

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**PATRONES ESPACIALES DE PRECIPITACIÓN EN CHILE CENTRAL:
UNA INVESTIGACIÓN PRELIMINAR**

**MARK FALVEY¹
RENÉ GARREAUD²**

RESUMEN

Se examina la distribución espacial de la precipitación en Chile central (32°S – 35°S) utilizando una combinación de técnicas tradicionales y nuevas, incluyendo el análisis de datos obtenidos de una densa red de pluviómetros suplementados con datos fluviométricos, y campos espaciales de precipitación basados en datos de un radar satelital (TRMM) y un modelo numérico de pronóstico del tiempo (MM5). Se exploran el uso de estas fuentes de datos para detectar regiones de intensificación y disminución de la precipitación que se asocian con los rasgos topográficos de la zona. Se discuten las ventajas y desventajas de cada una de las metodologías probadas.

¹ Investigador Post-doctorado, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile

² Profesor Asociado, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile

1. INTRODUCCIÓN

La distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas es difícil de medir, pero de gran importancia para el manejo de recursos hídricos y el seguimiento/pronóstico de crecidas. La dificultad se produce por la falta de accesibilidad en áreas de topografía compleja, lo cual impide la instalación de redes pluviométricas de alta densidad, y por la alta variabilidad espacial del campo de precipitaciones en estas regiones.

En este trabajo se emplean varias fuentes de datos en un intento preliminar para documentar con gran detalle la distribución espacial de la precipitación en Chile central (32°S-35°S), con énfasis en la detección de la posible influencia de la cordillera de la costa y de los Andes. En adición a los datos tradicionales obtenidos de pluviómetros y fluviómetros, se examina el potencial de dos tecnologías recientes para determinar la distribución de la precipitación. La primera corresponde a los datos del primer radar espacial TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) que provee una oportunidad sin precedentes para conocer la estructura tri-dimensional de la precipitación en lugares donde no existen radares meteorológicos convencionales. La segunda tecnología corresponde a modelos numéricos de la atmósfera, que proveen un diagnóstico y pronóstico de la precipitación sobre un dominio limitado pero con alto nivel de resolución espacial.

La estructura de este trabajo es la siguiente. En la sección 2 se describen sucintamente los aspectos climatológicos más relevantes de Chile central. En la sección 3 se examinan las características espaciales de la precipitación sobre la base de datos de una densa red de pluviómetros, complementada con algunas estaciones fluviométricas en valles andinos. En las siguientes dos secciones (4 y 5) se examinan las características de la precipitación derivada de TRMM y del modelo MM5 de pronóstico numérico del tiempo, comparándolas con las observaciones in-situ de precipitación, y enfatizando sus ventajas y limitaciones.

2. ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS

La precipitación en Chile central es un fenómeno casi exclusivamente invernal, con cerca del 92% de la precipitación anual concentrada entre Abril y Septiembre. La precipitación es generalmente de tipo frontal (e.g., Rutllant and Fuenzalida 1991), concentrada en bandas de lluvia/nieve de unos 50-100 km de ancho, y orientadas entre 30°-60° con respecto al eje norte-sur de la cordillera de los Andes. Durante estas tormentas de invierno, prevalece un flujo de aire húmedo desde el nor-oeste en niveles bajos y medios de la tropósfera, lo que indica la posibilidad de un incremento localizado de la precipitación debido al ascenso forzado sobre la ladera andina.

La altura de la línea de nieve durante las tormentas invernales varía típicamente entre 2000 y 3000 m, con un valor promedio cercano a los 2400 m (Garreaud 1993). Así, la mayor parte de la precipitación sobre la cordillera de los Andes ocurre en forma de nieve, con excepción de los sectores medios de los valles cordilleranos. En contraste, la precipitación sobre la cordillera de la costa es casi exclusivamente pluvial.

