



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES PRODUCTOS
GLOBALES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL SOBRE
MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

VALERIA VIDAL AGUIRRE

DIRECTOR DE TESIS:

DR. BENJAMÍN MARTÍNEZ LÓPEZ
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA



CD. UNIVERSITARIA, CD. DE MÉXICO

2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Datos del alumno

Vidal

Aguirre

Valeria

55 5930 4153

Universidad Nacional Autónoma de

México

Facultad de Ciencias

Ciencias de la Tierra

309203568

Datos del tutor

Dr

Benjamín

Martínez

López

Datos del sinodal 1

Dr

Carlos

Gay

García

Datos del sinodal 2

Dr

Ernesto Dos Santos

Caetano

Neto

Datos del sinodal 3

Dra

Rosario de Lourdes

Romero

Centeno

Datos del sinodal 4

Dr

William David

Cabos

Narvaez

Datos del trabajo escrito

Análisis comparativo de tres productos globales
de precipitación mensual sobre México

99 p

2019

*A la memoria de mis abuelitos,
Sara Mendoza y Ezequiel Aguirre*

Agradecimientos

Quiero expresar mi profunda gratitud al Dr. Benjamín Martínez por todo el tiempo dedicado para dirigir esta tesis, así como por su paciente orientación y útiles críticas que permitieron conducir esta investigación con éxito.

También quiero agradecer a los sinodales miembros del jurado de evaluación, compuesto por la Dra. Rosario Romero, el Dr. William Cabos, el Dr. Carlos Gay y el Dr. Ernesto Caetano, por su buena disposición para la revisión de este trabajo y por sus valiosos comentarios.

Extiendo mis sinceros agradecimientos al Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) de la UNAM, el haberme dado la oportunidad de participar en su programa de becas me permitió lograr avances sustanciosos a través de la retroalimentación de algunos de mis colegas.

Por último pero no menos importante, agradezco infinitamente a mis padres Carmen y Faustino, a mis hermanas Diana y Pau, a mi tía Luz y a mi novio Victor por todo el apoyo incondicional que me han brindado y que me ha motivado para seguir creciendo personal y profesionalmente.

Resumen

En México aún se tienen dificultades para contar con un registro continuo de observaciones de precipitación. La escasez de datos ha logrado mitigarse gracias al desarrollo de bases de datos generadas por centros avanzados de investigación de diferentes partes del mundo, no obstante, todas estas bases suelen diferir de forma importante entre sí.

En este estudio se evaluaron tres bases globales de precipitación mensual (CRU, GPCC y CHIRPS) sobre el país utilizando los datos de la base observacional CLICOM. Las comparaciones se realizaron sobre cuatro regiones para determinar en cada una de ellas el grado de afinidad de las bases globales con la base CLICOM. Las climatologías mensuales, la precipitación media anual acumulada, la precipitación sobre cada celda de malla y la precipitación promediada sobre el dominio espacial para cada mes del periodo se compararon estadísticamente mediante los parámetros que son comúnmente usados para evaluar el desempeño de modelos climáticos y para validar bases de datos meteorológicos.

Los resultados mostraron que, tanto la base GPCC como la base CHIRPS, tienen mayor afinidad con la base CLICOM y que el desempeño de estas bases está sujeto a la escala temporal que se utilice así como a la región del país que se busque analizar. La base CRU resultó tener las mayores diferencias con los datos de la base CLICOM y el desempeño más pobre en todos los análisis de comparación. Mediante el análisis de los datos mensuales pudo identificarse una disminución en el desempeño de la base GPCC a partir del año 2000, situación que no se observó en la base CHIRPS.

Con este trabajo se busca contribuir a generar un diagnóstico certero sobre la fiabilidad del uso de diferentes bases de precipitación mensual sobre el país.

Palabras clave: precipitación mensual, México, bases de datos, mallas interpoladas, evaluación, comparación.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
1. Introducción	1
2. Datos	6
2.1. Sistema CLICOM-CICESE	6
2.2. Climate Research Unit Time Series	6
2.3. GPCP Full Data Reanalysis Product	7
2.4. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations	7
3. Metodología	9
3.1. Esquema de homologación de las bases de datos	9
3.2. Regionalización de las mallas de precipitación	10
3.3. Parámetros estadísticos	12
3.4. Procedimientos de comparación	15
4. Resultados	17
4.1. Región noroeste (NO)	17
4.1.1. Comparación de la climatología mensual	17
4.1.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada	22
4.1.3. Comparación de las celdas de malla	23
4.1.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos	29
4.2. Región noreste (NE)	34
4.2.1. Comparación de la climatología mensual	34
4.2.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada	39
4.2.3. Comparación de las celdas de malla	40
4.2.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos	46

4.3. Región centro sur (CS)	51
4.3.1. Comparación de la climatología mensual	51
4.3.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada	56
4.3.3. Comparación de las celdas de malla	57
4.3.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos	63
4.4. Región sureste (SE)	68
4.4.1. Comparación de la climatología mensual	68
4.4.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada	73
4.4.3. Comparación de las celdas de malla	74
4.4.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos	79
5. Discusión	84
5.1. Comparación de la climatología mensual	84
5.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada	85
5.3. Comparación de las celdas de malla	86
5.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos	88
6. Conclusiones	91
Anexos	93
Anexo A	93
Anexo B	94
Referencias y bibliografía	96

Índice de figuras

1.1. Distribución de la precipitación pluvial normal 1981-2010. Fuente: CONAGUA (2016b).	2
1.2. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas desde 1955 hasta el 2015. . .	4
3.1. Representación matricial de la malla de las bases de datos de precipitación.	9
3.2. Regiones consideradas para el análisis comparativo: Noroeste (azul), Noreste (rojo), Centro Sur (verde) y Sureste (violeta).	10
3.3. Regímenes de precipitación en México. Fuente: Adaptado de Jáuregui-Ostos (1970).	11
3.4. Ejemplificación de un diagrama de Taylor. Fuente: Adaptado de Taylor (2005).	14
4.1. Ciclo anual de la a) precipitación, el b) EAM, el c) RECM, d) R, e) σ y el f) sesgo para el periodo 1981-2008 sobre la región noroeste.	19
4.2. Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región noroeste durante los meses de enero a junio.	20
4.3. Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región noroeste durante los meses de julio a diciembre.	21
4.4. Desempeño de las bases globales para reproducir la precipitación acumulada (1981-2008) de la base CLICOM sobre la región noroeste.	22
4.5. Distribución del EAM (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	26
4.6. Distribución del RECM (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	26
4.7. Distribución de R sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	27

4.8. Distribución de las anomalías de R sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	27
4.9. Distribución de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS.	28
4.10. Distribución del sesgo sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	28
4.11. Evolución temporal del EAM (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	31
4.12. Evolución temporal del RECM (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	31
4.13. Evolución temporal de R sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	32
4.14. Evolución temporal de las anomalías de R sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	32
4.15. Evolución temporal de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	33
4.16. Evolución temporal del sesgo sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	33
4.17. Ciclo anual de la a) precipitación, el b) EAM, el c) RECM, d) R, e) σ y el f) sesgo para el periodo 1981-2008 sobre la región noreste.	36
4.18. Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región noreste durante los meses de enero a junio.	37
4.19. Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región noreste durante los meses de julio a diciembre.	38
4.20. Desempeño de las bases globales para reproducir la precipitación acumulada (1981-2008) de la base CLICOM sobre la región noreste.	39

4.21. Distribución del EAM (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	43
4.22. Distribución del RECM (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	43
4.23. Distribución de R sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	44
4.24. Distribución de las anomalías de R (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	44
4.25. Distribución de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS.	45
4.26. Distribución del sesgo sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	45
4.27. Evolución temporal del EAM (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	48
4.28. Evolución temporal del RECM (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	48
4.29. Evolución temporal de R sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	49
4.30. Evolución temporal de las anomalías de R sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	49
4.31. Evolución temporal de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	50
4.32. Evolución temporal del sesgo sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	50
4.33. Ciclo anual de la a) precipitación, el b) EAM, el c) RECM, d) R, e) σ y el f) sesgo para el periodo 1981-2008 sobre la región centro sur.	53

4.34. Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región centro sur durante los meses de enero a junio.	54
4.35. Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región centro sur durante los meses de julio a diciembre.	55
4.36. Desempeño de las bases globales para reproducir la precipitación acumulada (1981-2008) de la base CLICOM sobre la región centro sur.	56
4.37. Distribución del EAM (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	60
4.38. Distribución del RECM (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	60
4.39. Distribución de R sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	61
4.40. Distribución de las anomalías de R sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	61
4.41. Distribución de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS.	62
4.42. Distribución del sesgo sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	62
4.43. Evolución temporal del EAM (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	65
4.44. Evolución temporal del RECM (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	65
4.45. Evolución temporal de R sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	66

4.46. Evolución temporal de las anomalías de R sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	66
4.47. Evolución temporal de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008. . . .	67
4.48. Evolución temporal del sesgo sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	67
4.49. Ciclo anual de la a) precipitación, el b) EAM, el c) RECM, d) R, e) σ y el f) sesgo para el periodo 1981-2008 sobre la región sureste.	70
4.50. Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región sureste durante los meses de enero a junio.	71
4.51. Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región sureste durante los meses de julio a diciembre.	72
4.52. Desempeño de las bases globales para reproducir la precipitación acumulada (1981-2008) de la base CLICOM sobre la región sureste.	73
4.53. Distribución del EAM (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	76
4.54. Distribución del RECM (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	76
4.55. Distribución de R sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla. . .	77
4.56. Distribución espacial de las anomalías de R sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	77
4.57. Distribución de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS.	78

4.58. Distribución del sesgo sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.	78
4.59. Evolución temporal del EAM (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	81
4.60. Evolución temporal del RECM (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	81
4.61. Evolución temporal de R sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	82
4.62. Evolución temporal de las anomalías de R sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	82
4.63. Evolución temporal de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	83
4.64. Evolución temporal del sesgo sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	83
5.1. Distribución espacial de la precipitación mensual media (1981-2008) del CLICOM y de las tres bases globales CRU, GPCC y CHIRPS sobre las regiones a) noroeste, b) noreste, c) centro sur y e) sureste.	87
5.2. Número de estaciones climatológicas utilizadas en la construcción del reanálisis GPCC v.7. Fuente: Schneider et al. (2016).	90
A.1. Distribución de las diferencias entre la desviación estándar de los tres productos globales y la desviación estándar de la base CLICOM sobre la región noroeste.	93
A.2. Distribución de las diferencias entre la desviación estándar de los tres productos globales y la desviación estándar de la base CLICOM sobre la región noreste.	93
A.3. Distribución de las diferencias entre la desviación estándar de los tres productos globales y la desviación estándar de la base CLICOM sobre la región centro sur.	93
A.4. Distribución de las diferencias entre la desviación estándar de los tres productos globales y la desviación estándar de la base CLICOM sobre la región sureste.	94
B.1. Evolución temporal del sesgo en escala logarítmica sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	94

B.2. Evolución temporal del sesgo en escala logarítmica sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	94
B.3. Evolución temporal del sesgo en escala logarítmica sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	95
B.4. Evolución temporal del sesgo en escala logarítmica sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.	95

Índice de tablas

4.1. Comparación estadística de la precipitación media anual acumulada (1981-2008) sobre la región noroeste.	22
4.2. Comparación estadística de la precipitación media anual acumulada (1981-2008) sobre la región noreste.	39
4.3. Comparación estadística de la precipitación media anual acumulada (1981-2008) sobre la región centro sur.	56
4.4. Comparación estadística de la precipitación media anual acumulada (1981-2008) sobre la región sureste.	73

1. Introducción

México es un país que destaca a nivel mundial gracias a su megadiversidad biológica y cultural. Esta diversidad resulta de los diferentes tipos de climas que se observan sobre el país, los cuales están determinados por factores tales como su extensión, su ubicación geográfica y su accidentado relieve.

Debido a la gran variedad de climas, la distribución geográfica de la precipitación varía de manera significativa de una región a otra. De acuerdo con CONAGUA (2016b), la precipitación pluvial normal del periodo 1981-2010 fue menor a los 50 mm anuales en las regiones más secas, mientras que en las regiones más húmedas sobrepasó los 4000 mm anuales (Fig.1.1).

Al ser un campo altamente variable tanto en tiempo como en espacio, el monitoreo de la precipitación es indispensable para conocer el estado del tiempo meteorológico. Además, contar con registros continuos permite caracterizar el clima de una región, realizar investigaciones encaminadas a evaluar el manejo y la disponibilidad de los recursos hídricos, desarrollar alertas tempranas de eventos meteorológicos extremos, efectuar análisis de variabilidad climática, así como estudiar el cambio climático y sus impactos.

Actualmente, distintas instituciones son responsables del monitoreo de la precipitación, siendo el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) el principal organismo encargado de proporcionar información sobre las condiciones climáticas y meteorológicas prevalecientes en el país. El SMN tiene distribuidas alrededor de 3000 estaciones de medición sobre el territorio nacional, no obstante, esta cifra no ha permanecido constante con el paso del tiempo (Fig.1.2). Si bien el número de estaciones presentó un incremento durante el periodo comprendido entre la década de los 50 y los años 80, a partir de los años 90 se ha observado que las estaciones han disminuido de forma sustancial (Zhu y Lettenmaier, 2007; Livneh et al., 2015). Aunado a lo anterior, la distribución espacial tampoco ha sido uniforme, pues el norte, el noroeste y el sureste de México siempre han concentrado una menor cantidad de estaciones en comparación con el resto del país (CONAGUA, 2016a).

Los huecos temporales de información y las extensas regiones sin cobertura hacen que esta red de estaciones sea insuficiente y poco confiable para cierto tipo de estudios. La naturaleza dinámica

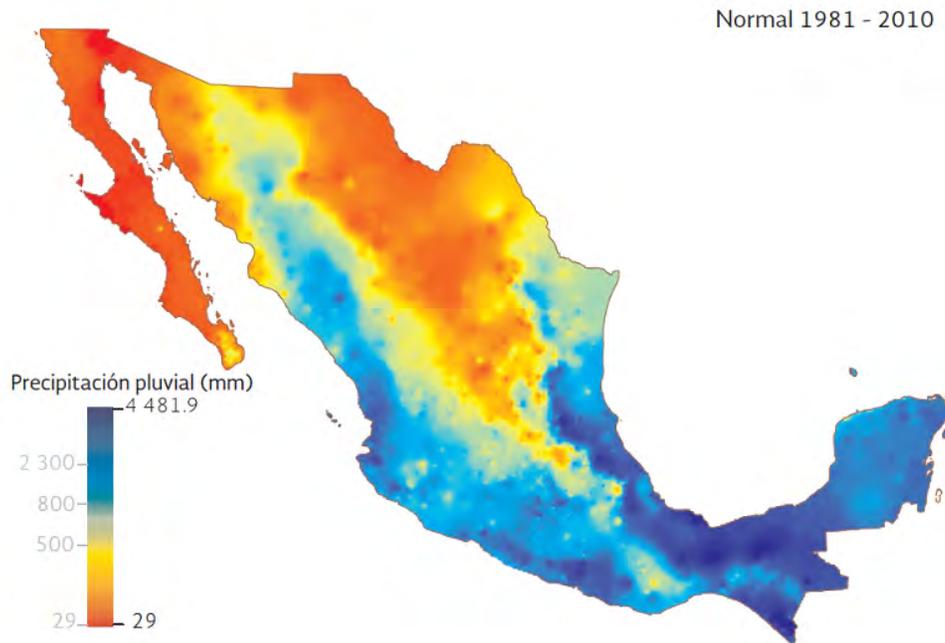


FIGURA 1.1: Distribución de la precipitación pluvial normal 1981-2010. Fuente: CONAGUA (2016b).

del clima y los cambios observados en el último siglo (Cuervo-Robayo et al., 2014) han incrementado la demanda de información climatológica para evaluar los impactos del cambio climático en el medio ambiente y en la sociedad.

Con el fin de contrarrestar los problemas derivados de la carencia de información, en las últimas décadas se han creado un gran número de bases de datos climatológicos a partir de observaciones interpoladas a mallas regulares. De esta forma, se cuenta con datos continuos a diferentes escalas espacio-temporales que van de registros horarios a mensuales y de regionales a globales. Estas bases se clasifican en tres categorías generales de acuerdo al tipo de datos que las integran: bases compuestas por observaciones in situ, bases satelitales y bases combinadas compuestas por datos observacionales y datos satelitales (National Center for Atmospheric Research Staff (Eds), 2014).

Aunque el desarrollo de las bases interpoladas ha resultado de mucha utilidad para aplicaciones agrícolas e hidrológicas y para la validación de modelos climáticos y de predicción del tiempo meteorológico (Schneider et al., 2014; Deser et al., 2014; Pascale et al., 2015), todas presentan ciertas deficiencias en lo que respecta a la precipitación. Los productos de cada base difieren entre sí en el número y duración de las mediciones debido a la cobertura no homogénea de datos en tiempo y

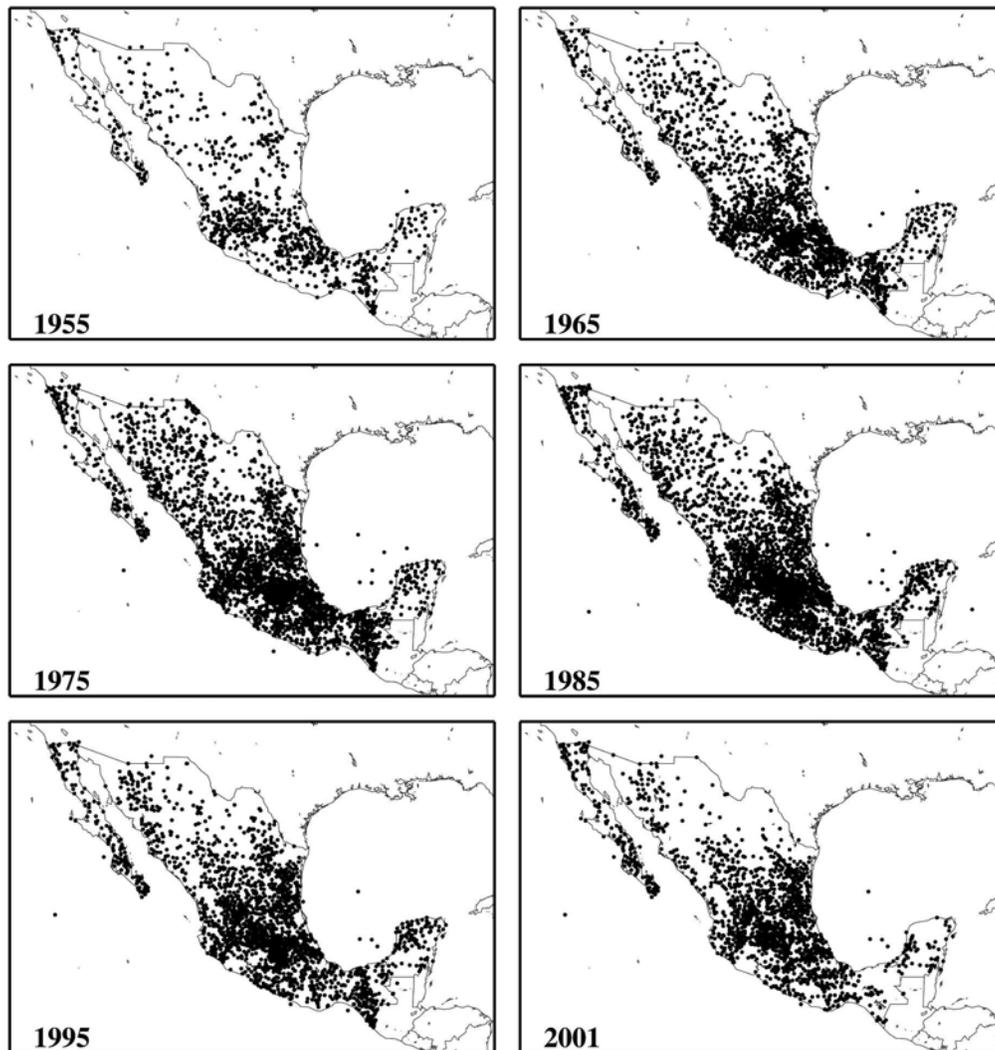
espacio. De la misma manera, las técnicas de interpolación implementadas, los procedimientos de verificación de calidad y la corrección de errores también son factores que influyen en la generación de disparidades.

El hecho de que la calidad de los productos esté sujeta a diferentes factores hace que su evaluación y comparación sobre regiones geográficas y climáticas específicas sea fundamental para generar información útil sobre su rendimiento y su desempeño, pues así puede determinarse dónde y cuándo pueden ser utilizados para la estimación de la precipitación en áreas con datos escasos o discontinuos. Hoy en día existen diversos trabajos en la literatura donde se ha evaluado el desempeño de algunas bases interpoladas comparándolas con datos observacionales sobre áreas remotas, terrenos morfológicamente complejos y regiones de relevancia ecológica de distintas partes del mundo (Lampsey, 2008; Dinku et al., 2008; Negrón-Juárez et al., 2009; Belo-Pereira et al., 2011; Nkiaka et al., 2017; Henn et al., 2017).

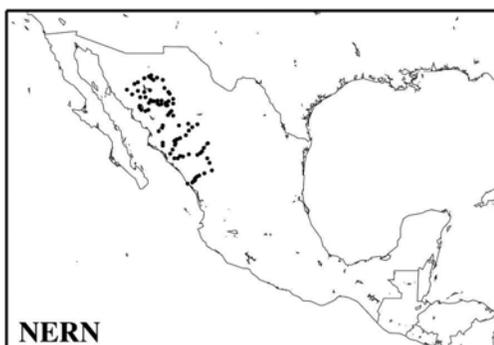
En el caso de México, hasta la fecha se tienen dos estudios publicados en donde se ha medido el desempeño de alguna base interpolada sobre el país. En el primero, Maynor et al. (2017) compararon la base satelital *Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement* (IMERG) con datos puntuales provenientes de estaciones del SMN sobre una región que abarca parte del centro y norte del país a una escala horaria, diaria y estacional durante el periodo de abril de 2014 a octubre de 2015. En el segundo, Perdigón-Morales et al. (2018) evaluaron las climatologías mensuales de la precipitación de la base combinada *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS) con datos puntuales de 2150 estaciones del SMN durante el periodo 1981-2010.

Debido al amplio uso que se les da a estas bases en el país sigue siendo necesario evaluar y equiparar otras bases de datos de precipitación a diferentes escalas espacio-temporales para poder conocer las limitaciones de su uso y puedan implementarse las correcciones necesarias.

De este modo, el objetivo de esta tesis es estimar las diferencias de tres bases globales con respecto a la malla interpolada del sistema *Climate Computing project* (CLICOM), la cual está compuesta únicamente por observaciones nacionales in situ. Con esta finalidad, se evaluará el desempeño de las bases globales sobre cuatro regiones de México para determinar en cada una de ellas el grado de afinidad con la base observacional. Los productos globales en cuestión son las bases *Climate Research Unit Time Series* (CRU TS), *Global Precipitation Climatology Center Full*



(a) Estaciones del SMN durante 1955-2001. Fuente: Adaptado de Zhu y Lettenmaier (2007).



(b) Estaciones del NERN. Fuente: Adaptado de Zhu y Lettenmaier (2007).



(c) Estaciones del SMN al 2015. Fuente: CONAGUA (2016a).

FIGURA 1.2: Distribución espacial de las estaciones meteorológicas desde 1955 hasta el 2015.

Data Reanalysis Product (GPCC) y la base CHIRPS. Los datos de temperatura y precipitación del CRU y del GPCC suelen usarse con frecuencia por su amplio registro temporal (Martínez-López et al., 2010; Karmalkar et al., 2011; Magaña et al., 2012; Cavazos et al., 2013), mientras que CHIRPS es un producto más reciente y apenas ha comenzado a analizarse su potencial para reproducir la precipitación en México (Perdigón-Morales et al., 2018).

Es necesario aclarar que la finalidad de este trabajo no es determinar, a nivel de cada celda de malla, la precisión y la exactitud con la que las bases globales reproducen las observaciones puntuales incluidas en CLICOM. El objetivo primordial es sentar un precedente, a través de la identificación de las diferencias más significativas entre las bases y CLICOM en las cuatro regiones consideradas, que suscite su validación futura contra observaciones puntuales de otras fuentes o productos satelitales. De esta manera, este trabajo puede tomarse como un esfuerzo inicial que conduzca, en el mediano plazo, a la validación rigurosa de algunas mallas climáticas que sirvan como fuentes alternativas de datos climatológicos en el país.

El presente documento está estructurado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presenta una descripción de los datos empleados, en el capítulo 3 se detalla la metodología implementada para el análisis comparativo, en los capítulos 4 y 5 se exponen los resultados y la discusión de los mismos para finalizar con las conclusiones en el capítulo 6.

2. Datos

2.1. Sistema CLICOM-CICESE

CLICOM es un *software* desarrollado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para facilitar el manejo de información climatológica.

El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) desarrolló una herramienta web para visualizar y procesar los datos del CLICOM en su formato de estaciones puntuales (CLICOM Estaciones) y en su formato en malla (CLICOM en Malla). Ambos formatos están disponibles y abiertos al público en el sitio <http://clicom-mex.cicese.mx/>.

El formato de estaciones puntuales está integrado por datos provenientes de un conjunto de estaciones superficiales pertenecientes a la red del SMN, mientras que la malla fue construida por Zhu y Lettenmaier (2007) utilizando datos de 6000 estaciones del SMN que datan desde 1920, así como los datos de precipitación provenientes de las 86 estaciones utilizadas en el proyecto *North American Monsoon Experiment (NAME) Event Rain Gauge Network (NERN)*.

En este trabajo los datos que se usaron como referencia fueron los datos mensuales de la precipitación calculados a partir de los datos diarios de la base CLICOM en Malla. La malla tiene un resolución espacial de 0.125° en longitud y latitud, extendiéndose de los 14° N a los 32° N y de los 87° O a los 117° O y cubriendo el periodo 1960-2008.

2.2. Climate Research Unit Time Series

La base CRU TS (Harris et al., 2014) es uno de los diferentes productos que es desarrollado y administrado por el *Climate Research Unit (CRU)* de la Universidad de *East Anglia* del Reino Unido. CRU TS es una base de reanálisis, esto es, que integra estadísticamente datos observacionales y estimaciones meteorológicas que se obtienen mediante modelos numéricos.

Los datos observacionales son obtenidos de 1) datos mensuales a escala global, que son archivos climáticos mensuales provenientes de la OMM en colaboración con la *National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA)* vía el *National Climatic Data Center (NCDC)*, así co-

mo del *Met Office Hadley Centre* del Reino Unido, y 2) de datos mensuales a escala nacional, que provienen de la colaboración con otras instituciones científicas y con servicios meteorológicos nacionales de distintos países.

Los datos de precipitación mensual utilizados fueron los de la versión CRU TS3.23, la cual consiste en una malla regular con resolución de 0.5° en longitud y latitud. La malla cubre la superficie continental global, exceptuando a la Antártida, durante el periodo 1901-2014.

2.3. GPCC Full Data Reanalysis Product

El *Full Data Reanalysis Product* (Schneider et al., 2014) es una base de reanálisis del *Global Precipitation Climatology Center* (GPCC) operado por el Servicio Meteorológico de Alemania.

Este producto está construido con datos distribuidos por servicios meteorológicos nacionales vía el Sistema Mundial de Telecomunicación de la OMM, reportes de tiempo sinóptico y reportes climáticos mensuales, así como de datos solicitados a servicios meteorológicos y otras instituciones de alrededor de 190 países. Adicionalmente, la base GPCC integra dentro de su biblioteca los datos provenientes de otras colecciones como de las bases CRU, *Global Historical Climatology Network* y *Food and Agriculture Organization*.

Los datos usados para esta tesis fueron los datos de precipitación mensual de la versión 7 del *Full Data Reanalysis Product*, el cual consiste en una malla regular con resolución de 0.5° en longitud y latitud. La malla abarca el periodo 1901-2013 y cubre la superficie terrestre global a excepción de la Antártida.

2.4. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations

La base CHIRPS (Funk et al., 2014, 2015b) del *Climate Hazards Group* de la Universidad de Carolina en Santa Bárbara, Estados Unidos es una base de datos de precipitación cuasi global compuesta por mediciones in situ y observaciones satelitales.

Las principales fuentes de datos utilizadas para la creación de CHIRPS son 1) la climatología de precipitación mensual CHPClim, también creada por el *Climate Hazards Group*; 2) observa-

ciones satelitales en el infrarrojo térmico del *Climate Prediction Center* y del NCDC, ambos de la NOAA; 3) el *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) de la NASA; 4) campos de precipitación del *Climate Forecast System* de la NOAA; y 5) observaciones de precipitación in situ provenientes de servicios meteorológicos nacionales y regionales.

