como la correlación entre ellos. Cada cuadro indica la región a la que pertenece el pixel en cuestión.

Como puede observarse en la figura 5, las correlaciones encontradas para datos diarios son relativamente bajas (del orden de 0,3). En la figura 7a se grafican en un mapa las correlaciones para la región, que incluye toda Bolivia. Aunque las correlaciones llegan hasta el orden de 0,5, en algunas regiones de Bolivia, una gran parte del territorio muestra correlaciones del orden de 0,1 que, aunque pueden llegar a ser estadísticamente significativas, no son suficientes para poder establecer una relación estadística sólida entre datos del reanálisis y TRMM. Por este motivo se decidió explorar la correlación entre estos conjuntos de datos a nivel mensual.

En este caso (figura 6), las correlaciones son mucho más altas y los datos muestran un comportamiento lineal mucho más fuerte que cuando los datos a nivel diario son considerados. La figura 7b muestra el mapa de correlaciones para datos mensuales. En este caso, la mayor parte de los pixeles exhibe una correlación cercana a 0,8. La razón para esta diferencia entre datos a nivel diario y mensual puede estar relacionada con la forma en que los datos de TRMM son calibrados con datos de superficie. En este caso se usan datos del Global Precipitation Climatology Centre a 1º de resolución horizontal a nivel mensual hasta marzo de 2005 y datos del Climate Assessment and Monitoring System a 0,5º de resolución horizontal también a nivel mensual desde abril 2005 (Scheel et al., 2011). Esos datos son usados a través de algoritmos que utilizan histogramas a nivel mensual para hacer la calibración de los datos satelitales (Scheel et al., 2011). Dado que los datos no son calibrados a nivel diario, parece lógico que las mejores correlaciones se obtengan a nivel mensual y que los valores diarios (y aquellos a 3 horas de resolución temporal) no necesariamente reproduzcan de buena manera los datos diarios (u horarios).

Figura 6. Relación entre datos mensuales de CFSR (interpolados a 25 km de resolución horizontal) y TRMM.

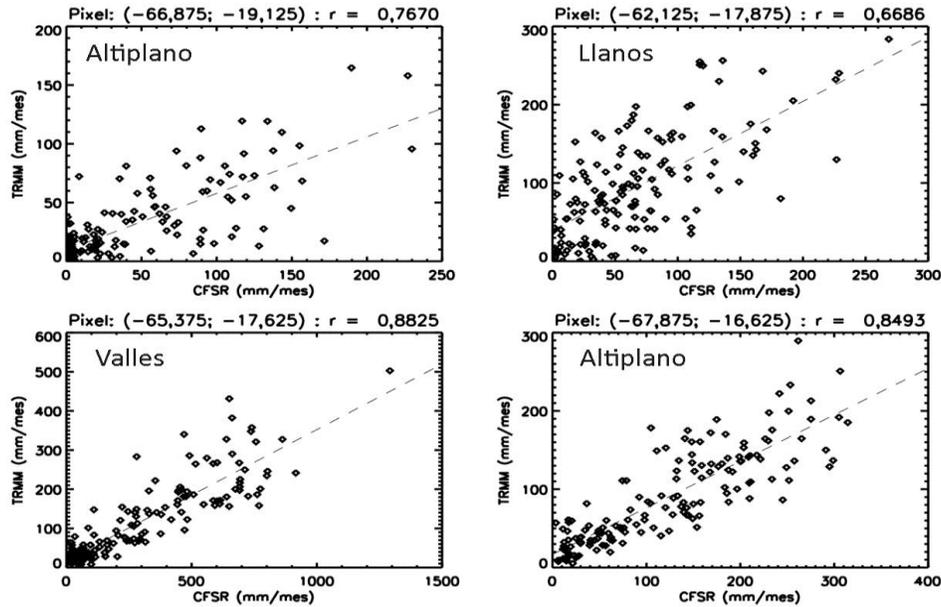
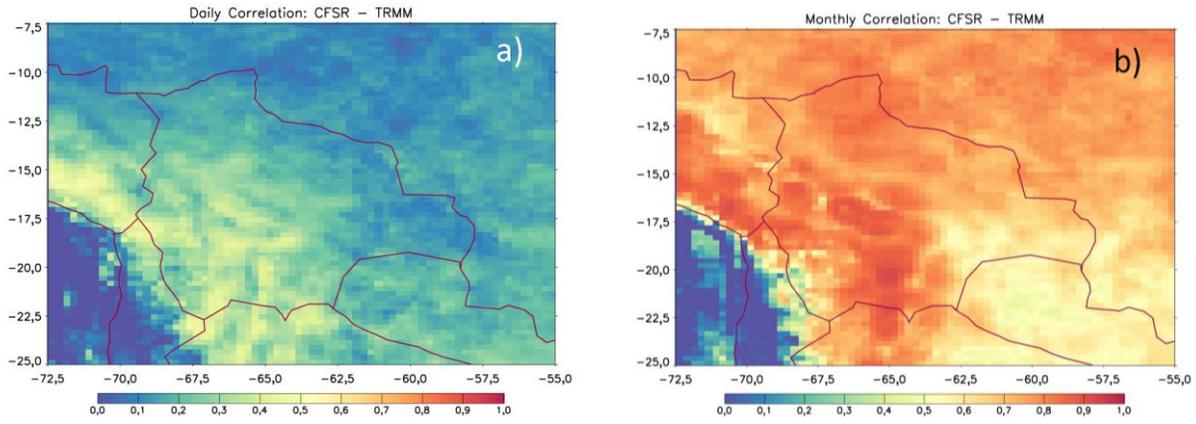


Figura 7. Mapas de correlaciones de Pearson (r) para datos del reanálisis y TRMM, 1998-2010.



Nota: El panel (a) muestra el mapa de correlaciones para datos a nivel diario y el panel (b) para datos mensual. La barra de colores indica el valor de r para cada pixel durante el periodo indicado.

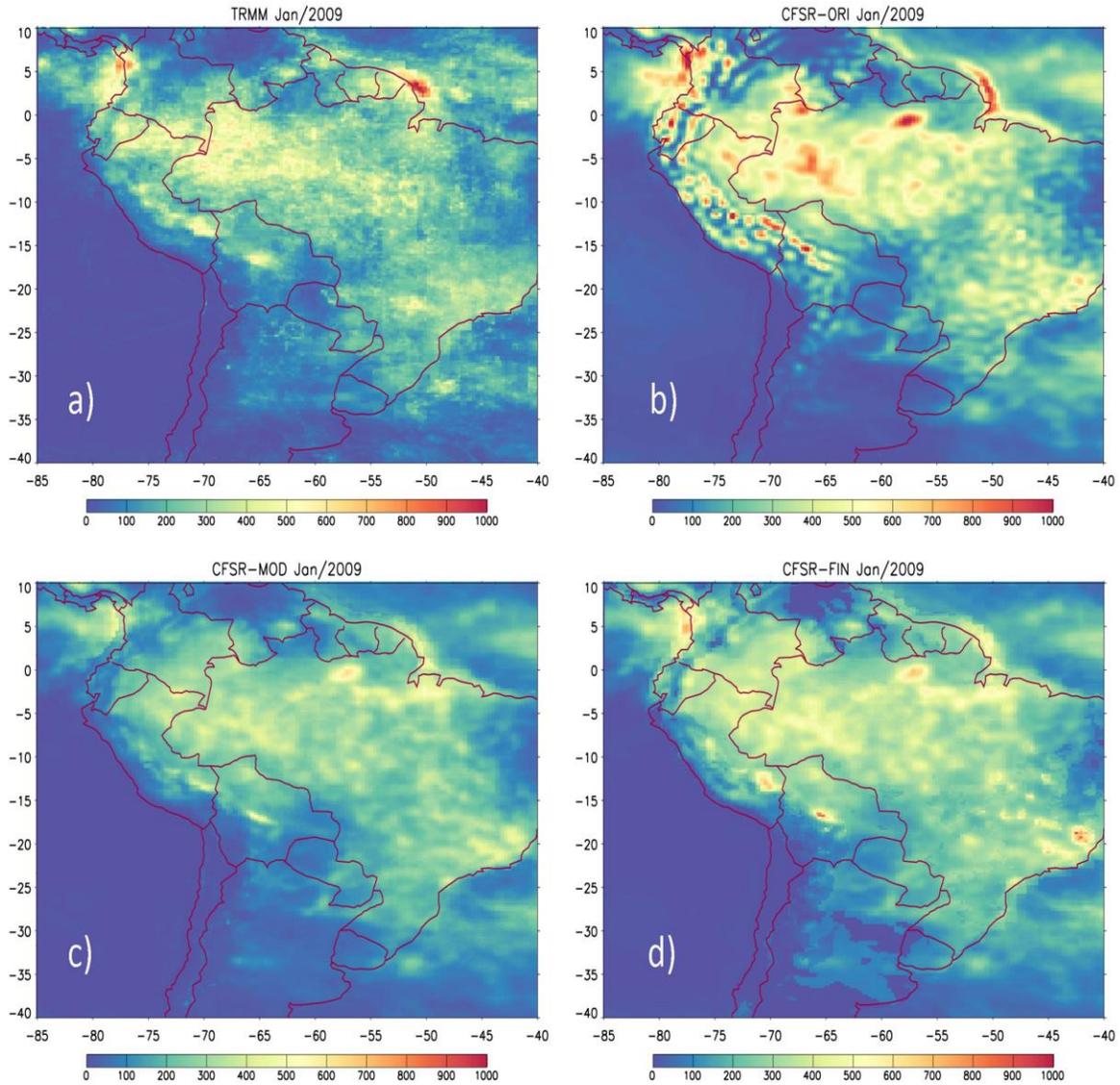
Cálculo de datos de precipitación a nivel diario a partir de datos de CFSR: primera aproximación.

A partir de los valores obtenidos, se estimaron valores mensuales de precipitación tanto para TRMM como para CFSR. A fin de ajustar los valores de CFSR en base a los de TRMM para todo el periodo de interés (1979-2010), se realizó una regresión lineal usando la ecuación (1) para datos mensuales. Esto es, se calcularon los parámetros A y B en la relación:

$$P_{TRMM} = A + B \times P_{CFSR} \quad (1)$$

siendo A y B constantes estimadas para cada pixel de la información existente entre 1998 y 2010. P_{CFSR} es la precipitación mensual calculada de CFSR y P_{TRMM} es la precipitación mensual calculada a partir de datos de TRMM. A pesar de que esta ecuación fue calculada para datos mensuales, fue usada, y adecuadamente modificada para estimar el valor diario de precipitación para cada día del periodo de interés. Este set de datos se denomina CFSR-MOD. La figura 8 muestra los valores reportados por TRMM (8a), los valores originales de CFSR interpolados horizontalmente a 25 km (8b), los valores calculados utilizando la ecuación (1), CFSR-MOD (8c), y CFSR ajustados por las ecuaciones (7) y (8), CFSR-FIN (8d).

Figura 8. Precipitación acumulada, Enero 2009, bajo diferentes ajustes de datos



Nota: (a) Datos de TRMM; (b) CFSR interpolados a 25 km de resolución horizontal (CFSR-ORI); (c) CFSR ajustados por la ecuación (1) (CFSR-MOD); (d) CFSR ajustados por las ecuaciones (7) y (8) (CFSR-FIN).

Análisis de bondad de los datos obtenidos.

A fin de estimar cuán bien se ajustan los datos calculados a datos observados, se dividió a Bolivia en cuatro regiones denominadas: Llanos, definidos como regiones con una altura menor a 500 msnm; valles bajos, como la región comprendida entre 500 y 2.000 msnm; valles altos, para regiones con alturas entre 2.000 y 3.800 msnm y Altiplano, para aquellos territorios con altura mayor a 3.800 msnm. La tabla 3 muestra un resumen de estas definiciones.

Tabla 3. Regiones y alturas asociadas definidas para Bolivia.

Región	Altura h (m)
Llanos	$h \leq 500$
Valles bajos	$500 < h \leq 2.000$
Valles altos	$2.000 < h \leq 3.800$
Altiplano	$3.800 < h$

A fin de comparar datos obtenidos en rejilla con observaciones in-situ se usaron valores mensuales calculados a partir de los datos diarios. Con este fin, se emplearon todas las observaciones para determinado mes. Para calcular las diferencias entre datos puntuales y valores en rejilla se tomó el valor del pixel en el que caía determinada estación. Se determinaron diferencias mensuales y las diferencias promedio para el periodo 1998-2010. La tabla 4 muestra un ejemplo de las diferencias medias para las cuatro regiones definidas por altura.

Tabla 4. Valores observacionales promedio mensual de precipitación por región (media obs.) y por mes del año, 1998-2010.

Región	Llanos				Valles bajos				Valles altos				Altiplano			
	Mes	No. est.	Media Obs.	Dif.	RMS	No. est.	Media Obs.	Dif.	RMS	No. est.	Media Obs.	Dif.	RMS	No. est.	Media Obs.	Dif.
1	29	219,68	-43,75	111,20	21	150,23	-2,30	84,07	48	125,24	14,96	86,70	16	126,73	-16,58	52,39
2	28	200,41	-17,8	101,52	21	134,52	13,87	89,14	48	101,05	23,22	78,19	16	92,57	8,81	43,21
3	28	183,83	-15,28	100,74	21	134,62	-3,88	80,52	48	80,34	15,91	66,20	16	74,80	1,48	40,91
4	29	104,11	12,79	75,16	21	47,02	12,93	41,54	48	24,26	18,14	33,46	16	23,24	16,97	27,37
5	28	65,45	27,74	66,57	21	14,22	18,01	28,50	48	5,81	12,14	21,03	16	6,06	10,43	13,74
6	29	38,49	27,54	53,04	21	8,53	11,69	20,74	48	3,13	8,78	14,74	16	4,35	7,13	9,84
7	28	35,23	29,11	45,22	21	7,64	11,43	21,53	48	4,16	8,55	15,55	16	6,43	6,68	12,07
8	28	29,71	28,15	44,3	21	8,98	8,35	17,15	48	5,14	10,65	18,09	16	7,33	9,21	13,85
9	28	57,08	11,73	48,49	21	16,81	13,29	26,70	48	14,17	12,66	31,99	16	14,84	10,86	17,74
10	28	115,41	-11,74	72,68	21	52,4	14,02	47,27	48	33,26	25,15	43,17	16	34,05	16,11	32,49
11	28	159,31	-23,29	99,62	21	82,21	16,02	62,00	48	40,94	35,28	54,40	16	35,23	26,91	35,98
12	29	215,68	-35,97	118,28	21	137,62	28,17	109,66	48	90,36	33,31	81,42	16	75,13	26,46	48,11

* Las medias observacionales, diferencias y raíces cuadráticas medias están expresadas en mm por mes.

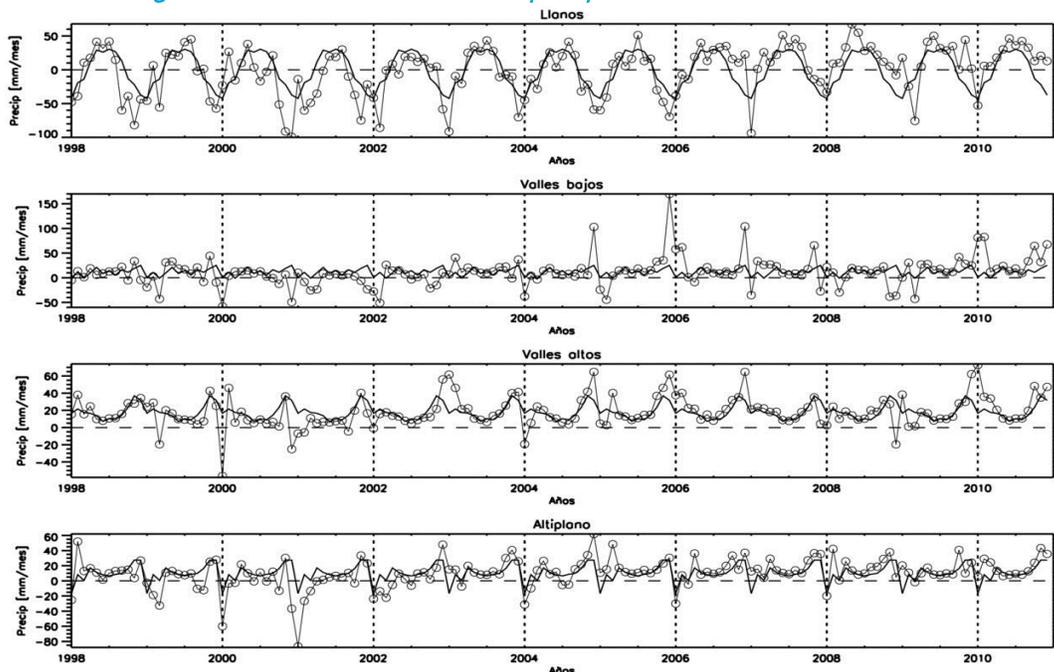
La tabla 4 muestra además el número de estaciones promedio que se usaron para calcular los valores medios por mes y región (No. Est.), la diferencia promedio de los valores generados¹ con respecto a los valores observacionales (Dif.) así como la raíz cuadrática media promedio (RMS). La tabla incluye valores ligeramente corregidos para obtener eventos más realistas para casos de precipitaciones fuertes².