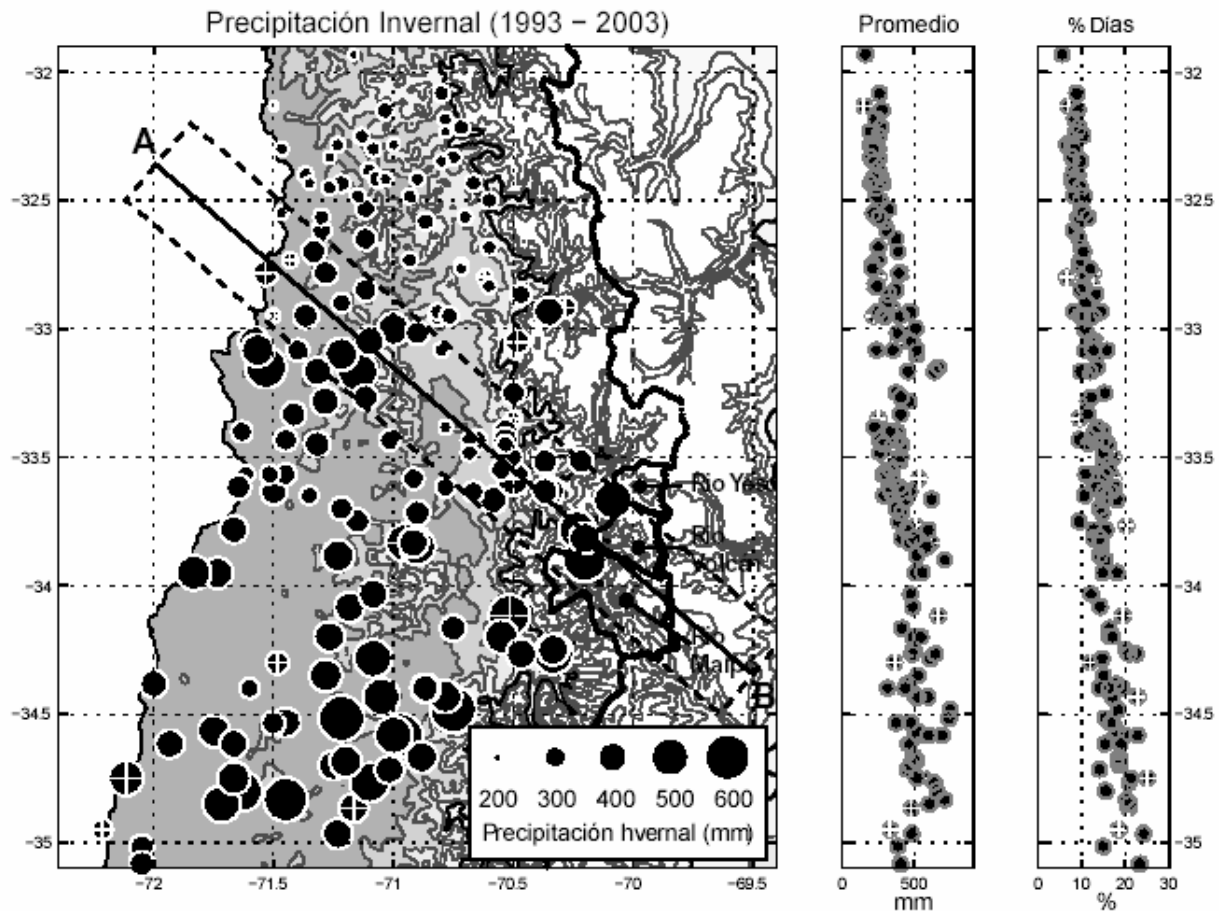


Figura 1. Precipitaciones promedio invernales derivadas de datos pluviométricos. El diámetro del círculo indica el valor de precipitación acumulada. Contornos grises indican la altura de la topografía con intervalos de 500 m. La línea punteada muestra la frontera de Chile con Argentina, que aproximadamente sigue la fila más alta de la cordillera de los Andes. También se muestran el transecto AB y las tres cuencas del cajón del Maipo (Yeso, Volcán y Maipo). Los paneles de la izquierda muestran la variación de R_w y R_f con la latitud de las estaciones pluviométricas

3. DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y FLUVIOMÉTRICOS

La principal fuente de datos empleada en esta sección consiste en 11 años (1993-2003) de observaciones diarias (registrada a las 08:00 HL) de lluvia en 95 estaciones en Chile central operadas por la Dirección General de Aguas (DGA). Adicionalmente, valores diarios fueron obtenidos desde 30 pluviómetros operados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) durante 5 años (1993, 2000, 2001, 2002 y 2003). Aunque la red combinada DGA+DMC alcanza una densidad razonable sobre la mayor parte del área de estudio (Figura 1, panel izquierdo), las mediciones son insuficientes sobre varios rasgos topográficos, incluyendo la mayoría de las zonas altas de la cordillera de la costa. La cobertura de datos es especialmente pobre en la cordillera de los Andes, donde la mayoría de las estaciones se encuentran en valles o cañones cordilleranos por debajo de los 1500 m. Solo una estación, Embalse El Yeso (2425 m), se encuentra sobre el nivel medio de la línea de nieves.