La versión con la que se trabajó fue con los datos mensuales de precipitación de la versión 2.0 que consiste en una malla regular con resolución de 0.05° , en longitud y latitud, que cubre la superficie continental comprendida entre los 50° S y los 50° N a todas las longitudes abarcando el periodo 1981-2015.

3. Metodología

3.1. Esquema de homologación de las bases de datos

La manera en la que están estructuradas las mallas de la base CLICOM y de los tres productos globales permite que puedan analizarse como matrices tridimensionales cuyas celdas pueden representarse mediante la expresión $A_{i,j,k}$, donde i y j representan la longitud y latitud de cada celda, respectivamente, y k representa los pasos de tiempo (Fig.3.1).

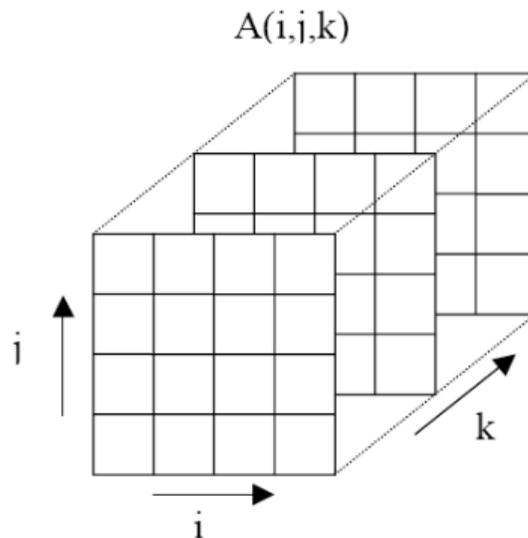


FIGURA 3.1: Representación matricial de la malla de las bases de datos de precipitación.

Debido a las diferencias que presentan las cuatro bases en su extensión espacial (i, j) y temporal (k), se les aplicó un procedimiento de homologación para que pudieran ser comparables entre sí. Este procedimiento consistió, inicialmente, en seleccionar el mismo dominio espacial de la malla CLICOM sobre las mallas de los productos globales. Posteriormente, se escogieron los datos mensuales de 1981 hasta 2008, puesto que fue el periodo que coincidió en las cuatro bases. Después, a los productos globales se les aplicó una interpolación bilineal para que tuvieran la misma resolución espacial que la malla CLICOM. Y por último, se aplicó una misma máscara (una matriz binaria) para que las cuatro bases contaran con el mismo número de elementos.

Al finalizar se obtuvieron cuatro matrices con $i = 1, \dots, 243$ longitudes de los 87° O a los 117°

O y $j = 1, \dots, 146$ latitudes de los 14° N a los 31° N, ambas con pasos de 0.125° . En la dimensión temporal las matrices contaron con $k = 1, \dots, 336$ pasos de tiempo mensuales desde enero de 1981 hasta diciembre de 2008.

3.2. Regionalización de las mallas de precipitación

Con la finalidad de facilitar los procedimiento de comparación entre las bases, las mallas de precipitación fueron divididas en cuatro regiones (Fig.3.2). Estas fueron similares a las utilizadas en Cavazos et al. (2013) y estuvieron delimitadas de la siguiente manera:

- la región Noroeste, con límites de 23° N a 33° N y de 106° O a 117° O;
- la región Noreste, con límites de 23° N a 33° N y de 97° O a 106° O;
- la región Centro Sur, con límites de 14° N a 23° N y de 97° O a 106° O;
- y la región Sureste, con límites de 14° N a 23° N y de 87° O a 97° O.

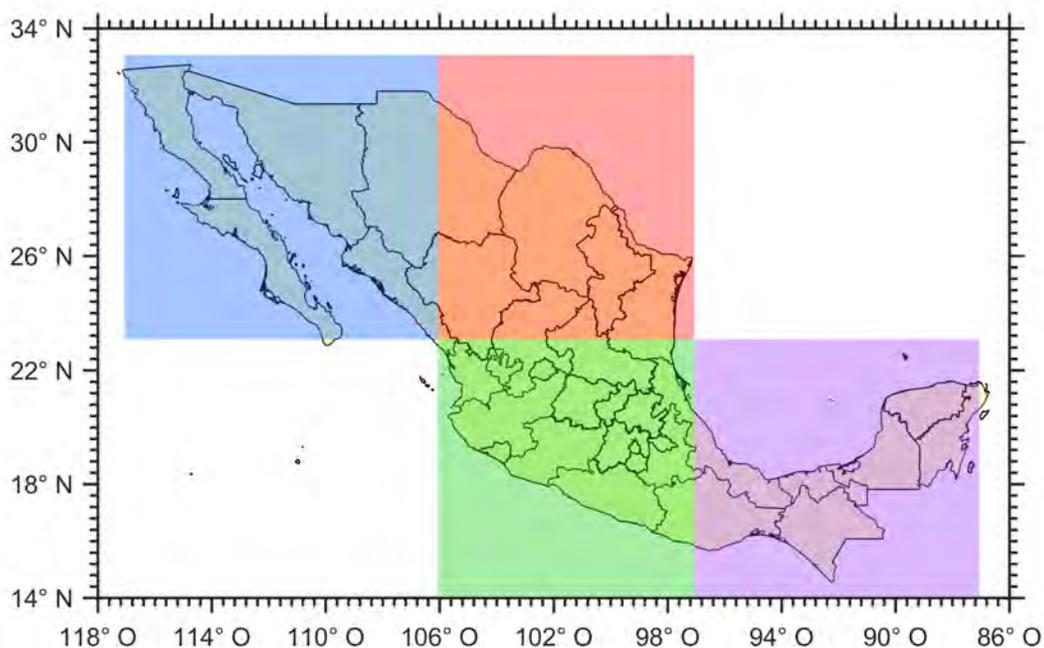


FIGURA 3.2: Regiones consideradas para el análisis comparativo: Noroeste (azul), Noreste (rojo), Centro Sur (verde) y Sureste (violeta).

No obstante, el comportamiento anual y estacional de la precipitación en México es altamente variable (Fig.3.3). Sobre el norte de Baja California domina un régimen característico de los climas mediterráneos, en el cual la mayor cantidad de precipitación se presenta durante la temporada invernal. Sobre el noreste, el centro y sur, la temporada de lluvias se caracteriza por tener un régimen bimodal con máximos en junio y septiembre-octubre y un mínimo relativo durante julio-agosto (Mosiño y García, 1966), siendo este mínimo al que se le conoce como sequía de medio verano o canícula. Finalmente, sobre la parte restante del país, las precipitaciones ocurren durante el verano presentando una distribución normal.

Por esta razón, debe de considerarse que la división utilizada no es la más idónea para analizar si las bases logran reproducir a los distintos regímenes de precipitación que se observan sobre el país. De acuerdo a la regionalización definida, dentro de una misma región pueden converger más de un régimen diferente por lo que, al promediar la precipitación sobre cada región, el régimen resultante no será representativo del comportamiento real de la precipitación.

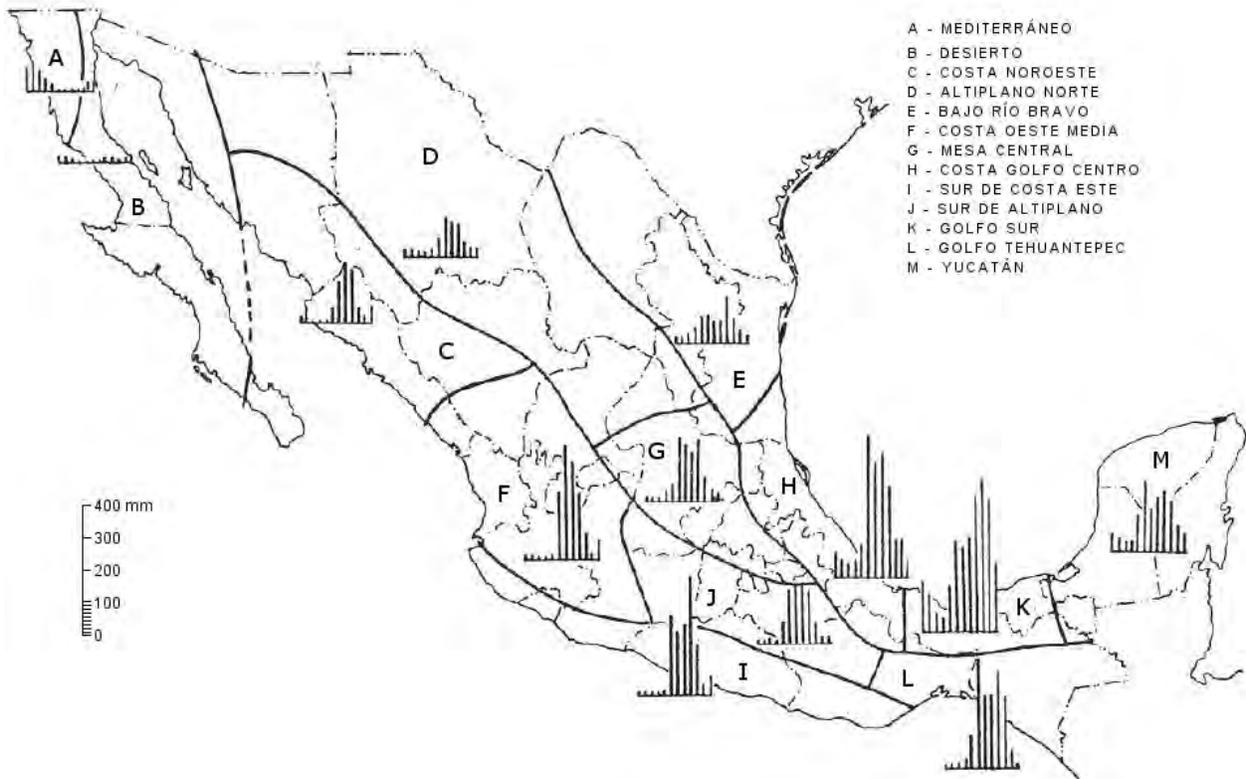


FIGURA 3.3: Regímenes de precipitación en México. Fuente: Adaptado de Jáuregui-Ostos (1970).

3.3. Parámetros estadísticos

La metodología implementada está basada en las metodologías de trabajos anteriores donde se han validado bases de precipitación sobre distintas regiones del mundo (Lamprey, 2008; Dinku et al., 2008; Negrón-Juárez et al., 2009; Belo-Pereira et al., 2011), así como en las que se han seguido para evaluar el desempeño de modelos climáticos (Karmalkar et al., 2011; Cavazos et al., 2013; Pascale et al., 2015).

Los parámetros estadísticos considerados para el análisis comparativo entre la base CLICOM y las bases CRU, GPCC y CHIRPS se describen a continuación.

a) *Desviación estándar*

La desviación estándar (Ec. 3.1), denotada por σ_x , indica qué tanto se alejan los valores de un conjunto (x_i), con n cantidad de elementos, de su valor medio (\bar{x}).

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.1)$$

b) *Sesgo volumétrico*

El sesgo volumétrico (Ec. 3.2) es el cociente estadístico entre la media de un conjunto de datos (\bar{x}) y la media de un conjunto de referencia (\bar{r}). Este determina si el conjunto x_i sobrestima o subestima al conjunto de referencia r_i . Un resultado igual a 1 implica que no hay sesgo, un sesgo mayor a 1 indica sobrestimación, mientras que un sesgo menor a 1 indica subestimación.

$$\text{SESGO} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (3.2)$$

c) *Error absoluto medio*

El error absoluto medio (Ec. 3.3) o EAM, representa la diferencia absoluta promedio entre dos conjuntos de datos, x_i y r_i , de n elementos.

$$\text{EAM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - r_i| \quad (3.3)$$

d) Raíz del error cuadrático medio

La raíz del error cuadrático medio, o RECM, puede interpretarse como la desviación estándar de los errores o, en otras palabras, como el grado de dispersión de los valores de un conjunto (x) alrededor de un conjunto de referencia (r). Por definición, el RECM siempre es mayor que el EAM pues, al elevar las diferencias $x_i - r_i$ al cuadrado, se hace más sensible que el EAM a las diferencias más grandes y a los valores de error atípicos. Otra de sus características, de acuerdo a Chai y Draxler (2014), es que el RECM tiende a aumentar conforme la distribución de la magnitud de los errores se vuelve más variable. En este trabajo se hizo uso del RECM centrado (Ec. 3.4), en el cual se sustraen los valores medios de ambos conjuntos.

$$\text{RECM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) - (r_i - \bar{r})]^2} \quad (3.4)$$

e) Coeficiente de correlación lineal de Pearson

El coeficiente de correlación lineal (Ec. 3.5), o R , mide el grado de asociación lineal entre dos conjuntos de datos, x y r , mediante el cociente de la covarianza (σ_{xr}) y el producto de las desviaciones estándar σ_x y σ_r de x y r .

$$R = \frac{\sigma_{xr}}{\sigma_x \sigma_r} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(r_i - \bar{r})}{\sigma_x \sigma_r} \quad (3.5)$$

El coeficiente de correlación alcanza un máximo de 1 cuando para los n pares de elementos x_i y r_i , $(x_i - \bar{x}) = \alpha(r_i - \bar{r})$, donde α es una constante positiva. En este caso los dos campos tienen el mismo patrón centrado de variación, pero no son idénticos a menos que $\alpha = 1$, por lo que el coeficiente de correlación por sí solo no permite determinar si dos patrones de datos tienen la misma amplitud de variación (Taylor, 2001).

f) Diagramas de Taylor

Para contar con una herramienta gráfica que sintetice visualmente el desempeño de los productos globales se construyeron diagramas de Taylor (Taylor, 2001). En estos diagramas, el coeficiente de correlación y el RECM centrado entre un campo de referencia (CLICOM) y uno o más campos de prueba (CRU, GPCC y CHIRPS), así como las desviaciones estándar de cada campo, son representados como puntos en una gráfica bidimensional. La construcción de los diagramas parte de la

relación entre los cuatro parámetros estadísticos (Ec. 3.6).

$$\text{RECM}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_x\sigma_rR \quad (3.6)$$

La posición de cada punto cuantifica qué tanto los campos prueba se asemejan al campo de referencia. Los campos que mejor coincidan con la referencia se encontrarán cerca del punto marcado como “referencia” en el eje x , estos campos tendrán una correlación relativamente alta y un RECM bajo. Los campos prueba sobre el arco punteado tendrán una correcta desviación estándar, lo cual indica que su patrón de variaciones es de la misma amplitud que el de la referencia.

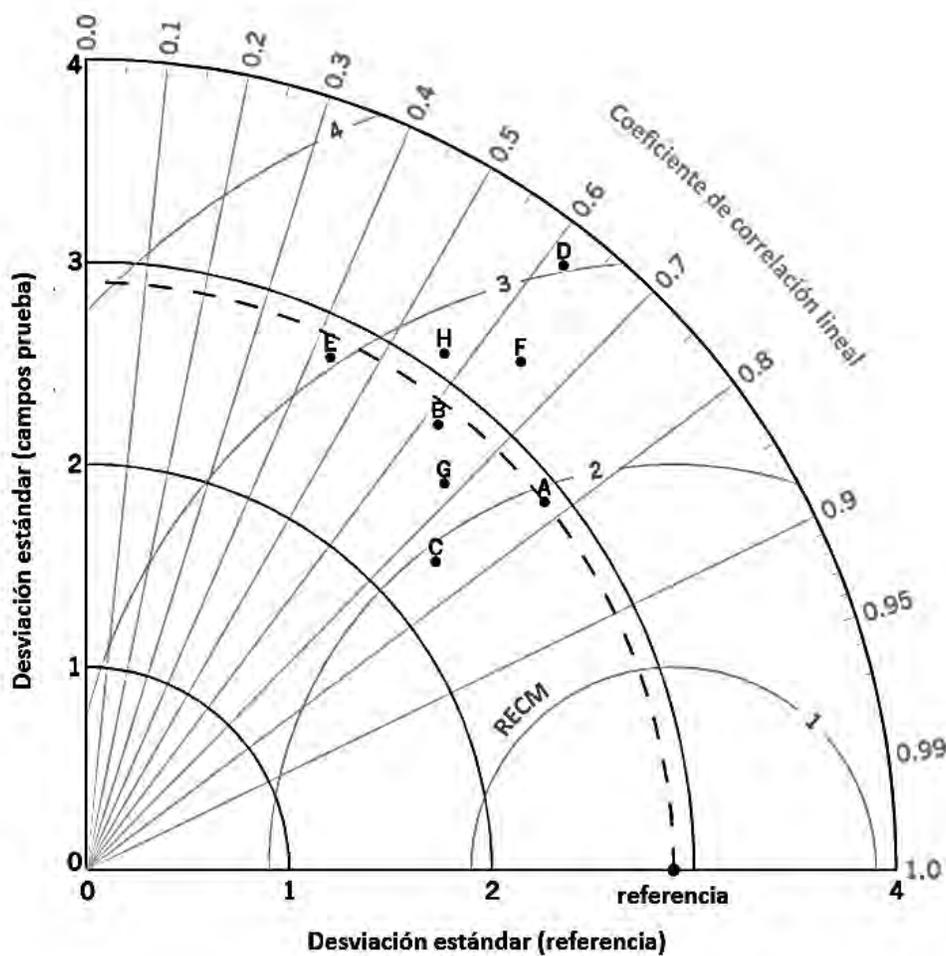


FIGURA 3.4: Ejemplificación de un diagrama de Taylor. Fuente: Adaptado de Taylor (2005).

Además de servir como interpretación gráfica, los diagramas de Taylor hacen posible determinar qué tanto del RECM se debe a la diferencia entre la amplitud de las variaciones (desviación

estándar) y qué tanto se debe a una pobre correlación entre el patrón de los datos de los diferentes campos.

En el ejemplo dado (Fig.3.4) puede observarse que los campos A y C tienen aproximadamente el mismo RECM, sin embargo, el campo A es el que mejor concuerda con el campo de referencia al tener una correlación ligeramente mayor y una desviación estándar que coincide con la de la referencia. Por el otro lado, los campos E y D presentan los desempeños más bajos pues en ambos se observa un RECM grande, el campo E registra la correlación más baja y en el D la desviación es mucho mayor que la de referencia. Aunque los campos D y B tienen correlaciones similares, el campo B simula mejor la desviación estándar lo cual resulta en un RECM más bajo.

3.4. Procedimientos de comparación

a) Comparación de la climatología mensual

En este análisis, para cada región, primero se calculó la climatología mensual del periodo 1981-2008 de las cuatro bases de precipitación, con lo cual se obtuvo una matriz bidimensional para cada mes de enero a diciembre. Posteriormente, para cada región y para cada mes, se calcularon los parámetros estadísticos utilizados para comparar cada base global con la base CLICOM.

b) Comparación de la precipitación media anual acumulada

Para cada región y para cada una de las cuatro bases, se calculó el promedio de la precipitación anual acumulada para el periodo 1981-2008, obteniéndose así cuatro matrices bidimensionales para cada base. Posteriormente, para cada región se calcularon los parámetros estadísticos utilizados para realizar la comparación entre CLICOM y cada producto global.

c) Comparación de las celdas de malla

Para analizar la distribución espacial de las diferencias entre las bases globales y CLICOM, se calcularon los parámetros estadísticos para las series de tiempo de los valores mensuales de precipitación correspondientes a cada celda de malla comprendida en los dominios espaciales de las cuatro regiones consideradas.

Además de calcular los parámetros estadísticos descritos en la sección anterior, también se calculó el coeficiente de correlación lineal utilizando las anomalías mensuales de la precipitación con el fin de sustraer la contribución de las variaciones estacionales. Las anomalías de la precipi-

tación se calcularon mediante la diferencia entre los datos mensuales y los valores medios de cada mes.

d) Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos

Con la finalidad de analizar la variación temporal de los parámetros estadísticos representativos de cada región, para cada mes se calcularon los parámetros estadísticos utilizando los valores promediados sobre cada región. De esta manera se obtuvieron series de tiempo, para cada parámetro y para cada región, que describen la evolución de las tres bases globales y de la base CLICOM con una resolución temporal mensual cubriendo el periodo de enero de 1981 a diciembre de 2008.

Al igual que en el análisis para cada una de las celdas de malla, también fue calculada la correlación lineal con las anomalías de la precipitación para descartar la influencia de las variaciones estacionales.

e) Pruebas de significancia estadística e incertidumbre

En este trabajo no se realizaron pruebas que indicaran la incertidumbre de los datos de precipitación y la significancia estadística de los resultados del análisis comparativo. Por esta razón, es deseable un estudio de mayor profundidad que complemente a este análisis. En Taylor (2001) se hace mención de algunas técnicas para obtener la significancia y las incertidumbres tanto en las series de tiempo como en los diagramas de Taylor que deben ser consideradas para aplicarse en un trabajo futuro, ya que esto va más allá de la finalidad principal de esta tesis de licenciatura.

4. Resultados

4.1. Región noroeste (NO)

4.1.1. Comparación de la climatología mensual

a) Ciclo anual

Los tres productos globales logran reproducir el régimen pluvial de CLICOM (Fig.4.1a), el cual se caracteriza por una estación húmeda definida durante julio-septiembre (61 - 100 mm/mes) y por la predominancia de una estación seca durante el resto del año (<30 mm/mes). Esta variación de ciclo anual es consistente con la señal del monzón de Norte América, el cual domina la distribución estacional de la precipitación sobre la región (Adams y Comrie, 1997).

Las diferencias más notables ocurren durante los meses de agosto a noviembre, en los que la precipitación de CRU y de CHIRPS es ligeramente menor que la de GPCC y que la de CLICOM.

b) EAM

La variación del EAM (Fig.4.1b) a lo largo de los meses sigue la evolución del ciclo anual de la precipitación. Durante los meses de la temporada seca el error en los tres productos globales varía en un rango de 1 a 6 mm/mes, mientras que durante la temporada húmeda varía entre 6 y 14 mm/mes, observándose los errores más bajos en GPCC y los más altos en CRU.

c) RECM

El RECM (Fig.4.1c) también se ve influenciado por el ciclo anual de la precipitación. Durante la estación húmeda el error varía en un rango de 9 a 18 mm/mes, mientras que el resto de los meses varía entre 1 y 10 mm/mes. GPCC registra los errores más bajos en comparación con las otras dos bases. En CHIRPS el error es más bajo que en CRU durante julio-octubre, pero durante los meses restantes ocurre la situación contraria.

d) Correlación lineal

El coeficiente de correlación en los tres productos varía entre 0.80 y 0.99 (Fig.4.1d), siendo GPCC la base con las correlaciones más altas (0.91 - 0.99). CRU presenta correlaciones más altas que CHIRPS durante los meses de enero a junio, noviembre y diciembre, mientras que de julio a

octubre se da el caso opuesto.

e) Desviación estándar

Las curvas de la desviación estándar (Fig.4.1e) son prácticamente iguales y las cuatro siguen el patrón del ciclo anual, solamente CHIRPS llega a diferir de las otras bases durante junio, julio, agosto y noviembre. Durante la estación húmeda varía entre 46 y 81 mm/mes, mientras que el resto del año varía entre 3 y 33 mm/mes.

f) Sesgo

Los resultados del sesgo (Fig.4.1f) muestran que, en comparación con CRU y CHIRPS, el sesgo en GPCC tiene la menor variación y los valores más cercanos a 1. CRU sobrestima la precipitación durante enero y marzo, un 1% y 9% respectivamente, y la subestima durante el resto de los meses en un orden entre 0.8% y 25%. GPCC subestima durante julio y agosto, un 0.4% y 3% respectivamente, y sobrestima durante el resto de los meses en un orden entre 0.6% y 13%. Y por último, CHIRPS sobrestima durante enero, junio y diciembre un 3%, 0.6% y 3% respectivamente, y subestima durante el resto de los meses en un orden entre 1% y 27%.

g) Diagramas de Taylor

Los diagramas de Taylor (Fig.4.2 y Fig.4.3) muestran que GPCC tiene el mejor desempeño durante todos los meses del año. CHIRPS tiene el desempeño más bajo durante los meses de enero a junio, septiembre, noviembre y diciembre, pues en los meses restantes CRU tiene un desempeño menor al de CHIRPS. De acuerdo a los diagramas, durante el mes de octubre CRU y CHIRPS tienen aproximadamente el mismo desempeño.

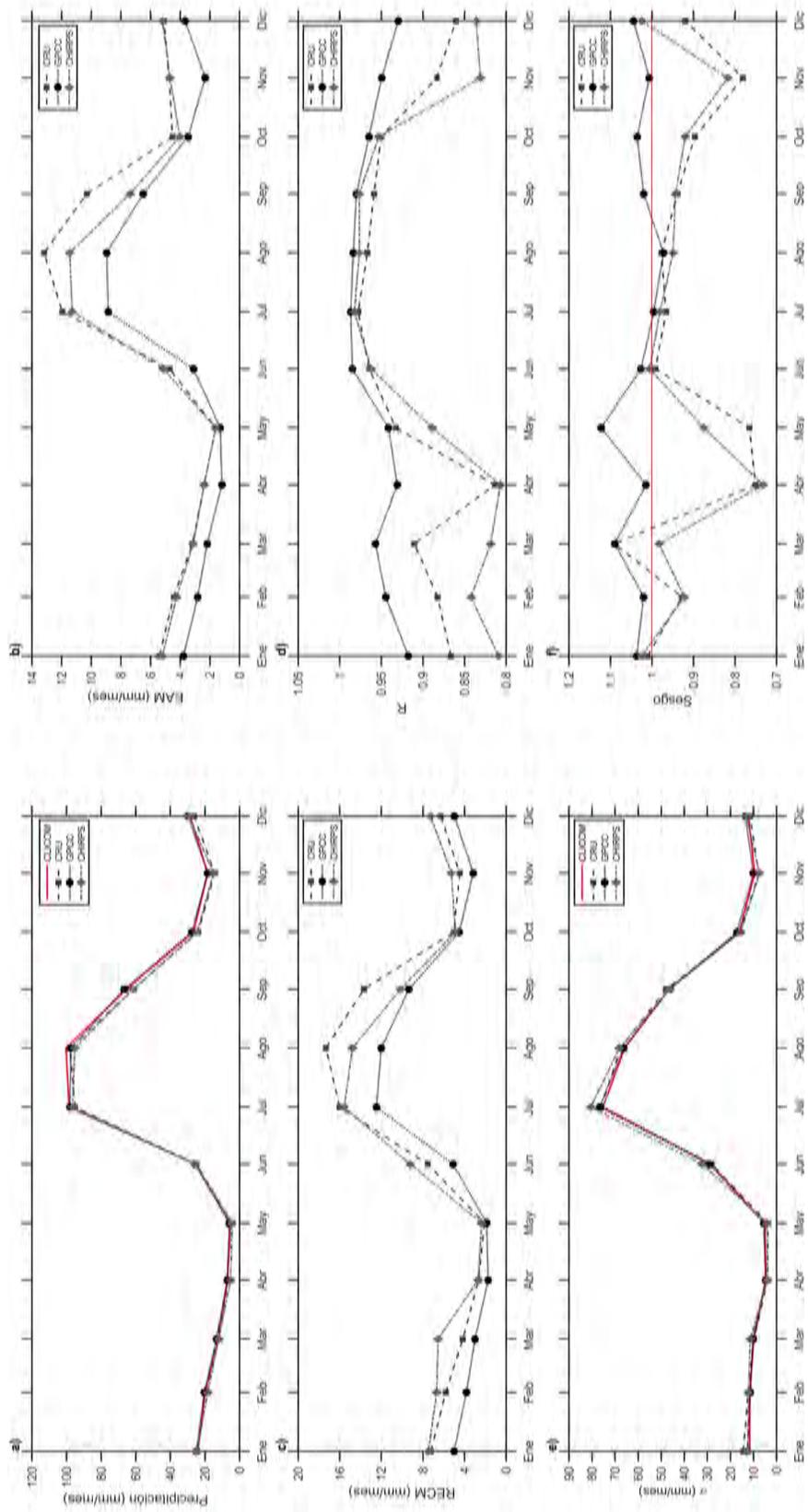


FIGURA 4.1: Ciclo anual de la a) precipitación, el b) EAM, el c) RECM, d) R, e) σ y el f) sesgo para el periodo 1981-2008 sobre la región noroeste.