Esta tabla muestra claramente el comportamiento estacional de la precipitación en Bolivia, con intensas precipitaciones en verano (Dic-Ene-Feb) y de muy poca precipitación en invierno (Jun-Jul-Ago). En el caso de los llanos, las diferencias parecen tener un comportamiento periódico anual, pues es negativa en verano y positiva el resto del año. Menos claro es el caso de las otras regiones. Para entender mejor esto se analizan las diferencias para todo el periodo.

La figura 9 muestra justamente estas diferencias para las cuatro regiones definidas por altura del terreno. La diferencia para la región de los llanos muestra un fuerte comportamiento estacional mientras que el mismo casi no existe en el caso de los valles bajos. Los datos asociados con los valles altos y el Altiplano muestran más estructura periódica aunque mucho menos definida que en el caso de los llanos. En los valles altos los datos generados por la regresión lineal son predominantemente positivos. También se observan casos con fuertes diferencias entre ambos sets de datos (el generado, denominado CFSR-MOD, y las observaciones), lo que sugiere que los datos del reanálisis ajustados por (1) no necesariamente reproducen los “eventos extremos” causantes de dichas diferencias.

Muchos de los casos donde se observan “grandes” diferencias aparecen en las cuatro regiones aunque con intensidades diferentes. Las curvas continuas en la figura 9 son ajustes de tipo armónico³. Por último, las diferencias asociadas con los llanos parecen mostrar una tendencia positiva a lo largo del tiempo.

Figura 9. Diferencias mensuales de precipitación acumulada, 1998-2010



¹ Ver sección “cálculo de datos de precipitación a nivel diario a partir de datos de CFSR: primera aproximación”.

² Ver sección “Cálculo de datos de precipitación a nivel diario a partir de datos de CFSR: correcciones.”

³ Ver sección “Cálculo de datos de precipitación a nivel diario a partir de datos de CFSR: correcciones.”

A fin de cuantificar la bondad de los datos generados respecto de los datos observacionales (los que se asumen como la “verdad”) se usaron algunos índices. Para ello se analizaron dos tipos de datos: la precipitación acumulada por estación en el periodo 1998-2010 y el número de días en los que se registró precipitación por encima de un valor umbral (definido en nuestro caso como 0, 1, 2, 5, 7, 10 y 20mm). Los índices usados se basaron en la siguiente tabla de contingencia (tabla 5):

Tabla 5. Tabla de contingencia para estimar índices usados en el análisis de bondad de los datos generados

	Precip. Estaciones (observaciones)	NO Precip. Estac. (observaciones)	Cualquier valor de precip. en observaciones
Precip. CFSR	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>q</i>
NO Precip. CFSR	<i>c</i>	<i>d</i>	-
Cualquier valor de precip. en CFSR	<i>p</i>	-	-

* Precip. Se refiere a precipitación por encima del valor umbral

** NO Precip. Se refiere a precipitación por debajo del valor del umbral

El parámetro *a* se refiere a casos en los que se registra precipitación tanto en los datos observacionales como en los datos generados a partir de CFSR. *b* se refiere a los casos en los que se registra precipitación en CFSR pero no en los datos observacionales. *c* se refiere al caso cuando las observaciones reportan precipitación pero no CFSR. *d* indica el caso que ni las observaciones ni CFSR indican precipitación. Finalmente *p* y *q* se refieren a precipitación en las observaciones y CFSR respectivamente, sin importar lo que pase en el otro set de datos. En todos los casos estos números se calculan para valores mayores a los umbrales considerados.

La definición de los índices usados en el presente trabajo es (siguiendo a Scheel et al., 2011):

$$FBI = \frac{a + b}{a + c} \quad (2)$$

$$POD = \frac{a}{a + c} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{b}{a + b} \quad (4)$$

y un índice simple definido por:

$$TP_{numdays} = \frac{q}{p} (\text{número días con precipitación}) \quad (5)$$

$$TP_{pcptot} = \frac{q}{p} (\text{precipitación total}) \quad (6)$$

pero usado tanto para el número de días con precipitación ecuación. (5) como la precipitación total ecuación. (6) para aquellos días que sobrepasaban algún umbral definido previamente.

Aquí FBI (Frequency Bias Index) se refiere al índice de frecuencia de sesgo definido como la razón entre el número de días con precipitación estimados a partir de los datos de CFSR (denominados CFSR-FIN a partir

de ahora), y el número de días con precipitación observados en las estaciones de SENAMHI. POD (que es también denominado la tasa de aciertos –o Hit Rate, en inglés) se refiere a la denominada probabilidad de detección (Probability of Detection) que estima la fracción entre los días en los que se registra precipitación tanto en las estaciones superficiales como en CFSR-FIN y los días totales de precipitación registrados por las estaciones superficiales. Un valor cerca de 1 es esperado en caso de que los datos generados reproduzcan razonablemente bien los datos observados. El índice FAR (o False Alarm Rate) cuantifica el índice de falsas alarmas estimado a partir de CFSR-FIN. Un valor cerca de 0 es lo esperado en este caso si el set de datos se acerca al de las observaciones. Finalmente, los índices TP, tanto para el número de días de precipitación para el periodo de análisis (TPnumdays), como para la precipitación acumulada en el mismo periodo (TPpcptots), se refieren a la razón entre valores estimados a partir de los datos de CFSR-FIN respecto a los calculados de las observaciones.

Las tablas 6 y 7 muestran los resultados obtenidos para los conjuntos de datos CFSR interpolados a 25 km de resolución horizontal (CFSR-ORI) y los datos calculados a partir de la ecuación (1) (denominados CFSR-MOD). En este caso se discriminan los datos para precipitación por encima de 0, 1, 2, 5, 7, 10 y 20 mm para tener una idea del comportamiento de cada set de datos respecto a las observaciones.

Tabla 6. Índices calculados para las cuatro regiones para datos CFSR interpolados a 25 km de resolución horizontal (CFSR-ORI) para los 7 umbrales de precipitación diaria.

Índice (por región)	Valor de los índices discriminados de acuerdo a distintos umbrales de PRECIPITACIÓN (mm)						
	0mm	1mm	2mm	5mm	7mm	10mm	20mm
Frequency Bias Index (FBI)							
<i>Llanos</i>	3,474	1,783	1,660	1,419	1,286	1,105	0,659
<i>Valles Bajos</i>	4,768	2,507	2,262	1,871	1,699	1,550	1,022
<i>Valles Altos</i>	5,178	2,980	2,651	2,321	2,214	2,172	2,148
<i>Altiplano</i>	3,974	2,431	2,309	2,401	2,506	2,772	4,393
Probability of Detection (POD)							
<i>Llanos</i>	0,980	0,731	0,655	0,507	0,430	0,339	0,150
<i>Valles Bajos</i>	0,986	0,767	0,680	0,511	0,427	0,346	0,167
<i>Valles Altos</i>	0,993	0,818	0,716	0,522	0,432	0,337	0,132
<i>Altiplano</i>	0,997	0,837	0,744	0,568	0,480	0,362	0,160
False Alarm Rate (FAR)							
<i>Llanos</i>	0,718	0,590	0,606	0,642	0,665	0,693	0,773
<i>Valles Bajos</i>	0,793	0,694	0,699	0,727	0,749	0,777	0,836
<i>Valles Altos</i>	0,808	0,726	0,730	0,775	0,805	0,845	0,939
<i>Altiplano</i>	0,749	0,656	0,678	0,763	0,808	0,869	0,964
Total Precipitation (TP)							
<i>Llanos</i>	3,574	1,834	1,707	1,461	1,325	1,140	0,687
<i>Valles Bajos</i>	4,877	2,560	2,309	1,911	1,735	1,583	1,048
<i>Valles Altos</i>	5,288	3,039	2,701	2,364	2,254	2,211	2,185
<i>Altiplano</i>	4,064	2,487	2,362	2,456	2,561	2,834	4,482

Tabla 7. Índices calculados para las cuatro regiones definidas para datos CFSR-MOD para los 7 umbrales de precipitación diaria.

Índice (por región)	Valor de los índices discriminados de acuerdo a distintos umbrales de PRECIPITACIÓN (mm)						
	0mm	1mm	2mm	5mm	7mm	10mm	20mm
Frequency Bias Index (FBI)							
<i>Llanos</i>	3,695	3,961	2,524	1,260	0,997	0,718	0,294
<i>Valles Bajos</i>	4,040	2,355	1,841	1,299	1,080	0,806	0,474
<i>Valles Altos</i>	4,613	2,736	2,004	1,224	0,966	0,746	0,454
<i>Altiplano</i>	4,132	2,037	1,486	0,868	0,667	0,478	0,189
Probability of Detection (POD)							
<i>Llanos</i>	1,000	0,975	0,777	0,454	0,344	0,228	0,062
<i>Valles Bajos</i>	0,963	0,744	0,589	0,377	0,288	0,184	0,057
<i>Valles Altos</i>	0,977	0,793	0,618	0,336	0,241	0,153	0,041
<i>Altiplano</i>	1,000	0,770	0,550	0,246	0,162	0,082	0,005
False Alarm Rate (FAR)							
<i>Llanos</i>	0,729	0,754	0,692	0,640	0,655	0,683	0,790
<i>Valles Bajos</i>	0,762	0,684	0,680	0,710	0,733	0,772	0,879
<i>Valles Altos</i>	0,788	0,710	0,692	0,725	0,750	0,796	0,909
<i>Altiplano</i>	0,758	0,622	0,630	0,717	0,757	0,829	0,974
Total Precipitation (TP)							
<i>Llanos</i>	3,800	4,074	2,598	1,298	1,028	0,744	0,307
<i>Valles Bajos</i>	4,122	2,401	1,879	1,326	1,103	0,827	0,488
<i>Valles Altos</i>	4,719	2,791	2,042	1,248	0,986	0,762	0,464
<i>Altiplano</i>	4,225	2,085	1,522	0,888	0,685	0,489	0,194

La tabla 6 muestra que los datos del reanálisis, interpolados a 25 km de resolución, sobreestiman el número de días con precipitación para todas las regiones y para todos los valores umbrales usados en este estudio (índice FBI). Asimismo se observa que el valor POD se degrada rápidamente conforme se incrementa el valor umbral de precipitación hasta llegar a valores del orden de 0,14. Por el contrario, los valores de FAR se mantienen relativamente altos para todos los valores umbrales aunque se nota un incremento al considerar los valores umbrales más altos. Un hecho interesante es que el índice FBI (definido por la WMO) y la razón TP, un concepto mucho más simple, tiene valores muy similares en este caso.

La tabla 7, por otro lado, muestra que los valores obtenidos a partir de la ecuación de predicción (1) aplicada sobre los datos del reanálisis, produce valores de FBI mucho más razonables para valores umbrales entre 0 y 5 mm, pero comienza a subestimar el número de días de precipitación para umbrales mayores a 7 mm/día, indicando que el número de días con valores de precipitación mayores a 20 mm son fuertemente subestimados en este caso.

Cálculo de datos de precipitación a nivel diario a partir de datos de CFSR: correcciones.

Claramente, el problema expresado por la tabla 7 proviene del uso de (1) que no captura los eventos “extremos”. A fin de solucionar este problema, y luego de un análisis cuidadoso de los datos mensuales y los ajustes realizados, se decidió corregir (1) para tratar de captar mejor aquellos casos donde se tiene “fuerte” precipitación. En este caso, la ecuación de predicción fue modificada a:

$$P_{est} = w \times (A + B \times P_{CFSR}) + (1 + w) \times (C \times e^{D \times P_{CFSR}}) \quad (7)$$

con w una “función de peso” cuyo valor varía entre 0 y 1. El término exponencial trata de captar mejor aquellos eventos de gran precipitación que la regresión lineal no capta. Al hacer un análisis de bondad de ajuste se encuentra que w debe estar cerca de 0,995 para evitar tener demasiados casos con mucha precipitación (de alguna manera definidos por $1-w$), que parecen poco reales pues ningún set de datos, ni reanálisis ni TRMM, presentan los mismos. El valor final usado de w fue 0,997.

Asimismo, a fin de corregir sesgos, se ajustó a las diferencias encontradas entre datos en malla y las observaciones de superficie (datos puntuales) una función del tipo:

$$y_j = \sum_{i=1}^n \{A_i \text{sen}(2\pi\omega_i t_{ij}) + B_i \text{cos}(2\pi\omega_i t_{ij})\} \quad (8)$$

donde n es el número de armónicos usados para el ajuste. En general, se usa $n=3$ en este caso. Las líneas sólidas en las figuras 9 a la 14 son justamente el resultado de este tipo de ajuste.

Toda esta información fue usada para corregir los datos calculados⁴. Aquí se debe puntualizar que, a fin de evitar el excesivo número de días con “baja” precipitación que aparecen en el reanálisis y los valores derivados en la primera aproximación, se decidió usar también valores umbrales de corte, que corrijan de alguna manera este problema. Los valores usados por región fueron: 3,9, 4,5, 3,5 y 2,8 mm para llanos, valles bajos, valles altos y Altiplano respectivamente. Estos valores no están lejos de los 3 mm propuestos por Scheel et al. (2011) para el caso de Cusco y La Paz en invierno. A fin de mantener consistencia con los valores mensuales, los valores eliminados se suman por mes y pixel y se distribuyen de manera uniforme en todos los días donde se tenga una precipitación mayor a dichos umbrales mínimos. Los datos así producidos se denominaron CFSR-FIN. Un ejemplo de esos datos se muestra en la figura 8d. La tabla 8 muestra los índices para el análisis de bondad de ajuste para este último set de datos.

⁴ Ver sección “Cálculo de datos de precipitación a nivel diario a partir de datos de CFSR: primera aproximación”

Tabla 8. Índices calculados para las cuatro regiones definidas para datos corregidos CFSR-FIN para los 7 umbrales de precipitación diaria.

Índice (por región)	Valor de los índices discriminados de acuerdo a distintos umbrales de PRECIPITACIÓN (mm)						
	0mm	1mm	2mm	5mm	7mm	10mm	20mm
Frequency Bias Index (FBI)							
<i>Llanos</i>	0,890	1,027	1,166	1,259	1,168	1,193	0,821
<i>Valles Bajos</i>	0,781	0,916	1,059	1,269	1,080	0,981	0,726
<i>Valles Altos</i>	0,927	1,079	1,236	1,199	1,065	0,918	0,703
<i>Altiplano</i>	0,732	0,880	1,054	1,118	0,933	0,780	0,508
Probability of Detection (POD)							
<i>Llanos</i>	0,476	0,496	0,506	0,454	0,389	0,342	0,149
<i>Valles Bajos</i>	0,362	0,380	0,393	0,368	0,288	0,216	0,084
<i>Valles Altos</i>	0,414	0,425	0,433	0,332	0,258	0,172	0,053
<i>Altiplano</i>	0,402	0,416	0,426	0,310	0,210	0,122	0,011
False Alarm Rate (FAR)							
<i>Llanos</i>	0,465	0,517	0,566	0,640	0,667	0,713	0,818
<i>Valles Bajos</i>	0,536	0,585	0,629	0,710	0,733	0,779	0,884
<i>Valles Altos</i>	0,554	0,606	0,650	0,723	0,758	0,813	0,924
<i>Altiplano</i>	0,451	0,527	0,596	0,723	0,775	0,844	0,978
Total Precipitation (TP)							
<i>Llanos</i>	0,916	1,057	1,200	1,297	1,204	1,232	0,850
<i>Valles Bajos</i>	0,798	0,935	1,081	1,294	1,105	1,007	0,749
<i>Valles Altos</i>	0,944	1,099	1,258	1,223	1,088	0,938	0,721
<i>Altiplano</i>	0,750	0,901	1,079	1,142	0,954	0,797	0,520

Los resultados de la tabla 8 fueron corregidos usando las ecuaciones (7) y (8) para los 7 umbrales de precipitación mínima diaria. Los datos así producidos se denominan CFSR-FIN. En este caso se observa una mejoría de todos índices respecto de los datos de primera aproximación (CFSR-MOD, tabla 7) pero se nota aún una pérdida de habilidad de reproducir, al menos desde el punto de vista estadístico, la cantidad de días de precipitación para valores umbrales mayores a 7 mm/día. En el caso del Altiplano este hecho es más dramático para valores mayores a 20 mm/día.