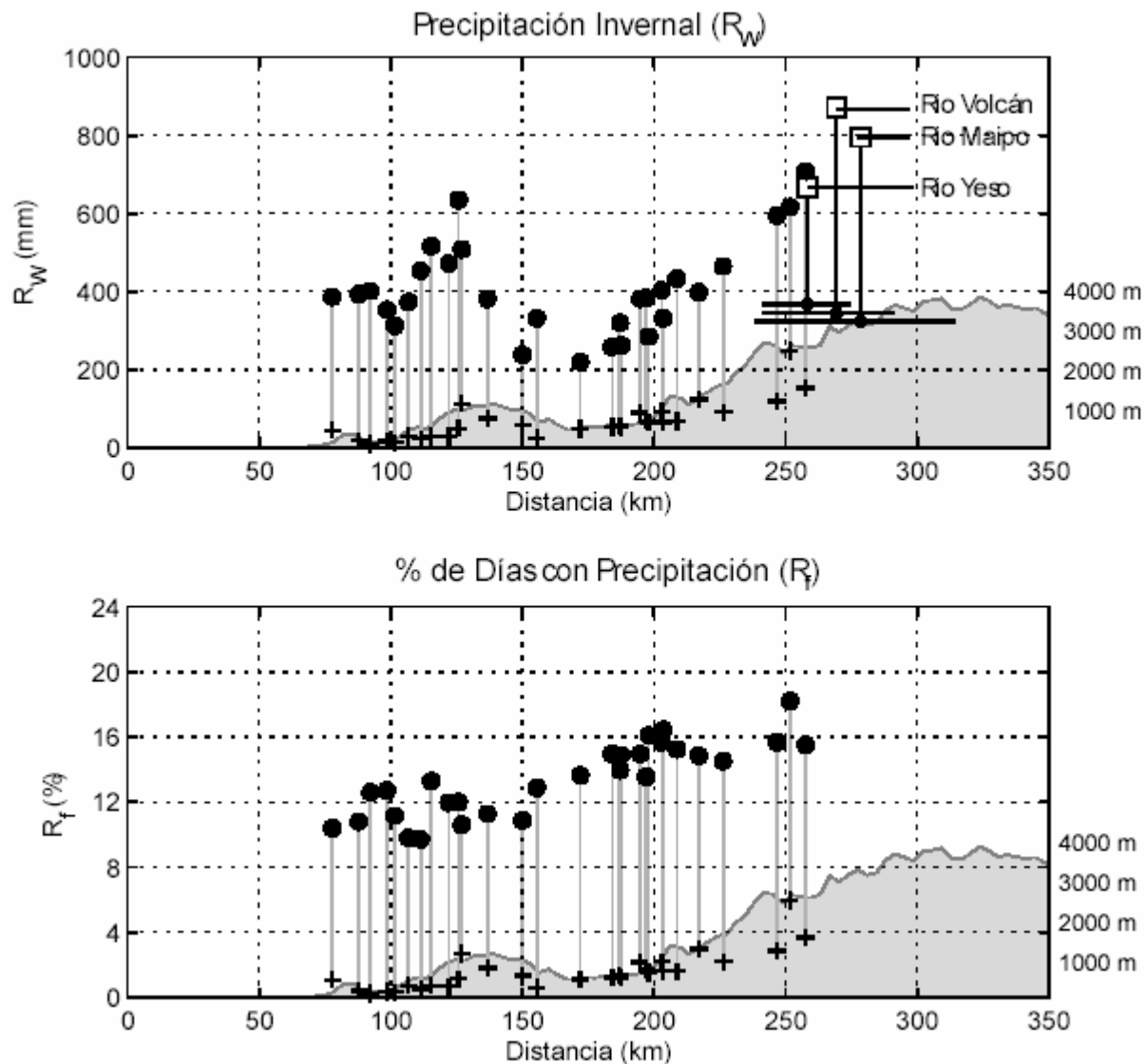


Figura 2. R_W (panel arriba) y R_f (panel abajo) sobre el transecto AB indicada en la Figura 1. El área gris representa la topografía promedio con la escala vertical que se encuentra a la derecha. Las alturas de las estaciones pluviométricas se indican con una cruz negra. Los cuadros blancos muestran las estimaciones de R_W en las cuencas de los ríos Yeso, Volcán y Maipo, cuyas dimensiones horizontales y alturas promedio se indican a través de las líneas horizontales y círculos pequeños, respectivamente.

En este trabajo se emplean dos indicadores de precipitación. Para cada estación, R_W es definida como la precipitación media invernal (Abril-Septiembre). R_f es el porcentaje de días de invierno con precipitación sobre 0.5 mm, lo cual provee una cruda estimación de la frecuencia de eventos de precipitación en las distintas estaciones. Además, para cada estación, la razón R_W / R_f puede interpretarse como un indicador de la intensidad media de la precipitación.

La Figura 1 muestra los valores de R_W en todas las estaciones. El rasgo más notable es un marcado gradiente norte-sur de la precipitación invernal. Entre 32° y 36°S, R_W se incrementa desde 200 mm a 500 mm. Este aumento es acompañado por uno similar en el porcentaje de días lluviosos (R_f : 10-20%), lo cual sugiere que el gradiente de R_W se relaciona básicamente con un aumento en la frecuencia de tormentas, debido a que los sistemas frontales tienden a afectar más frecuentemente la zona centro-sur del país.

Tabla 1. Información de fluviómetros utilizada para estimar precipitación en lugares altos de la cordillera de Los Andes.

Estación Fluviométrica	Latitud	Longitud	Altura (m)	Altura de Cuenca (m)	A (km ²)	Q (m ³ /seg)	R_W^* (mm/inv)
El Yeso en Embalse	33.67°S	70.08°W	2425	3670	353	8.1	666
Volcán en Queltehues	33.80°S	70.20°W	1365	3450	523	15.7	871
Maipo en las Melosas	33.83°S	70.20°W	1527	3220	1488	40.7	793

Las columnas *latitud*, *longitud* y *altura* refieren a la ubicación del fluviómetro. *Altura de la cuenca* es una estimación aproximada de la altura promedio de cada cuenca. *A* y *Q* son el área de la cuenca y el caudal anual del río, respectivamente. R_W^* es la precipitación promedio estimada por la ecuación $R_W^* = 0.92Q/A$

Debido a la irregularidad de la red de pluviómetros, la falta de observaciones sobre zonas montañosas, los posibles sesgos en los registros, y la inevitable presencia de influencias locales, es difícil discernir alguna evidencia de un fuerte control orográfico sobre la precipitación de invierno en esta región. En general, los valores de R_W registrados cerca de la costa son similares a aquellos registrados 150 km tierra adentro cerca de la base de la cordillera de los Andes. Sin embargo, evidencia de un efecto orográfico puede observarse al considerar las variaciones a lo largo de un transecto (AB) de 350 km indicado en la Figura 1, y alineado desde NW a SE que corresponde a la dirección predominantes del viento durante tormentas de invierno.