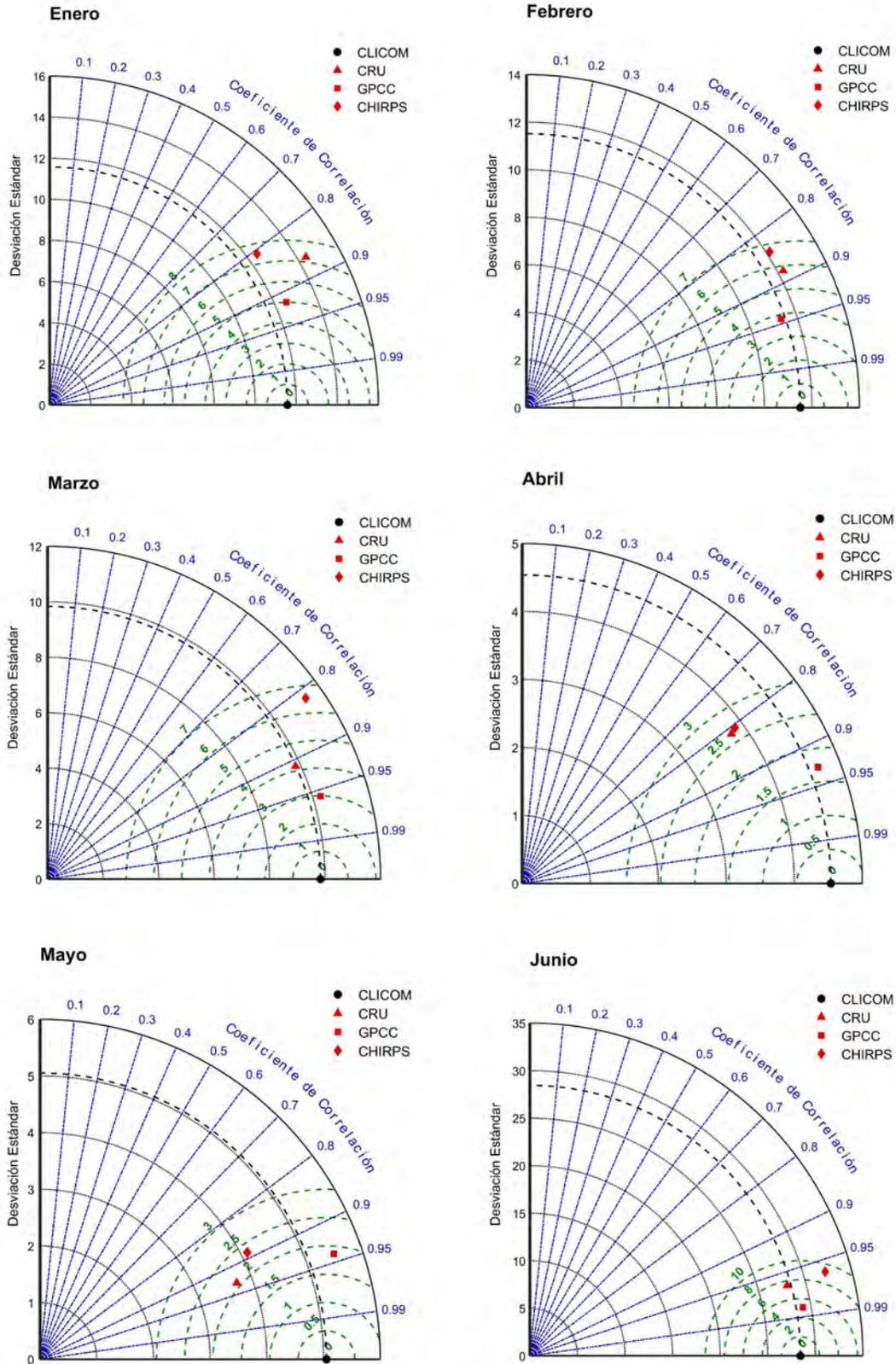


FIGURA 4.2: Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región noroeste durante los meses de enero a junio.

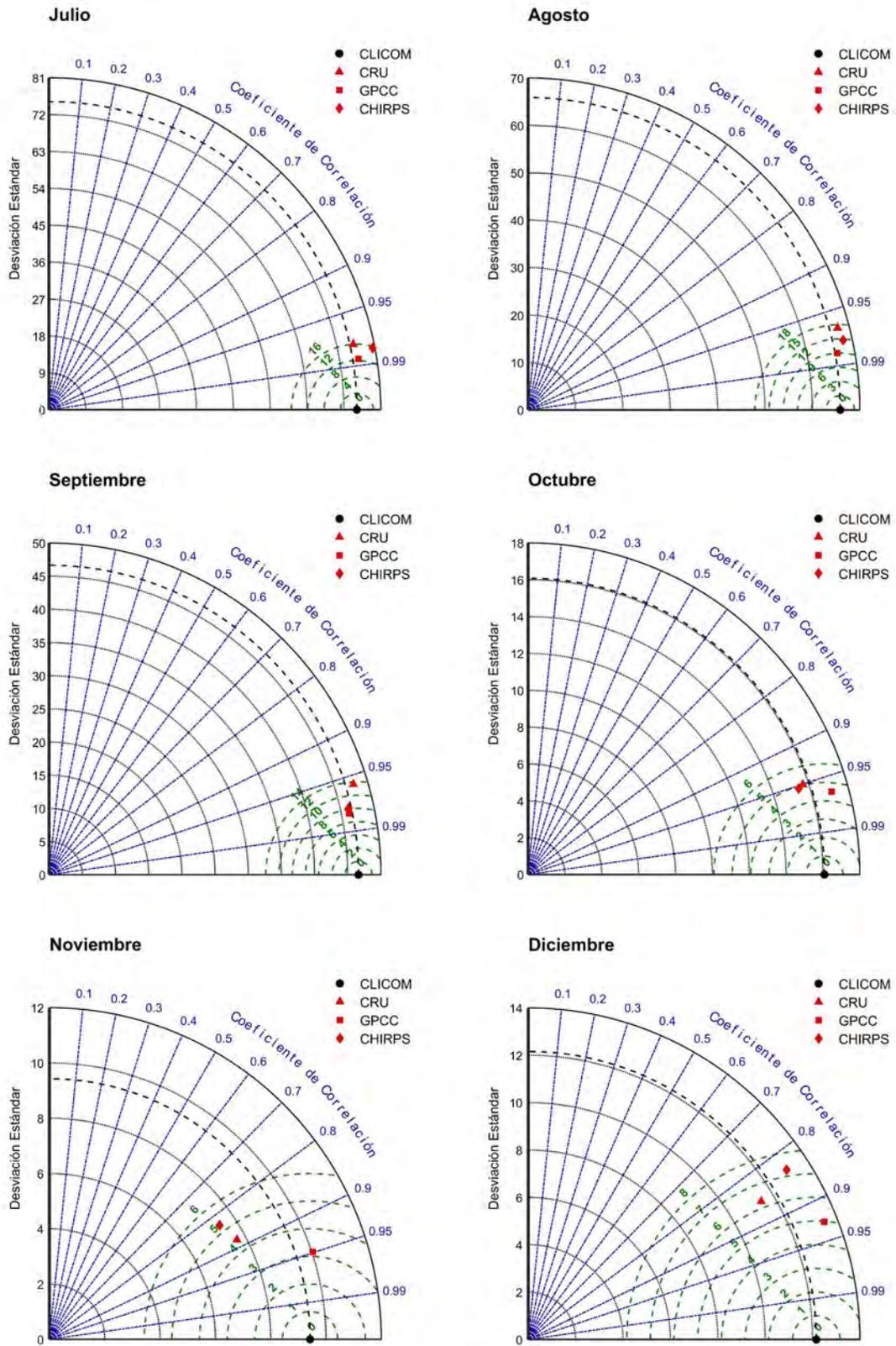


FIGURA 4.3: Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región noroeste durante los meses de julio a diciembre.

4.1.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada

Los resultados de la comparación de la precipitación media anual acumulada (Tabla 4.1) muestran que GPCC tiene los errores EAM y RECM más bajos al igual que la correlación más alta, aunque las correlaciones de las tres bases globales son iguales o superiores a 0.97. Por el contrario, CRU tiene los errores más altos así como la correlación lineal más baja.

De los tres productos globales, CRU posee la desviación estándar de mayor similitud con la desviación de CLICOM, pues las desviaciones de GPCC y de CHIRPS sobrepasan a la de CLICOM por alrededor de 9 y 7 unidades respectivamente.

Finalmente, el sesgo de las tres bases toma valores muy próximos a 1 e indica que GPCC sobrestima la precipitación en un orden del 1%, mientras que CRU y CHIRPS la subestiman un 5% y 4% respectivamente.

De acuerdo con el diagrama de Taylor (Fig.4.4), GPCC es la base que mejor logra reproducir a la precipitación media anual acumulada de CLICOM sobre la región y CRU es la que tiene el desempeño más bajo.

TABLA 4.1: Comparación estadística de la precipitación media anual acumulada (1981-2008) sobre la región noroeste.

	EAM (mm/mes)	RECM (mm/mes)	R	σ (mm/mes)	Sesgo
CLICOM	0	0	1	254.85	1
CRU	51.71	62.73	0.97	254.64	0.95
GPCC	33.85	46.65	0.98	263.67	1.01
CHIRPS	45.43	56.13	0.98	261.44	0.96

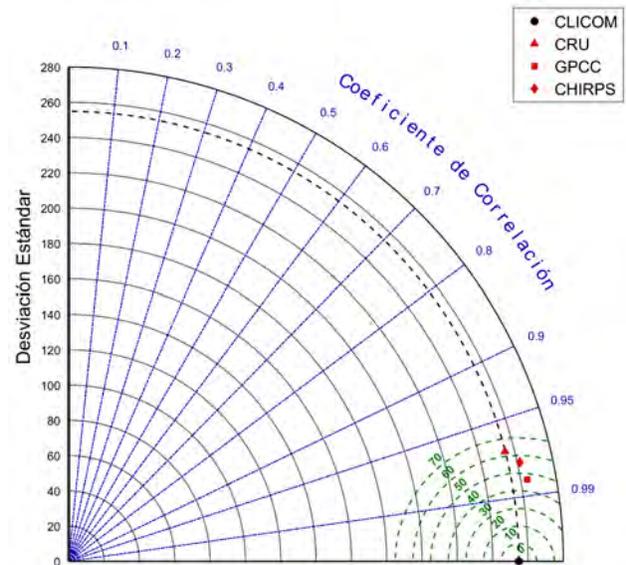


FIGURA 4.4: Desempeño de las bases globales para reproducir la precipitación acumulada (1981-2008) de la base CLICOM sobre la región noroeste.

4.1.3. Comparación de las celdas de malla

a) EAM

Las tres bases presentan un patrón similar en la distribución espacial de los errores (Fig.4.5). Los errores más altos se concentran sobre la Sierra Madre Occidental, mientras que los más bajos se concentran sobre la península de Baja California y sobre el norte de Sonora y Chihuahua. GPCC muestra los errores más bajos en comparación con los observados en CRU y en CHIRPS.

Lo anterior se puede constatar visualmente en el histograma de frecuencias (Fig.4.5), el cual muestra la distribución de la fracción de celdas de malla con determinados valores de EAM. GPCC tiene la distribución menos sesgada hacia la derecha, lo cual indica que tiene mayor cantidad de celdas de malla con EAM bajos. En GPCC el 84 % de la región tiene errores menores a 15 mm/mes, en CHIRPS el 78 % y en CRU el 66 %.

b) RECM

La distribución espacial del RECM (Fig.4.6) es similar a la del EAM y, en las tres bases, los errores más altos se localizan sobre la zona montañosa de la región. GPCC muestra los errores más bajos en comparación con los que se observan en CRU y en CHIRPS.

Aunque las tres distribuciones mostradas en el histograma (Fig.4.6) presentan un sesgo positivo, la distribución del CRU está más sesgada hacia la derecha, lo cual indica que los errores en CRU son más grandes en comparación con los errores de las otras dos bases. En GPCC el 69 % de las celdas de malla tiene errores menores a 20 mm/mes, en CHIRPS el 63 % y en CRU el 41 %.

c) Correlación lineal

En los resultados se observa que sobre la mayor parte de la región dominan los valores de R mayores a 0.8 (Fig.4.7). Además, los productos globales comparten el mismo patrón de distribución espacial, en las tres bases se tienen las mismas zonas con valores de R bajos (<0.7) sobre la península de Baja California y algunas zonas del estado de Sonora. Mediante inspección visual, puede verse que en CRU se presentan los valores de R más bajos. Entre GPCC y CHIRPS las principales diferencias se encuentran sobre Sonora y la península de Baja California.

De acuerdo con la distribución de frecuencias (Fig.4.7), en CRU son más recurrentes los valores de R menores a 0.8. En GPCC y CHIRPS no es posible caracterizar a simple vista las diferencias entre las distribuciones pero, calculando la porción de celdas de malla que concentran los valores

de R más altos, se obtiene que en GPCC el 89 % de la región muestra correlaciones mayores a 0.8, en CHIRPS el 82 % y en CRU el 67 %. Considerando solamente los valores de R mayores a 0.9, la proporción es de 60 % en GPCC, 49 % en CHIRPS y 13 % en CRU.

d) Correlación lineal de las anomalías

Utilizando las anomalías de la precipitación (Fig.4.8), los valores de R resultantes son más bajos en comparación con los observados en los resultados anteriores (Fig.4.7). Asimismo, las distribuciones de frecuencias están más diferenciadas entre sí, lo que permite visualizar mejor las diferencias entre las bases. CRU sigue teniendo los valores de R más bajos, mientras que en GPCC se observan valores de R altos sobre la mayor parte de la región. En CHIRPS los valores de R son más bajos que en GPCC, a excepción de algunas zonas sobre Baja California Sur y la frontera entre Sonora y Chihuahua.

A partir del histograma de frecuencias (Fig.4.8) se obtiene que en GPCC el 86 % de la región muestra valores de R mayores a 0.7, en CHIRPS el 80 % y en CRU el 28 %. Considerando solamente los valores mayores a 0.8, la proporción es de 53 % en GPCC, 39 % en CHIRPS y 5 % en CRU.

e) Desviación estándar

En las cuatro bases se observa un patrón espacial similar de los valores de desviación estándar (Fig.4.9), las σ más altas se ubican sobre la zona montañosa y disminuyen progresivamente hacia el norte de la región y sobre la península de Baja California. En GPCC y en CHIRPS, los valores de σ son menores que los de CLICOM. Las diferencias son más grandes entre CHIRPS-CLICOM que entre GPCC-CLICOM, siendo GPCC la base con los valores de σ más similares a los de CLICOM. En CRU, la desviación es menor que la de CLICOM sobre la zona montañosa pero en algunas zonas, como en los límites entre Sonora y Chihuahua, σ toma valores altos que no se observan ni en CLICOM ni en las otras dos bases.

En el anexo A se muestra la distribución espacial de la sustracción de la desviación estándar de las cuatro bases globales a la desviación de CLICOM (Fig. A.1), la cual permite visualizar mejor las diferencias de este parámetro estadístico.

f) Sesgo

Sobre las bases globales no se exhibe un patrón común que caracterice a la distribución del sesgo (Fig.4.10), las únicas características que comparten son la zona de sobrestimación entre Baja California y Sonora, así como la región de subestimación ubicada al norte de Baja California Sur.

El sesgo en CRU varía entre 0.40 y 2.40, en GPCC entre 0.36 y 2.46 y en CHIRPS entre 0.2 - 2.8.

En el histograma de frecuencias (Fig.4.10) se observa que GPCC sobrestima la precipitación en el 54 % de la región, mientras que en CRU y CHIRPS mayor porción de áreas tiende a subestimarla (66 % y 68 % respectivamente).

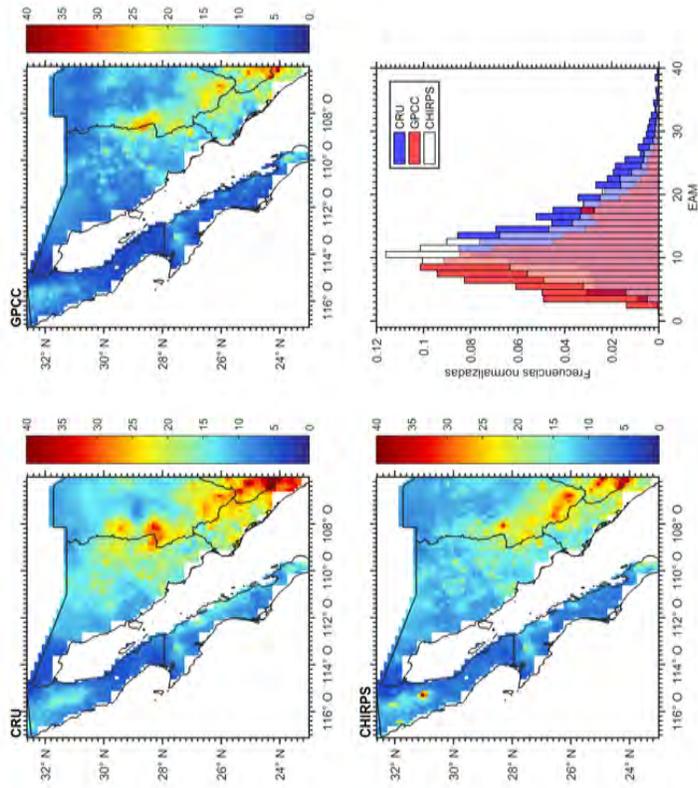


FIGURA 4.5: Distribución del EAM (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

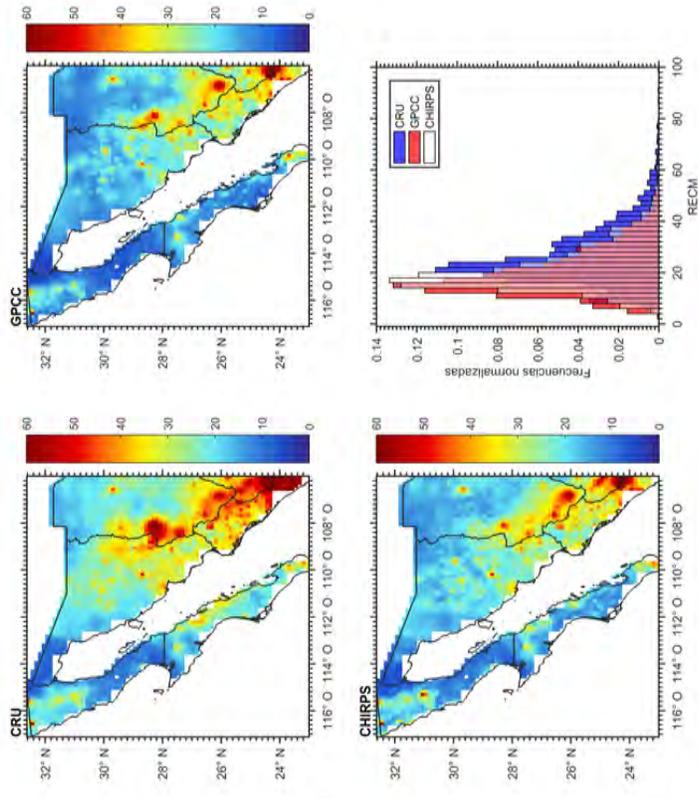


FIGURA 4.6: Distribución del RECM (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

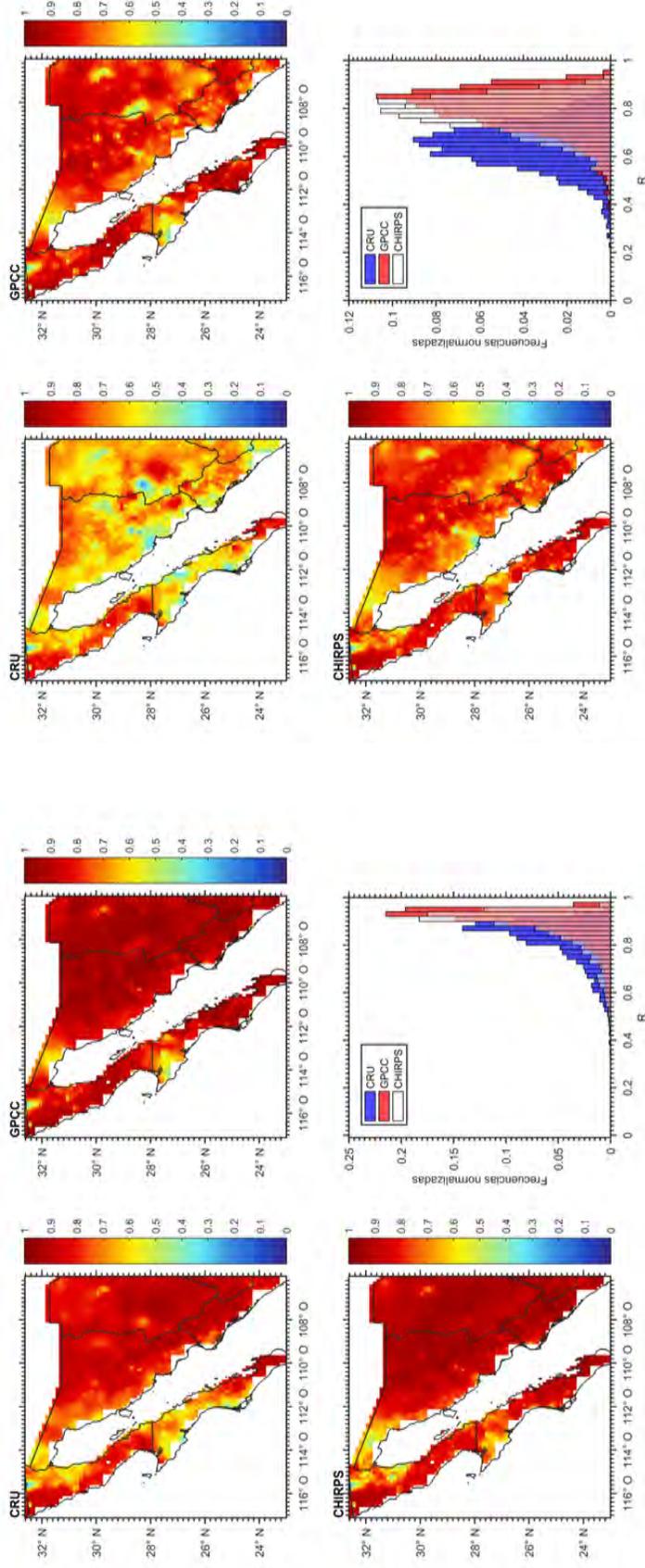


FIGURA 4.7: Distribución de R sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

FIGURA 4.8: Distribución de las anomalías de R sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

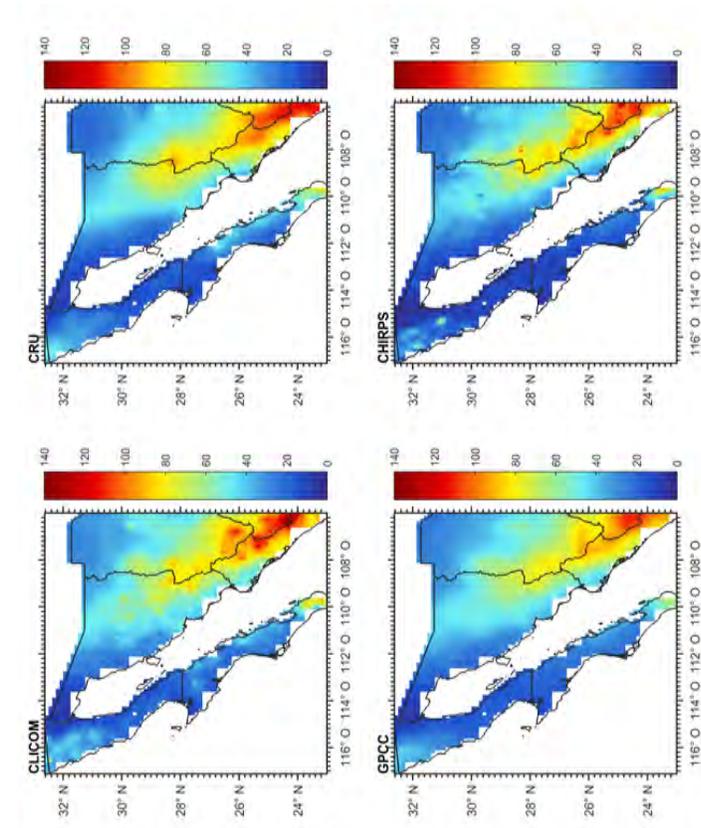


FIGURA 4.9: Distribución de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS.

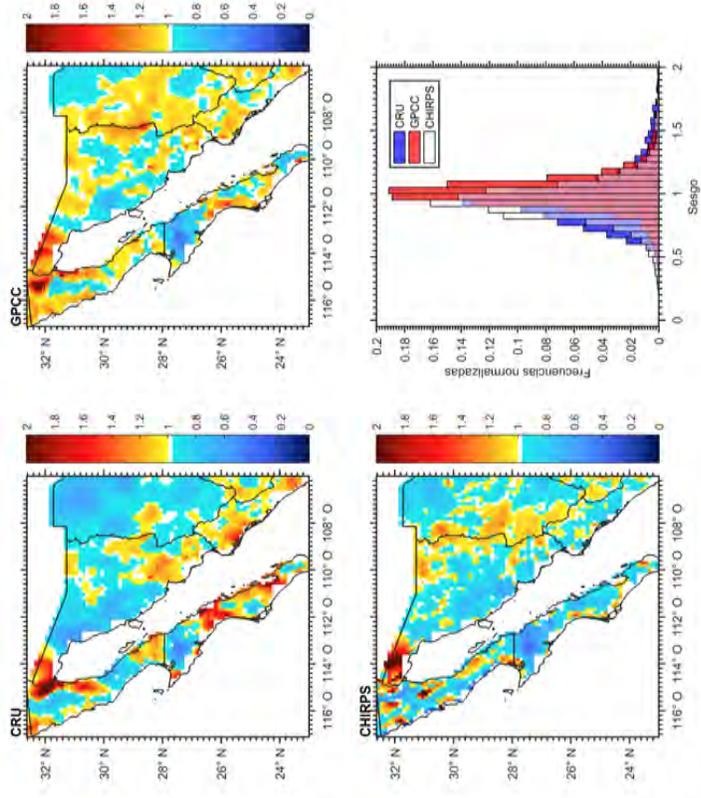


FIGURA 4.10: Distribución del sesgo sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

4.1.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos

a) EAM

La evolución de los valores mensuales del EAM (Fig.4.11) de las tres bases muestran una variación anual similar a lo largo de todo el periodo, este patrón está caracterizado por errores altos durante los meses de la temporada húmeda y por errores bajos durante los meses de bajas precipitaciones. El comportamiento temporal del error puede clasificarse dentro de dos subperiodos de tiempo. En el primer subperiodo (1981-2004) los errores más bajos se observan en GPCC. CRU muestra los errores más altos durante la temporada húmeda, mientras que durante la temporada seca no es posible distinguir visualmente entre las bases CRU y CHIRPS cuál tiene los errores más bajos. En el segundo subperiodo (2005-2008) los errores en GPCC aumentan de modo que CHIRPS queda con los errores más bajos durante la temporada húmeda. Durante los meses de la temporada seca, en CRU y en CHIRPS el error es menor que en GPCC pero no es posible distinguir visualmente en cuál de las dos bases los errores son más bajos.

b) RECM

En las series de tiempo del RECM (Fig.4.12) los errores exhiben los mismos comportamientos que los observados en el cambio temporal del EAM, la única diferencia consiste en que los errores alcanzan mayores amplitudes de variación.

c) Correlación lineal

En el cambio temporal de R (Fig.4.13) no se observa que las tres bases sigan un patrón en particular. Las variaciones de R oscilan entre 0 y 1, aunque la mayor parte del periodo los valores de R son mayores a 0.5. Al igual que en las series temporales del EAM, el comportamiento de R también puede clasificarse dentro de dos subperiodos. En el primero (1981-2004) GPCC tiene los valores de R más altos y en su mayoría tienden a ser mayores a 0.7. Las variaciones de R en CRU y en CHIRPS son más abruptas que las de GPCC y no es posible identificar visualmente cuál de las dos tiene los valores de R más altos. El segundo subperiodo (2005-2008) está principalmente caracterizado por una disminución de la correlación en GPCC. Durante este periodo tampoco es posible determinar visualmente si alguna de las tres bases presenta los valores más altos de R.

d) Correlación lineal de las anomalías

El cálculo de la correlación para las anomalías de la precipitación (Fig.4.14) permite diferen-

ciar mejor las variaciones de R en cada base, ya que el rango de valores disminuye y las separaciones entre las series de tiempo son más acentuadas. Durante el subperiodo 1981-2004, los valores más altos de R vuelven a observarse en GPCC y los más bajos y variables en CRU. Durante el subperiodo 2005-2008, la correlación de GPCC comienza a disminuir y a oscilar de manera más abrupta llegando a alcanzar valores similares a los de CRU. En CHIRPS las variaciones son muy similares a las de GPCC durante el primer subperiodo, no obstante, durante el periodo de 2005 al 2008, tiene las correlaciones más altas ya que no muestra una disminución como la observada en GPCC.

e) Desviación estándar

En la evolución temporal de σ (Fig.4.15) puede verse que los tres productos globales reproducen una variación anual similar a la que se observa en CLICOM, la cual está caracterizada por desviaciones estándar altas durante los meses de la temporada húmeda y por valores bajos durante los meses de baja precipitación. Aunque las cuatro series de tiempo están prácticamente sobrepuestas, es posible identificar visualmente que la desviación estándar de CRU suele ser mayor que la de las otras tres bases durante la temporada húmeda. También destacan los máximos que presenta CLICOM durante los años 2003 y 2007.

f) Sesgo

Los resultados muestran que el sesgo en las tres bases se mantiene con valores cercanos a 1 durante la mayor parte del periodo (Fig.4.16). En GPCC y en CHIRPS las oscilaciones son de mayor amplitud (0.6 - 24 y 0.2 - 32 respectivamente) que en CRU, cuyo rango de variación es el más bajo de las tres bases (0.06 - 5). Al descomponer las series de tiempo para analizar el cambio del sesgo durante cada mes (figura no mostrada) se identifica un comportamiento estacional en los tres productos determinado por el régimen de la precipitación sobre la región. Durante la temporada húmeda las variaciones son menos abruptas y permanecen acotadas entre 0 y 2, mientras que en la época seca se agrupan todos los puntos con un sesgo mayor a 2.