A fin de evaluar la precipitación y no solo el número de días con precipitación, se decidió usar la razón TPpctot para todos los casos mencionados, a saber: CFSR-ORI, CFSR-MOD, CFSR-FIN. La justificación de usar este índice para un análisis no categórico viene de observar el buen desempeño de este "índice" para el caso de número de días de precipitación respecto a índices estándar, como el FBI (ecuación 3). La tabla 9 muestra los resultados asociados a los sets de datos mencionados.

Tabla 9. Valores de TPpcptot (ecuación 6) para los tres sets de datos producidos para el caso de precipitación.

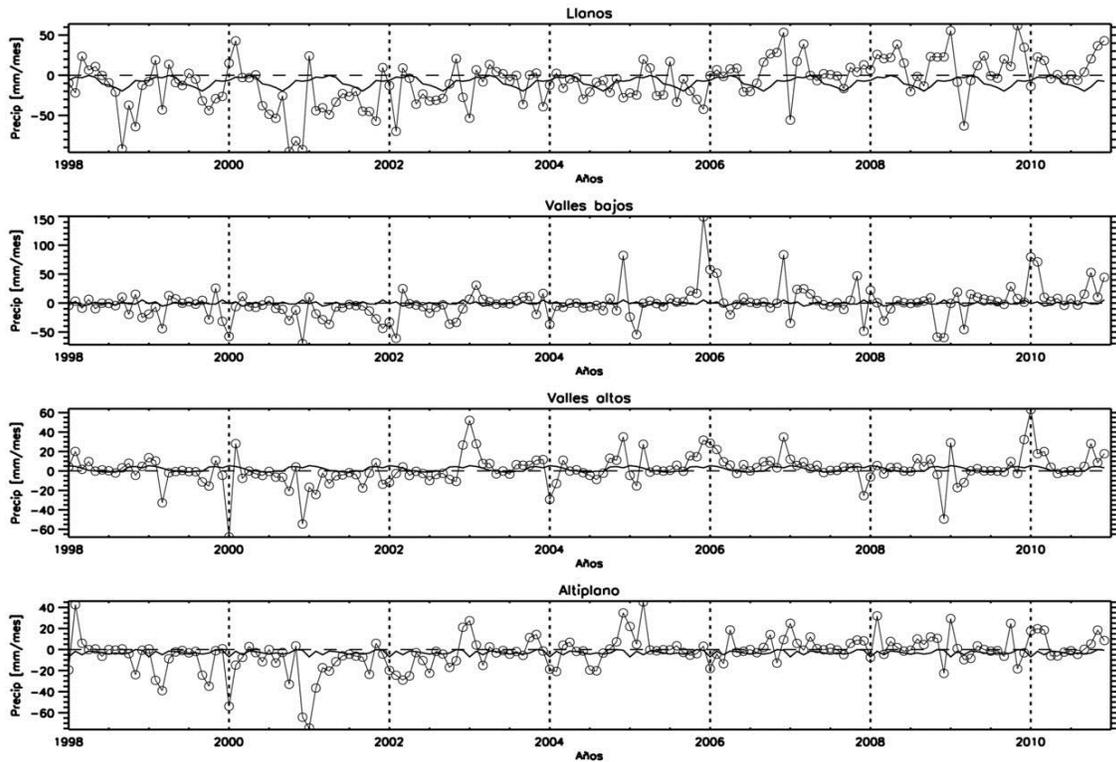
Set de datos (por región)	Valor del índice TPpcptot de acuerdo a distintos umbrales de PRECIPITACIÓN (mm)						
	0mm	1mm	2mm	5mm	7mm	10mm	20mm
CFSR ORI							
Llanos	1,011	0,996	0,978	0,911	0,861	0,782	0,552
Valles Bajos	1,588	1,555	1,517	1,396	1,319	1,230	0,904
Valles Altos	2,427	2,380	2,323	2,212	2,158	2,132	2,115
Altiplano	2,739	2,702	2,693	2,804	2,922	3,193	4,920
CFSR-MOD							
Llanos	1,029	1,020	0,855	0,638	0,553	0,446	0,245
Valles Bajos	1,189	1,131	1,057	0,909	0,825	0,709	0,568
Valles Altos	1,449	1,345	1,214	0,939	0,810	0,683	0,520
Altiplano	1,272	1,107	0,972	0,689	0,565	0,424	0,187
CFSR-FIN							
Llanos	0,962	0,967	0,977	0,968	0,939	0,929	0,731
Valles Bajos	0,993	1,001	1,019	1,042	0,976	0,937	0,827
Valles Altos	1,061	1,072	1,097	1,032	0,961	0,878	0,764
Altiplano	0,945	0,960	0,998	0,965	0,849	0,735	0,517

Los valores hallados muestran que CFSR-FIN son más consistentes y relativamente de mejor desempeño que los datos originales interpolados (CFSR-ORI) o el primer set de datos (CFSR-MOD), producidos a partir de la ecuación (1). A pesar de esto, se observa una subestimación de valores de precipitación para eventos mayores a 7 mm/día. Esta subestimación es más notoria en el caso del Altiplano. Es bueno notar que en el caso de CFSR-ORI los datos indican una fuerte sobreestimación para el caso del Altiplano. Este hecho parece estar relacionado con el hecho de tener mucha precipitación de baja intensidad en muchos días del año.

Productos finales de precipitación.

En base a las correcciones descritas, se produjeron datos diarios de precipitación acumulada para toda Bolivia. Al analizar las diferencias entre este set final de datos (CFSR-FIN) y las observaciones disponibles se encuentra (figura 10), que los sesgos sistemáticos fueron removidos razonablemente. Las diferencias están centradas alrededor de cero (algo que se espera si no existen errores sistemáticos evidentes) y la amplitud de las curvas calculadas por la ecuación (8) son mucho más bajas que en el caso de los datos originales de CFSR o ajustados solamente por datos de TRMM. Se debe remarcar, sin embargo, que diferencias no sistemáticas, y por tanto atribuibles a otro tipo de causa, como fenómenos atmosféricos (El Niño, por ejemplo) no captados por el reanálisis, problemas en los datos de superficie u otros, no fueron eliminados por los ajustes hechos. Aquí es necesario aclarar que en este caso se asume que los valores observacionales son los valores “verdaderos”, cosa que no es necesariamente cierta (ver discusión en sección 4).

Figura 10. Diferencias mensuales de precipitación acumulada, 1998-2010



La curva sólida representa el ajuste de una función sinusoidal⁵

3.3 Temperaturas mínima y máxima

En el caso de las temperaturas el procedimiento fue más sencillo dado que este es un campo que varía espacial y temporalmente de manera suave. En ese sentido, los pasos seguidos fueron:

- Interpolación a 25 km de resolución espacial.
- Corrección de los datos luego de comparar los datos de CFSR con datos observacionales.

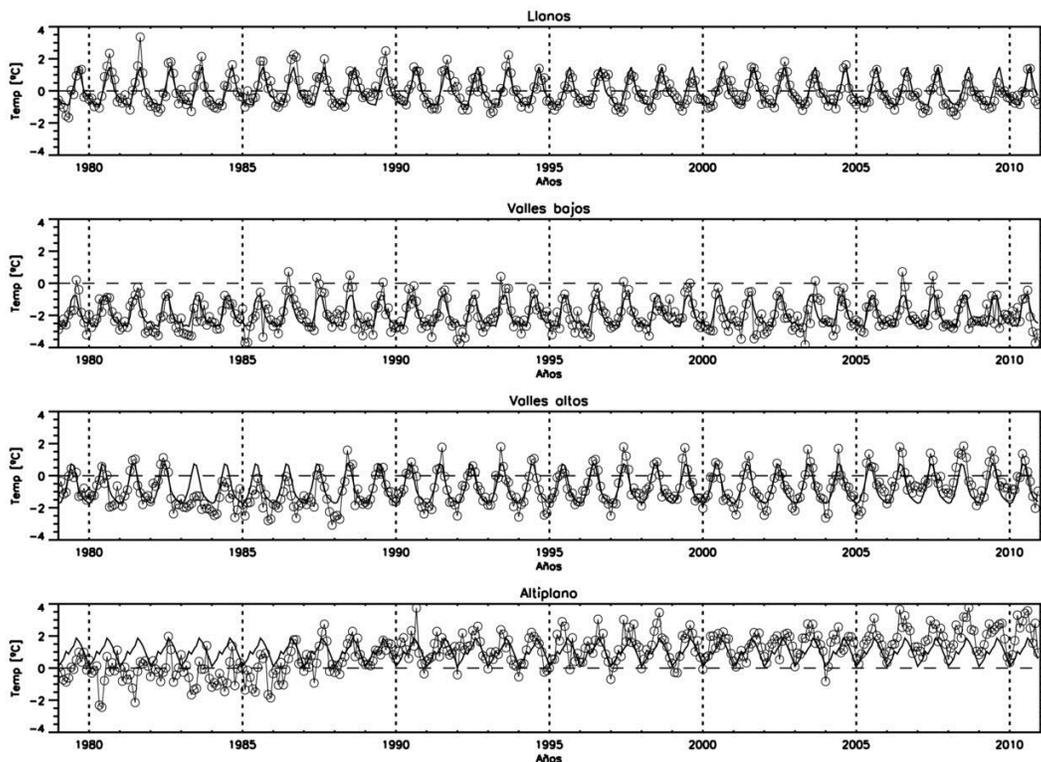
La figura 11 muestra las diferencias encontradas entre los datos interpolados y los datos observacionales para el caso de la temperatura mínima promedio mensual, mientras que la figura 12 muestra las diferencias para la temperatura máxima promedio mensual. La curva sólida que se muestra en ambas figuras representa el ajuste de una función sinusoidal⁶.

En el caso de las temperaturas mínimas se observa un fuerte comportamiento periódico en las diferencias entre datos del reanálisis y los datos observacionales para todas las regiones de estudio. Llama la atención que en el caso del Altiplano y Valles Altos se observe un comportamiento “anómalo” previo a 1988, pues los valores observados previos a ese año son menores en el periodo posterior (existe un “salto”). El caso del Altiplano es más notorio en este aspecto. Se deben investigar más profundamente las razones para dicho comportamiento.

⁵ Cálculo de datos de precipitación a nivel diario a partir de datos de CFSR: correcciones.

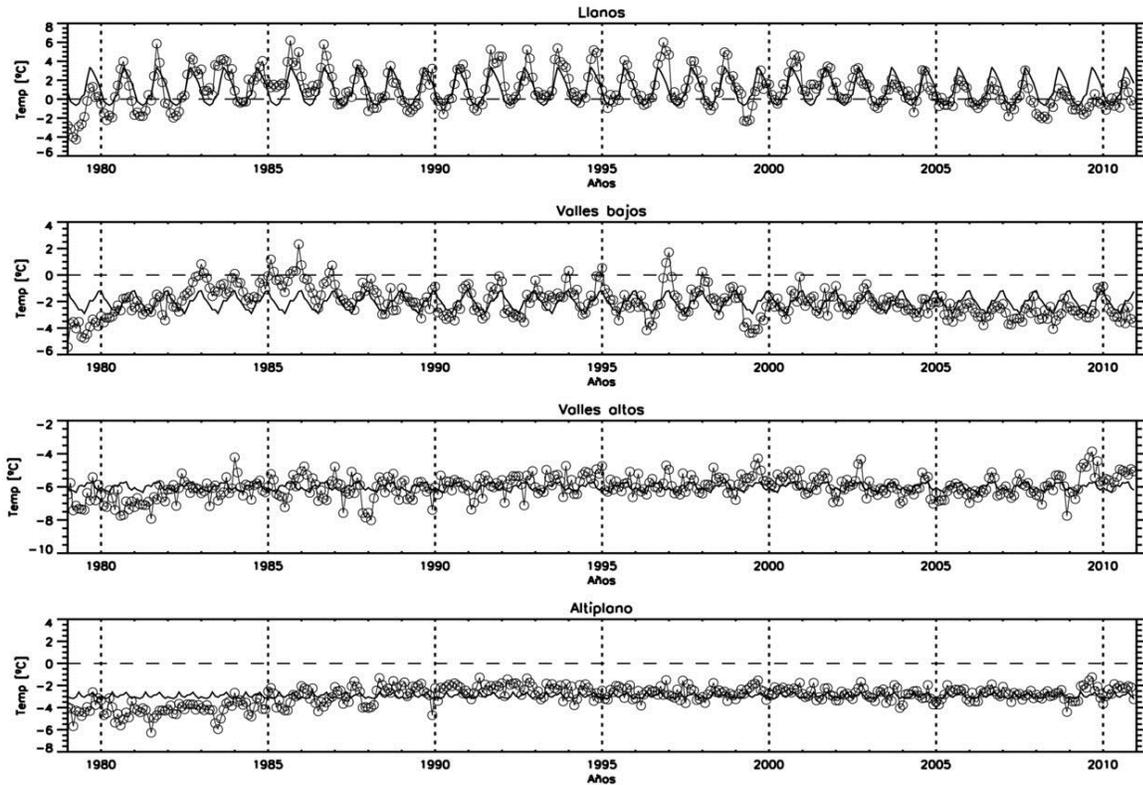
⁶ Cálculo de datos de precipitación a nivel diario a partir de datos de CFSR: correcciones.

Figura 11. Diferencias para temperaturas mínimas promedio mensual calculadas a partir de datos de CFSR y datos observacionales discriminados por altura, 1979-2010 (tabla 2).



Respecto a las temperaturas máximas, también se observa un comportamiento periódico para las diferencias entre datos del reanálisis y datos de superficie, especialmente en las regiones de los Llanos y Valles bajos. En el caso de Valles altos y Altiplano este comportamiento periódico es mucho más débil. En este caso, sin embargo, se observa también un comportamiento irregular de las diferencias en periodos más largos. Por ejemplo, para los Valles bajos las diferencias son más grandes al principio del periodo de interés (1979) hasta hacerse casi cero alrededor de 1985, para luego disminuir gradualmente hasta el año 2010. Diferencias relativamente grandes también se observan en las otras regiones; llegan al mínimo en distintos años del periodo de interés. Por ejemplo, en el caso del Altiplano, se llega a una “estabilización” de las diferencias alrededor de 1988 y en el caso de los Valles altos dicha estabilización acontece alrededor de 1982. Es necesario un estudio más profundo tanto de los datos observacionales como los de reanálisis para establecer las causas de este comportamiento anómalo.

Figura 12. Diferencias para temperaturas máximas promedio mensual calculadas a partir de datos de CFSR interpolados espacialmente y datos observacionales discriminados por altura, 1979-2010 (tabla 2).



Luego de aplicadas las correcciones correspondientes, a fin de eliminar errores sistemáticos, se observa (figuras 13 y 14) que las diferencias están centradas alrededor de cero y con una desviación cuadrática media del orden de 1°C . Las amplitudes de las curvas producto del ajuste por la ecuación (8) muestran valores muy bajos, especialmente cuando son comparados con las diferencias de los datos originales de CFSR.

Un hecho que llama la atención es que las diferencias entre datos modificados del reanálisis y datos observacionales son bajos y con tendencias muy cercanas a cero para las temperaturas mínimas promedio. Este no es el caso para las temperaturas máximas promedio que muestran todavía cierta estructura periódica de frecuencia anual y otra oscilación de frecuencia más baja. En este último caso se observa un incremento de estas diferencias para el inicio del periodo (1979) en todas las regiones. A la fecha no está claro si esto se debe a errores en los sistemas de medición de superficie o artefactos en los datos del reanálisis. Se necesitan estudios más profundos para entender el porqué de este comportamiento en el caso de la temperatura máxima. La curva sólida que se muestra en las figuras 13 y 14 representa el ajuste de una función sinusoidal

Figura 13. Diferencias mensuales de temperaturas mínimas promedio calculadas a partir de los datos finales (CFSR-FIN) y datos observacionales discriminados por altura, 1979-2010.