La Figura 2 (panel superior) muestra los valores de R_W como función de la distancia a lo largo del transecto AB. Sólo se han considerado datos de estaciones con más de 5 años de medición y que se encuentran a ± 25 km del transecto. Se observan claras variaciones de R_W en conexión con los rasgos topográficos más relevantes. En la vertiente oeste de la cordillera de la costa R_W varía entre 400-600 mm, con un leve aumento hacia las estaciones de mayor altura. Luego R_W decrece considerablemente hacia la cuenca de Santiago hasta valores cercanos a los 200 mm, indicando que esta área es afectada por una “sombra pluviométrica” causada por el descenso del aire en la vertiente occidental de la cordillera de la costa. Siguiendo el transecto desde la cuenca de Santiago hacia la precordillera y cordillera, R_W muestra un incremento lineal consistente con el gradiente de la topografía, sugiriendo un aumento orográfico de la precipitación. Los valores de R_W sobre las estaciones precordilleranas (600-700 mm) son solo levemente superiores a los registrados en la cordillera de la costa, pero casi tres veces superiores a los observados en la base de los Andes. La proporción de días de tormenta (Figura 2, panel inferior) muestra un débil

incremento desde cerca de 10% en la costa hasta 16% en la cordillera. Entonces, las variaciones sistemáticas de R_W reflejan una variabilidad en la intensidad media de la precipitación.

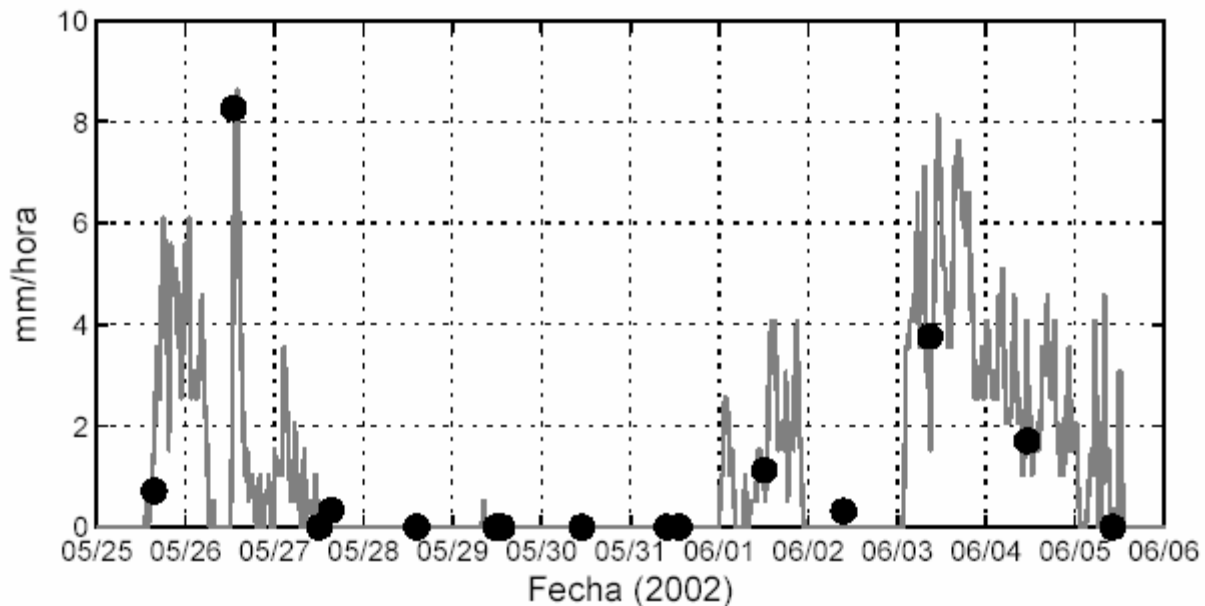


Figura 3. Comparación entre la precipitación superficial estimada por el radar TRMM (puntos negros) y observada por un pluviómetro en Santiago (línea gris). El instrumento se ubica en el techo del Departamento de Geofísica en la Universidad de Chile, donde se registran observaciones de lluvia acumulada cada 15 minutos.

La similitud entre los valores de R_W sobre la cordillera de la costa y la precordillera de Los Andes es sorprendente considerando la gran diferencia de altura entre ambas cordilleras. Sin embargo, esta similitud puede deberse a que los sectores altos (>2000 m) en los Andes no están cubiertos por la red de pluviómetros, y poco puede concluirse sobre la cantidad de precipitación sobre la línea de nieve. En esos sectores, datos fluviométricos presentan una alternativa interesante a la medición directa de precipitación. En un promedio climatológico (es decir, promedio durante varios años) la precipitación sobre una cuenca debe ser aproximadamente balanceada por el caudal del río que la drena, lo cual entrega una cruda pero informativa estimación del promedio espacial de la precipitación en Los Andes.

Aquí se han considerado tres cuencas andinas (Ríos Yeso, Volcán y Maipo), con alturas medias sobre los 3000 m (Figura 1). Usando datos en los puntos de control de cada cuenca (Tabla 1), la estimación de la precipitación promedio esta dada por $R_W^* = 0.92 Q/A$, donde Q es el caudal medio anual y A es el área de la cuenca. La ecuación se evalúa en unidades SI, no en las unidades que se muestran en Tabla 1. El factor 0.92 es aplicado para transformar el valor anual (Enero-Diciembre) al invernal (Abril-Septiembre). Estas estimaciones probablemente subestiman el valor real de R_W , debido a que parte de la precipitación sale de la cuenca en forma subterránea y a las pérdidas por evaporación/sublimación.