En el anexo B se muestra la evolución temporal del sesgo en escala logarítmica (Fig. B.1) para facilitar la visualización de las variaciones de este parámetro estadístico.

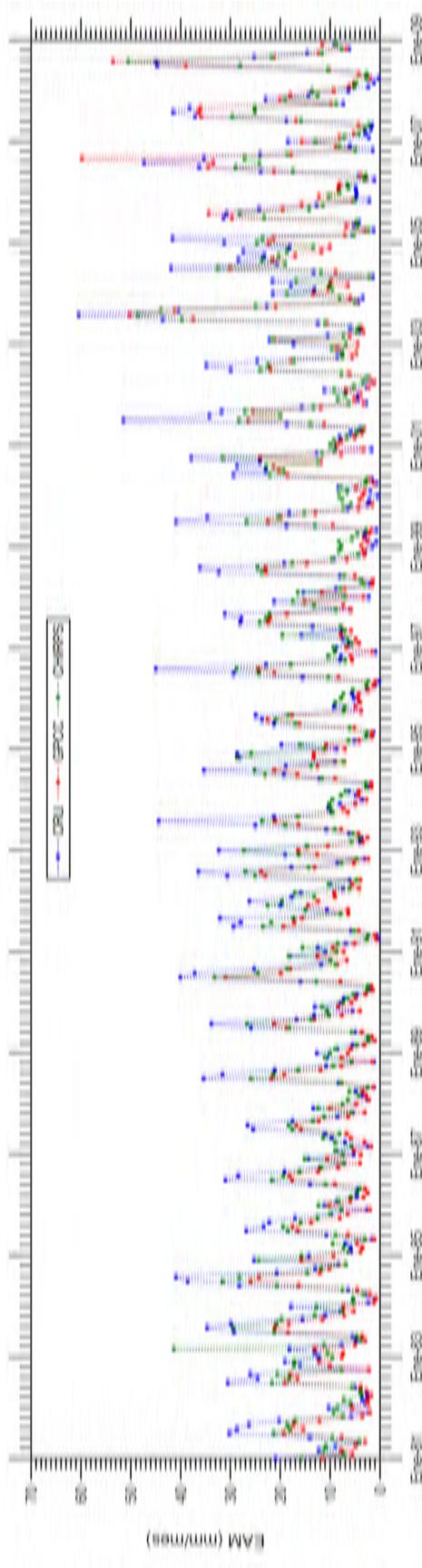


FIGURA 4.11: Evolución temporal del EAM (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

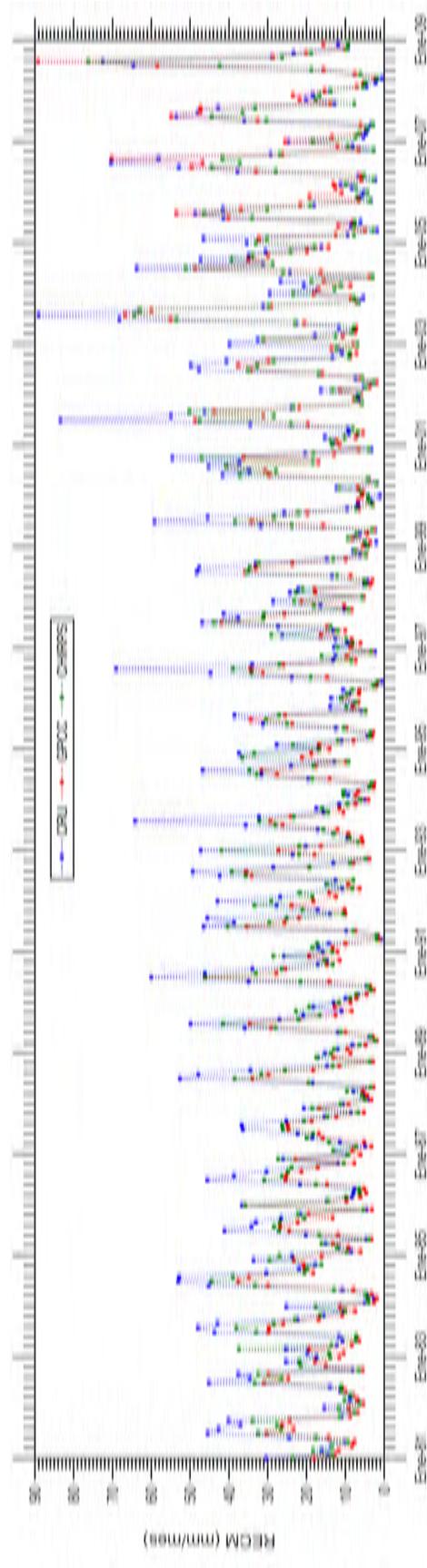


FIGURA 4.12: Evolución temporal del RECM (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

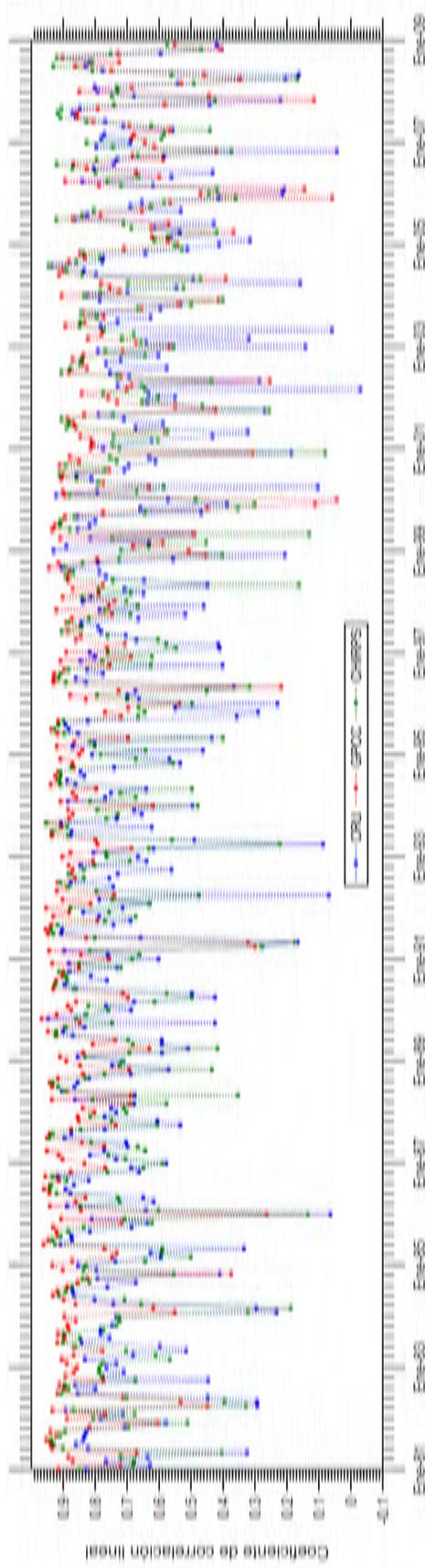


FIGURA 4.13: Evolución temporal de R sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

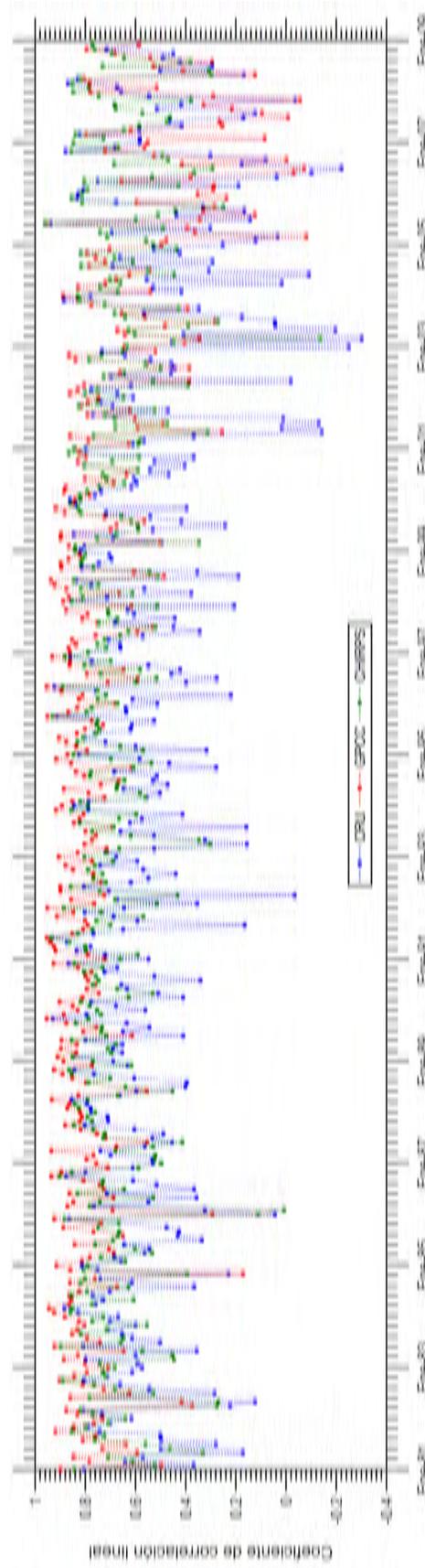


FIGURA 4.14: Evolución temporal de las anomalías de R sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

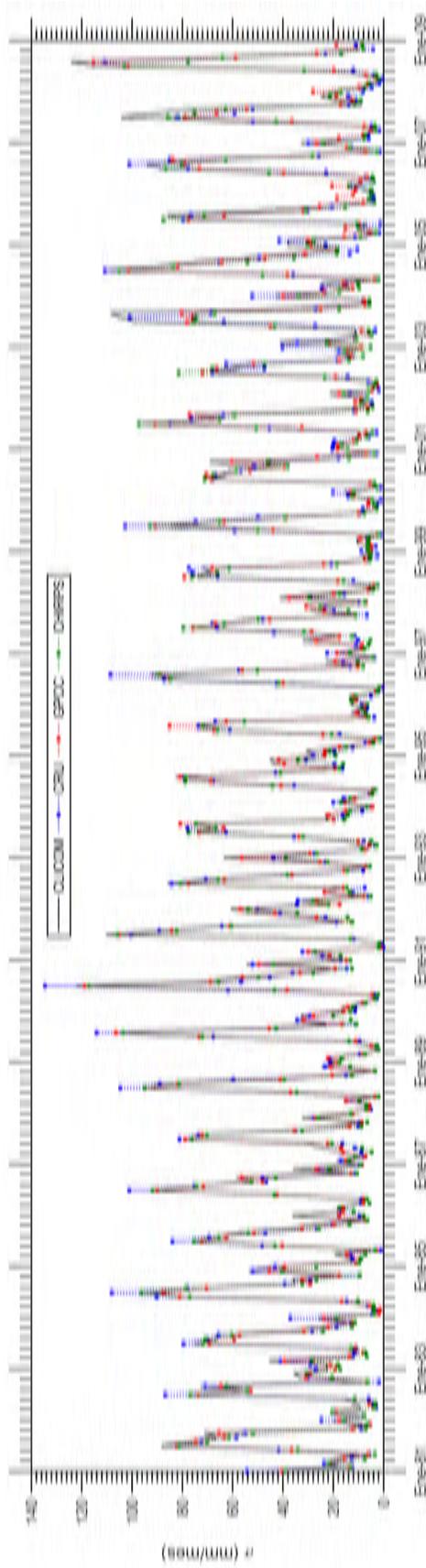


FIGURA 4.15: Evolución temporal de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región noroeste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

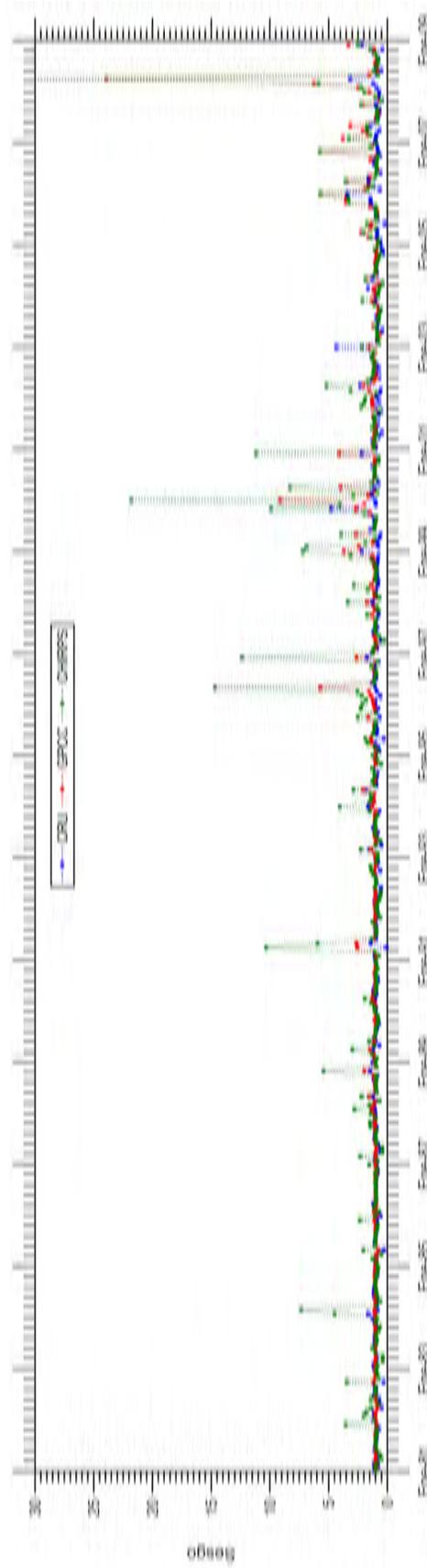


FIGURA 4.16: Evolución temporal del sesgo sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

4.2. Región noreste (NE)

4.2.1. Comparación de la climatología mensual

a) Ciclo anual

De forma general, GPCC y CHIRPS logran reproducir el régimen pluvial de la base CLICOM (Fig.4.17a), el cual está caracterizado por una temporada húmeda durante mayo-octubre (31 - 82 mm/mes) y por una temporada seca durante el resto del año (<20 mm/mes). De acuerdo a la figura 3.3, esta región mezcla diferentes regímenes de precipitación. Como se describe en García (1965), la distribución estacional de esta región presenta un máximo muy marcado en septiembre. También se distingue una variación similar a la señal de la canícula ya que esta también suele extenderse sobre esta porción del país (Magaña, Amador, y Medina, 1999).

Los tres productos no pudieron representar la canícula de CLICOM que, aunque apenas es perceptible, ocurre durante el mes de agosto. En CRU la precipitación es menor a la de las otras bases durante los meses de abril a septiembre.

b) EAM

La variación del error (Fig.4.17b) a lo largo de los meses sigue la evolución del ciclo anual de la precipitación (Fig.4.17a). Durante los meses de la temporada húmeda el error varía en un rango de 5 a 14 mm/mes y durante el resto de los meses varía entre 2 y 7 mm/mes, observándose los errores más bajos en GPCC y los más altos en CRU.

c) RECM

El RECM (Fig.4.17c) también se ve influenciado por el ciclo anual de la precipitación. Durante la estación húmeda el error varía en un rango de 8 a 16 mm/mes y durante el resto del año varía entre 2 y 9 mm/mes. GPCC registra los errores más bajos excepto durante el mes de diciembre. El error en CRU siempre es mayor que en GPCC (a excepción de diciembre) y que en CHIRPS (a excepción de enero, abril y mayo).

d) Correlación lineal

El coeficiente de correlación de los tres productos varía entre 0.7 y 0.98 (Fig.4.17d), siendo GPCC la base con las correlaciones más altas (0.9 - 0.98). Por el contrario, CRU tiene las correlaciones más bajas durante la mayoría de los meses excepto en enero y abril, pues en estos meses la

correlación es más baja en CHIRPS.

e) Desviación estándar

La desviación estándar (Fig.4.17e) sigue el patrón del ciclo anual, durante la estación húmeda varía entre 18 y 45 mm/mes y durante el resto del año varía entre 5 y 25 mm/mes. En GPCC es mayor que la de CLICOM durante julio-septiembre, noviembre y diciembre, mientras que en el resto de los meses las desviaciones estándar de estas dos bases son similares. En CHIRPS, la desviación es mayor durante abril-octubre y en los meses restantes es menor o similar a la de CLICOM. Y por último, CRU se diferencia al tener valores más bajos con respecto a los de las otras bases durante la mayor parte de los meses.

f) Sesgo

Los resultados del sesgo (Fig.4.17f) indican que CRU subestima la precipitación en todos los meses (entre 1 y 17%) excepto en febrero y octubre, meses en los que sobrestima un 8% y 2% respectivamente. De igual manera, CHIRPS subestima la precipitación durante la mayoría de los meses (entre 0.03 y 11%) excepto en junio y diciembre, donde sobrestima un 0.2% y 2% respectivamente. Y contrario a CRU y a CHIRPS, GPCC sobrestima durante la mayor parte del año (entre 0.08 y 12%) excepto durante los meses de junio a agosto, donde subestima entre 0.4 y 0.9%.

g) Diagramas de Taylor

Los diagramas de Taylor (Fig.4.18 y Fig.4.19) muestran que GPCC tiene el mejor desempeño durante los meses de enero a noviembre. En diciembre no hay una sola base que mejor reproduzca a la climatología del mes pues en GPCC el patrón de la variación espacial de la precipitación correlaciona mejor con el patrón de CLICOM, pero, a su vez, GPCC tiene una desviación estándar mayor que la de CHIRPS la cual tiene mayor similitud con la amplitud de CLICOM. Por el contrario, CRU tiene el desempeño más bajo durante la mayor parte de los meses a excepción de enero, abril y mayo.

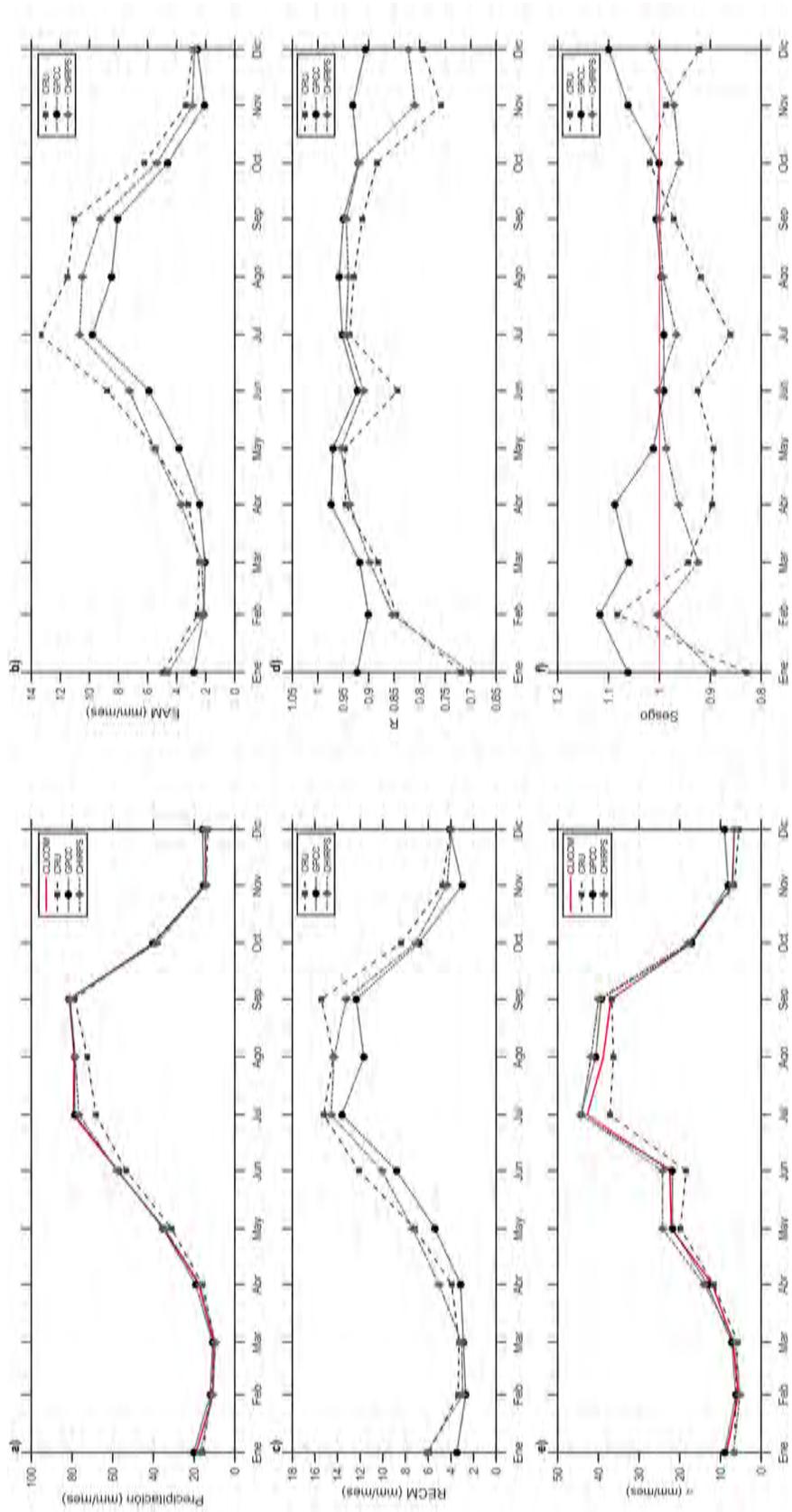


FIGURA 4.17: Ciclo anual de la a) precipitación, el b) EAM, el c) RECM, d) σ y el f) sesgo para el periodo 1981-2008 sobre la región noreste.

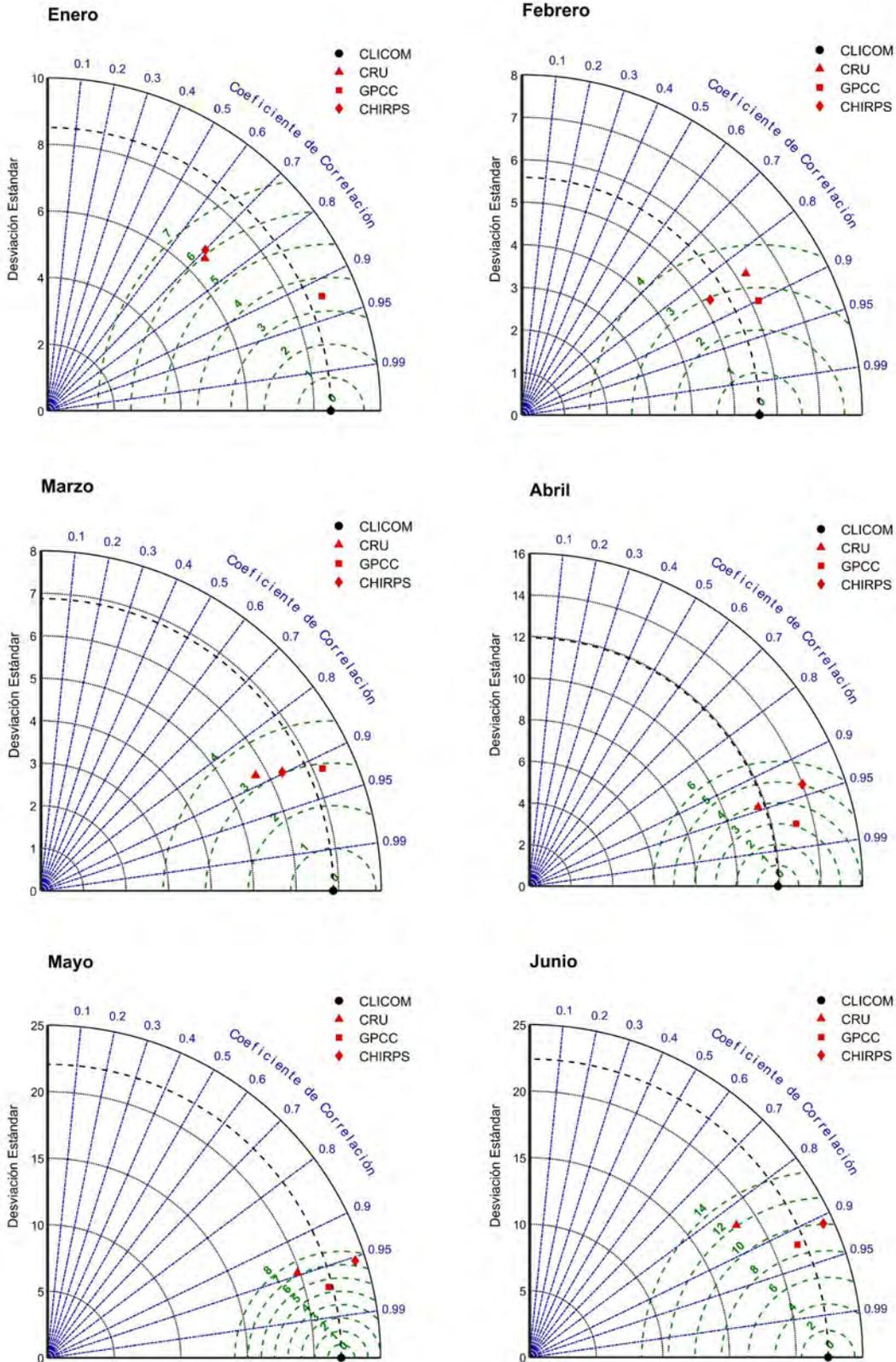


FIGURA 4.18: Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región noreste durante los meses de enero a junio.