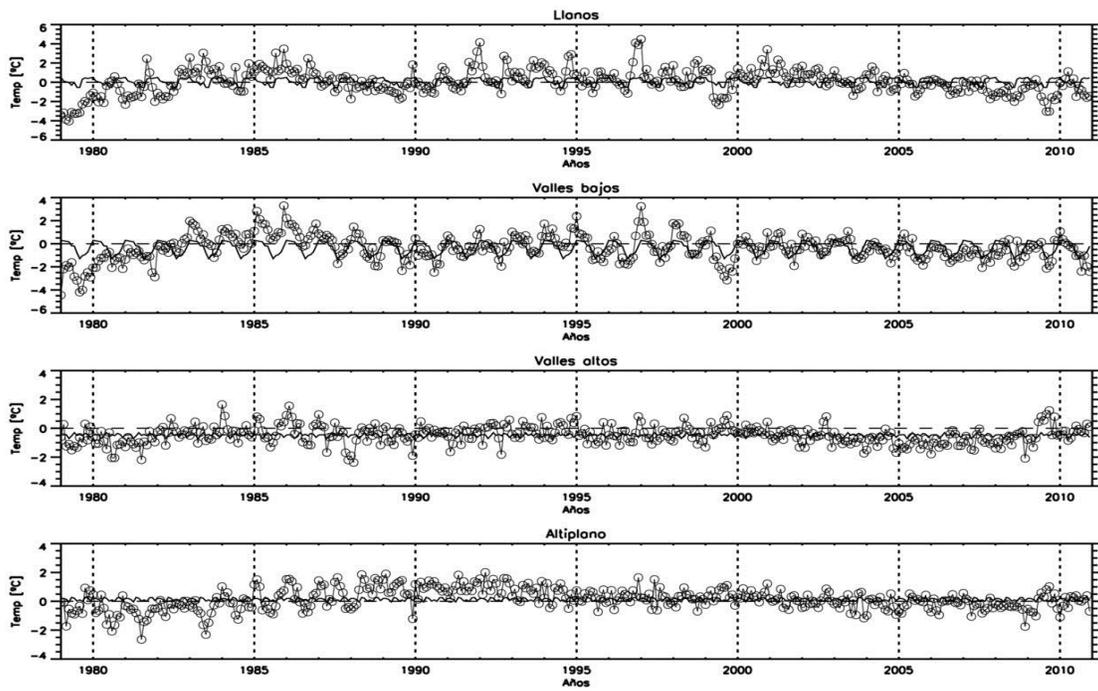
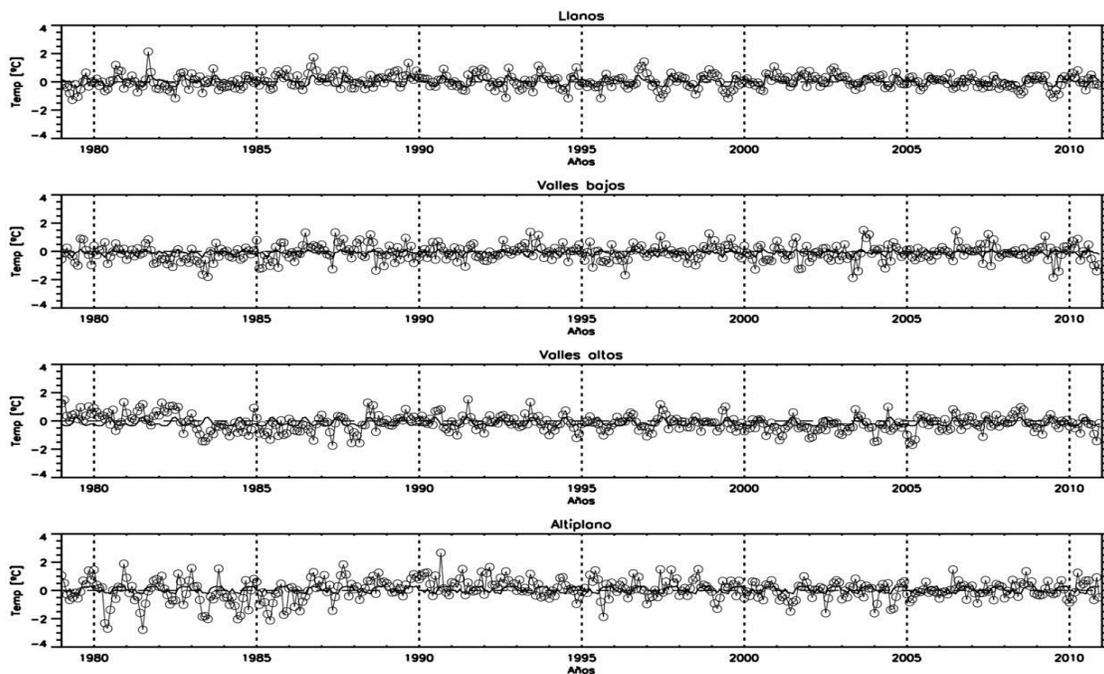


Figura 14. Diferencias mensuales de temperaturas máximas promedio calculadas a partir de los datos finales (CFSR-FIN) y datos observacionales discriminados por altura, 1979-2010.

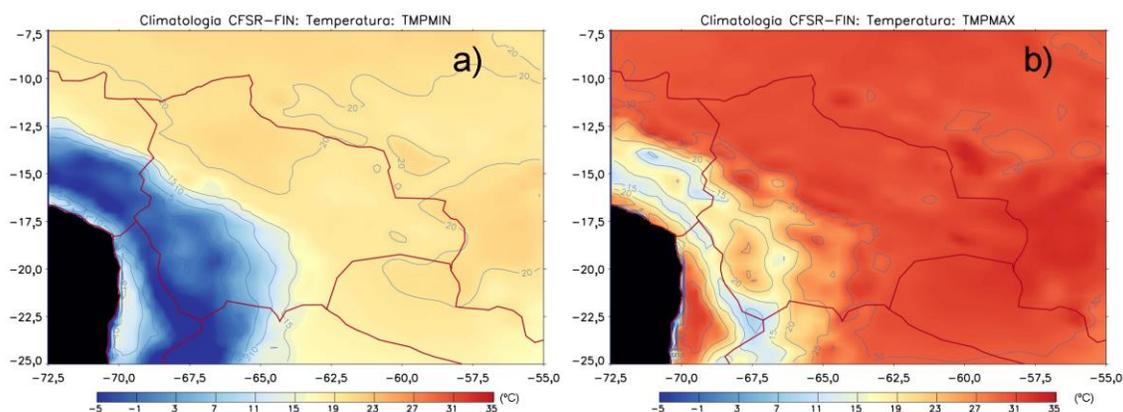


4. Climatologías

4.1 Temperatura

Con los datos generados por los procesos descritos anteriormente se calcularon las climatologías para el periodo 1979-2010, tanto para temperaturas mínimas y máximas así como para la precipitación.

Figura 15. Temperaturas promedio mensuales, 1979-2010.



La figura 15 muestra los resultados de este cálculo para el caso de las temperaturas, para el periodo 1979-2010 a partir de los datos CFSR-FIN producidos en este trabajo. El panel (a) muestra la temperatura mínima promedio y el panel (b) muestra la temperatura máxima promedio. La zona en negro no tiene datos, pues las correcciones para producir CFSR-FIN se basan en datos de superficie para el territorio boliviano solamente.

Como se observa, ambos sets de datos muestran las temperaturas más altas en las zonas bajas y las temperaturas más bajas sobre las Cordilleras Oriental y Occidental, como era de esperarse, siguiendo la altura del terreno. Cuando se comparan estos gráficos con la climatología producida a partir de datos observacionales interpolados espacialmente (Andrade, 2010), se observan muchas coincidencias pero también algunas diferencias.

Por ejemplo, se observa que la zona más fría de Bolivia se halla en la parte suroeste del país en ambos casos. Sin embargo, en los datos CFSR-FIN producidos en este trabajo no se observa un mínimo de temperatura alrededor de 17°S y 69°O como se observa en el mapa de datos observacionales interpolados. Estos últimos tampoco muestran el efecto de las cordilleras en la temperatura de superficie. A pesar de eso el gradiente de temperatura sigue razonablemente bien los cambios relacionados con la altura de terreno en ambos casos. Es posible también encontrar ciertas similitudes en la estructura térmica presente obtenida por ambos métodos, aunque en el caso de las interpolaciones la estructura puede deberse a artefactos de la interpolación misma.

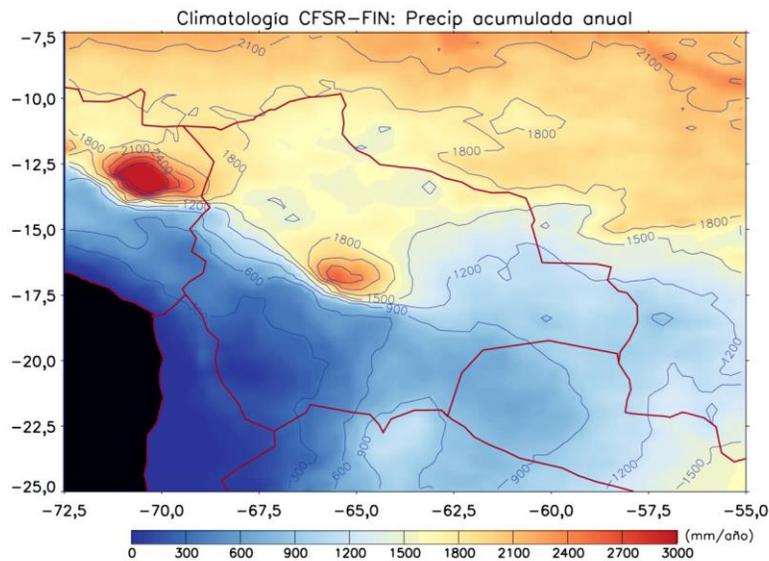
Es necesario aclarar que la climatología proveniente de los datos observacionales corresponde al periodo 1960-1990 y que en este caso se usaron menos de 60 estaciones para el análisis (Andrade, 2010).

4.2 Precipitación

La figura 16 muestra la climatología de la precipitación anual a partir de los datos CFSR-FIN para el periodo 1979-2010. En esta figura se observa que la región de máxima precipitación está en la región del Chapare (alrededor de 16,5°S y 65,5°O). Se observa también una región con una alta precipitación en el Perú

(alrededor de 13°S y 70,5°O) en la provincia Madre de Dios. La región con mínima precipitación se encuentra en el Altiplano sur aunque también se tiene baja precipitación en la región del Chaco.

Figura 16. Precipitación acumulada anual promedio, 1979-2010



La zona en negro no tiene datos, pues las correcciones para producir CFSR-FIN se basan en datos de superficie para el territorio boliviano solamente. Las características principales (zonas de máxima y mínima precipitación) corresponden bien a la climatología obtenida de datos observacionales para el periodo 1960-1990 (Andrade, 2010). En esta climatología, sin embargo, se observan regiones relativamente pequeñas con valores altos (también relativos) de precipitación. Estas regiones, a veces denominadas “ojos de buey”, podrían ser un artefacto de la interpolación espacial.

Cuando otra climatología basada en datos de superficie que provienen de la Organización Mundial de Meteorología, es analizada (<http://www.agteca.com/climate.htm>) se observa una muy buena coincidencia de las zonas y valores de máxima precipitación, excepto que en la zona del Chapare el máximo de precipitación reportado por las observaciones es mucho mayor que el valor obtenido de CFSR-FIN. En esta interpolación se observan menos “ojos de buey”. El trabajo realizado por Espinoza et al. (2009), aunque no abarca toda Bolivia, sugiere también razonable coincidencias en el patrón espacial de precipitación. Estas comparaciones sugieren que los datos CFSR-FIN, al menos del punto climatológico, producen valores bastante cercanos a las observaciones y nos dan confianza en los datos obtenidos en este trabajo.

5. Análisis de tendencias y periodos para el caso de la precipitación

A fin de establecer posibles cambios en el régimen de precipitación en Bolivia se hizo un análisis de tendencias lineales a nivel mensual, y de las funciones de densidad de probabilidades (PDF, por sus siglas en inglés) para periodos de cinco días o *pentas*. Para este propósito se usaron los datos generados en el presente trabajo (CFSR-FIN).

5.1 Análisis de tendencias

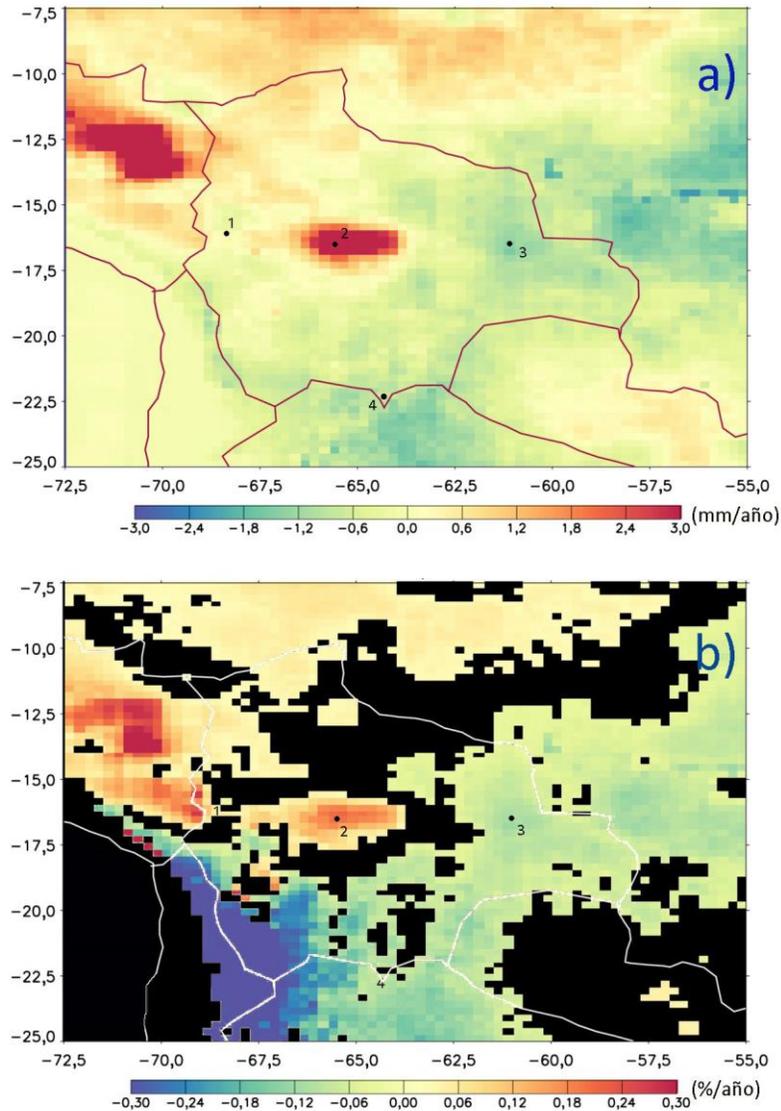
Para realizar el análisis de tendencias se procedió a calcular las anomalías⁷ a nivel mensual para cada pixel de Bolivia (y algunas regiones adyacentes). Se usaron dos procedimientos para este propósito: a) calcular la climatología para cada punto y a partir de éstos obtener las anomalías y, b) hacer un ajuste de regresión lineal múltiple a un modelo de funciones periódicas (senos y cosenos), más un término lineal (la tendencia lineal). Un análisis entre los dos métodos (no mostrado aquí), indica que no hay diferencias significativas entre ambos, al menos respecto a la tendencia lineal buscada. En todo caso, en ambos casos se calcularon no solo las tendencias lineales para cada pixel en el área de interés, sino también la incertidumbre asociada a un 95% de intervalo de confianza.

La figura 17a muestra la tendencia lineal calculada para cada pixel en mm/año para el periodo 1979-2010, mientras que la figura 17b muestra las mismas tendencias desplegadas en 17a pero normalizadas por la precipitación acumulada anual y expresadas en porcentaje. En esta última figura solo se muestran aquellas tendencias que son estadísticamente significativas a un 95% de intervalo de confianza. Como se observa, las tendencias obtenidas son relativamente bajas (menores a 1 mm/año) para la mayor parte del territorio boliviano. El lugar donde más cambios se observan corresponde a la región central de Bolivia, en la zona conocida como Chapare (la región alrededor del punto 2 en la figura 17a y definido en la tabla 8). Esta región, a su vez, corresponde a la región de máxima precipitación del país, donde en promedio se tiene 3.000 mm/año de precipitación.

Se observa que en la zona del Chapare la tendencia lineal es del orden de 0,2 %/año, equivalente a aproximadamente un incremento de 6% para el periodo de análisis, mientras que en la zona sudoeste del territorio los datos muestran una tendencia negativa del orden de 0,3%/año, equivalentes a una disminución en la precipitación de 9% para el periodo 1979-2010. Las tendencias observadas en la zona del Chaco están en el orden de -0,15%/año, equivalentes aproximadamente a 5% de descenso en la precipitación en el periodo de interés. En el caso del Altiplano, se observa que la tendencia lineal es del orden de 0,05%/año, equivalentes a un incremento aproximado de 1,6% entre 1979 y 2010 para la zona norte. El Altiplano central y la zona amazónica en el departamento del Beni no presentan tendencias lineales estadísticamente significativas.

⁷ La anomalía se define como la diferencia de un valor a un tiempo dado (un mes dado en nuestro caso) respecto al promedio de todo el periodo de análisis elegido como referencia. En el presente estudio dicho periodo corresponde a los años 1979-2010.