Los valores de Q , A y R_W^* para cada cuenca se presentan en la Tabla 1, y también se presentan en el transecto de la Figura 2. Pese a la simplicidad del método, las estimaciones fluviométricas R_W^*

son consistentes con las mediciones pluviométricas de R_w , y sugieren que el incremento de la precipitación media con la altura continua sobre la línea de nieve. Una simple extrapolación visual, sugiere que la precipitación invernal sobre las partes más altas de la cordillera de Los Andes alcanzaría unos 1000 m: cerca de 5 veces superior a la registrada en la cuenca de Santiago, y dos veces superior a la observada sobre la cordillera de la costa.

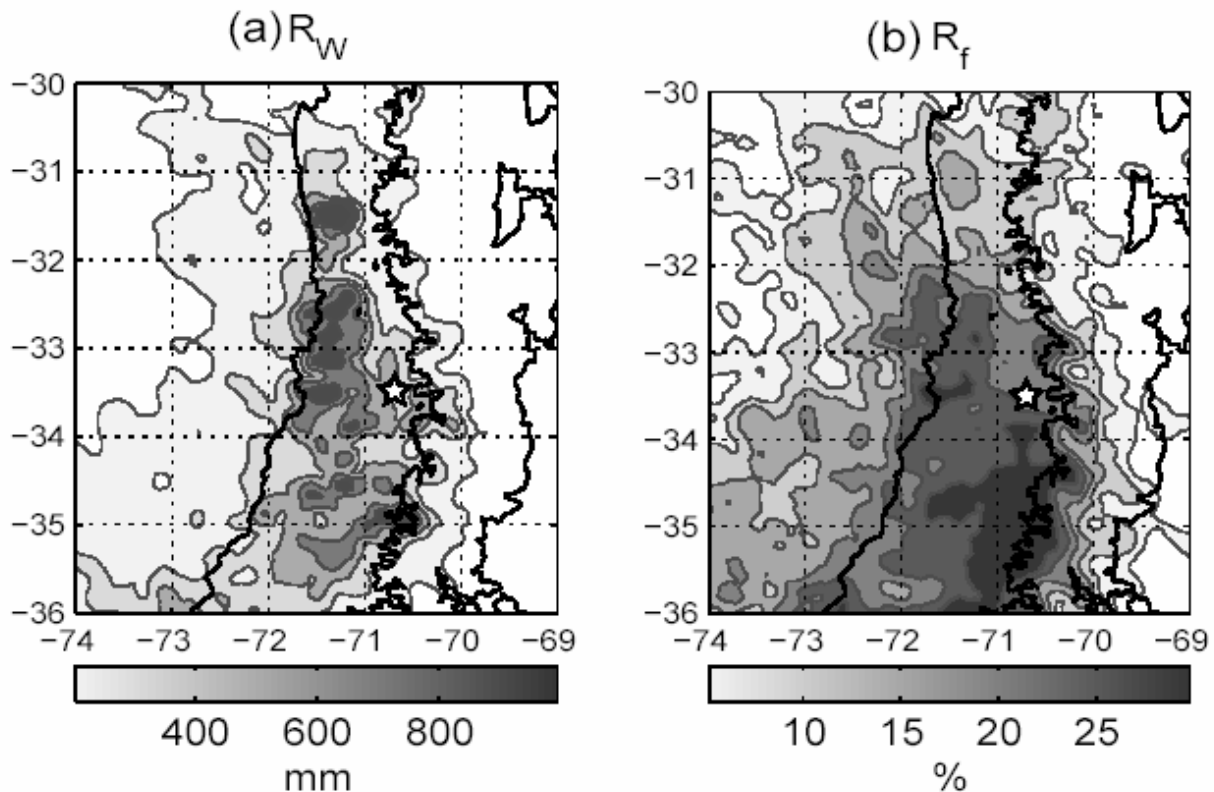


Figura 4. Mapas de contornos de R_w (panel a) y R_f (panel b) estimados de todas las imágenes de TRMM radar durante el invierno de 2002. En el panel a los contornos se dibujan cada 200 mm a partir de 100 mm. En el panel b, los contornos se dibujan con intervalos de 5% a partir de 5%. La estrella indica la ciudad de Santiago.

4. EL RADAR SATELITAL ‘TRMM’

En Noviembre de 1997 la NASA lanzó el satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*, Kummerow et al. 2000). Este satélite lleva todos los instrumentos que tradicionalmente han sido utilizados para estimar precipitación (sensores microonda, infrarrojo y visible) y además el primer radar meteorológico satelital. El radar de TRMM es un instrumento activo, que emite un pulso de frecuencia de radio (13.7 GHz) y luego registra el perfil de radiación reflejado por gotas de agua (y en un grado inferior, partículas de hielo) entre 250 m y 20 km sobre la superficie. Los perfiles de reflectividad permiten estimar precipitación superficial aún sobre regiones de topografía compleja como Chile central.