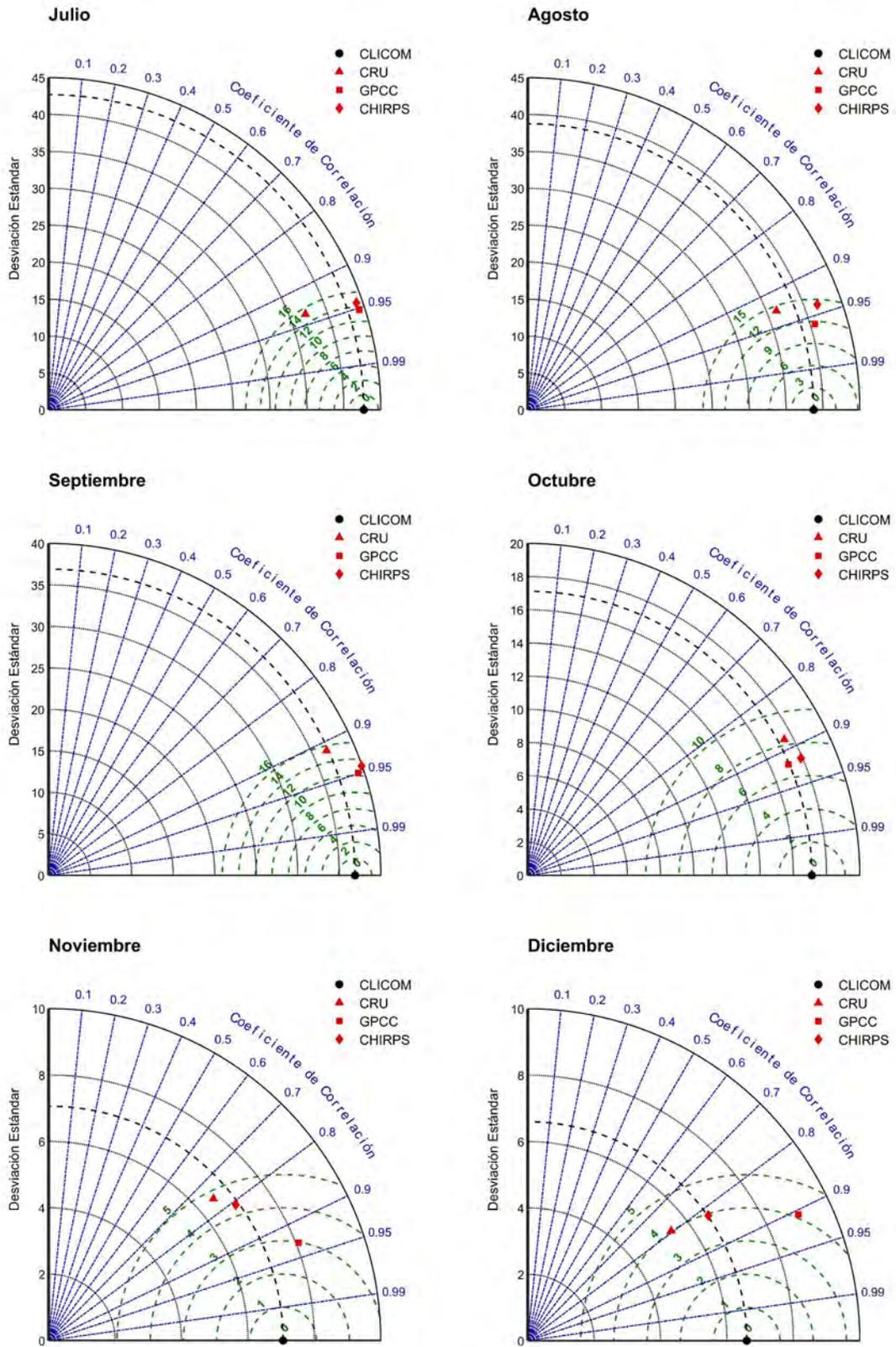


FIGURA 4.19: Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región noreste durante los meses de julio a diciembre.

4.2.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada

Los resultados de este análisis (Tabla 4.2) muestran que GPCC tiene los errores EAM y RECM más bajos al igual que la correlación más alta, aunque las correlaciones de la tres bases globales son iguales superiores a 0.92. Por el contrario, CRU tiene los errores más altos así como la correlación lineal más baja.

De los tres productos globales, CHIRPS posee la desviación estándar de mayor similitud con la del CLICOM, aunque esta es más alta. Las desviaciones estándar de CRU y de GPCC sobrepasan a la del CLICOM por alrededor de 15 y 14 unidades respectivamente.

Finalmente, el sesgo de las tres bases toma valores muy próximos a 1 e indica que GPCC sobrestima la precipitación en el orden del 1 %, mientras que CRU y CHIRPS la subestiman un 7 % y 2 % respectivamente.

De acuerdo con el diagrama de Taylor (Fig.4.20), GPCC es la base que mejor logra reproducir a la precipitación media anual acumulada de CLICOM sobre la región y CRU es la que tiene el desempeño más bajo.

TABLA 4.2: Comparación estadística de la precipitación media anual acumulada (1981-2008) sobre la región noreste.

	EAM (mm/mes)	RECM (mm/mes)	R	σ (mm/mes)	Sesgo
CLICOM	0	0	1	168.05	1
CRU	52.83	66.94	0.92	152.71	0.93
GPCC	36.51	53.96	0.96	182.47	1.01
CHIRPS	44.00	58.50	0.94	176.80	0.98

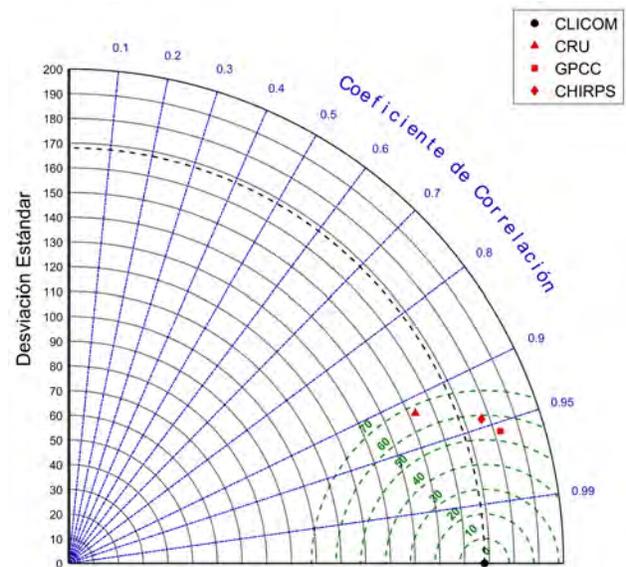


FIGURA 4.20: Desempeño de las bases globales para reproducir la precipitación acumulada (1981-2008) de la base CLICOM sobre la región noreste.

4.2.3. Comparación de las celdas de malla

a) EAM

Las tres bases presentan un patrón similar en la distribución espacial de los errores (Fig.4.21). Los errores más altos se concentran sobre las zonas montañosas de la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental y sobre la costa este. GPCC muestra los errores más bajos en comparación con los observados en CRU y en CHIRPS.

En el histograma de frecuencias (Fig.4.21), GPCC tiene la distribución con menor sesgo, lo cual indica que una mayor cantidad de celdas de malla tienen valores bajos de EAM. En GPCC el 74% de la región tiene errores menores a 15 mm/mes, en CHIRPS el 65% y en CRU el 50%.

b) RECM

La distribución espacial del RECM (Fig.4.22) se asemeja a la del EAM y, en las tres bases, los errores más altos se localizan sobre las zonas montañosas de la región. CRU muestra los errores más altos, mientras que entre GPCC y CHIRPS no es posible estimar visualmente cuál es la de menor RECM.

Aunque las tres distribuciones mostradas en el histograma (Fig.4.22) presentan un sesgo positivo, la distribución del CRU está más sesgada hacia la derecha, lo cual indica que los errores en CRU son más grandes en comparación con los errores de las otras dos bases. En GPCC el 68% de las celdas de malla tiene errores menores a 26 mm/mes, en CHIRPS el 66% y en CRU el 53%.

c) Correlación lineal

Sobre la mayor parte de la región dominan valores de R mayores a 0.8 (Fig.4.23). En general, los productos globales comparten el mismo patrón de distribución espacial, presentándose los valores más bajos en la zona centro. En CRU se observan los valores de R más bajos, mientras que entre GPCC y CHIRPS no es posible estimar visualmente cuál base tiene los valores más altos aunque es posible visualizar algunas diferencias, como por ejemplo, los valores de R bajos GPCC sobre Coahuila en la base GPCC.

De acuerdo con la distribución de frecuencias (Fig.4.23), en CRU son más recurrentes los valores de R menores a 0.8. En GPCC y CHIRPS no es posible caracterizar a simple vista las diferencias entre las distribuciones pero, calculando la proporción de áreas con los valores de R más altas, se obtiene que en GPCC el 74% de la región muestra correlaciones mayores a 0.8, en

CHIRPS el 71 % y en CRU el 43 %. Considerando solamente R mayores 0.9, la proporción es de 31 % en GPCC, 25 % en CHIRPS y 6 % en CRU.

d) Correlación lineal de las anomalías

Utilizando las anomalías de la precipitación (Fig.4.24), los valores de R resultantes son más bajos en comparación con los observados en los resultados anteriores (Fig.4.23). Asimismo, las distribuciones de frecuencias están más diferenciadas entre sí, lo que permite visualizar mejor las diferencias entre las bases. CRU sigue teniendo los valores de R más bajos, en cambio, en GPCC se observan valores de R altos sobre la mayor parte de la región, a excepción de algunas zonas sobre Coahuila y Nuevo León, en donde los valores de R son más altos en CHIRPS.

A partir del histograma de frecuencias (Fig.4.24) se obtiene que, tanto en GPCC como en CHIRPS, el 76 % de la región muestra valores de R mayores a 0.7, mientras que en CRU se obtiene el 24 %. Considerando los valores mayores a 0.8, la proporción es de 39 % en GPCC, 35 % en CHIRPS y 5 % en CRU.

e) Desviación estándar

En las cuatro bases se observa un patrón espacial similar de los valores de desviación estándar (Fig.4.25), los valores más altos se ubican sobre las zonas montañosas y la costa este, disminuyendo progresivamente hacia el centro de la región. En CRU y en GPCC las diferencias más notorias se pueden observar sobre los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, en donde los valores de σ son menores a los observados en CLICOM. En CHIRPS la desviación estándar es la que mejor reproduce a la distribución de CLICOM.

En el anexo A se muestra la distribución espacial de la sustracción de la desviación estándar de las cuatro bases globales a la desviación de CLICOM (Fig. A.2), la cual permite visualizar mejor las diferencias de este parámetro estadístico.

f) Sesgo

Sobre las bases globales no se exhibe un patrón común que caracterice a la distribución del sesgo (Fig.4.26), una de las pocas características que comparten las tres bases son los dos puntos de subestimación en el norte de Chihuahua, así como la zona de sobrestimación localizada sobre el sur de Nuevo León que comparten CRU y GPCC. El sesgo en CRU varía entre 0.51 y 2.13, en GPCC entre 0.57 y 1.92 y en CHIRPS entre 0.45 y 1.80.

Mediante el histograma de frecuencias (Fig.4.26) se estima que GPCC sobrestima la precipi-

tación en el 55% de la región, mientras que en CRU y CHIRPS mayor porción de áreas tiende a subestimarla (71% y 59% respectivamente).

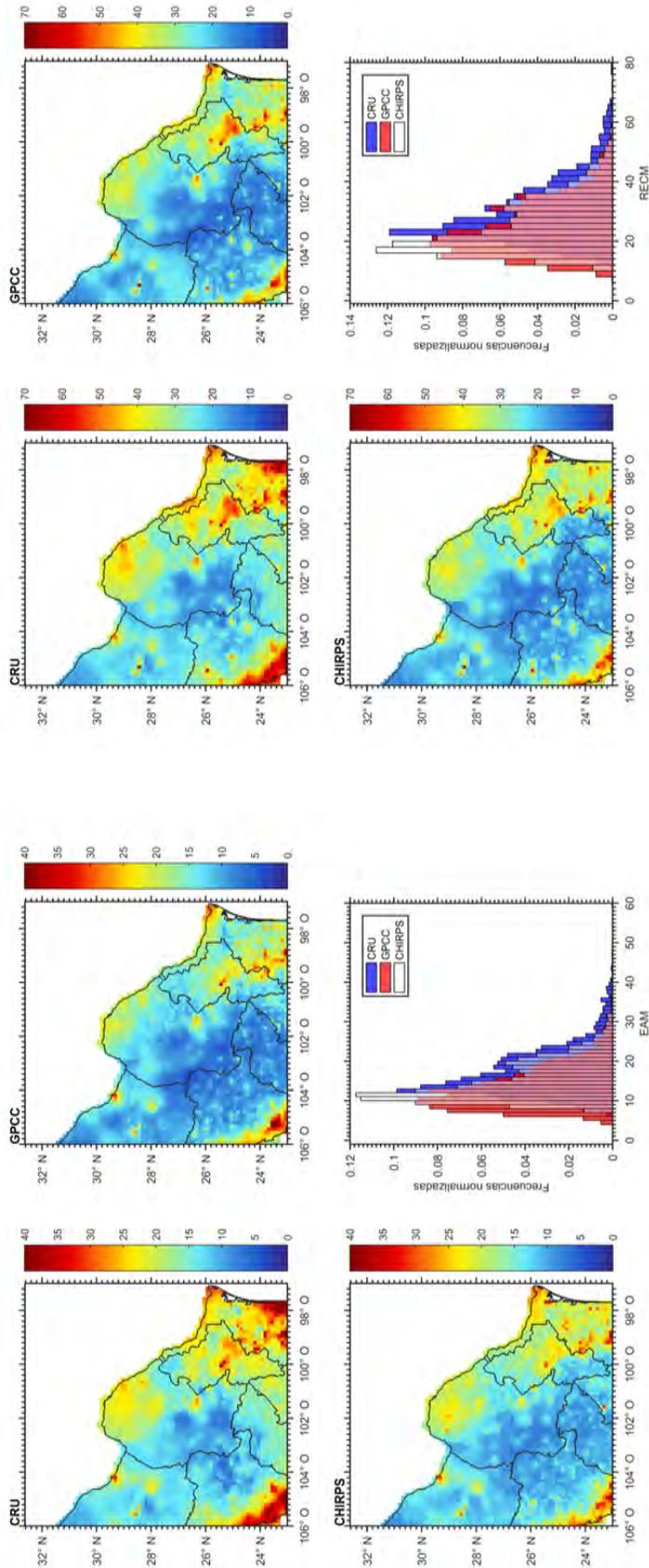


FIGURA 4.21 : Distribución del EAM (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

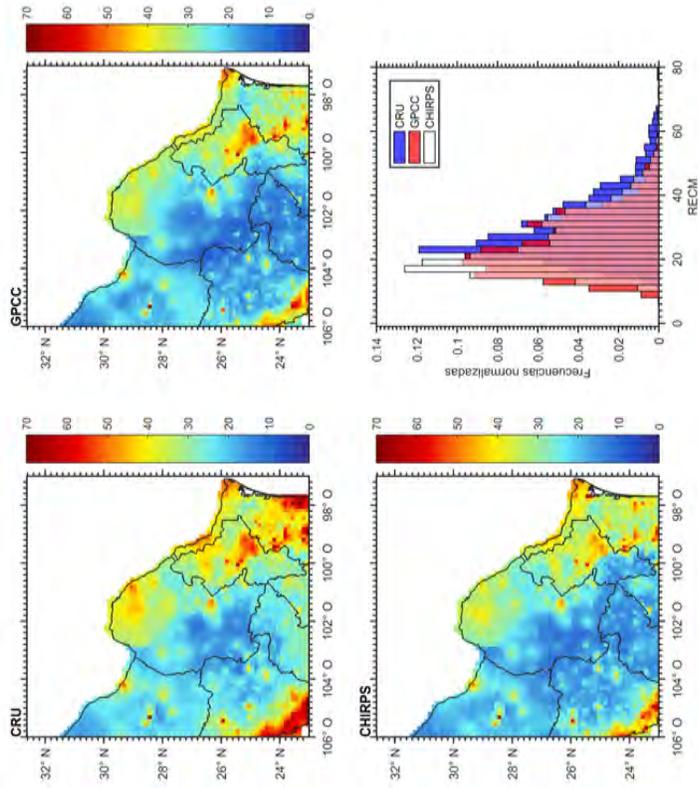


FIGURA 4.22: Distribución del RECM (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

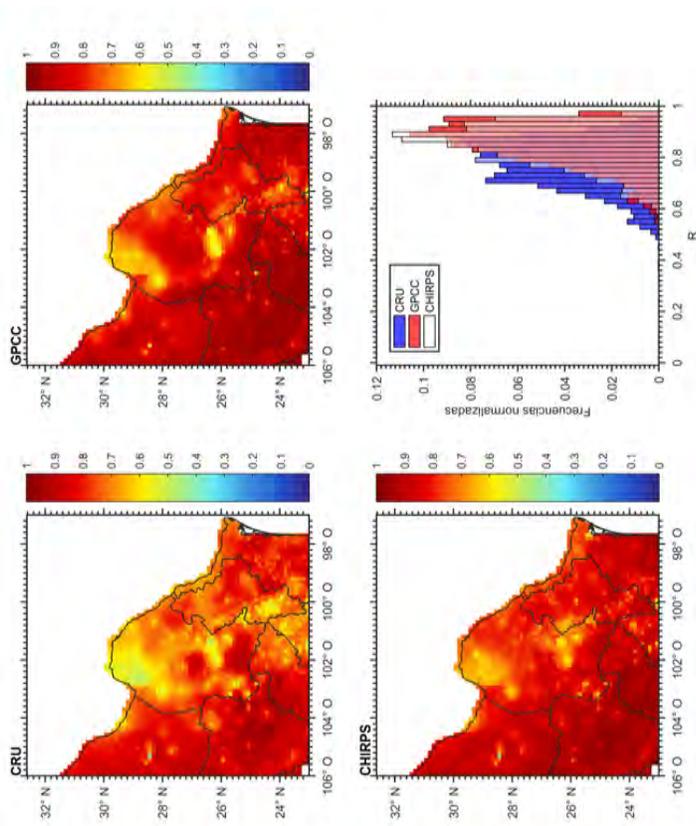


FIGURA 4.23: Distribución de R sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

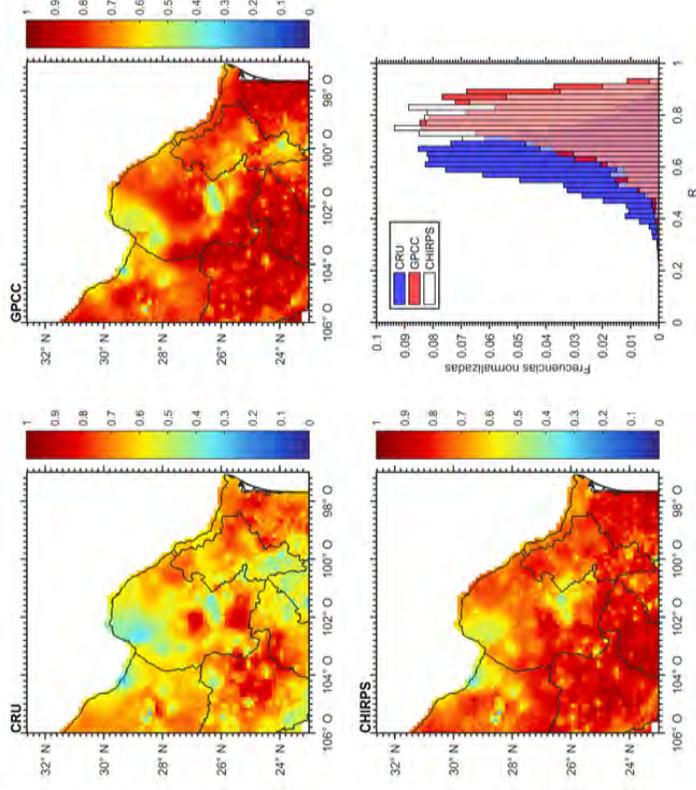


FIGURA 4.24: Distribución de las anomalías de R (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

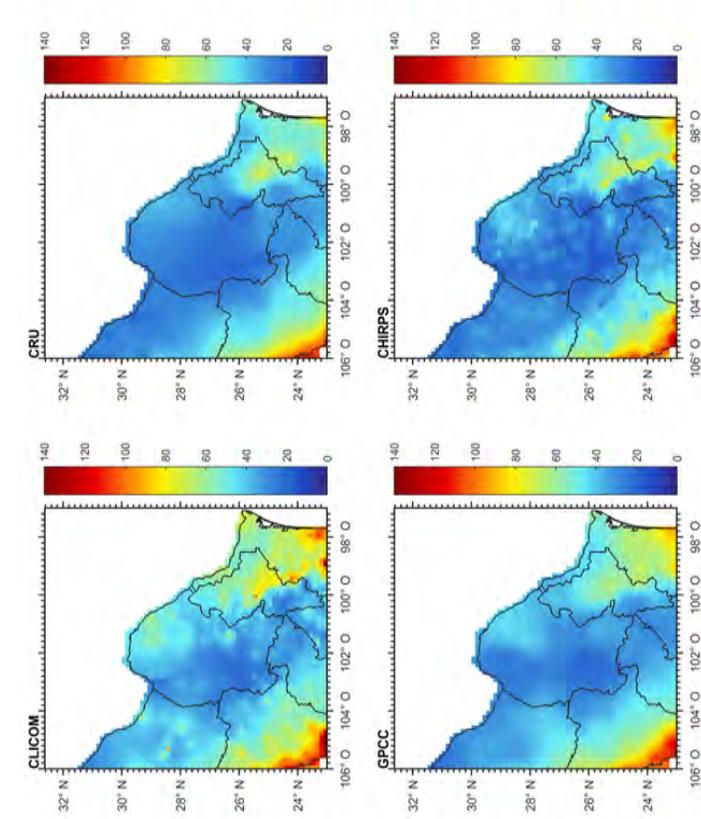


FIGURA 4.25: Distribución de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS.

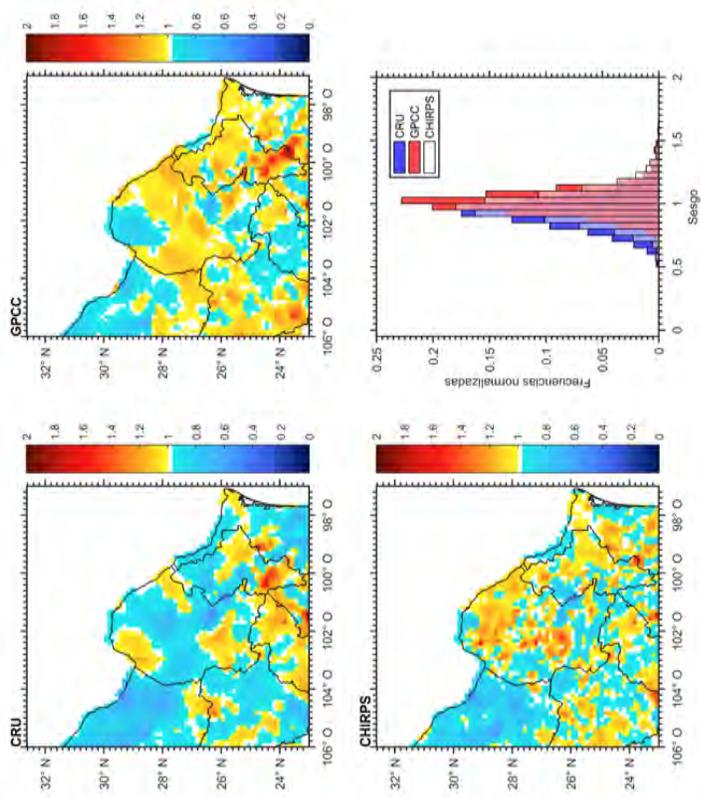


FIGURA 4.26: Distribución del sesgo sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

4.2.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos

a) EAM

La variación anual del EAM (Fig.4.27) en las tres bases sigue el mismo patrón caracterizado por errores altos durante los meses de la temporada húmeda y por errores bajos durante los meses de bajas precipitaciones. El comportamiento temporal del error puede clasificarse dentro de dos subperiodos de tiempo separados por un máximo que ocurre simultáneamente en las tres bases durante el 2003. Durante el primer subperiodo (1981-2003) los errores más bajos se observan en GPCC, mientras que CRU muestra los errores más altos durante la temporada húmeda, pues durante la temporada seca no es posible distinguir visualmente entre las bases CRU y CHIRPS cuál tiene los errores más bajos. En el segundo subperiodo (2004-2008) los errores de GPCC aumentan de modo que CHIRPS queda con los errores más bajos durante la temporada húmeda. En los meses de la temporada seca no es posible distinguir cuál de las tres bases registra los errores más bajos.

b) RECM

En las series de tiempo del RECM (Fig.4.28) los errores exhiben los mismos comportamientos que los observados en el cambio temporal del EAM.

c) Correlación lineal

En el cambio temporal de R (Fig.4.29) no se observa que las tres bases sigan un patrón en particular. Las variaciones de R oscilan entre -0.4 y 1, aunque la mayor parte del periodo la correlación en las tres series es superior a 0.4. Al igual que en las series temporales del EAM y del RECM, el comportamiento de R también puede clasificarse dentro de dos subperiodos. En el primero (1981-2003) GPCC tiene los valores de R más altos ya que, en general, tienden a ser mayores a 0.6. Las variaciones de R en CRU y en CHIRPS son más abruptas que las de GPCC, pero en CRU la correlación tiende a ser menor que en las otras dos bases. El segundo subperiodo (2004-2008) está caracterizado por una disminución y un aumento en la variación de la correlación en GPCC y tampoco es posible determinar visualmente cuál de las tres bases presenta los valores más altos de R.

d) Correlación lineal de las anomalías

El cálculo de la correlación para las anomalías de la precipitación (Fig.4.30) permite diferenciar mejor las variaciones de R en cada base ya que el rango de valores disminuye y las separaciones

entre las series de tiempo son más acentuadas. Sin embargo, a pesar de la mayor diferenciación entre las series, los resultados son los mismos que los enunciados en el inciso anterior.

e) Desviación estándar

En la evolución temporal de σ (Fig.4.31) puede verse que los tres productos globales reproducen la misma variación anual que se observa en CLICOM, la cual está caracterizada por desviaciones estándar altas durante los meses de la temporada húmeda y por valores bajos durante los meses de baja precipitación. Aunque las cuatro series de tiempo están prácticamente sobrepuestas, pueden identificarse algunas características como el máximo que se observa en CLICOM durante el 2003 y el que a partir de ese máximo la desviación estándar de las tres bases, principalmente en GPCC, comienza a tener variaciones que sobrepasan a las desviaciones estándar de CLICOM.

En el anexo B se muestra la evolución temporal del sesgo en escala logarítmica (Fig. B.2) para facilitar la visualización de las variaciones de este parámetro.

f) Sesgo

Los resultados muestran que el sesgo en las tres bases se mantiene con valores cercanos a 1 durante la mayor parte del periodo (Fig.4.32). En CHIRPS se observan las oscilaciones de mayor amplitud (0.4 - 16), en GPCC los valores varían entre 0.4 - 6 y en CRU el sesgo tiene el rango de menor variación (0.2 - 3.2). Al descomponer las series de tiempo para analizar el cambio del sesgo durante cada mes (figura no mostrada) se identifica un comportamiento estacional en los tres productos. Durante la temporada húmeda las variaciones son menos abruptas y permanecen acotadas entre 0 y 2, mientras que en la época seca se agrupan todos los puntos con un sesgo mayor a 2. Adicionalmente, en las series temporales también es posible visualizar que, a partir del 2003, el sesgo en las tres bases comienza a aumentar y a oscilar de manera más abrupta en comparación con los años anteriores al 2003.