Figura 17. Tendencias en mm/año para cada pixel dentro del dominio elegido, 1979-2010



El panel (a) muestra las tendencias (en mm/año) para cada pixel dentro del dominio elegido, y el panel (b) muestra las mismas tendencias mostradas pero expresadas en %/año. En este caso, se enmascaran las tendencias que no son estadísticamente significativas (pixeles negros). Los pixeles escogidos para mayor análisis están representados por puntos negros (o blancos, para fines de claridad) y corresponden a la tabla 8.

A fin de entender mejor el significado de las tendencias lineales mostradas en la figura 17 se decidió elegir cuatro puntos que representen a diferentes regiones de Bolivia. Se eligió un pixel en el área de interés del proyecto (denominado “Cuenca” en la tabla 10), un pixel en la región del Chapare, la región donde la precipitación es máxima en Bolivia, otro pixel en los llanos de Santa Cruz donde el análisis sugiere que existió un cambio estadísticamente significativo y, finalmente, otro en la región sur de Bolivia en la región

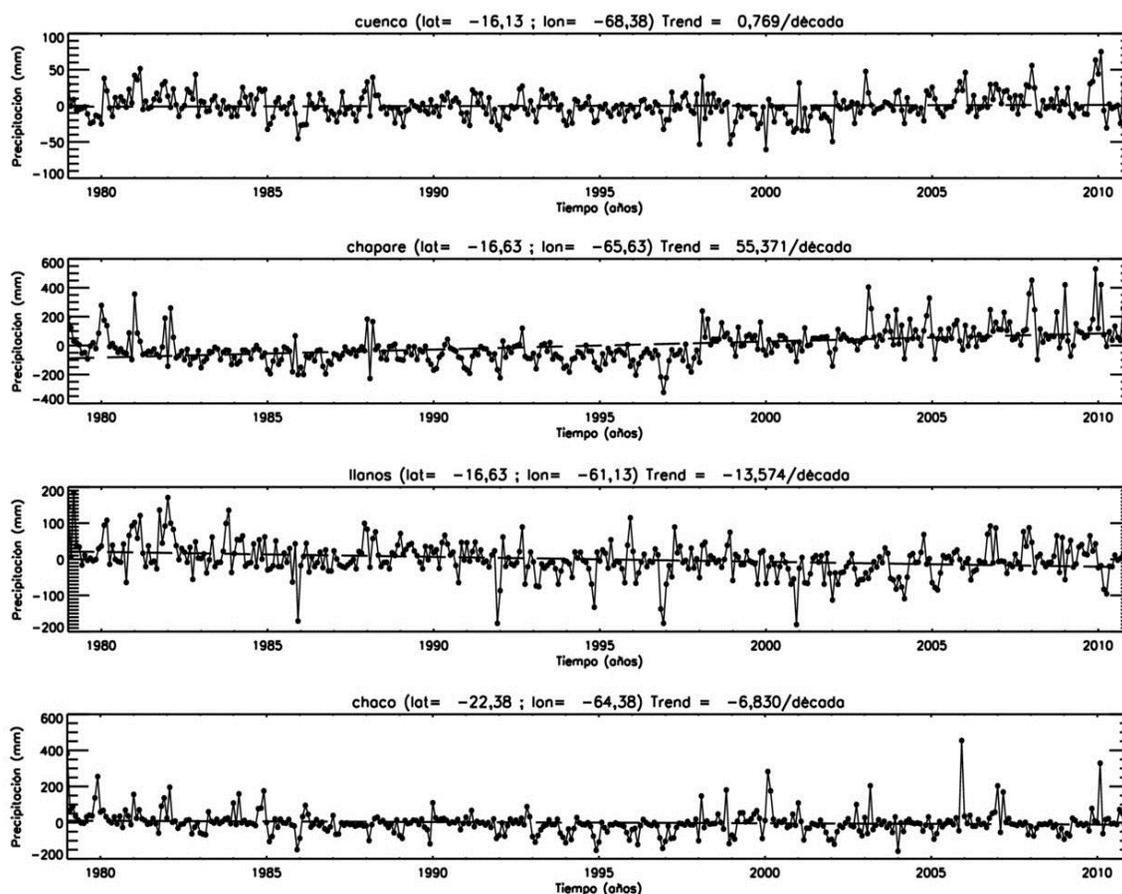
del Chaco boliviano (ver fig. 17 para observar su localización). La tabla 10 lista los puntos elegidos, así como las coordenadas geográficas del centro de los respectivos pixeles.

Tabla 10. Pixeles escogidos para un análisis más detallado de tendencias lineales.

Pixel	Región aproximada	Latitud	Longitud
1	Cuenca	-16,125	-68,375
2	Chapare	-22,375	-64,375
3	Llanos	-16,625	-65,625
4	Chaco	-16,625	-61,125

La figura 18 muestra las series temporales para las anomalías de los pixeles listados en la tabla 10. En la misma figura se grafican también la rectas que representan las tendencias lineales entre 1979 y 2010 para cada pixel. Como era de esperarse, las anomalías en regiones con baja precipitación, como la cuenca de estudio, son relativamente pequeñas. Las anomalías más grandes se encuentran en la zona del Chapare. En este caso se observa un comportamiento un poco raro pues existe un “salto” en las anomalías alrededor de 1997-98, las cuales se hacen notoriamente más positivas a partir de entonces, lo que parece contribuir a la tendencia positiva (estadísticamente distinta de cero) observada para la región. El pixel situado en la región de Santa Cruz (denominada llanos en la tabla 8) muestra también valores de anomalías relativamente altos, con excursiones tanto positivas como negativas a lo largo del periodo de análisis. En este caso no se observa ningún “salto” en los datos. Finalmente, el pixel correspondiente a la región del Chaco presenta algunas anomalías relativamente grandes al final del periodo de estudio, aunque la tendencia general es negativa y estadísticamente significativa.

Figura 18 Series temporales de las anomalías mensuales correspondientes a los cuatro pixeles de la tabla 8.



Nota: La línea punteada representa dicha tendencia lineal en el periodo indicado. La latitud y longitud del centro de cada pixel, así como la tendencia lineal (en mm por década) se muestran en cada gráfico.

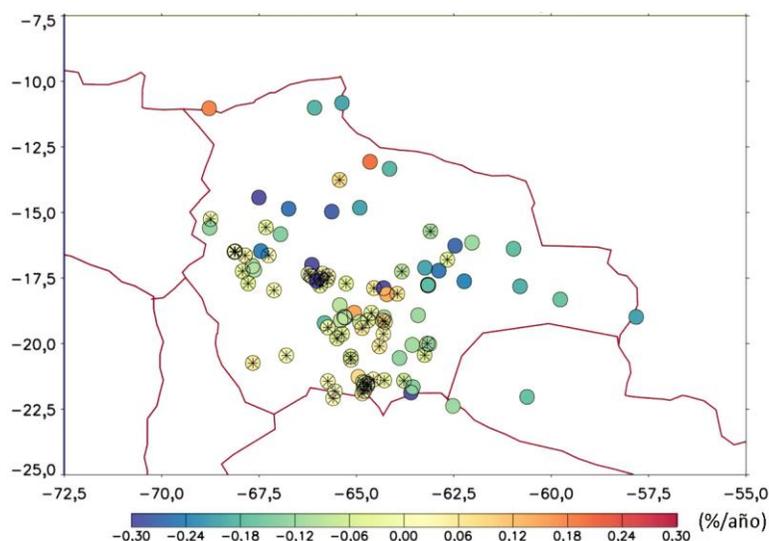
Para ver cuán razonables son las tendencias lineales calculadas para el set de datos producido a partir de datos del reanálisis, se procedió a calcular las tendencias relativas obtenidas de las observaciones descritas en la sección 2.1. La figura 19 muestra geográficamente dichas tendencias. En este caso, cada círculo representa la localización de las estaciones, y los colores dentro los mismos la tendencia en porcentaje por año. Las cruces dentro de los círculos indican que las tendencias no son estadísticamente significativas. Se observa que un número relativamente alto de estaciones cae dentro de esta categoría. Se ve, además, que en la zona oriental de Bolivia hay un porcentaje alto de estaciones con tendencias moderadamente negativas lo cual es consistente, al menos en términos relativos, con lo observado en la figura 17. Se debe puntualizar que existen también algunas estaciones con tendencias negativas relativamente altas (círculos llenos de color azul) que sugieren que las observaciones muestran tendencias, en valor absoluto, un poco más altas.

Las tendencias en la zona altiplánica son casi todas estadísticamente no significativas (los colores indican que son relativamente bajas), aunque la falta de cobertura espacial hace difícil un análisis más claro con este set de datos. Tal vez el hecho más notable es que algunos datos correspondientes a la región del Chapare sugieren una tendencia negativa en este caso. La estación La Jota en Chimoré (Chapare) registra históricamente los valores más altos de precipitación en Bolivia y es a su vez la que muestra una tendencia

negativa aunque otras estaciones cercanas no muestran tendencias estadísticamente significativas. Otra diferencia interesante entre los datos observacionales y los producidos en este trabajo es la existente en la región del Beni (San Borja, Rurrenabaque, San Ignacio de Moxos y Trinidad, por ejemplo).

En los datos en malla, la región no muestra tendencias estadísticamente significativas mientras que los datos observacionales muestran tendencias negativas espacialmente coherentes. Sin embargo, se debe indicar que estaciones situadas al norte de las mencionadas anteriormente muestran tendencias positivas. En este sentido es importante recordar que los datos observacionales no fueron homogenizados y solo pasaron un primer control de calidad, por lo que las tendencias obtenidas deberían ser usadas de manera referencial solamente. Dicho esto, las tendencias observacionales muestran coherencia espacial con los datos en malla obtenidos a partir de datos del reanálisis, aunque parecen ser más altos en valor absoluto. Se necesita un tratamiento más cuidadoso de los datos observacionales para verificar estos resultados.

Figura 19. Tendencias relativas (anomalías/media) expresadas en porcentaje por año, 1979-2010



Los colores indican los valores de las diferentes tendencias. Las estaciones (ver sección 2.3) donde no se encuentran tendencias estadísticamente significativas están marcadas con un asterisco.

5.2 Estudio del periodo de lluvias

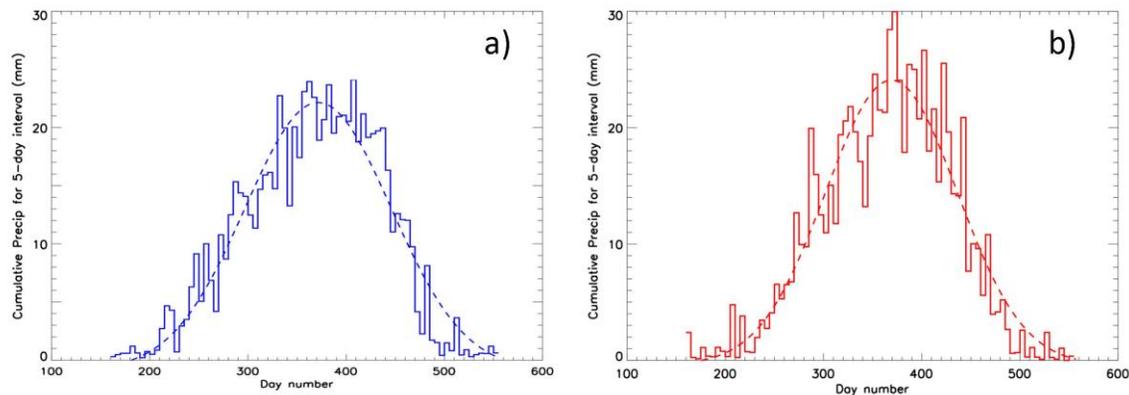
Una de las posibles consecuencias del incremento de la temperatura de la superficie del planeta es el probable cambio del ciclo hidrológico. En el caso de Bolivia, por su ubicación geográfica y por la dinámica de la circulación atmosférica regional se tiene un marcado periodo de precipitación que corresponde fundamentalmente a los meses de diciembre, enero y febrero (DEF) y un periodo con muy poca precipitación correspondiente a los meses de invierno: junio, julio y agosto (JJA). Los restantes meses son de transición entre estos dos periodos. Por tanto, la distribución estadística de precipitación en el país corresponde a una distribución unimodal. A fin de realizar el estudio de posibles cambios en la intensidad y duración del ciclo de precipitación, se estudian las funciones de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés). Estas funciones indican la distribución temporal de la precipitación en un determinado punto o área. En nuestro caso nos centramos en datos de tipo diario pero agrupados en periodos de cinco días (de aquí en adelante denominados “pentas”) a fin de mejorar la estadística.

Dado que el periodo de análisis va de 1979 a 2010 se decidió dividirlo en dos intervalos de 16 años cada uno. Al primero, que va de 1979 a 1994 se lo denomina genéricamente como *pasado* y al segundo intervalo, que comprende 1995 a 2010, se lo llama *presente*. El resultado de este ejercicio produjo histogramas como los desplegados en la figura 20. En ella se muestran histogramas para el pixel correspondiente a la cuenca de interés (ver tabla 8). Como puede verse, los histogramas muestran distribuciones de tipo gaussiano. Por este motivo se decidió, en ambos casos, ajustar una función de la siguiente forma:

$$f(x) = a_0 + a_1 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-a_2}{a_3} \right)^2} \quad (9)$$

donde a_2 representa el valor medio (típicamente simbolizado por μ), a_3 la dispersión característica de la distribución (la desviación estándar σ) y e es la base del logaritmo natural. En una primera aproximación, las funciones propuestas se ajustan razonablemente bien a los valores observados aunque pueden observarse ciertas asimetrías en los valores extremos. A pesar de esto, las curvas ajustadas nos sirven de guía para estimar la duración media de la temporada de lluvias en cada pixel de Bolivia. En este sentido, se tomó a la cantidad 2σ como un indicador de la duración promedio de la época de lluvias en los periodos pasado y presente.

Figura 20. Histogramas de precipitación acumulada en ventanas de cinco días para los periodos 1979-1994 y 1995-2010.

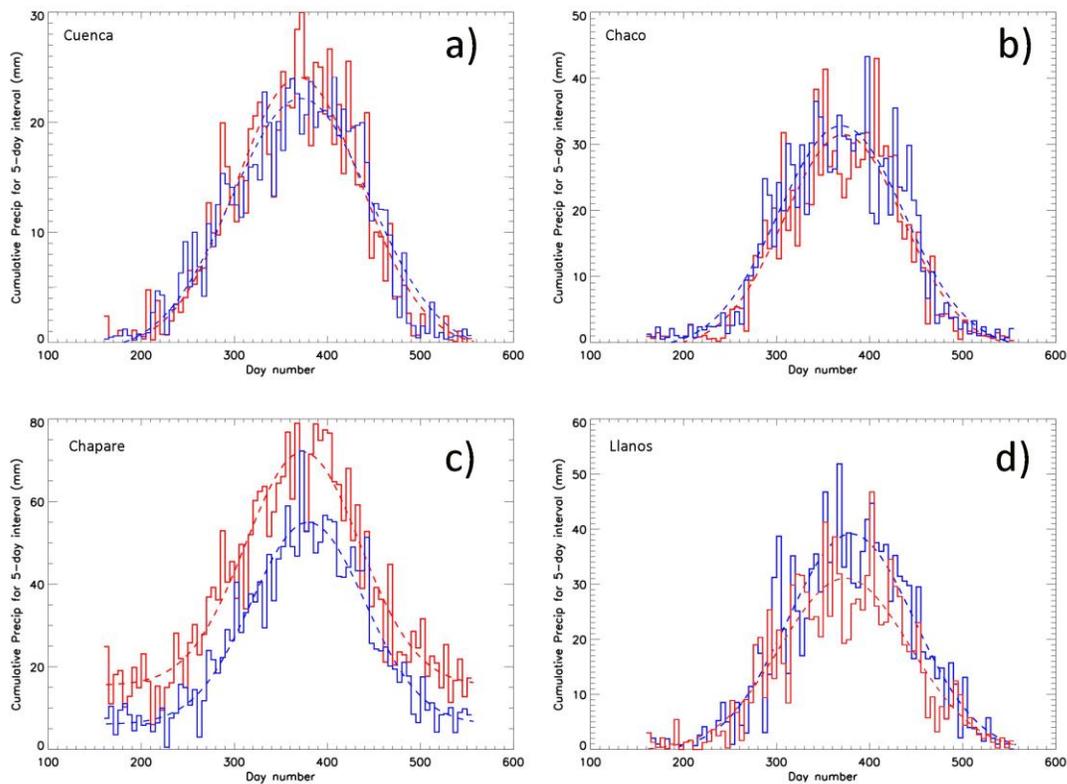


El panel (a) muestra el histograma correspondiente al periodo 1979-1994 (pasado), y el panel (b) muestra el histograma correspondiente al periodo 1995-2010 (presente). En ambos casos se ajustó la curva punteada (ecuación 9) a esos datos. Los valores en el eje x corresponden al número de día del año, por ejemplo 1 para el primero de enero y 365 para el 31 de diciembre. Adicionalmente, el análisis se realizó para el pixel centrado en $-16,125S$ y $-68,375O$, correspondiente a la cuenca de interés del proyecto.