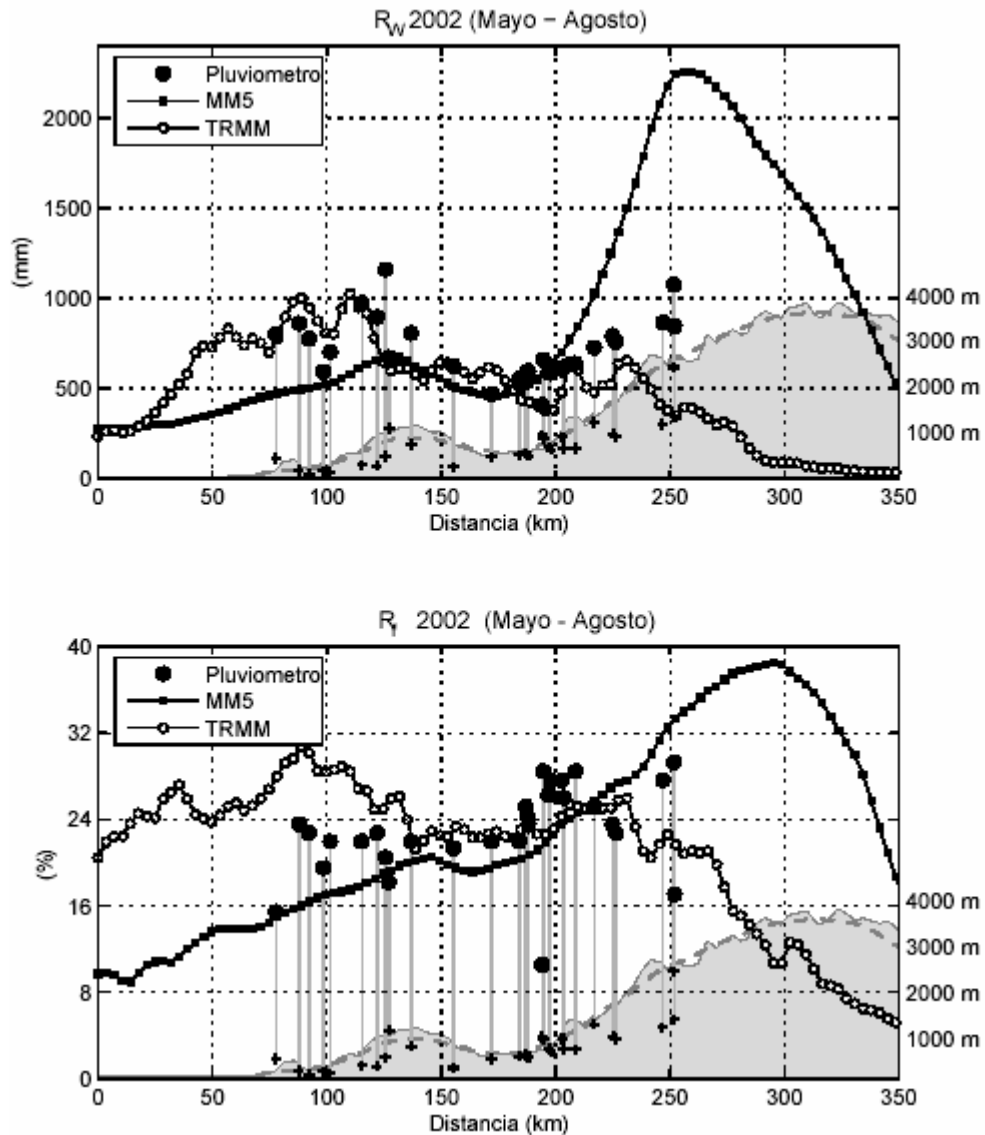


Figura 5. R_w (panel a) y R_r (panel b) sobre el transecto durante el invierno de 2002 estimadas por pluviómetro (círculos negros), TRMM radar (círculos blancos) y el modelo MM5 (cuadros negros). La topografía y las alturas de las estaciones pluviómetros se representa aquí como en Figura 2. La línea segmentada representa la topografía del modelo MM5.

El satélite TRMM gira aproximadamente 16 veces cada día sobre el planeta en una órbita baja (400 km de altura) diseñada para observar latitudes tropicales entre 36°N y 36°S . Se realizan mediciones tri-dimensionales de la reflectividad a lo largo de una banda de 250 km, con una resolución nominal de 5 km^2 . El radar de TRMM tiene algunas limitaciones importantes, incluyendo un muestreo temporal infrecuente (usualmente hay menos de una observación por día en un lugar particular) y la insensibilidad para detectar hidrometeoros sólidos (nieve, lluvia helada, etc.).

En esta sección se presenta una examen preliminar de las estimaciones de precipitación superficial de TRMM durante el invierno de 2002 (1 de Mayo al 31 de Agosto), interpoladas a

una grilla regular de resolución de 4 km² que cubre Chile central y sus alrededores. La buena calidad de TRMM se muestra en la Figura 3 mediante una comparación de la precipitación medida por un instrumento superficial (en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, Santiago) y la estimación correspondiente de TRMM durante algunos eventos de lluvia intensas en la zona.

Las Figuras 4a y 4b muestran mapas espaciales de R_W y R_f derivados de la base de TRMM. Donde la topografía es baja (< 2000 m) ambas cantidades son relativamente bien estimadas. La precipitación invernal maximiza sobre la cordillera de la costa, y disminuye considerablemente sobre el mar y hacia las partes más altas de la cordillera de Los Andes. En las Figuras 5a y 5b se compara R_W y R_f con las observaciones pluviométricas y TRMM sobre el transecto discutido en la sección anterior. La variación de R_W observada por los pluviómetros muestra una estructura similar a la climatología de 11 años, aunque la precipitación acumulada el año 2002 fue aproximadamente dos veces mayor que el promedio y las precipitaciones en la cordillera de la costa excedieron las precipitaciones en los Andes. El perfil pluviométrico se reproduce bien por el radar de TRMM. Ambos perfiles muestran máxima precipitación sobre la cordillera Costera y un mínimo en la cuenca de Santiago. La fuerte reducción de la precipitación estimada por TRMM en la cordillera de los Andes refleja la inhabilidad del algoritmo de precipitación superficial para estimar correctamente la precipitación sólida. Se espera que este problema eventualmente sea solucionable por un análisis mejor de los campos básicos de TRMM. Mientras tanto, el radar de TRMM resulta muy útil para estimar la precipitación en Chile Central en lugares bajo la línea de nieve (<http://infomet.dgf.uchile.cl/> [Productos Satelitales, TRMM]).