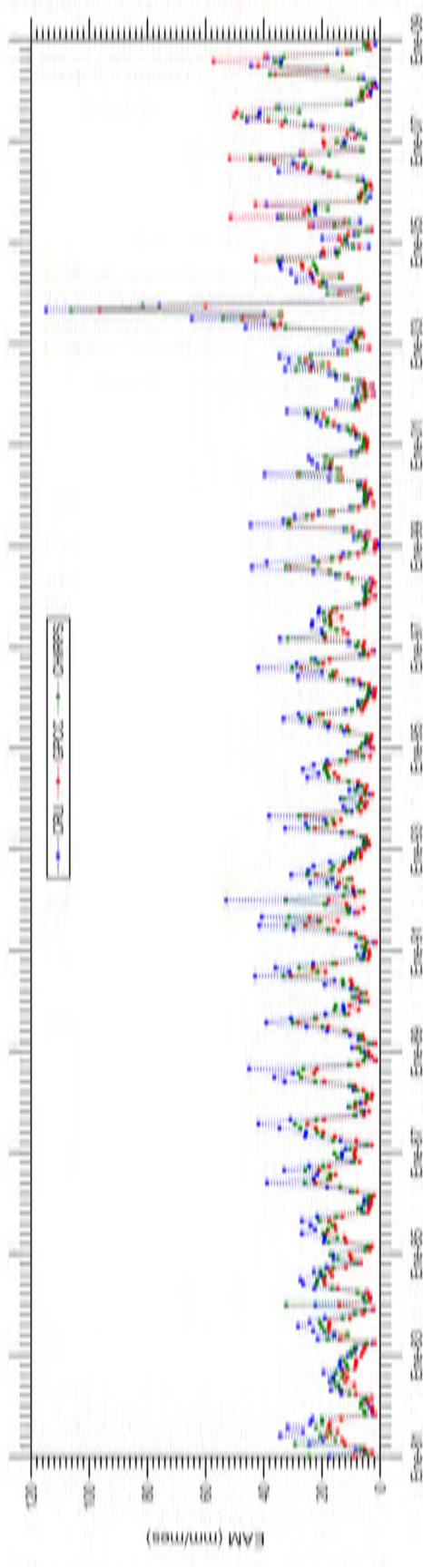


FIGURA 4.27: Evolución temporal del EAM (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

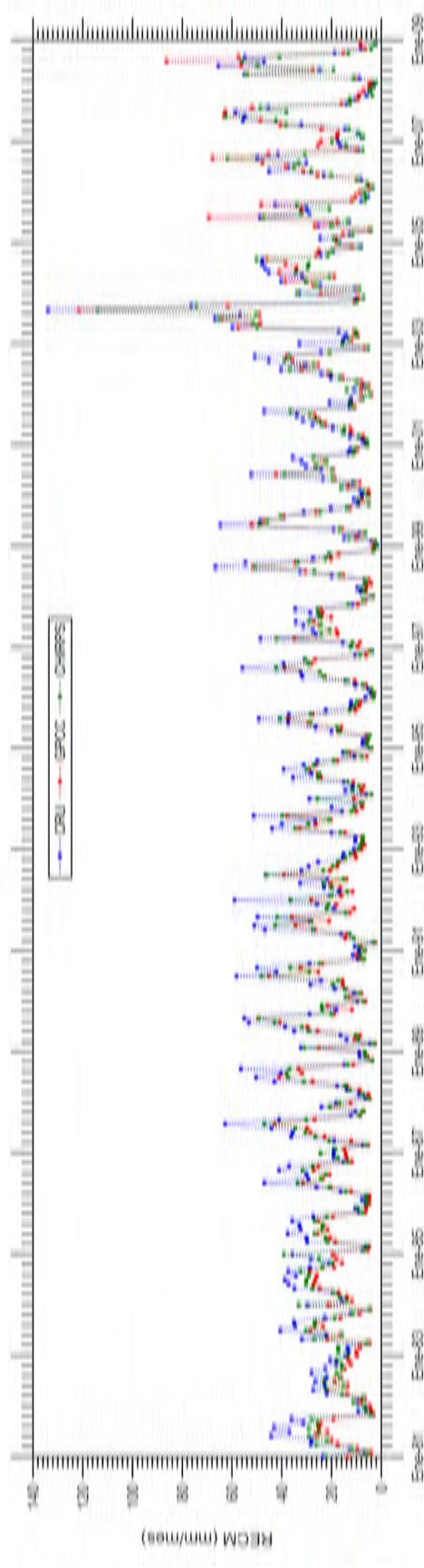


FIGURA 4.28: Evolución temporal del RECM (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

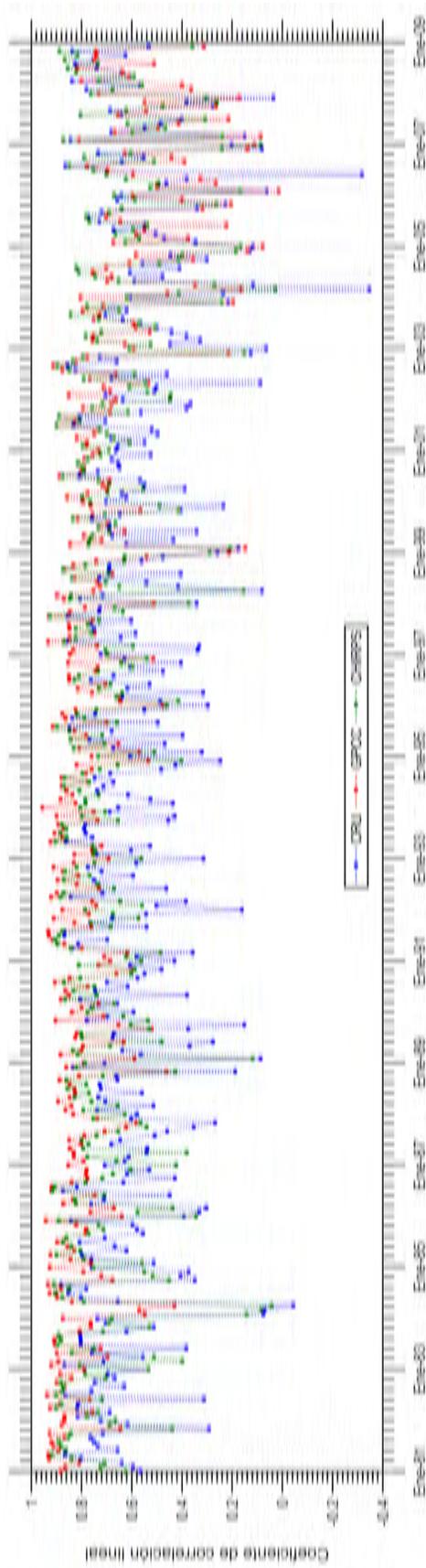


FIGURA 4.29: Evolución temporal de R sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

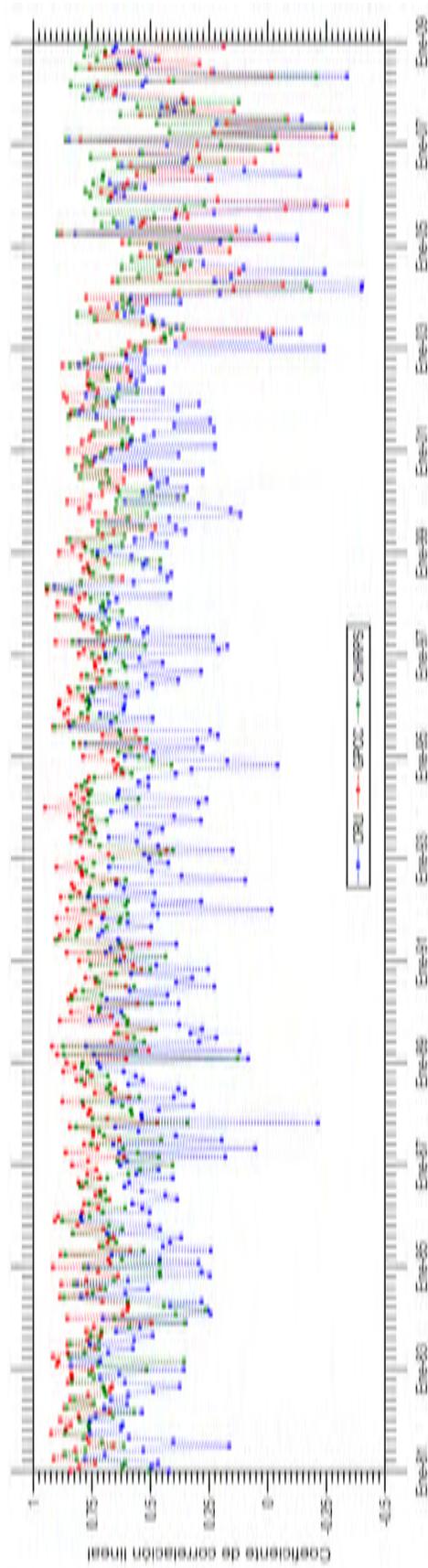


FIGURA 4.30: Evolución temporal de las anomalías de R sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

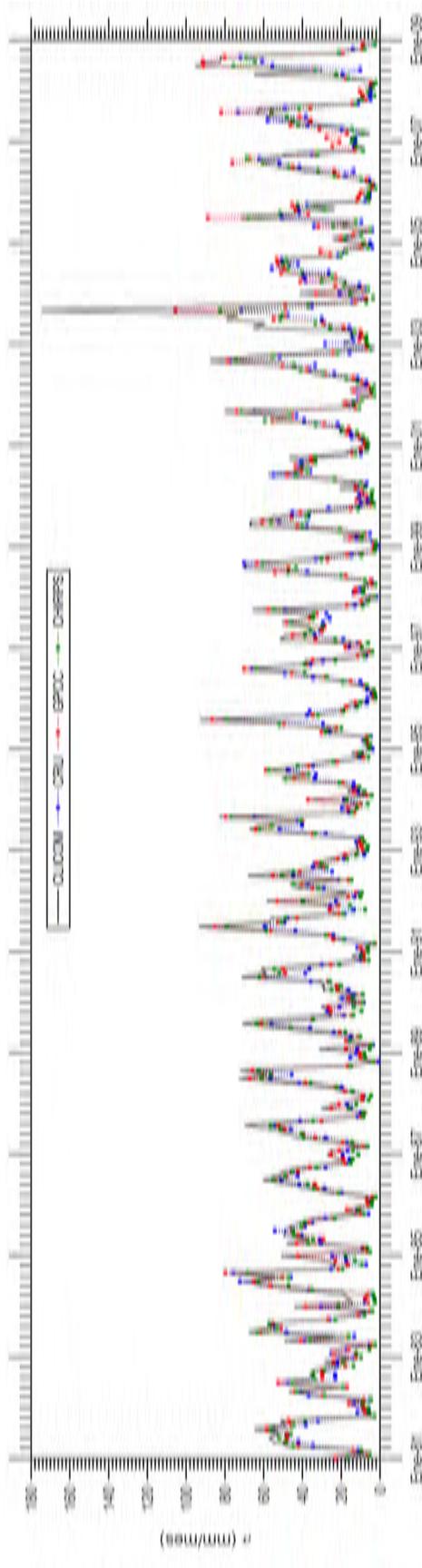


FIGURA 4.31: Evolución temporal de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región noreste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

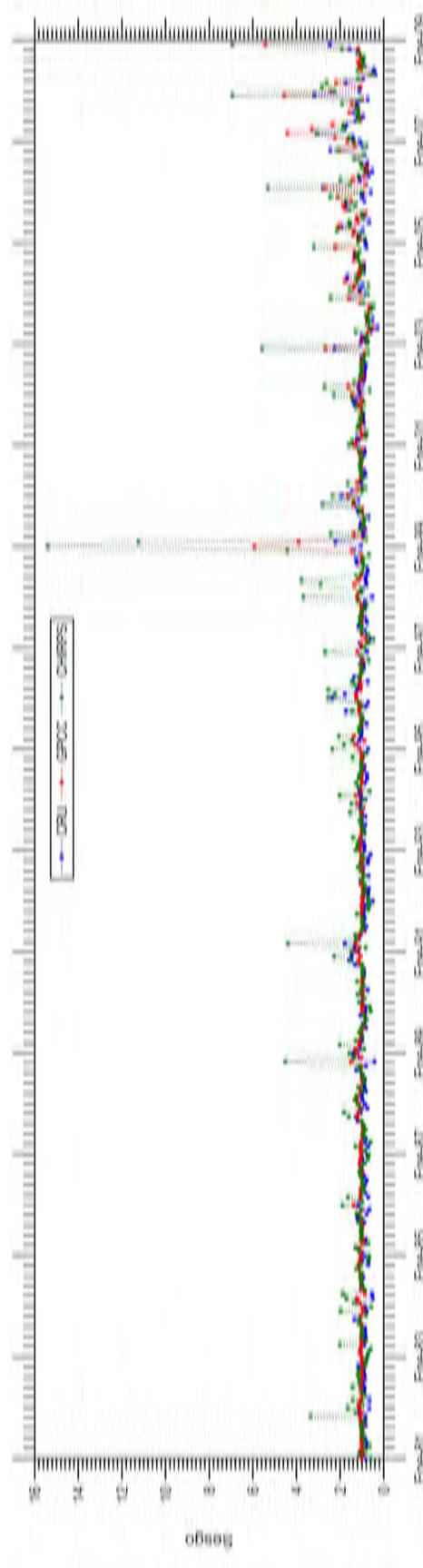


FIGURA 4.32: Evolución temporal del sesgo sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

4.3. Región centro sur (CS)

4.3.1. Comparación de la climatología mensual

a) Ciclo anual

Los tres productos logran reproducir el régimen pluvial del CLICOM (Fig.4.33a), el cual se caracteriza por una estación húmeda que se extiende durante junio-octubre (80 - 196 mm/mes) y por una estación seca durante el resto del año (<60 mm/mes). Esta variación del ciclo anual es consistente con el observado sobre el centro y sur del país (Perdigón-Morales et al., 2018), en el ciclo anual se distingue la señal de la canícula con máximos de precipitación en julio y en septiembre.

La base que más se diferencia de las demás es CRU, al registrar mayor cantidad de precipitación durante el mes de septiembre. También destaca el hecho de que en CLICOM y en GPCC no se observa la canícula durante el mes de agosto que se percibe con claridad en CRU y con mayor dificultad en CHIRPS.

b) EAM

La variación del EAM (Fig.4.33b) a lo largo de los meses sigue la evolución del ciclo anual de la precipitación (Fig.4.33a). Durante los meses de la temporada húmeda el error varía en los tres productos entre 11 y 35 mm/mes, mientras que el resto de los meses varía entre 1 y 13 mm/mes. GPCC tiene los errores más bajos excepto durante julio y agosto, meses en los cuales los errores son más bajos en CHIRPS. CRU tiene errores más altos que los de las otras dos bases excepto durante diciembre, en donde el error es mayor en CHIRPS.

c) RECM

El RECM (Fig.4.33c) también se ve influenciado por el ciclo anual de la precipitación. Durante la estación húmeda el error varía en un rango de 18 a 45 mm/mes y durante el resto del año varía entre 3 y 19 mm/mes. GPCC tiene los errores más bajos excepto durante mayo-septiembre, meses en los que el error es menor en CHIRPS. El error en CHIRPS es mayor que en GPCC durante enero-abril y octubre-diciembre. CRU tiene errores más altos que en las otras dos bases excepto durante diciembre, en donde el error es menor que en CHIRPS.

d) Correlación lineal

El coeficiente de correlación de los tres productos varía entre 0.78 y 0.95 (Fig.4.33d), siendo GPCC la base con las correlaciones más altas durante enero, febrero, abril, noviembre y diciembre. CHIRPS tiene las correlaciones más altas durante marzo y mayo-octubre, mientras que CRU tiene las correlaciones más bajas excepto durante el mes de diciembre.

e) Desviación estándar

La desviación estándar (Fig.4.33e) sigue el patrón del ciclo anual. CHIRPS tiene las desviaciones estándar más cercanas a las de CLICOM, pues la desviación de GPCC y de CRU muestra diferencias importantes durante los meses de mayo a agosto. Durante la estación húmeda varía entre 40 y 88 mm/mes, y el resto del año varía entre 7 y 37 mm/mes.

f) Sesgo

Los resultados del sesgo (Fig.4.33f) indican que CRU sobrestima la precipitación durante marzo-junio y septiembre-noviembre (entre 1 y 20%), y subestima el resto del año (entre 1 y 25%). GPCC posee el sesgo menos variable y más próximo a 1, sobrestimando la precipitación durante enero, febrero, abril, mayo, noviembre y diciembre (entre 0.3 y 5%) y subestimándola durante los otros seis meses (entre 0.6 y 3%). CHIRPS sobrestima durante junio, julio y septiembre (entre 0.1 y 3%) y subestima el resto del año (entre 0.1 y 18%).

g) Diagramas de Taylor

Los diagramas Taylor (Fig.4.34 y Fig.4.35) muestran que GPCC se desempeña mejor durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre; en cambio, CHIRPS se desempeña mejor durante la mitad del año restante. CRU posee el desempeño más bajo durante la mayor parte del año excepto durante diciembre, pues en este mes CHIRPS tiene el desempeño más bajo.

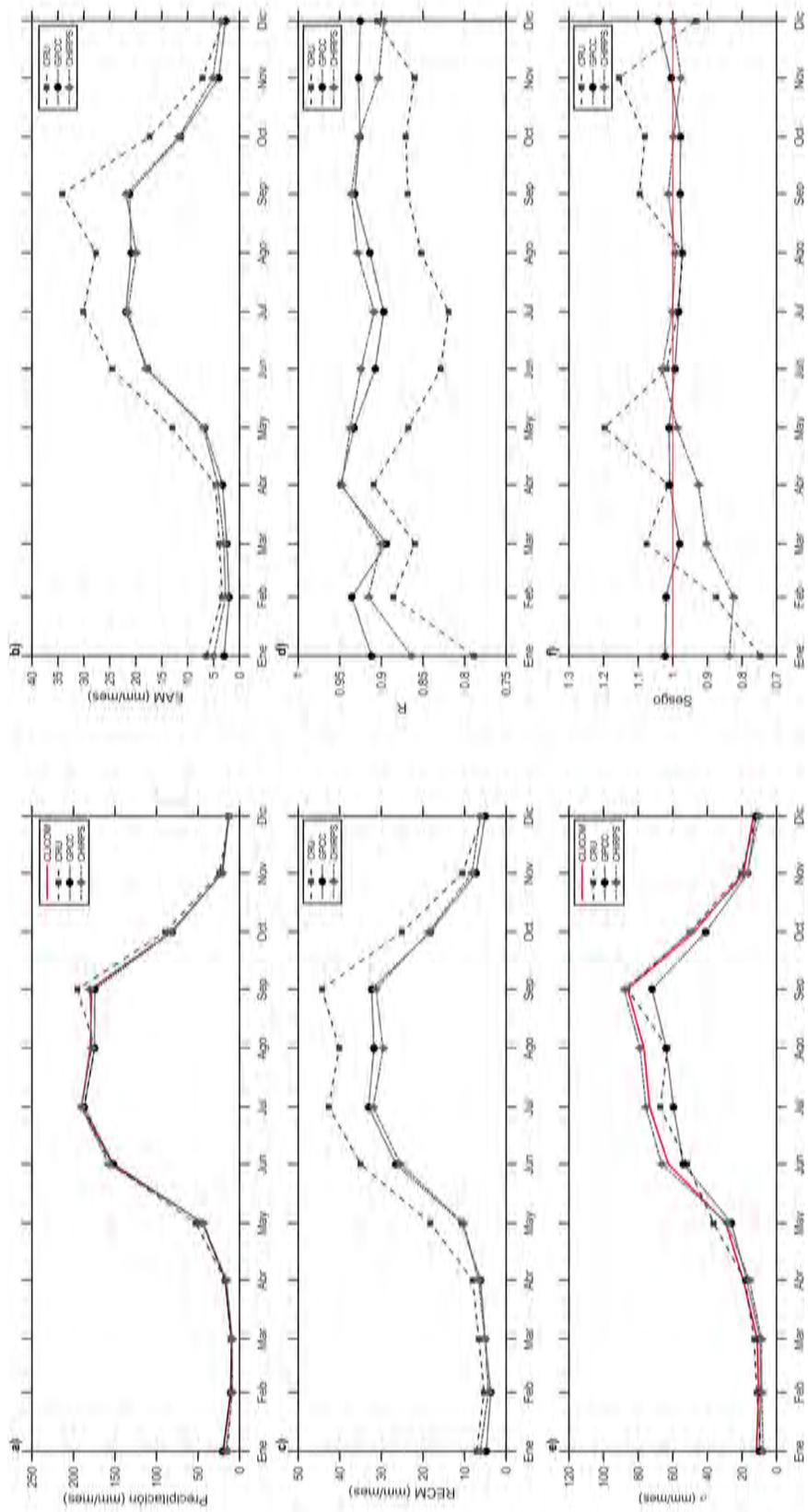


FIGURA 4.33: Ciclo anual de la a) precipitación, el b) EAM, el c) RECM, el d) σ y el e) σ para el periodo 1981-2008 sobre la región centro sur.

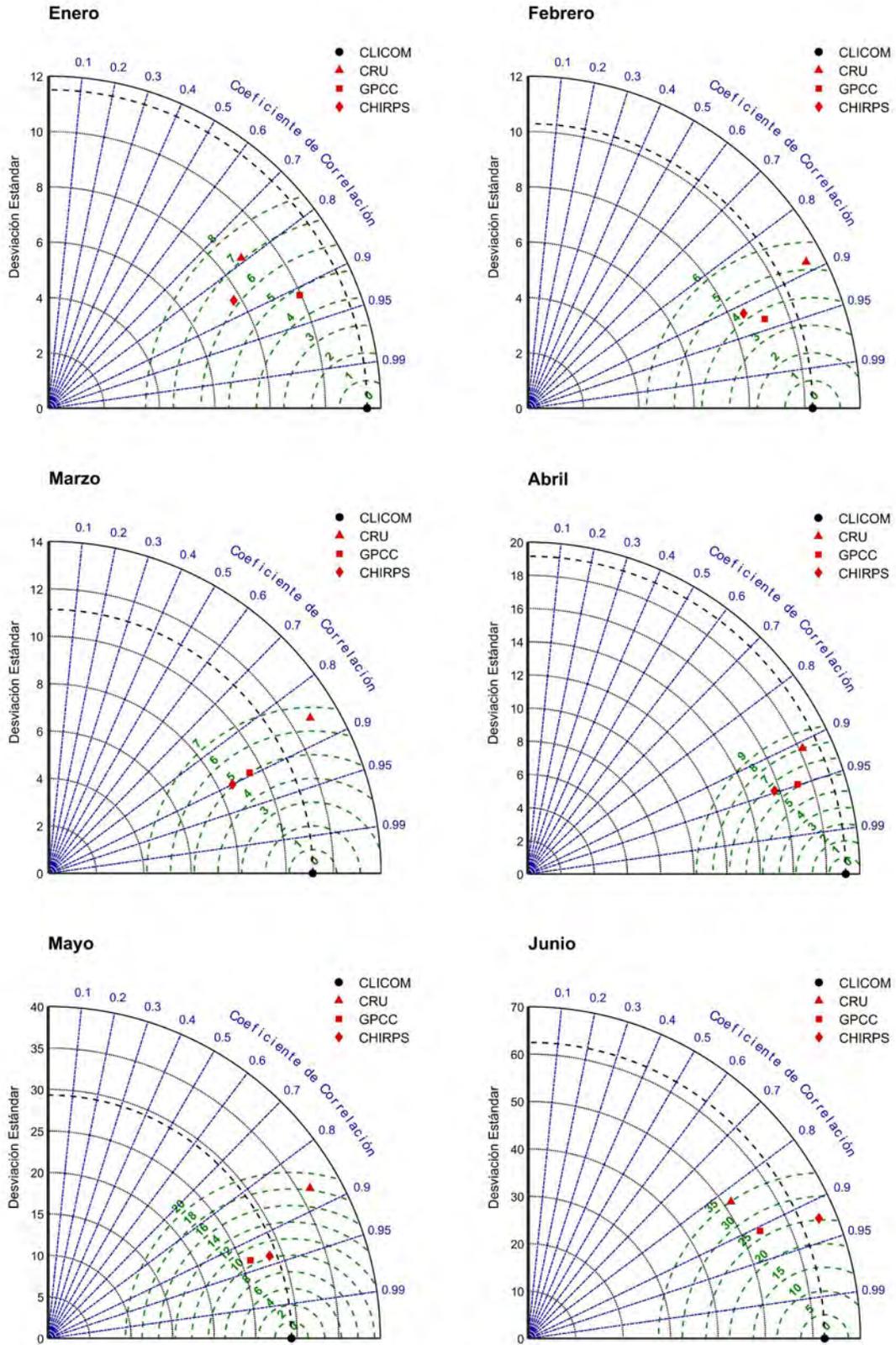


FIGURA 4.34: Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región centro sur durante los meses de enero a junio.

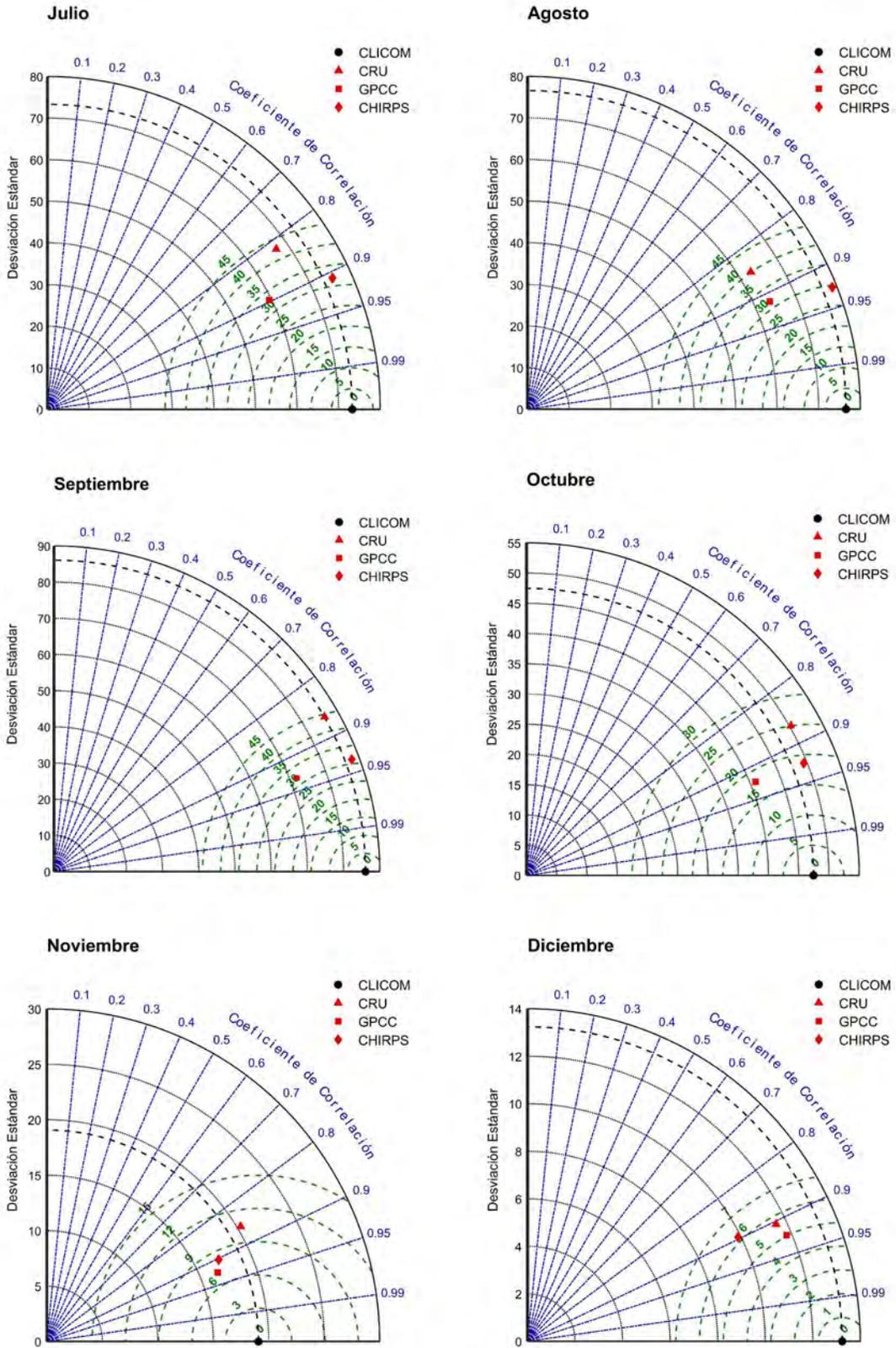


FIGURA 4.35: Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región centro sur durante los meses de julio a diciembre.

4.3.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada

Los resultados de este análisis (Tabla 4.3) muestran que CHIRPS tiene los errores EAM y RECM más bajos, al igual que la correlación lineal más alta (0.94). Por el contrario, CRU resulta tener los errores más altos así como la correlación más baja (0.83).

La desviación estándar de las tres bases es menor a la de CLICOM, sin embargo, la de CHIRPS es la que tiene mayor similitud con la desviación de la base observacional.

Finalmente, el sesgo de las tres bases toma valores muy próximos a 1 e indica que CRU sobrestima la precipitación en un orden del 3%, mientras que GPCC y CHIRPS la subestiman un 1% y un 0.3% respectivamente.

De acuerdo al diagrama de Taylor (Fig.4.36), CHIRPS es la base que mejor logra reproducir a la precipitación media anual acumulada sobre la región y CRU es la que tiene el desempeño más bajo.

TABLA 4.3: Comparación estadística de la precipitación media anual acumulada (1981-2008) sobre la región centro sur.

	EAM (mm/mes)	RECM (mm/mes)	R	σ (mm/mes)	Sesgo
CLICOM	0	0	1	362.87	1
CRU	135.81	201.48	0.84	347.33	1.03
GPCC	98.05	157.29	0.91	296.23	0.99
CHIRPS	90.49	137.28	0.93	356.94	0.99

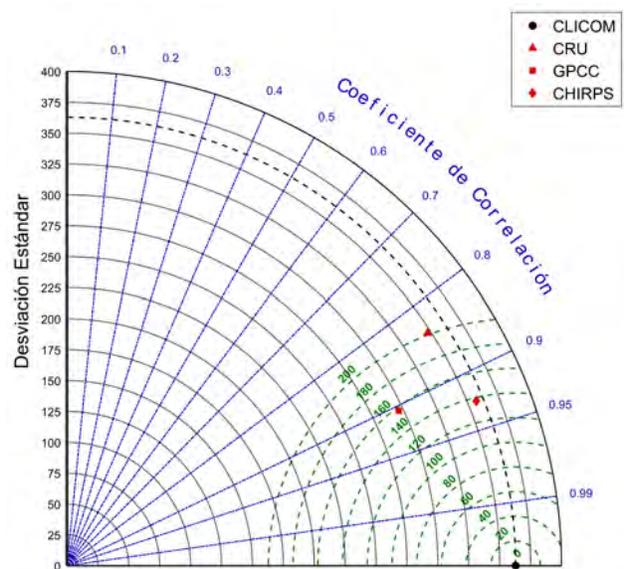


FIGURA 4.36: Desempeño de las bases globales para reproducir la precipitación acumulada (1981-2008) de la base CLICOM sobre la región centro sur.