La figura 20 muestra dos cosas interesantes: i) La precipitación parece más intensa en el periodo más reciente (1995-2010) que en el periodo 1979-1994; ii) La variabilidad parece mayor en el último periodo. A fin de explorar el comportamiento de las PDF en diversas regiones de Bolivia, se graficaron conjuntamente las distribuciones tanto del presente como del pasado para los mismos cuatro pixeles estudiados en la sección anterior (ver tabla 8).

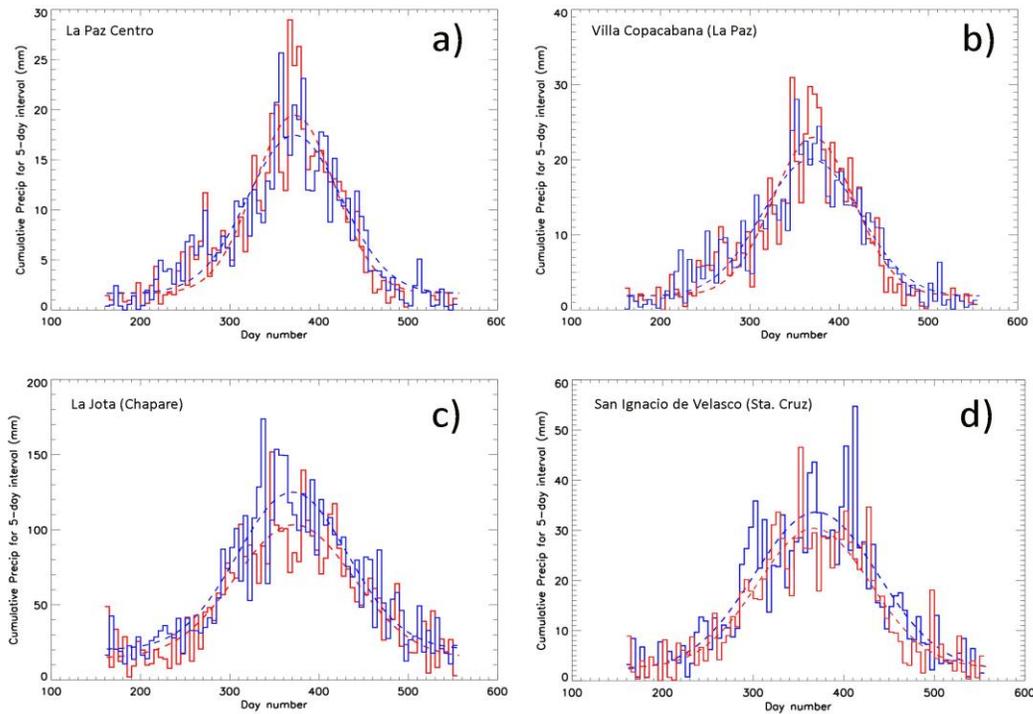
La figura 21 muestra en azul las PDF correspondientes al periodo 1979-1994 y en rojo aquellas referidas al periodo 1995-2010. En el caso del pixel correspondiente a la cuenca de interés (figura 21a) se observa una mayor precipitación en el periodo más reciente (alrededor 2 mm para el valor máximo), al mismo tiempo que el ajuste indica que la duración de la temporada de lluvias se habría acortado aproximadamente en 14 días respecto del periodo 1979-1994. Para el pixel denominado Chaco (figura 21b), se observa un ligero descenso en el máximo de la curva de ajuste (alrededor de 1 mm) y un acortamiento del periodo de lluvias en alrededor de 8 días. En el caso de los pixeles Chapare (fig. 21c) y Llanos (fig. 21d), el cambio en la duración del periodo de lluvias es menor a tres días, pero en el caso de Chapare se observa un claro incremento en el máximo de precipitación de alrededor de 17 mm, mientras que para el pixel localizado en los llanos se observa un descenso del máximo de la curva de ajuste en aproximadamente 8 mm.

Figura 21. Histogramas de precipitación acumulada.



A fin de analizar la confiabilidad de este análisis se decidió estudiar las PDF pero esta vez para datos observacionales (sección 3.1). La figura 22 muestra en azul las PDF correspondientes al periodo 1979-1994 y en rojo aquellas referidas al periodo 1995-2010. Se eligieron estaciones cercanas a los pixeles descritos en la tabla 8. En el caso de cuenca de interés se decidió usar dos estaciones situadas muy cerca de la misma y a la vez cercanas entre sí (separadas 2,7 km en línea recta). Las figuras 22a y 22b muestran los histogramas y curvas ajustadas para estas estaciones en los periodos pasado y presente. Ambas estaciones muestran una reducción del periodo de lluvias del orden de 16 días y un incremento del máximo de la curva de ajuste del orden de 2 mm entre el pasado y el presente.

Figura 22. Histogramas de precipitación acumulada.



Estos resultados son consistentes con los cambios observados en la región a partir del set de datos en malla producidos en el presente trabajo. Para la estación en los llanos, San Ignacio de Velasco orientales (-16,383S, -60,967O, 413msnm), la curva ajustada indica un descenso del máximo de la PDF en 4 mm entre el pasado y el presente. Este mismo ajuste indica una reducción en el periodo de lluvias de casi 12 días. Aunque el descenso en el máximo es consistente con los datos en rejilla, el cambio en el periodo de precipitación es más grande del obtenido de los datos en rejilla (que estaba en el orden de tres días) pero tiene, al menos, el mismo signo. Finalmente, en el caso de la estación en el Chapare (-16,995S, -66,143O, 254 msnm), se observa (fig. 22c) que el máximo en las PDF bajó 16 mm entre el periodo 1979-1994 y el más reciente entre 1995-2010.

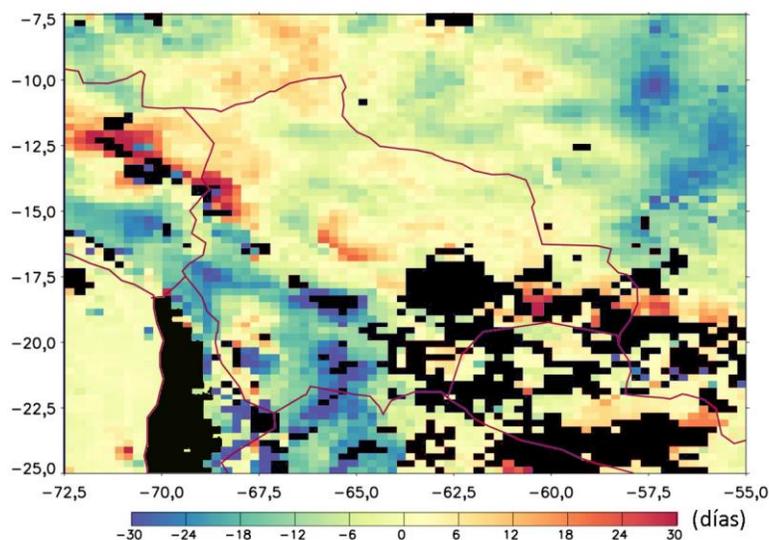
Este cambio tiene signo contrario, aunque casi la misma magnitud que el calculado para el pixel correspondiente a los datos en rejilla. En cuanto a la duración de la temporada de lluvias, el ajuste indica que este periodo se habría incrementado en aproximadamente 8 días entre el pasado y el presente. En este punto es importante recordar que las estimaciones obtenidas a partir del ajuste matemático a los histogramas tiene una incertidumbre asociada, la cual no fue estimada en el presente trabajo. El periodo relativamente corto (16 años para cada intervalo) hace difícil obtener una buena estimación de estas incertidumbres y por tanto saber si los cambios observados son estadísticamente robustos, pero al menos el análisis indica cualitativamente la dirección e intensidad de los cambios.

El análisis anterior mostró que los resultados obtenidos a partir de los datos en rejilla son en general coherentes con los que se obtienen de los datos de las diferentes estaciones de superficie. Eso nos permite ampliar con cierta confianza el cálculo de los cambios en la duración del periodo de lluvias. La figura 23 muestra estos cambios (en días) para cada pixel del dominio de interés (Bolivia). Existen algunos pixeles para los cuales el ajuste matemático no pudo ser realizado correctamente por lo que se decidió excluirlos del análisis y enmascararlos pintándolos de negro. Los resultados del ajuste sugieren que hubo una reducción de

la temporada de lluvias entre los periodos 1979-1994 y 1995-2010 en el Altiplano central y la región de los valles, siendo el cambio más importante, en parte, de los valles de Chuquisaca, Potosí y Tarija.

Del mismo modo, el análisis sugiere que existen cambios positivos relativamente pequeños (y probablemente no significativos desde el punto de vista estadístico) en toda la zona amazónica y en parte del Altiplano sur. Las zonas en las que aparentemente el periodo de lluvias se prolongó entre los dos periodos en consideración, corresponden a zonas bajas, una en la parte norte del departamento de La Paz, cerca de la frontera con Perú, otra en el Chaco cruceño cerca de la frontera con Paraguay, y otra en la zona del Chapare. En este último caso, los datos muestran un cambio relativamente brusco entre las regiones donde el periodo de lluvias se alargó y otras regiones donde se acortó. Esto podría explicar los resultados obtenidos en el párrafo anterior respecto de la estación La Jota y la información en malla.

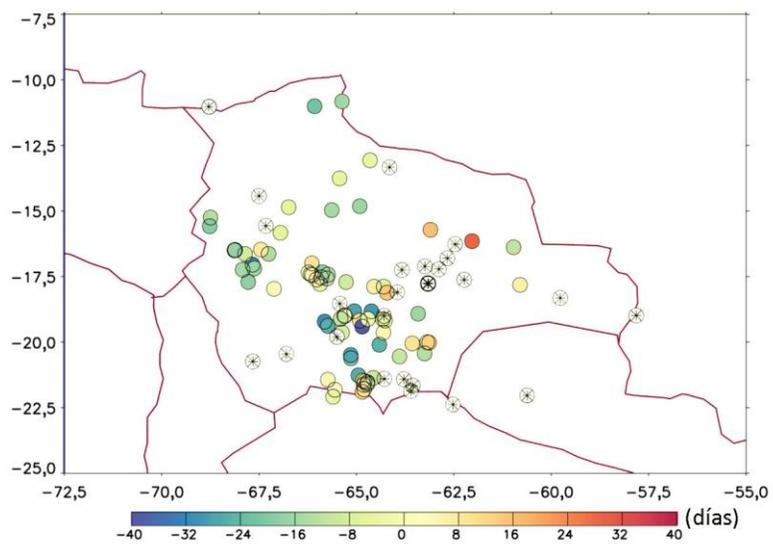
Figura 23. Cambios en el periodo de lluvias estimados a partir del ajuste (ecuación 9) a los histogramas obtenidos para cada pixel.



El cambio mostrado se define por $2(\sigma_{pres} - \sigma_{pas})$ con σ_{pres} la desviación estándar obtenida para el periodo 1995-2010 y σ_{pas} la desviación correspondiente al periodo 1979-1994. Las zonas marcadas en negro corresponden a pixeles donde el ajuste de la curva no pudo establecerse correctamente.

Finalmente, se computó el cambio de duración del periodo de lluvias para todas las estaciones usadas en este trabajo. Los resultados de este cálculo se muestran en la figura 24. Al igual que en el caso de los datos en rejilla, existen ocasiones en que el ajuste numérico a los histogramas no funciona correctamente. Las estaciones que sufrieron este problema están marcadas con un asterisco. Comparando estos resultados con aquellos mostrados en la figura 23, se observa que los resultados presentan una coherencia espacial razonable (es decir, los cambios ocurren en la misma dirección) para la mayoría de las estaciones. Ciertamente, existen estaciones que muestran un comportamiento diferente a los de los datos en rejilla, pero considerando que los datos observacionales no están homogenizados algo como esto es esperable.

Figura 24. Cambios en el periodo de lluvias observados a partir a los histogramas obtenidos para cada pixel.

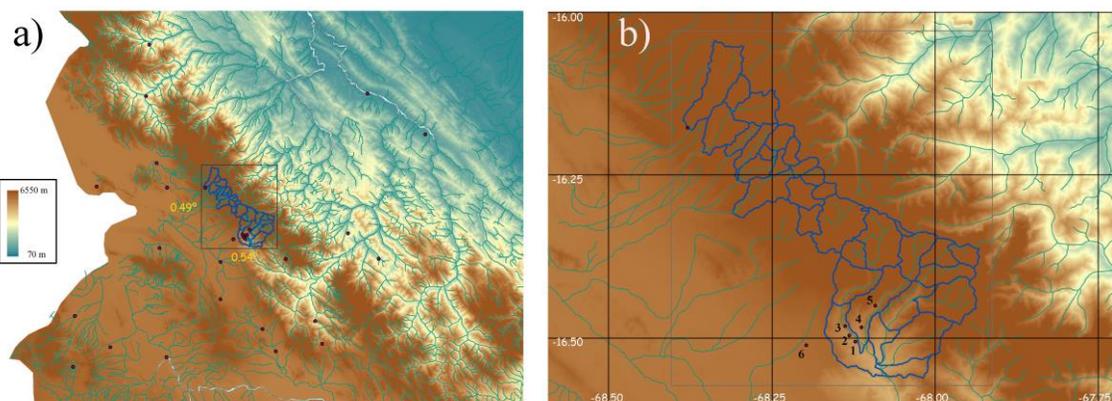


Los círculos con asteriscos corresponden a estaciones donde el ajuste numérico a la ecuación 9 no pudo realizarse correctamente.

6. Análisis de los datos en las cuencas de interés

La región de las microcuencas de interés para el presente proyecto se encuentra en un área relativamente pequeña de 0,5 x 0,5 grados de latitud y longitud respectivamente (ver figura 25). Existen muy pocas estaciones meteorológicas en la región; la mayoría cercanas a las ciudades de La Paz y El Alto en la parte sur de este grupo de microcuencas.

Figura 25. Área de interés del proyecto, cercanías de La Paz y El Alto



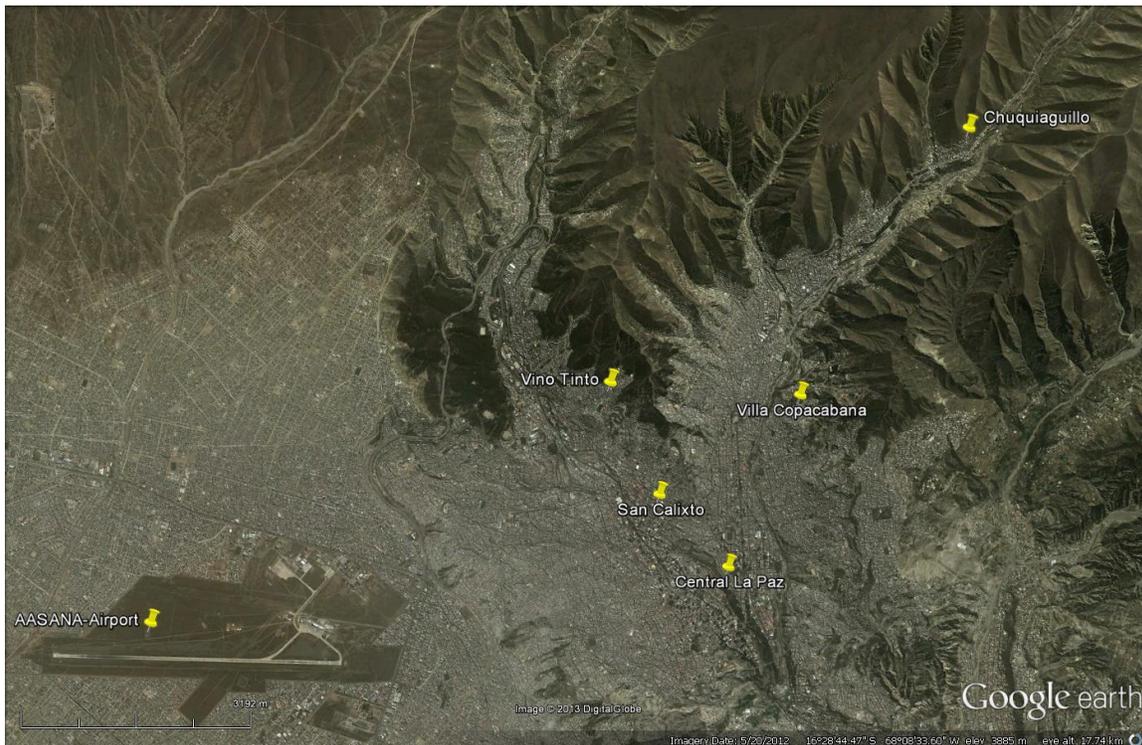
El panel (a) muestra la región del Altiplano central de Bolivia. Los colores indican la altura de superficie y el recuadro el área de las microcuencas involucradas en el proyecto. El panel (b) muestra el acercamiento de la región de las microcuencas de interés. La localización de las estaciones meteorológicas usadas en este estudio está señalada por los círculos. Los números al lado de los mismos identifican las estaciones de la región (tabla 9). La malla indica el tamaño de cada pixel de los datos de precipitación y temperatura producidos en este trabajo. Los límites de las diferentes microcuencas están dibujados en azul. La información de altura de superficie se obtuvo del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia: <http://essm.tamu.edu/bolivia/> y la información de las microcuencas proviene del Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia.