5. MODELO NUMÉRICO

Los actuales modelos numéricos de pronóstico del tiempo sobre un área limitada (también llamados modelos mesoescala) se presentan como una alternativa factible para estimar patrones de precipitación en regiones donde las observaciones son escasas. Estos modelos representan la atmósfera en términos de las variables de estado (presión, temperatura, velocidad de viento, etc.). Dada una condición inicial, las ecuaciones dinámicas que controlan la atmósfera son integradas numéricamente para obtener el estado futuro de la atmósfera. Los modelos de alta resolución son capaces, en principio, de reproducir todos los procesos que causan lluvia y nieve, incluyendo la formación y propagación de frentes, el ascenso orográfico y la convección.

El Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, ejecuta diariamente el modelo MM5 (*PSU/NCAR Mesoscale Model of the 5th Generation*) desde el año 2002 para generar pronósticos experimentales del tiempo en Chile central. MM5 utiliza un esquema complejo de la microfísica para simular las interacciones entre vapor de agua, gotas de nube y precipitación líquida y sólida. El modelo produce pronósticos de precipitación superficial con intervalos de una hora sobre una grilla de 15 km de resolución que cubre Chile entre Concepción y La Serena (<http://infomet.dgf.uchile.cl/> [Pronósticos Numéricos]).

Para este trabajo, se extrajeron pronósticos de la precipitación diaria desde los archivos de MM5 durante el periodo entre 1 de Mayo al 31 de Agosto del año 2002, y luego se construyeron los mapas de R_W y R_f que se presentan en las Figuras 6a y 6b. Se observa que el modelo captura bien los patrones espaciales de ambas variables respecto a la climatología examinada en sección 3.

Entre la costa y el contorno topográfico de 2000 m, R_W aumenta claramente desde el norte hacia el sur consistente con un gradiente similar en la frecuencia de precipitación (R_f). R_W y R_f aumentan fuertemente en la ladera barlovento (oeste) de la cordillera de Los Andes, y disminuyen en la ladera sotavento. Los valores más altos de R_W ocurren un poco antes (~30 km) de la cumbre de la cordillera mientras R_f generalmente se maximiza en la cumbre. El gradiente norte-sur en R_f es muy débil en la Cordillera. Un mínimo local en R_W se pronostica inmediatamente al oeste de la ciudad de Santiago, que posiblemente corresponde a la sombra de lluvia sugerida por los datos pluviométricos de las figuras 2 y 5.