4.3.3. Comparación de las celdas de malla

a) EAM

Las tres bases presentan un patrón similar en la distribución espacial del EAM (Fig.4.37). Los errores más altos se concentran sobre las zonas montañosas de la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Oriental y disminuyen hacia el centro de la región. En CRU se muestran los errores más altos, mientras que entre GPCC y CHIRPS no es posible estimar visualmente cuál es la de menor error pues, aunque GPCC parece presentar errores más bajos, sobre algunos estados (Sn. Luis, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Guerrero y Oaxaca) se observan errores más bajos en CHIRPS.

En el histograma de frecuencias (Fig.4.37) la distribución que más se diferencia de las demás es la de CRU, ya que a simple vista se observa un mayor sesgo positivo con respecto a las distribuciones de las otras dos bases. Las distribuciones de GPCC y de CHIRPS son casi iguales y no es posible caracterizar a simple vista las diferencias entre ambas. En GPCC y en CHIRPS, el 87 % de la región tiene errores menores a 30 mm/mes, mientras que en CRU se tiene el 61 %.

b) RECM

La distribución espacial del RECM (Fig.4.38) se asemeja a la del EAM y, en las tres bases, los errores más altos se localizan sobre las zonas montañosas. CRU muestra los errores más altos, a diferencia de los observados en GPCC y en CHIRPS. Entre GPCC y CHIRPS no es posible identificar cuál base tiene los errores más bajos, pero las diferencias más notables se observan sobre los estados de la costa este (Sn. Luis Potosí, Hidalgo, Puebla y Veracruz) y oeste (Nayarit, Jalisco, Guerrero y Oaxaca).

Aunque las tres distribuciones mostradas en el histograma (Fig.4.38) presentan un sesgo positivo, la distribución en CRU está más sesgada hacia la derecha, lo cual indica que los errores en CRU son más grandes. Las distribuciones de GPCC y de CHIRPS están prácticamente sobrespuestas y no es posible caracterizar visualmente sus diferencias. GPCC y CHIRPS comparten el mismo porcentaje de celdas de malla con errores menores a 40 mm/mes (73 %), a diferencia del CRU, cuyo porcentaje es del 43 %.

c) Correlación lineal

En los resultados se observa que sobre la mayor parte de la región dominan valores de R mayores a 0.8 (Fig.4.39). CRU muestra los valores de R más bajos, mientras que entre GPCC y

CHIRPS no es posible estimar visualmente cuál tiene los valores de R más grandes.

De acuerdo con la distribución de frecuencias (Fig.4.39), en CRU son más recurrentes los valores de R menores a 0.9. En GPCC y CHIRPS no es posible caracterizar a simple vista las diferencias entre las distribuciones pero, calculando la porción de áreas con los valores de R más altos, se obtiene que en CHIRPS el 96% de la región muestra correlaciones mayores a 0.8, en GPCC el 95% y en CRU el 72%. Considerando solamente los valores de R mayores a 0.9, la proporción es de 73% en GPCC y en CHIRPS, y 18% en CRU.

d) Correlación lineal de las anomalías

Utilizando las anomalías de la precipitación (Fig.4.40), los valores de R son más bajos en comparación con los observados en los resultados anteriores (Fig.4.39). Asimismo, las distribuciones de frecuencias están más diferenciadas entre sí, lo que permite visualizar mejor las diferencias entre las bases. CRU sigue teniendo los valores de R más bajos, en cambio, en CHIRPS se observan valores de R altos sobre la mayor parte de la región, a excepción de algunas zonas sobre Michoacán y Sn. Luis Potosí, en donde los valores de R son más altos en GPCC.

A partir del histograma de frecuencias (Fig.4.40) se obtiene que en CHIRPS el 75% de la región muestra valores de R mayores a 0.7, en GPCC el 69% y en CRU el 14%. Considerando los valores mayores a 0.8, la proporción es de 43% en CHIRPS, a 34% en GPCC y a 2% en CRU.

e) Desviación estándar

Las cuatro bases comparten el mismo patrón de distribución espacial de los valores de desviación estándar (Fig.4.41), los valores más altos se ubican sobre la regiones que corresponden a las cadenas montañosas y disminuyen progresivamente hacia el centro del cuadrante. Las diferencias más notorias se observan en las tres franjas en donde los valores de σ son mayores a 130 mm/mes, la primera de ellas cruza de Nayarit a Jalisco; la segunda atraviesa Sn. Luis Potosí, Hidalgo, Veracruz y el norte de Puebla; y la tercera se extiende sobre el sur de Guerrero hasta Oaxaca. En CRU, los valores de σ son menores que los de CLICOM sobre la primera y la segunda franja. Sobre GPCC, los valores de σ son aún menores que en CRU pues no sobrepasan los 170 mm/mes sobre las tres franjas. CHIRPS tiene el patrón de distribución espacial más similar con el de CLICOM, sin embargo, sobre la primera y segunda franja, los valores de σ siguen siendo menores.

En el anexo A se muestra la distribución espacial de la sustracción de la desviación estándar de las cuatro bases globales a la desviación de CLICOM (Fig. A.3), la cual permite visualizar mejor

las diferencias de este parámetro estadístico.

f) Sesgo

Sobre las bases globales no se exhibe un patrón común que caracterice a la distribución del sesgo (Fig.4.42). El sesgo en CRU varía entre 0.40 y 2.55, en GPCC entre 0.45 y 2.64 y en CHIRPS entre 0.39 y 2.31.

Mediante el histograma de frecuencias (Fig.4.42) se estima que CRU sobrestima la precipitación en el 59% de la región, mientras que GPCC y CHIRPS tienen casi la misma proporción de áreas en donde la precipitación es subestimada y sobrestimada, en GPCC sobrestima el 53% y en CHIRPS el 49%.

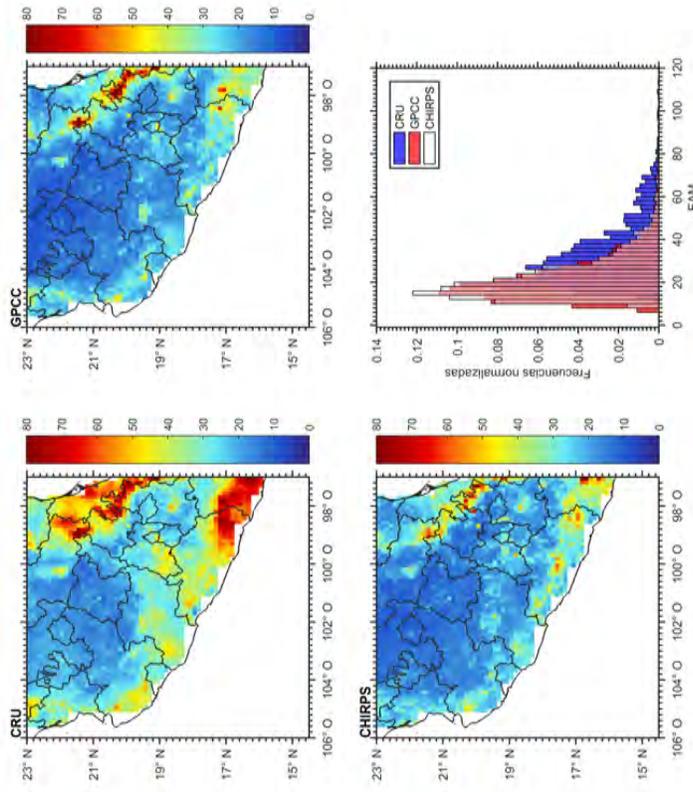


FIGURA 4.37: Distribución del EAM (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

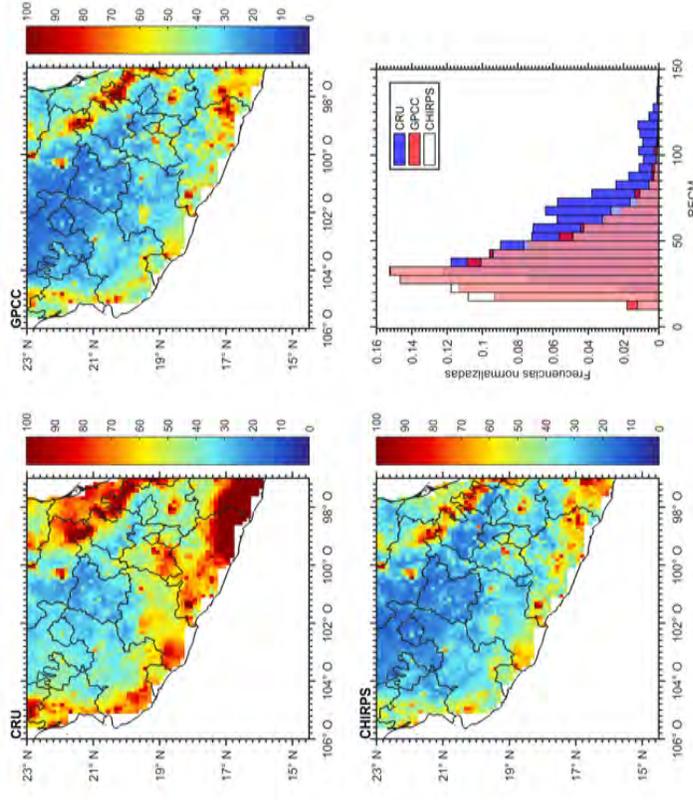


FIGURA 4.38: Distribución del RECM (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

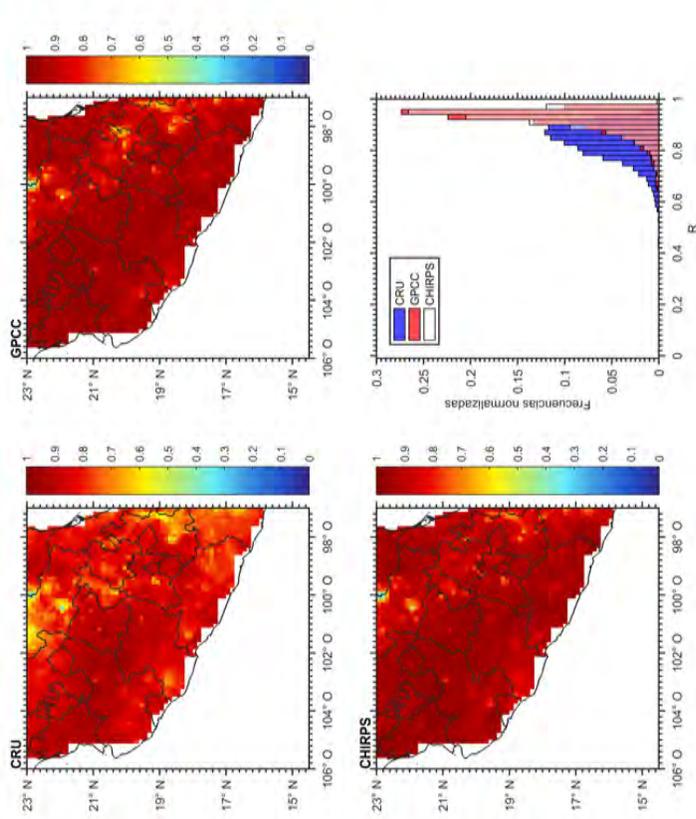


FIGURA 4.39: Distribución de R sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

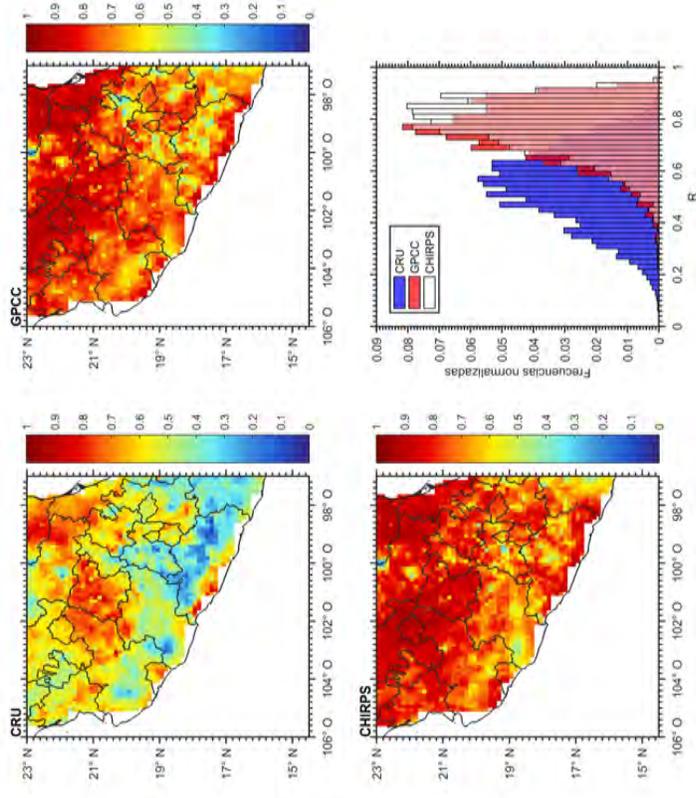


FIGURA 4.40: Distribución de las anomalías de R sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

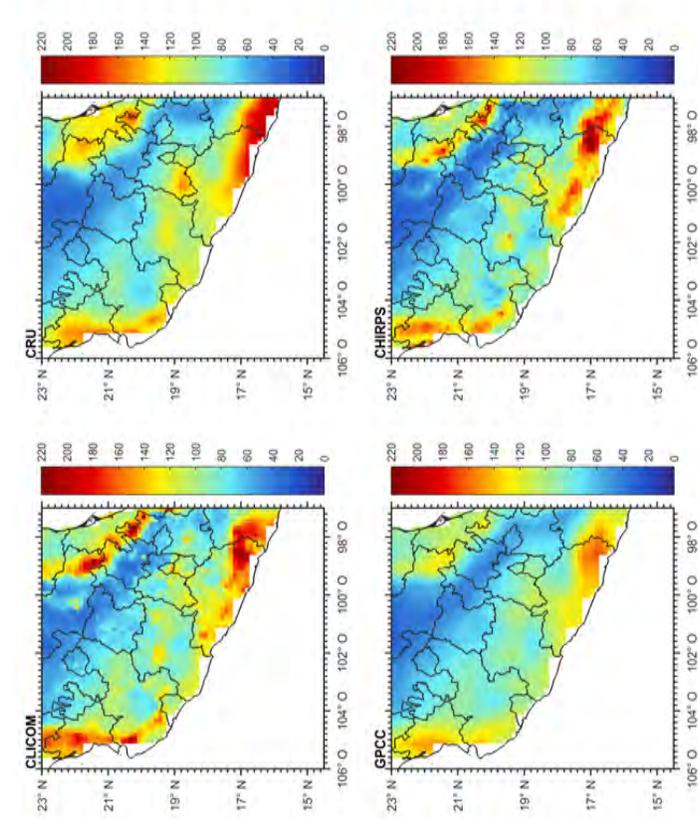


FIGURA 4.4.1: Distribución de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS.

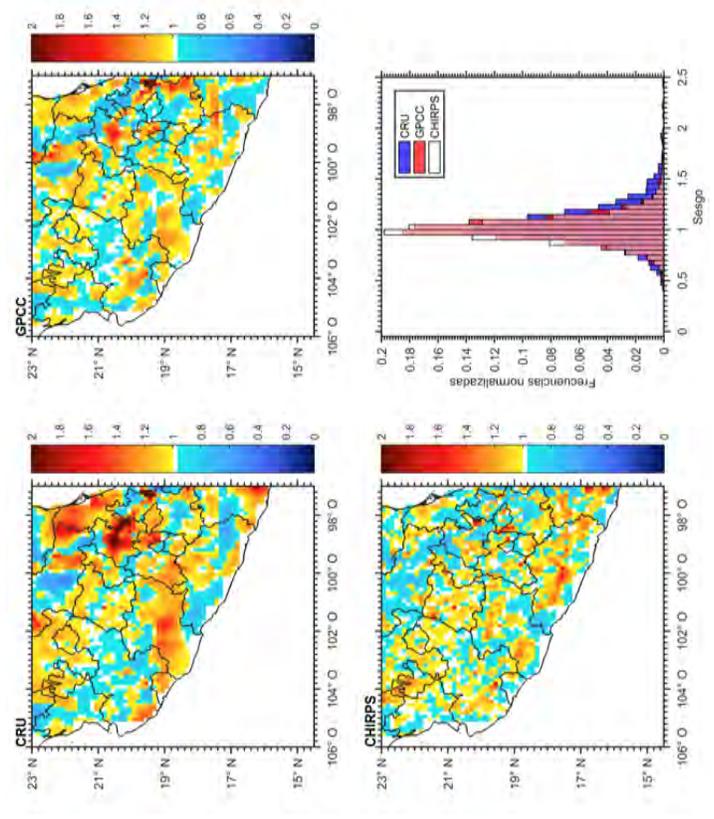


FIGURA 4.4.2: Distribución del sesgo sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

4.3.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos

a) EAM

La variación anual del EAM (Fig.4.43) en las tres bases sigue el mismo patrón caracterizado por errores altos durante los meses de la temporada húmeda y por errores bajos durante los meses de baja precipitación. El comportamiento temporal del error puede clasificarse dentro de dos subperiodos de tiempo separados por un máximo que ocurre simultáneamente en las tres bases durante el 2003. En el primer subperiodo (1981-2003) GPCC se mantiene con los errores más bajos durante los meses de la temporada seca, mientras que durante los meses de la temporada húmeda en GPCC y en CHIRPS los errores son de magnitudes similares y no se distingue visualmente cuál de las dos bases tiene los errores más bajos. En el segundo subperiodo (2004-2008) los errores en GPCC aumentan de forma que CHIRPS queda como la base con los errores más bajos. A diferencia de las bases GPCC y CHIRPS, CRU registra los errores más altos durante los dos subperiodos.

b) RECM

En la series de tiempo del RECM (Fig.4.44) los errores exhiben los mismos comportamientos que los observados en el cambio temporal del EAM.

c) Correlación lineal

En el cambio temporal de R (Fig.4.45) no se observa que las tres bases sigan un patrón en particular. Las variaciones de R oscilan entre 0 y 1, aunque la mayor parte del periodo la correlación en las tres bases es superior a 0.5. Al igual que en las series temporales del EAM y del RECM, el comportamiento de R también puede clasificarse dentro de dos subperiodos. Durante el primer subperiodo (1981-2003) GPCC y CHIRPS tienen variaciones muy similares, en ambas bases R es superior a 0.6 y no es claro cuál de las dos tiene los valores más altos. El segundo subperiodo (2004-2008) está caracterizado por una disminución y un aumento en la variación de la correlación en GPCC y, en consecuencia, CHIRPS permanece con los valores de R más altos. Por el otro lado, CRU registra las correlaciones más bajas durante los dos subperiodos.

d) Correlación lineal de las anomalías

El cálculo de la correlación para las anomalías de precipitación (Fig.4.46) permite diferenciar mejor las variaciones de R en cada base, ya que el rango de valores disminuye y las separaciones entre las series son más acentuadas. Sin embargo, a pesar de la mayor diferenciación entre las

series, los resultados son los mismos que los enunciados en el inciso anterior.

e) Desviación estándar

En la evolución temporal de σ (Fig.4.47) puede verse que los tres productos globales reproducen la misma variación anual que se observa en CLICOM, la cual está caracterizada por desviaciones estándar grandes durante los meses de la temporada húmeda y por valores mínimos durante los meses de baja precipitación. Las cuatro series están prácticamente sobrepuestas y a simple vista no es posible caracterizar diferencias relevantes entre las series de tiempo. La única particularidad que destaca es el máximo que se observa en CLICOM durante el 2003.

f) Sesgo

Los resultados muestran que el sesgo en las tres bases se mantiene con valores cercanos a 1 durante la mayor parte del periodo (Fig.4.48). En GPCC se observan las oscilaciones de menor variación y con mayor cercanía a 1 (0.5 - 1.6), en CRU el sesgo varía entre 0.2 y 3.3, y por último, en CHIRPS el sesgo alcanza los valores de mayor amplitud (0.4 - 3.9). Al descomponer las series de tiempo para analizar el cambio del sesgo durante cada mes (figura no mostrada) se identifica un comportamiento estacional en los tres productos determinado por el régimen de la precipitación sobre la región. Durante la temporada húmeda las variaciones son menos abruptas y permanecen acotadas entre 0 y 2, mientras que en la época seca se agrupan todos los puntos con un sesgo mayor a 2. Adicionalmente, en las series de tiempo también es posible visualizar que durante el 2003 el sesgo disminuye simultáneamente en las tres bases. Después de este episodio, el sesgo comienza a aumentar y a oscilar de manera más abrupta en comparación con los años anteriores al 2003.

En el anexo B se muestra la evolución temporal del sesgo en escala logarítmica (Fig. B.3) para facilitar la visualización de las variaciones de este parámetro.

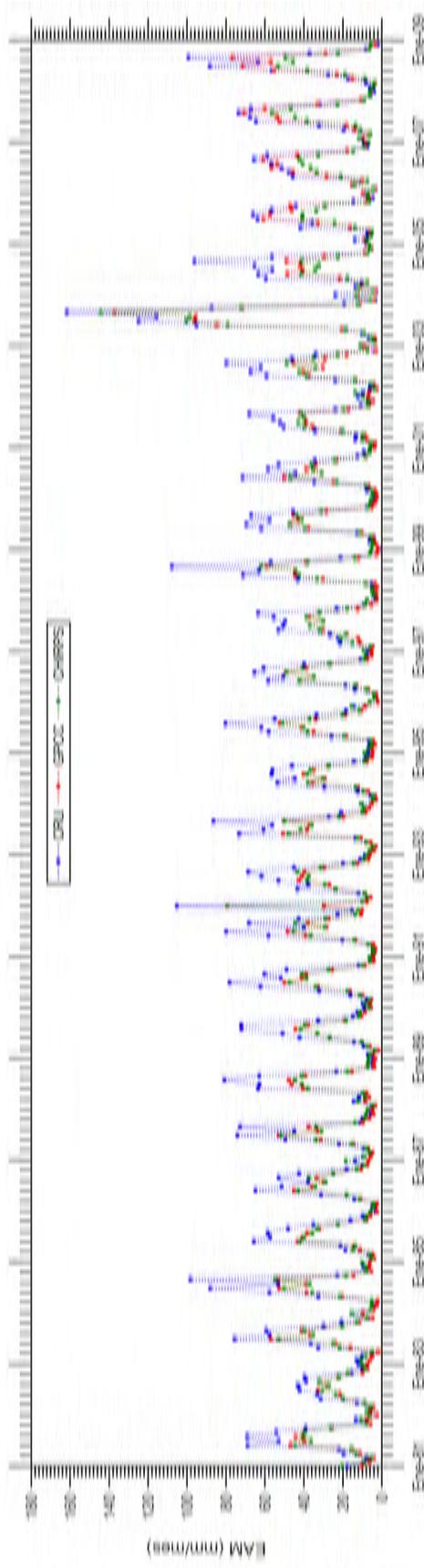


FIGURA 4.43: Evolución temporal del EAM (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

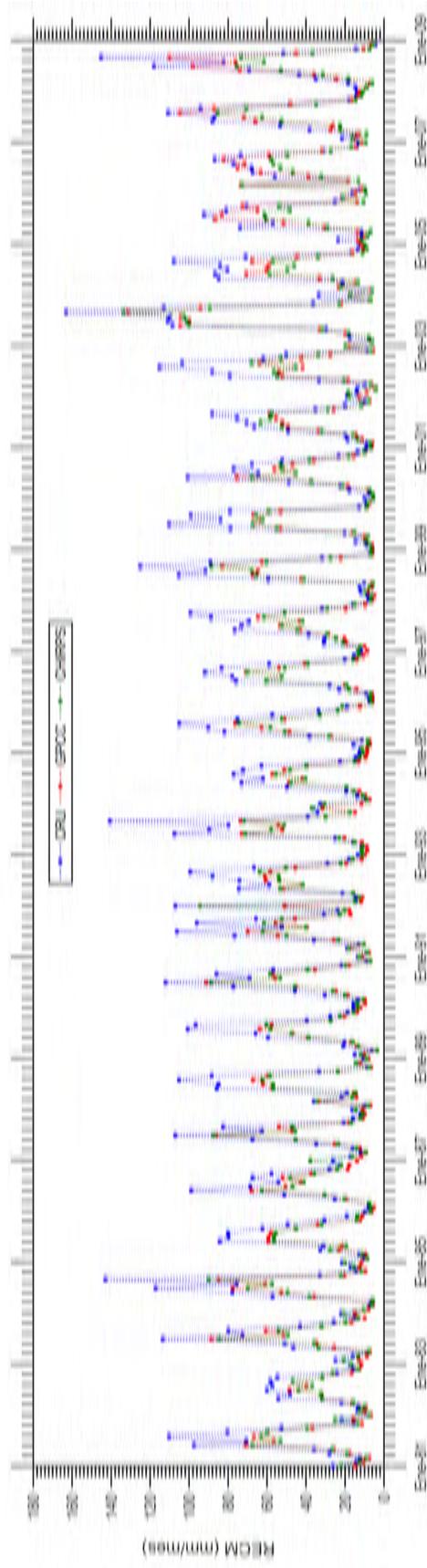


FIGURA 4.44: Evolución temporal del RECM (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

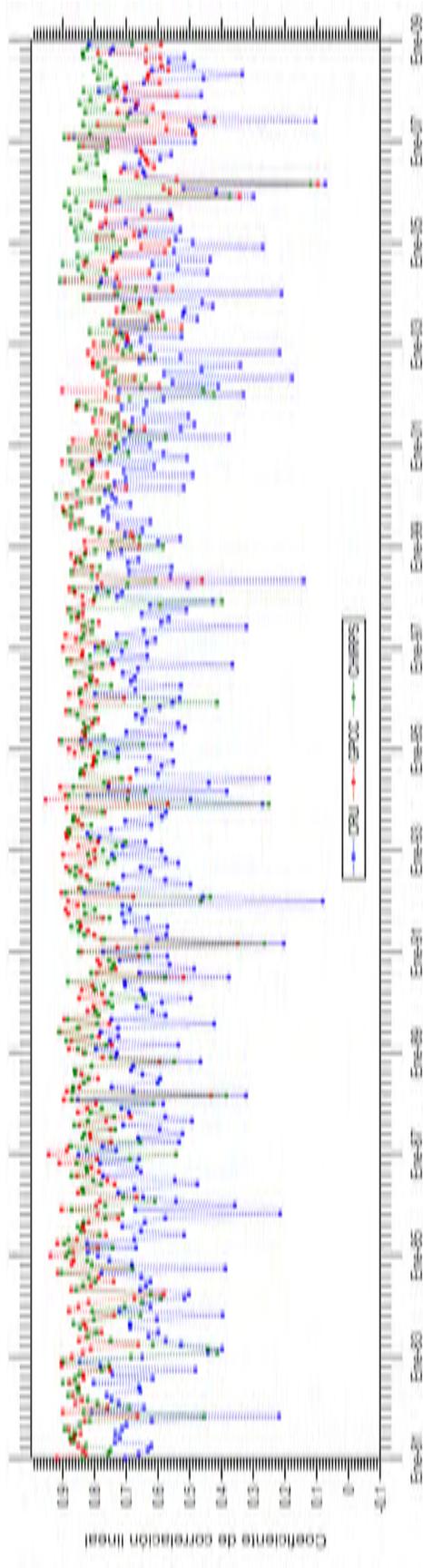


FIGURA 4.45: Evolución temporal de R sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