Claramente, las estaciones meteorológicas capturan información muy local y es de esperarse que al momento de comparar la información colectada allí contra la información estimada, sea por instrumentos a bordo de satélites o del reanálisis, no exista una muy alta correlación. La figura 27 muestra la precipitación acumulada diaria, medida en la estación del Aeropuerto en la ciudad de La Paz y la precipitación acumulada diaria para el pixel que contiene dicha estación. Esta figura muestra claramente que los datos obtenidos a partir de los datos de CFSR-FIN no capturan los eventos de precipitación más altos como el ocurrido en 2002. Los datos CFSR-FIN sí captan la estacionalidad aunque producen muy poca precipitación durante la época seca (probablemente por la forma de estimar la precipitación diaria).

Tabla 11. Lista de estaciones en el área metropolitana de La Paz.

Pto.	Estación	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
1	Central La Paz	-16,504723	-68,123337	3.632
2	San Calixto	-16,495277	-68,132500	3.658
3	Vino Tinto	-16,480833	-68,138885	3.865
4	Villa Copacabana	-16,482779	-68,113884	3.680
5	Chuquiaguillo	-16,449720	-68,092499	4.024
6	Aeropuerto El Alto	-16,510279	-68,198608	4.071

Figura 26. Localización de las estaciones en el área metropolitana de La Paz (Tabla 11)



Fuente: Elaboración propia en base a imagen obtenida de Google Earth.

A fin de estimar mejor la variabilidad espacial y temporal de precipitación se analizó información de precipitación acumulada diaria en seis estaciones del área metropolitana de La Paz (tabla 11), que se hallan distribuidas en dos laderas: Central LP, San Calixto y Vino Tinto por un lado; Villa Copacabana y Chuquiaguillo por otro, y, en el Altiplano, la estación del Aeropuerto de El Alto. La figura 26 muestra la localización de dichas estaciones en una imagen satelital del área metropolitana de La Paz. La figura 28 muestra los valores de precipitación acumulada diaria para dichas localidades, para el periodo 1998-2010. Se observa una buena correlación temporal para los días con mayor precipitación entre las estaciones de la misma ladera (Central LP, San Calixto y Vino Tinto).

La correlación es menor con Villa Copacabana, que se encuentra en otra ladera aunque a tan solo 2,5 km de distancia horizontal aproximadamente de San Calixto. Sorprendentemente, cuando se analizan las correlaciones estadísticas (figura 29) los valores son relativamente bajos entre estaciones de la misma

ladera (0,322, 0,224, 0,291 para Central LP-San Calixto, Central LP-Vino Tinto y San Calixto-Vino tinto, respectivamente), pero se obtiene un valor alto entre San Calixto y Villa Copacabana (0,728). Lo raro es que las correlaciones entre Villa Copacabana-Central LP y Villa Copacabana-Vino Tinto no muestran diferencias estadísticas (0,327 y 0,328 respectivamente) respecto de las cinco estaciones de la región (excepto la estación del aeropuerto que se encuentra en la planicie de El Alto). La alta correlación encontrada entre San Calixto y Villa Copacabana, a pesar de que no hay una clara correlación temporal para días con alta precipitación, nos muestra la complejidad de analizar registros de precipitación en esta región. No existe un claro patrón de circulación atmosférica que permita entender esta alta correlación o la relativamente baja correlación con la estación situada en la misma ladera (Chuquiaguillo). Esto también sugiere de alguna manera que no debemos esperar altas correlaciones entre datos obtenidos de satélite o reanálisis y datos puntuales de superficie para regiones con compleja topografía. Es más, dado que los datos satelitales o de reanálisis estiman una especie de promedio de la región representada por el píxel (de 25 x 25 km aproximadamente en nuestro caso) es natural que los eventos con alta precipitación queden sub-representados, pues no es común tener sistemas tan grandes (especialmente hablando) en estas regiones.

Figura 27. Datos de precipitación acumulada diaria para la estación de "El Alto Aeropuerto" (obs) y los correspondientes al píxel que contiene dicha estación (CFSR-FIN), 1998-2010.

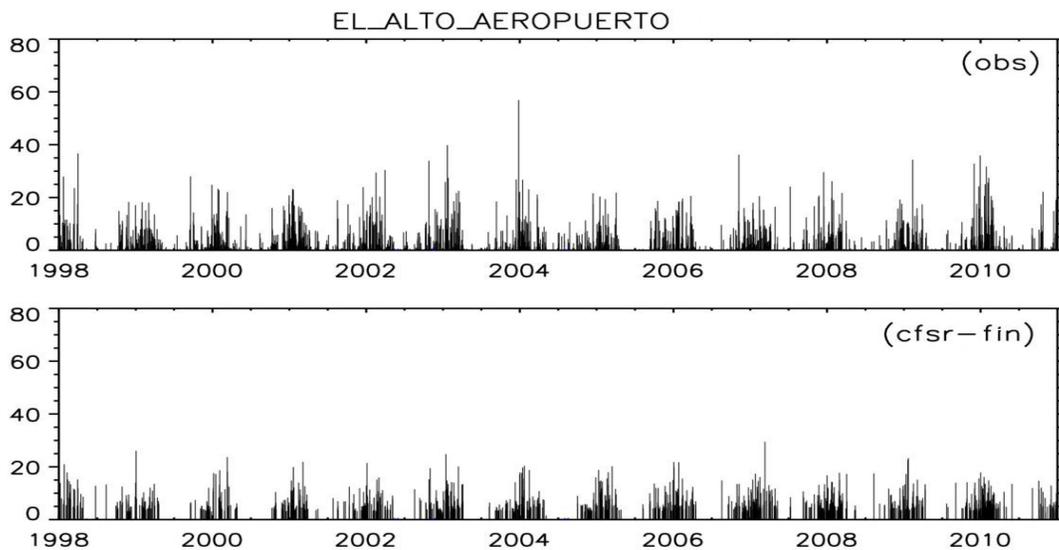
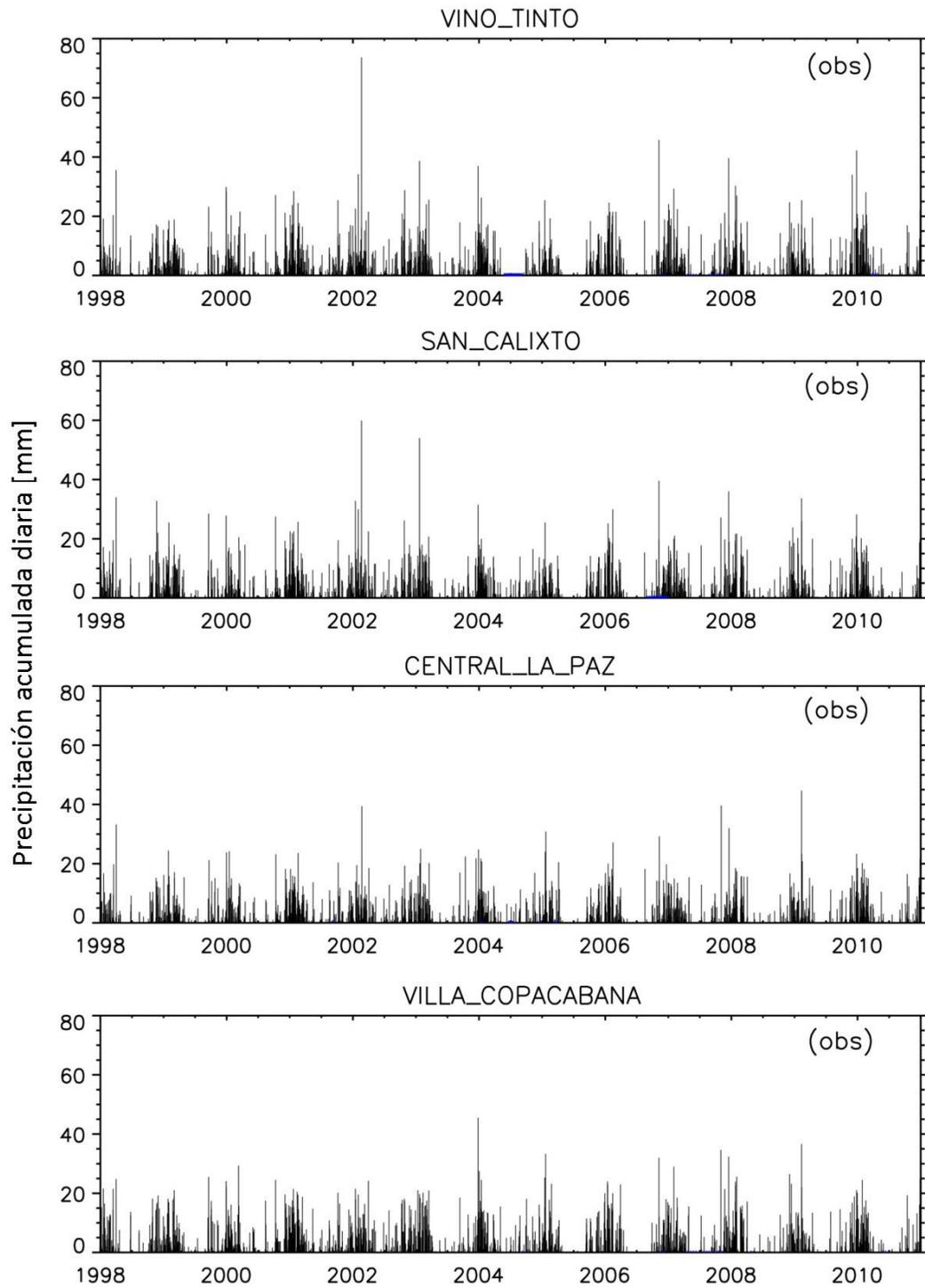
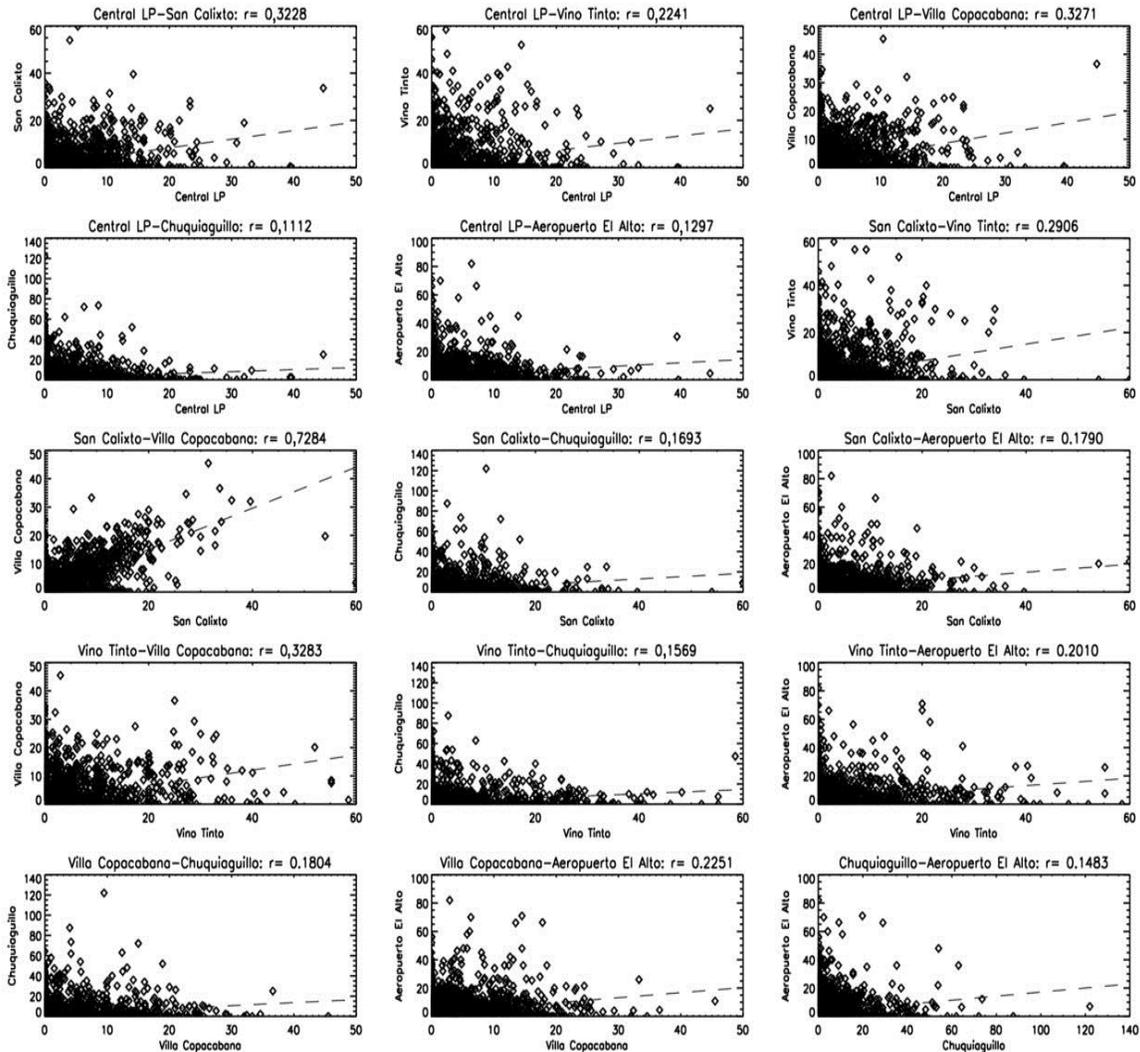


Figura 28. Datos diarios de precipitación acumulada para diferentes estaciones en la ciudad de La Paz, 1998-2010



Nota: Ver tabla 8 y figura 15 para detalles de la localización de las estaciones consideradas en la figura 28.

Figura 29. Correlaciones entre los valores de precipitación acumulada diaria para las estaciones en el área metropolitana de La Paz



7. Discusión y conclusiones

A raíz de la complicada topografía de Bolivia, el bajo número de estaciones de superficie para la extensión del territorio boliviano y la falta de continuidad temporal de mediciones en muchas de estas estaciones, se decidió usar tanto datos de satélite como datos del reanálisis. La gran ventaja de estos sets de datos es la cobertura espacial (básicamente todo el globo) y, en el caso del reanálisis, su cobertura temporal. Sin embargo, a pesar de los avances científicos y tecnológicos de los últimos 15 años, la resolución espacial (inicialmente a 2,5° y actualmente a unos 38 km de resolución horizontal) es todavía baja para varios de los requerimientos de ingeniería.

A pesar de esto, los datos obtenidos a bordo de satélites, así como los datos del reanálisis son muy valiosos para estimar y entender el comportamiento de varias variables meteorológicas. Sin embargo, a fin de poder aplicar estos datos a regiones como Bolivia, es necesario validar/corregir los mismos comparándolos con datos de superficie, que típicamente son datos “puntuales”. Por esto es importante tener en cuenta que tanto los datos de satélite como los datos del reanálisis, interpolados a 0,25° de resolución espacial, representan un valor medio en una región del tamaño del pixel (de una área de 25 km x 25 km = 625 km²

aproximadamente), mientras que los datos observacionales son datos puntuales que no necesariamente son representativos del pixel al que pertenecen.

De hecho, en el caso de precipitación esto es lo que sucede en regiones con gran gradiente altitudinal como la región de Andina en general y el área de interés del proyecto en particular (figura 25). En el caso de la temperatura, debido a que este es un parámetro que no varía espacialmente de manera brusca, las observaciones podrían ser más representativas del área del pixel obtenido a partir de información del reanálisis que en el caso de la precipitación. Dicho esto, es importante considerar que en regiones con fuertes gradientes altitudinales, la temperatura puede también variar fuertemente y entonces los valores de los pixeles corresponden solamente a un promedio de la temperatura en la región y, por tanto, se espera que existan diferencias entre estos datos y los observacionales.