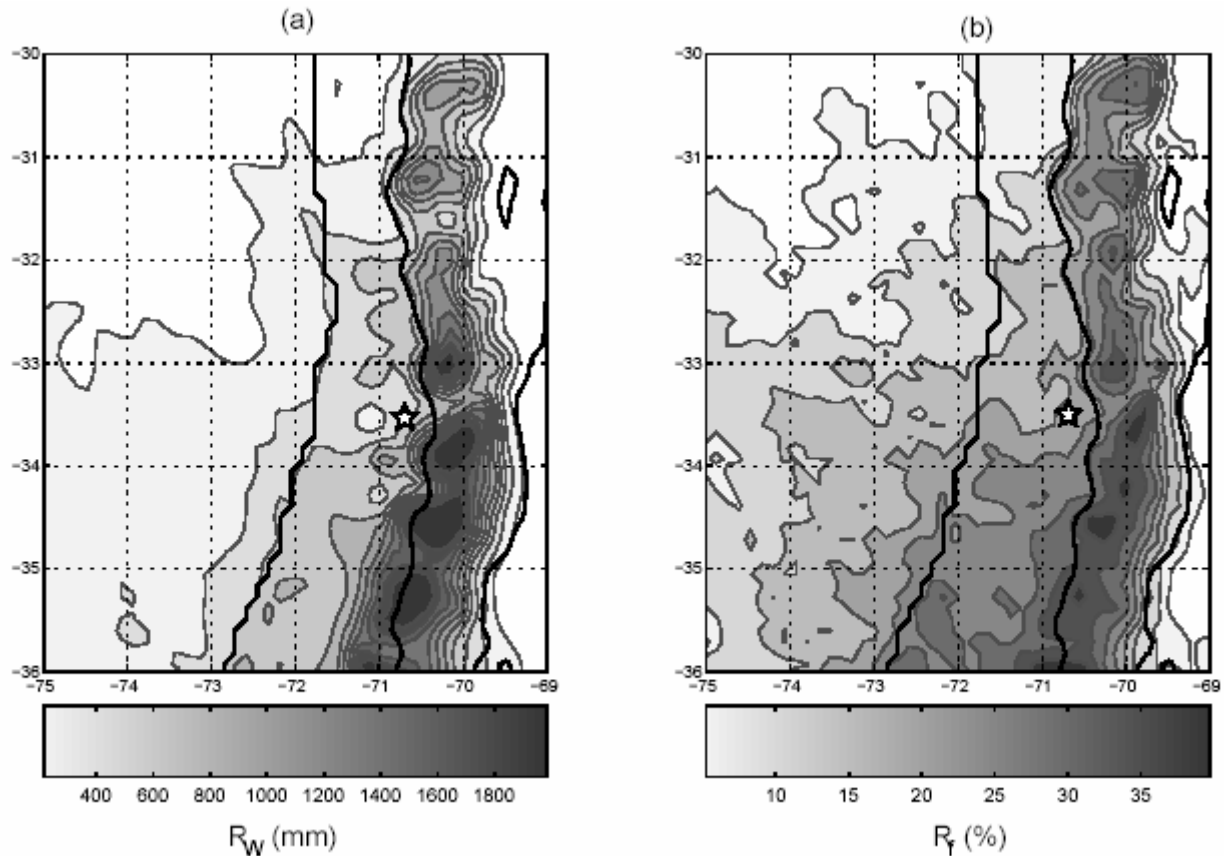


Figura 6. R_W (panel a) y R_f (panel b) del modelo MM5. Los contornos de R_W tienen intervalos de 200 mm, y los contornos de R_f están separados por intervalos de 5 %. La estrella ubica la ciudad de Santiago.

La variación de la precipitación de MM5 sobre el transecto AB se compara con las otras fuentes de datos en Figura 5. En la cuenca de Santiago la precipitación simulada de 500 mm está en concordancia con las observaciones pluviométricas y de TRMM. Sin embargo, el modelo no logra simular bien la región de intensificación fuerte de la lluvia sobre la cordillera Costera. Adicionalmente, los valores de R_W simulados en la costa (~200 mm) son aproximadamente la mitad de los valores observados. Por otro lado, en la cordillera de los Andes, el modelo desarrolla un aumento demasiado fuerte que maximiza con valores de 2200 mm en los sectores más altos de la región.

Es notable que los valores de R_f se comparen bien con las observaciones sobre todo el transecto, implicando que los errores en la predicción de R_w resultan de problemas en el pronóstico de la *intensidad* de lluvia más bien que problemas en el pronóstico de frecuencia de eventos.

6. CONCLUSIONES

Se examinaron los patrones espaciales de la precipitación en Chile central utilizando observaciones de lluvia de una red densa de pluviómetros junto con estimaciones de precipitación derivadas de datos fluviométricos, del radar satelital TRMM y del modelo de pronóstico del tiempo MM5. Dado que existen gradientes topográficos muy fuertes en las cordilleras de la costa y de Los Andes, se espera observar regiones claramente marcadas de intensificación orográfica. Sorprendentemente, los datos indican que el realce orográfico es relativamente débil en Chile central.

El rasgo más prominente del patrón espacial de precipitación es un gradiente norte-sur en la precipitación invernal (R_w) debido a un gradiente correspondiente en la frecuencia de ocurrencia de precipitación (R_f). Entre la costa y pre-Cordillera no hay mucha evidencia de un control fuerte orográfico sobre precipitación invernal, con valores de R_w aproximadamente uniformes. Considerando la variación en R_w sobre un transecto orientado en dirección NW/SE (vientos prevalentes durante episodios de lluvia), se advierte una intensificación débil en la cordillera de la costa y supresión (que implica la presencia de una ‘sombra’ de lluvia) en la cuenca de Santiago. La precipitación invernal aumenta significativamente dentro de la cordillera de los Andes aunque la falta de observaciones no permite una conclusión categórica de esta región, especialmente en sectores sobre la línea de nieve. Datos obtenidos de estaciones fluviométricas y pluviométricas en la valle de Maipo indican que R_w alcanza a valores alrededor de 1m cerca del cumbre de la cordillera de Los Andes.

El radar satelital de TRMM y el modelo MM5 demuestran potencial como herramientas para analizar patrones espaciales de precipitación en Chile central. Ambos fueron capaces de producir campos realistas de R_w y R_f para alturas debajo de la línea de nieve durante el invierno de 2002. Sin embargo, ninguno de los dos parece confiable para estimar precipitación en la cordillera de los Andes, donde la precipitación de TRMM está considerablemente subestimada y la de MM5 está sobre-pronosticada.

Se continúa la adquisición de bases de datos de TRMM y MM5 para periodos más largos. Además se intentará extender el análisis de datos fluviométricos para incluir otras cuencas en la cordillera de los Andes, e idealmente, registros de nieve. Se cree que una mirada completa de la distribución de precipitación en Chile central se realiza mejor a través de una amalgamación de múltiples recursos de datos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por FONDECYT a través del proyecto 3040700.

REFERENCIAS

Garreaud R., 1993: Impacto de la variabilidad de la línea de nieve en crecidas invernales en Chile central, *XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, pp 271 – 285, Octubre 1993, Concepción Chile.

Haddad, Z. S., E. A. Smith, C. D. Kummerow, T. Iguchi, M. R. Farrar, S. L. Durden, M. Alves, and W. S. Olson, 1997: The TRMM 'Day-1' Radar/Radiometer Combined Rain-Profiling Algorithm", *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 799-809.

Kummerow, C., and Coauthors, 2000: The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission after two years in Orbit. *Journal of Applied Meteorology*, **39**, 1965 – 1982

Rutllant J y H. Fuenzalida, 1991: Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *Int. J. Climatology*, **11**, 63 – 76.