Una ventaja de los datos del reanálisis es su consistencia interna. Esto evita que estos datos sufran de efectos de inhomogeneidad o saltos como podría acontecer en datos observacionales (Skansi et al., 2013), principalmente de superficie, donde cambios de instrumentación, lugar, o simplemente del entorno donde está ubicado el instrumento podrían modificar las lecturas de las estaciones. A este respecto es importante mencionar que idealmente los datos observacionales debieron haber sufrido un proceso de control de calidad y de homogeneización buscando puntos de quiebre (ver por ejemplo Seiler et al., 2013 y Skansi et al., 2013).

Los datos obtenidos cubren el periodo 1979-2010. Fueron ajustados a nivel mensual porque a ese nivel temporal los datos muestran la mayor coherencia espacial y temporal (Scheel et al., 2011). Los datos diarios, sin embargo, no muestran una alta correlación con los datos observacionales. Esto no significa, necesariamente, que los datos obtenidos no sean buenos, como se muestra en la sección 4 donde se explican los valores climatológicos para el periodo estudiado tanto para precipitación como temperaturas máximas y mínimas. La diferencia de representatividad espacial de los datos en malla y los datos puntuales puede explicar la falta de correlación entre los datos generados y los observacionales.

Por la misma razón, es razonable que los datos generados muestren el peor desempeño para valores mayores a 10 mm/día, pues típicamente valores altos de precipitación están asociados con precipitación convectiva (Insel et al., 2009, Schumacher & Houze, 2003) que típicamente no tiene extensión espacial muy alta en la zona de Bolivia (por la pronunciada topografía). Asimismo, es necesario tener en cuenta que en zonas cercanas que inclusive se encuentran a altitudes similares pero orientadas de distinta manera (a barbolento o sotavento), la precipitación puede ser dramáticamente diferente (Espinoza et al., 2009; Bookhagen & Strecker, 2008, Perry et al., 2013).

De hecho, un porcentaje importante de la lluvia en la zona Andina es precipitación estratiforme (Schumacher & Houze, 2003). Este hecho también puede afectar el ajuste realizado a los datos del reanálisis con datos observacionales, pues no se tiene la misma cantidad de estaciones a barbolento que a sotavento (Molina, 2013, comunicación personal). Esto implica que alguna de estas regiones debe mostrar una sobre o subestimación de los valores de precipitación. A pesar de esto, los datos producidos parecen tener valores razonables y pueden servir para generar datos a mayor resolución espacial.

En este trabajo se usaron los datos generados en malla para explorar tendencias y posibles cambios en precipitación en Bolivia. Particularmente, en el área de interés del proyecto se obtuvo que las tendencias lineales sean bajas, o no son estadísticamente significativas. A la vez, el análisis de los datos en malla como los datos observacionales sugiere que el periodo de lluvias en la misma región se ha acortado y que la intensidad de las precipitaciones se ha incrementado en los últimos 30 años, manteniendo el total de precipitación sin cambio apreciable. Los datos también indican que en la región del Altiplano sur, cerca de la

frontera con Chile, la precipitación se ha reducido de manera notable. No se tienen estaciones con registros largos en la zona que permitan validar estos resultados.

En este punto es importante mencionar que el estudio de tendencias es complejo y requiere mucho cuidado. Las tendencias podrían depender del periodo elegido para el análisis. Asimismo, debe considerarse la influencia de oscilaciones internas del sistema atmosférico como El Niño o la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés). Por ejemplo Seiler et al. (2012) encuentran que dependiendo de la fase de la PDO la precipitación podría mostrar tendencias positivas o negativas. Asimismo, si en el periodo de análisis se tienen intensos eventos, El Niño (o La Niña) las tendencias se podrían ver fuertemente influenciadas.

Por último, se debe reiterar que los datos generados representan píxeles de un área aproximada de 25 x 25 km². Esto implica que no se puede hacer una comparación directa entre datos obtenidos por estaciones meteorológicas, que proporcionan datos puntuales, y los datos generados en este trabajo. En términos de valores promedio, como la temperatura, se espera que en lugares planos, los valores coincidan de manera razonable. Esto es cierto aún en el caso de la precipitación. El problema surge en lugares con fuertes gradientes altitudinales donde en un área de 25 km x 25 km se pueden tener diferencias de cientos de metros en la altura de superficie, las cuales tienen temperaturas y, probablemente, precipitaciones muy diferentes. Este es el caso del área de interés del proyecto. Por este mismo motivo, es posible que los datos en malla no reproduzcan los eventos más extremos que se observan en las estaciones meteorológicas. Por ejemplo, la precipitación registrada en la estación La Jota, en el Chapare, es sistemáticamente más alta que la estimada en el píxel que engloba la misma. Por tanto, se debe tener especial cuidado al usar los datos en malla en este tipo de regiones.

8. Referencias bibliográficas

- Andrade, M.F. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: Validación de Modelos Climáticos*. C.E. Ludeña y L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 184, Washington, DC.
- BID y CEPAL. 2014. *La Economía del Cambio Climático en el Estado Plurinacional de Bolivia*. C.E. Ludeña, L. Sanchez-Aragon, C. de Miguel, K. Martínez, y M. Pereira (eds). Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 220 y Naciones Unidas LC/W.627.
- Bookhagen B. & M. R. Strecker, 2008. Orographic barriers, high-resolution TRMM rainfall, and relief variations along the eastern Andes, *Geo. Phys. Lett.*, 35, doi:10.1029/2007GL032011.
- Buarque D.C., R. C. Dias de Paiva, R. T. Clarke, and C.A. Bulhões, 2011. A comparison of Amazon rainfall characteristics derived from TRMM, CMORPH and the Brazilian national rain gauge network, *J. Geo. Res.*, 116, D19105, doi:10.1029/2011JD016060.
- Espinoza, J.C, J. Ronchail, J.L. Guyot, G. Cochonneau, F. Naziano, W. Lavado, E. De Oliveira, R. Pombosag and P. Vauchel, 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador), *Int. J. Climatol.*, 29: 1574-1594.
- Huffman, G.J., R.F. Adler, D.T. Bolvin, G. Gu, E.J. Nelkin, K.P. Bowman, Y. Hong, E.F. Stocker, D.B. Wolff, 2007. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. *J. Hydrometeorol.*, 8(1), 38-55.
- Insel N., C. J. Poulsen & T. A. Ehlers, 2009. Influence of the Andes Mountains on South American moisture transport, convection, and precipitation, *Climate. Dynamic*. DOI 10.1007/s00382-009-0637-1.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W.Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437-471.
- Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. van den Dool, R. Jenne, and M. Fiorino, 2001. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 247-267.
- Perry L.B., A. Seimon and Ginger M. Kelly, 2013. Precipitation delivery in the tropical high Andes of southern Peru: new findings and paleoclimatic implications, *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.3679.
- Saha, Suranjana, and Coauthors, 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1015.1057. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1
- Scheel, M. L. M., M. Rohrer, Ch. Huggel, D. Santos Villar, E. Silvestre, and G. J. Huffman, 2011. Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 2649-2663.
- Schumacher, C. and R.A.Houze, 2003. Stratiform Rain in the Tropics as Seen by the TRMM Precipitation Radar, *J. Clim.*, 16, 1739-1756.
- Seiler, C., R. Hutjes, and P. Kabat, 2012. Climate Variability and Trends in Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. doi:10.1175/JAMC-D-12-0105.1.

ANEXO 1. Estaciones con información de precipitación, temperatura mínima y máxima (porcentaje).

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Precipitación (%)	T min (%)	T max (%)
Abapo	-18,916666	-63,416668	440	98,6		
Achiri	-17,211668	-68,999443	3.880	92,5		
Anzaldo	-17,783611	-65,932777	3.032	95,1		
Arani	-17,573612	-65,754448	2.767	94,3	94,2	94,1
Asencion_De_Guarayos	-15,716666	-63,099998	247	98,8		
Ayo_Ayo	-17,094168	-68,008331	3.888	98,8	98,3	98,2
Azurduy	-20,100555	-64,410004	2.530	90,5		
Belen	-16,016388	-68,697777	3.833	94,3	93,0	92,3
Berenguela	-17,338890	-69,241661	4.120	93,2		
Boyuiibe	-20,433332	-63,250000	800	91,1		
Calacoto	-17,276945	-68,633888	3.826	99,1	99,1	99,0
Camata	-15,248334	-68,744995	2.250	99,6		
Camiri_Aeropuerto	-20,049999	-63,566666	810	96,1	95,2	95,7
Canas	-21,900000	-64,849998	2.406	94,7		
Capinota	-17,710001	-65,265274	2.030	99,4		99,0
Central_La_Paz	-16,504723	-68,123337	3.632	99,8	99,7	99,4
Central_Santa_Cruz	-17,783333	-63,166668	416	100,0	99,8	99,8
Chinoli	-19,633333	-65,366669	3.450	98,2		
Chuqui_Chuqui	-18,820835	-65,054169	1.775	98,8		
Chuquiaguillo_Lp	-16,449720	-68,092499	4.024	99,4		
Circuata	-16,637222	-67,252220	2.012	91,5		
Cobija_Aeropuerto	-11,026944	-68,779724	235	98,9		93,2
Cochabamba_Aeropuerto	-17,416111	-66,174438	2.548	99,0	98,9	98,9
Coimata	-21,499166	-64,788887	2.027	96,9		
Colcha_K	-20,736668	-67,658333	3.780	90,1		
Collana	-16,900278	-68,281670	3.911	99,9	99,5	99,6
Colomi	-17,336111	-65,870834	3.309	93,1		
Comarapa	-17,883333	-64,550003	1.614	92,7		
Concepcion_Sc	-16,150000	-62,033333	497	98,7	97,7	
Copacabana	-16,169167	-69,088615	3.815	98,6	98,6	97,0
Covendo	-15,830000	-66,949722	500	96,8		
EL_Alto_Aeropuerto	-16,510279	-68,198608	4.071	99,8	99,7	99,1
EL_Tejar_Tarija	-21,543055	-64,721115	1.859	97,5	97,3	97,3
EL_Villar	-19,631111	-64,306946	2.080	93,1		
Florida	-17,883333	-64,300003	570	99,7		
Guayamerin_Aeropuerto	-10,823889	-65,369446	130	98,1		91,1
Hichucota	-16,176666	-68,381111	4.460	91,7	92,0	
Huarina_Cota_Cota	-16,176111	-68,630554	3.838	99,1	93,5	96,0
Irupana	-16,473057	-67,452774	1.946	99,2	98,9	98,7
Juntas	-21,799999	-64,800003	1.900	100,0		
La_Jota_(Chimore)	-16,995001	-66,143051	254	91,8		
La_Tamborada	-17,448610	-66,135551	2.597	96,1		
La_Torre	-20,615833	-65,140831	2.420	96,4		
La_Violeta	-17,347223	-66,231667	2.614	99,2	98,7	98,7
Luribay	-17,042500	-67,666664	2.510	97,5		94,4
Magdalena	-13,333333	-64,150002	141	98,0	97,1	94,6
Mairana	-18,100000	-63,950001	1.350	97,7		

Mataral	-18,116667	-64,216667	1.400	99,7		
Mcal_Estigarribia_Paraguay	-22,030556	-60,618889	167	98,0		
Minero_(Unagro)	-17,110001	-63,241669	245	98,2		90,1
Mision_La_Paz_Argentina	-22,377222	-62,523056	247	98,6		
Mojo	-21,816668	-65,550003	3.400	94,5	94,0	94,0
Muyuquiri	-20,491388	-65,146667	3.120	91,1		
Narvaez	-21,400000	-64,283333	1.800	99,5		
Nuevo_Mundo	-18,996111	-64,292778	2.220	99,7		
Okinawa_I	-17,216667	-62,883335	252	99,7		
Oruro_Aeropuerto	-17,966667	-67,116669	3.702	99,5	98,8	99,1
Palmar_Chico	-21,866667	-63,599998	570	91,4		
Palos_Blancos_Tja	-21,414999	-63,781387	763	98,1		
Patacamaya	-17,238611	-67,923050	3.793	98,7	98,6	98,5
Pinaya	-16,638332	-67,858330	3.780	99,4		
Poroma_Ch	-18,534166	-65,425827	2.300	99,6		
Potosi_Los_Pinos	-19,583334	-65,750000	3.950	98,3	98,3	98,3
Puerto_Suarez	-18,983334	-57,816666	234	99,5	98,7	98,5
Puna	-19,799999	-65,500000	3.420	92,6		
Punilla	-18,983334	-65,308334	3.300	99,6		
Quiabaya	-15,583333	-68,766670	3.470	93,8		
Redencion_Pampa	-18,825001	-64,616112	2.460	99,2	98,4	98,9
Riberalta	-11,006667	-66,074440	141	98,5	95,5	95,9
Robore	-18,316668	-59,766666	277	99,6	98,9	99,3
Rosario_Del_Ingre	-20,548889	-63,893612	820	96,6		
Rurrenabaque_Aeropuerto	-14,428889	-67,502777	204	97,4	96,3	95,2
Sachapera	-21,660555	-63,550556	619	95,3		
Salla	-17,190277	-67,620834	3.500	96,0		
San_Andres	-21,623333	-64,815002	1.987	99,7		
San_Antonio_Sc	-20,000000	-63,183334	600	92,7		90,3
San_Benito	-17,528610	-65,904724	2.710	92,5	91,5	
San_Borja	-14,857223	-66,739998	194	95,2	93,3	93,9
San_Calixto	-16,495277	-68,132500	3.658	93,3		
San_Francisco_Sc	-20,016666	-63,133335	580	91,9		
San_Ignacio_De_Moxos	-14,966666	-65,633331	160	91,4		
San_Ignacio_De_Velasco	-16,383333	-60,966667	413	99,4	97,2	97,4
San_Jacinto_Sud	-21,610279	-64,720001	1.820	98,9		
San_Javier	-16,266666	-62,466667	234	99,3	96,4	96,0
San_Joaquin	-13,066667	-64,650002	139	95,7		
San_Jose_Alto	-17,704445	-67,778618	3.746	93,1		
San_Jose_De_Chiquitos	-17,816668	-60,799999	284	99,6	91,1	90,7
San_Juan_De_Yapacani	-17,250000	-63,833332	350	96,7		
San_Julian	-16,799999	-62,666668	305	97,7		96,4
San_Pablo_De_Lipez	-21,683332	-66,616669	4.230	97,1		
Santa_Ana	-13,758333	-65,432220	144	94,3	91,6	94,0
Santiago_De_Machaca	-17,008612	-69,230003	3.874	99,8		97,3
Sapecho	-15,565556	-67,324997	410	95,8		
Sucre_Aeropuerto	-19,009722	-65,293892	2.904	100,0	99,8	99,8
Talula_Tako_Tako	-19,110001	-65,405281	2.859	99,8		
Tarabuco	-19,180555	-64,913338	3.284	94,8		
Tarata	-17,608612	-66,022781	2.775	99,7		99,6
Tarija_Aeropuerto	-21,533333	-64,716667	1.875	99,9	99,6	99,6
Tiawanacu	-16,568611	-68,678329	3.863	98,9	93,7	94,4

Tinquipaya	-19,216667	-65,816666	3.200	97,3		
Tiraque	-17,425278	-65,724442	3.304	97,7	97,4	97,3
Tomayapo_Pueblo	-21,266666	-64,949997	2.720	92,2		
Tres_Cruces	-17,622223	-62,232502	271	90,3		
Trinidad_Aeropuerto	-14,818334	-64,913338	156	99,1	98,8	98,9
Trompillo_Aeropuerto	-17,750000	-63,166668	413	99,4	99,0	99,3
Tucumillas	-21,466667	-64,833336	2.560	100,0		
Tupiza	-21,433332	-65,733330	2.956	92,3	92,0	92,0
Urriolagoytia	-19,169722	-64,264168	1.980	99,7		
Uyuni	-20,450001	-66,800003	3.669	95,8	95,4	94,7
Vallecito	-17,766666	-63,150002	398	97,5		
Viacha	-16,658333	-68,281944	3.850	95,4	92,2	90,7
Villa_Copacabana	-16,482779	-68,113884	3.680	97,3		
Villa_Serrano	-19,118334	-64,322502	2.108	96,3		
Villazon	-22,083334	-65,599998	3.443	96,8		
Vina_Quemada	-19,408333	-64,852776	3.865	96,4		
Vino_Tinto	-16,480833	-68,138885	2.030	99,1		
Yacuiba_Aeropuerto	-22,016666	-63,700001	580		95,4	96,2
Yesera_Norte	-21,366667	-64,566666	2.200	91,9		
Yocalla	-19,383333	-65,733330	3.450	96,9	97,2	97,2
Zudanez	-19,118889	-64,703331	2.475	99,9	98,6	



www.iadb.org/cambioclimatico

Síguenos en twitter @BIDcambioclima