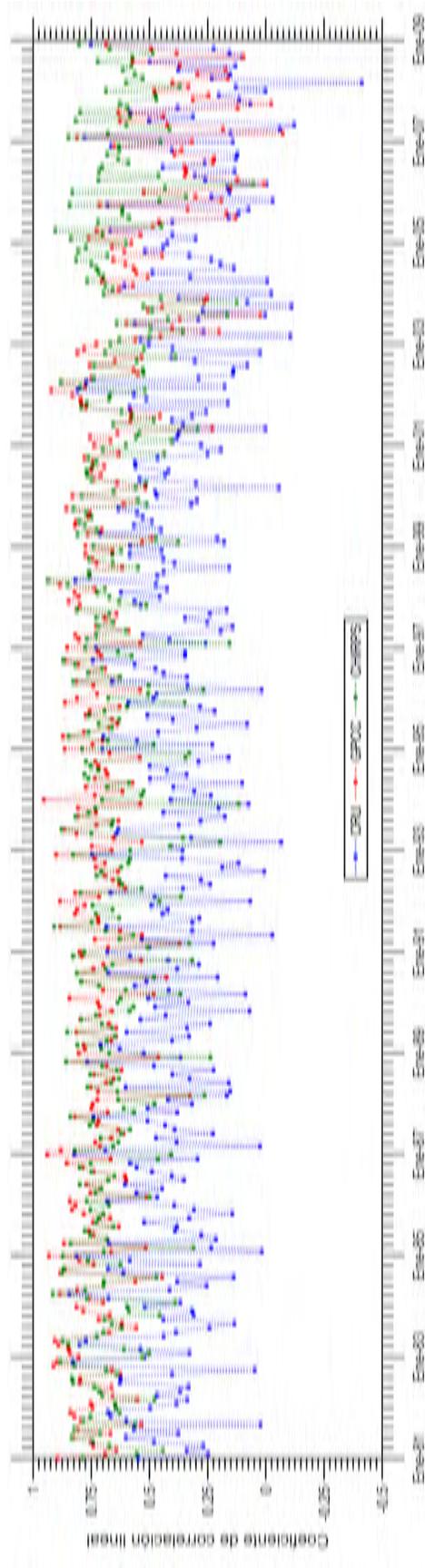


FIGURA 4.46: Evolución temporal de las anomalías de R sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

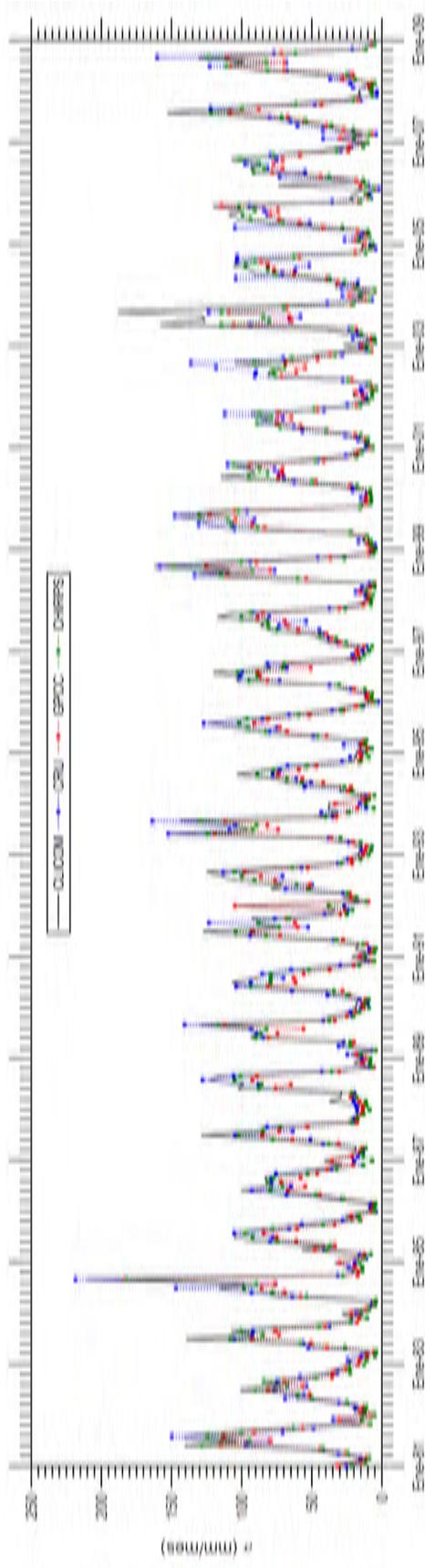


FIGURA 4.47: Evolución temporal de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región centro sur en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

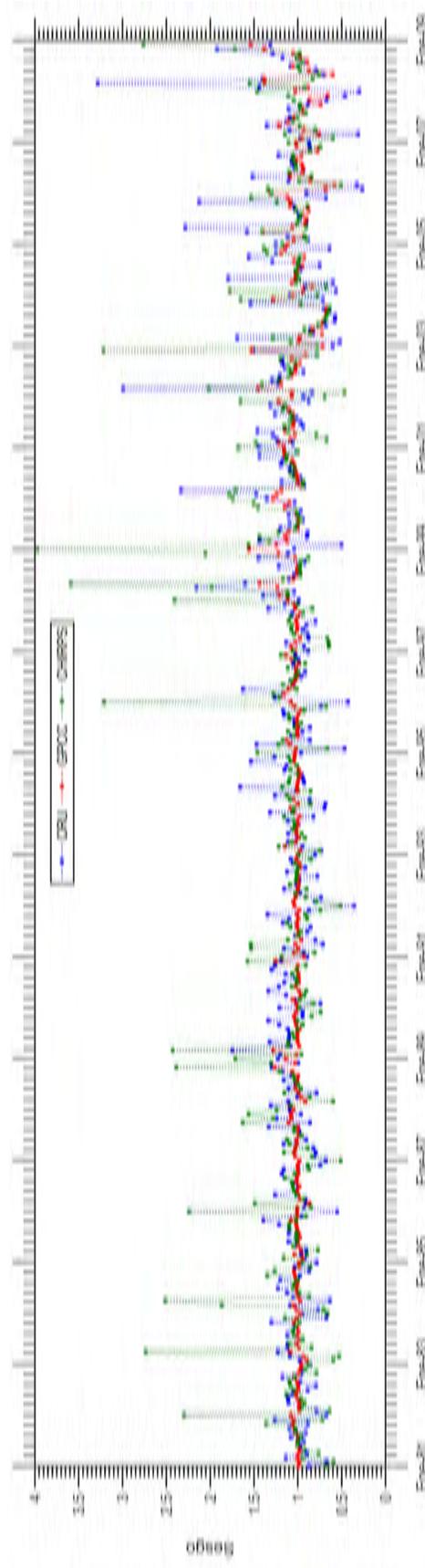


FIGURA 4.48: Evolución temporal del sesgo sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

4.4. Región sureste (SE)

4.4.1. Comparación de la climatología mensual

a) Ciclo anual

Los tres productos globales logran reproducir el régimen pluvial de CLICOM (Fig.4.49a), el cual se caracteriza por contar con una temporada de altas precipitaciones que predomina durante los meses de mayo a octubre (105 - 296 mm/mes), mientras que el resto del año las precipitaciones son inferiores a 95 mm/mes. Esta variación del ciclo anual es consistente con el observado sobre el centro y sur del país (Perdigón-Morales et al., 2018), en el ciclo anual se distingue la señal de la canícula con máximos de precipitación en junio y en septiembre.

Las diferencias más notables se observan durante mayo, agosto y octubre en CRU, y durante los meses entre mayo y septiembre en CHIRPS. Sobre esta región, la canícula que se observa en CLICOM durante julio y agosto es reproducida en las tres bases globales.

b) EAM

En la variación del EAM (Fig.4.49b) GPCC tiene los errores más bajos, después le sigue CHIRPS y al último CRU, que además es la única base que presenta una curva bimodal. Durante junio-octubre el error en GPCC y CHIRPS varía en un rango de 22 a 33 mm/mes y durante el resto de los meses varía entre 6 y 17 mm/mes.

c) RECM

En los resultados del RECM (Fig.4.49c) GPCC tiene errores más bajos que CHIRPS durante enero-marzo, junio-octubre y diciembre, mientras que durante abril-mayo y noviembre se da la situación contraria. Por otro lado, CRU se mantiene con los errores más altos durante todos los meses. Durante junio-octubre el error en GPCC y CHIRPS varía en un rango de 32 a 48 mm/mes y durante el resto del año varía entre 11 y 24 mm/mes.

d) Correlación lineal

El coeficiente de correlación de los tres productos varía entre 0.54 y 0.94 (Fig.4.49d). Aunque GPCC y CHIRPS tienen correlaciones similares, CHIRPS tiene correlaciones más altas durante la mayor parte del año (marzo-noviembre) y GPCC solamente tiene las correlaciones más altas durante enero, febrero y diciembre. Por el otro lado, CRU tiene los coeficientes más bajos y variables

(0.54 - 0.86).

e) Desviación estándar

De forma general, la desviación estándar (Fig.4.49e) de CRU y de GPCC tiene valores más bajos que los de la base CLICOM, en cambio, la desviación estándar en CHIRPS suele ser mayor que la de CLICOM durante la mayor parte de los meses (junio-diciembre). Durante los meses de junio a octubre se tienen valores que varían entre 67 y 119 mm/mes y durante el resto del año varían entre 14 y 68 mm/mes.

f) Sesgo

El sesgo (Fig.4.49f) indica que CRU sobrestima la precipitación durante abril-julio y octubre (entre 0.2 y 19%) y subestima el resto de los meses (entre 0.14 y 16%). GPCC subestima entre 0.1 y 6% durante febrero, junio, septiembre y noviembre, y el resto del año sobrestima la precipitación entre 0.2 y 6%. Asimismo, GPCC posee el sesgo menos variable y más próximo a 1. CHIRPS sobrestima durante mayo-octubre (entre 3 y 10%) y subestima el resto de los meses entre 0.1 y 12%.

g) Diagramas de Taylor

Los diagramas de Taylor (Fig.4.50 y Fig.4.51) muestran que GPCC tiene el mejor desempeño durante enero, junio-octubre y diciembre, y CHIRPS se desempeña mejor durante los meses de febrero a mayo, octubre y noviembre. En cambio, CRU es la base con el desempeño más bajo durante todos los meses del año.

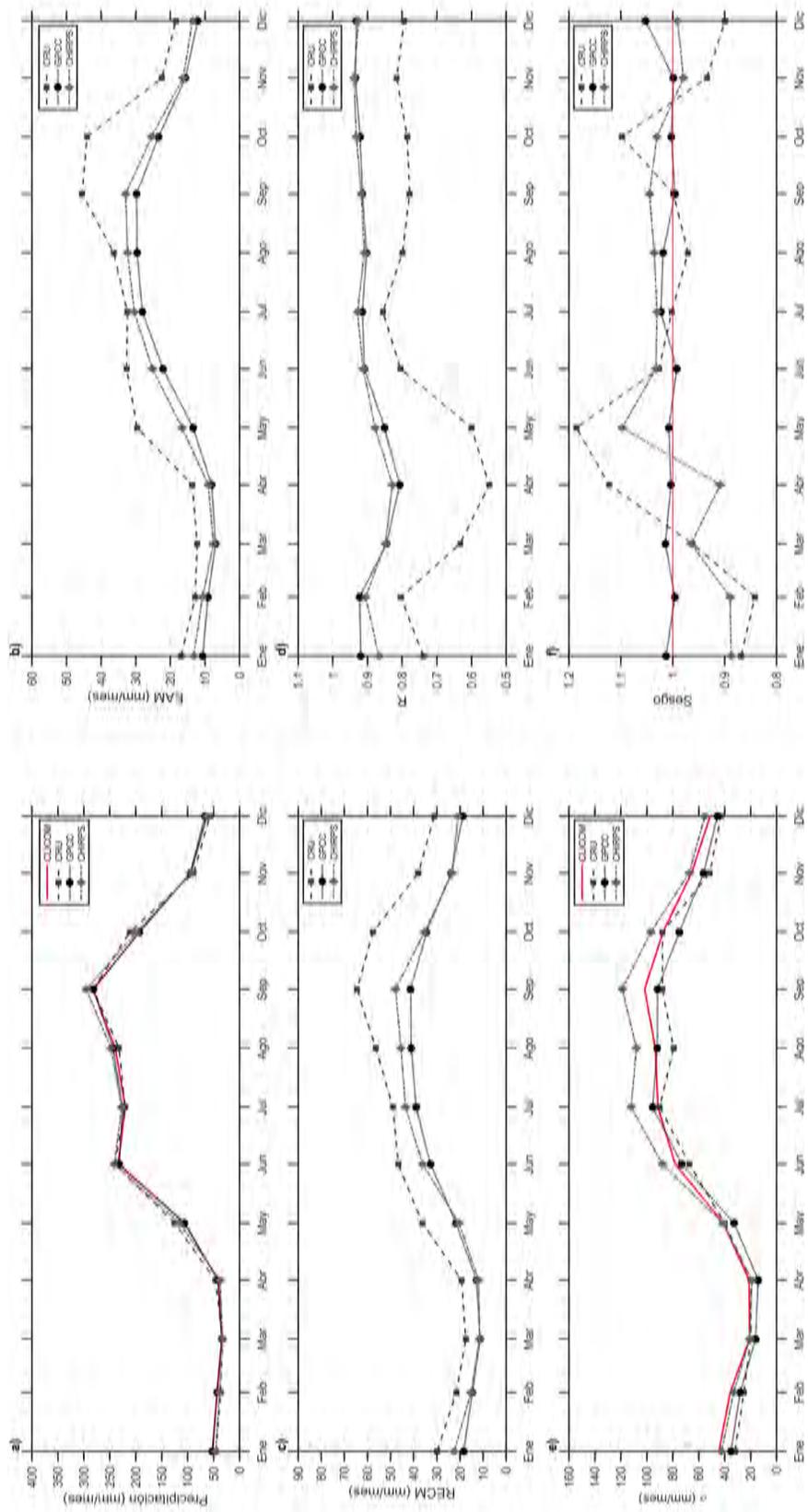


FIGURA 4.49: Ciclo anual de la a) precipitación, el b) EAM, el c) RECM, d) R, e) σ y el f) sesgo para el periodo 1981-2008 sobre la región sureste.

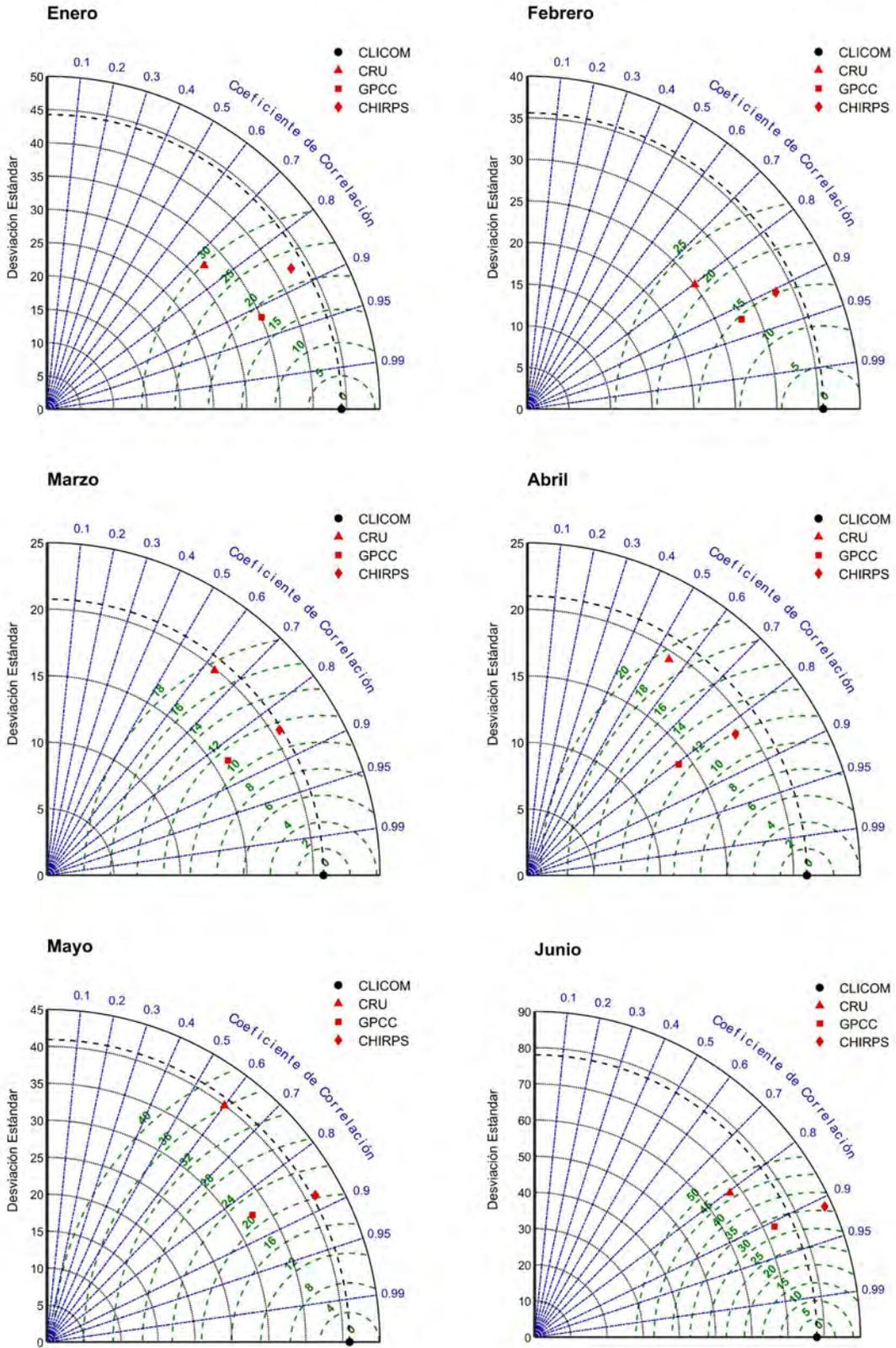


FIGURA 4.50: Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región sureste durante los meses de enero a junio.

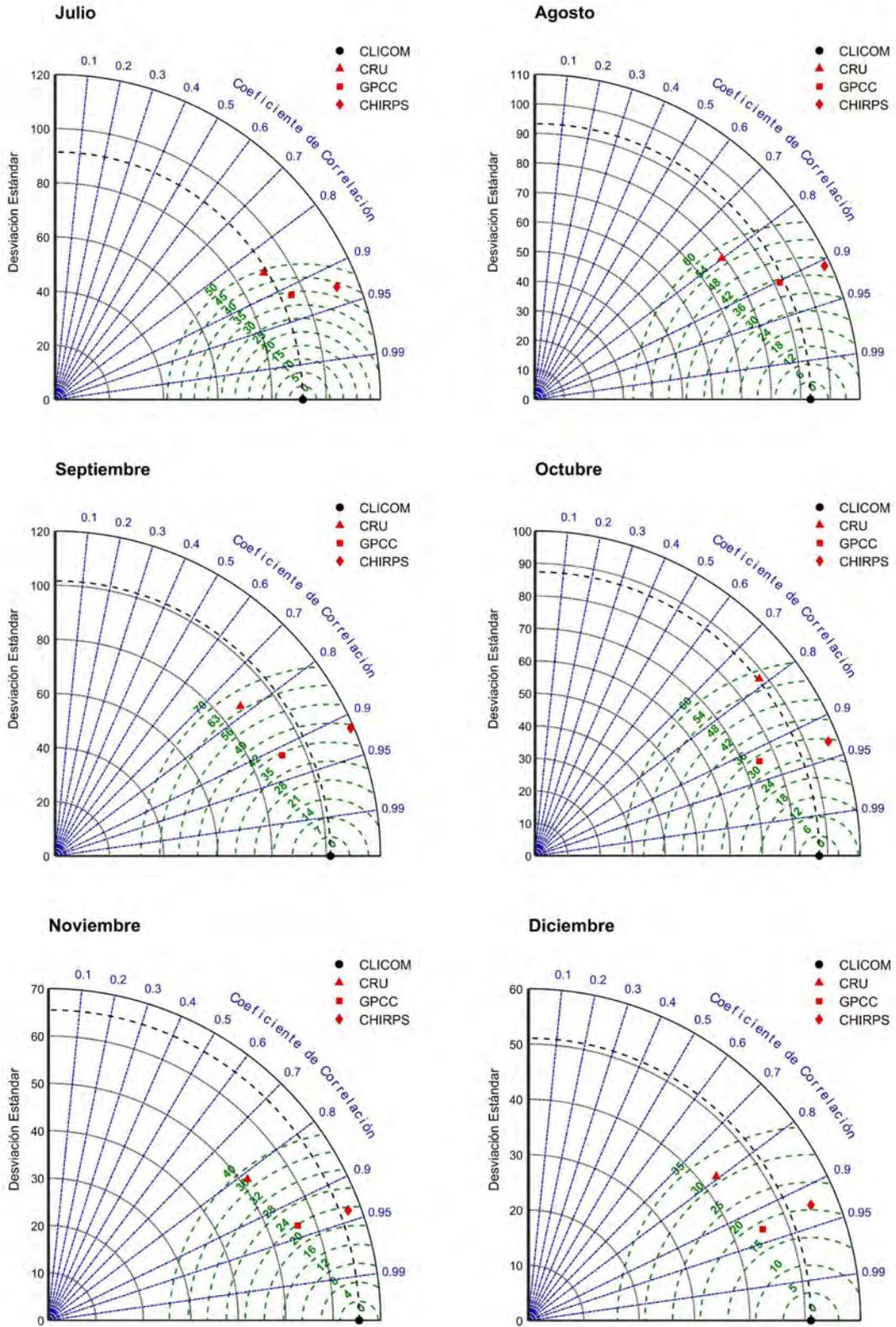


FIGURA 4.51: Desempeño de las tres bases globales para reproducir los valores medios de la precipitación (1981-2008) de CLICOM sobre la región sureste durante los meses de julio a diciembre.

4.4.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada

Los resultados de análisis (Tabla 4.4) muestran que CHIRPS es la base con los errores EAM y RECM más bajos al igual que la correlación lineal más alta (0.94). Por el contrario, CRU resulta tener los errores más altos así como la correlación más baja (0.77).

La desviación estándar del CHIRPS es la que tiene mayor similitud con la del CLICOM, a pesar de ser relativamente más alta, pues las desviaciones estándar del CRU y del GPCC son menores que la de la base observacional por 92 y 66 unidades respectivamente.

Finalmente, el sesgo de las tres bases es prácticamente igual a 1, pero estrictamente indica que CRU sobrestima la precipitación un 0.9%, GPCC sobrestima del orden del 0.7% y CHIRPS cerca del 2%.

De acuerdo al diagrama de Taylor (Fig.4.52), CHIRPS es la base que mejor logra reproducir a la precipitación media anual acumulada sobre la región y CRU es la que tiene el desempeño más bajo.

TABLA 4.4: Comparación estadística de la precipitación media anual acumulada (1981-2008) sobre la región sureste.

	EAM (mm/mes)	RECM (mm/mes)	R	σ (mm/mes)	Sesgo
CLICOM	0	0	1	602.32	1
CRU	254.98	398.43	0.77	510.88	1.01
GPCC	170.66	257.54	0.90	536.01	1.01
CHIRPS	157.38	229.44	0.94	649.58	1.02

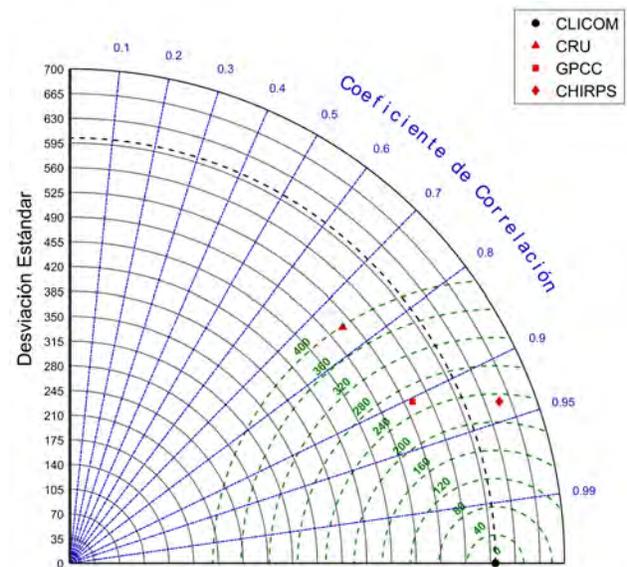


FIGURA 4.52: Desempeño de las bases globales para reproducir la precipitación acumulada (1981-2008) de la base CLICOM sobre la región sureste.

4.4.3. Comparación de las celdas de malla

a) EAM

Las tres bases presentan un patrón similar en la distribución espacial de los errores (Fig.4.53). Los errores más altos se concentran sobre las zonas montañosas de la Sierra Madre Oriental, las Sierras de Chiapas y sobre las llanuras de Tabasco. En CRU se observan los errores más altos, mientras que entre GPCC y CHIRPS no es visualmente claro cuál es la base con los errores más bajos.

En el histograma de frecuencias (Fig.4.53), entre las distribuciones de las bases GPCC y CHIRPS no es posible caracterizar visualmente sus diferencias. De las tres bases, la distribución del CRU está más sesgada hacia la derecha, indicando que los errores en esta base son más altos. En GPCC el 92 % de la región tiene errores menores a 60 mm/mes, en CHIRPS el 91 % y en CRU el 69 %.

b) RECM

La distribución espacial del RECM (Fig.4.54) se asemeja a la del EAM y, en las tres bases, los errores más altos se localizan sobre las zonas montañosas de la región y la llanura de Tabasco. CRU muestra los errores más altos, en comparación con los observados en GPCC y en CHIRPS.

Aunque las tres distribuciones mostradas en el histograma (Fig.4.54) presentan un sesgo positivo, la distribución del CRU está más sesgada hacia la derecha, lo cual indica que los errores en CRU son más grandes. Las distribuciones de las bases GPCC y CHIRPS están prácticamente sobrepuestas una sobre otra y no es posible caracterizar sus diferencias a simple vista. En CHIRPS, el 70 % de la región tiene errores menores a 60 mm/mes, en GPCC es el 66 % y en CRU el 34 %.

c) Correlación lineal

En los resultados se observa que sobre la mayor parte de la región dominan valores de R mayores a 0.8 (Fig.4.55). CRU muestra los valores de R más bajos y entre GPCC y CHIRPS no es posible estimar visualmente cuál tiene los valores más altos.

De acuerdo con la distribución de frecuencias (Fig.4.55), en CRU son más recurrentes los valores de R menores a 0.8. Las distribuciones de las bases GPCC y CHIRPS son casi iguales y a simple vista las diferencias no son tan perceptibles. Sin embargo, calculando la porción de áreas con los valores de R más altos, se obtiene que en CHIRPS el 93 % de la región muestra correlaciones

mayores a 0.8, en GPCC el 90 % y en CRU el 39 %. Considerando solamente los valores de R mayores a 0.9, la proporción es de 38 % en CHIRPS, 30 % en GPCC y 3 % en CRU.

d) Correlación lineal de las anomalías

Utilizando las anomalías de la precipitación (Fig.4.56) los valores de R resultantes son más bajos en comparación con los observados en los resultados anteriores (Fig.4.55) y las distribuciones de frecuencias están más diferenciadas entre sí. CRU sigue teniendo los valores de R más bajos y, entre las bases GPCC y CHIRPS, la primera es la que concentra los valores de R más altos.

A partir del histograma de frecuencias (Fig.4.56) se obtiene que en CHIRPS el 62 % de la región muestra valores de R mayores a 0.9, en GPCC el 48 % y en CRU el 7 %. Considerando los valores mayores a 0.8, la proporción es de 25 % en CHIRPS, 12 % en GPCC y 0.2 % en CRU.

e) Desviación estándar

En las cuatro bases se observa un patrón espacial similar de los valores de desviación estándar (Fig.4.57), los valores más altos coinciden con las zonas de mayor EAM y RECM que, a su vez, son las que corresponden con las zonas montañosas. La desviación estándar en CHIRPS es la que mejor reproduce a los valores de CLICOM. Por el contrario, los valores de σ en CRU y en GPCC son visiblemente menores que los valores en las otras dos bases.

En el anexo A se muestra la distribución espacial de la sustracción de la desviación estándar de las cuatro bases globales a la desviación de CLICOM (Fig. A.4), la cual permite visualizar mejor las diferencias de este parámetro estadístico.

f) Sesgo

Sobre las bases globales no se exhibe un patrón común que caracterice a la distribución del sesgo (Fig.4.58) sobre la región. No obstante, CRU y GPCC comparten ciertas similitudes como las áreas de sobrestimación sobre Veracruz, sobre Oaxaca y sobre el este de Chiapas. Las bases CRU y CHIRPS también comparten una distribución espacial similar sobre la península de Yucatán. El sesgo de CRU varía entre 0.40 y 2.25, el de GPCC entre 0.45 y 1.75 y el de CHIRPS entre 0.35 y 2.05.

Mediante el histograma de frecuencias (Fig.4.58) se estimó que sobre CRU y CHIRPS mayor porción de áreas tiende a sobrestimar la precipitación (59 % y 54 %), mientras que en GPCC mayor porción de áreas la subestiman (52 %).

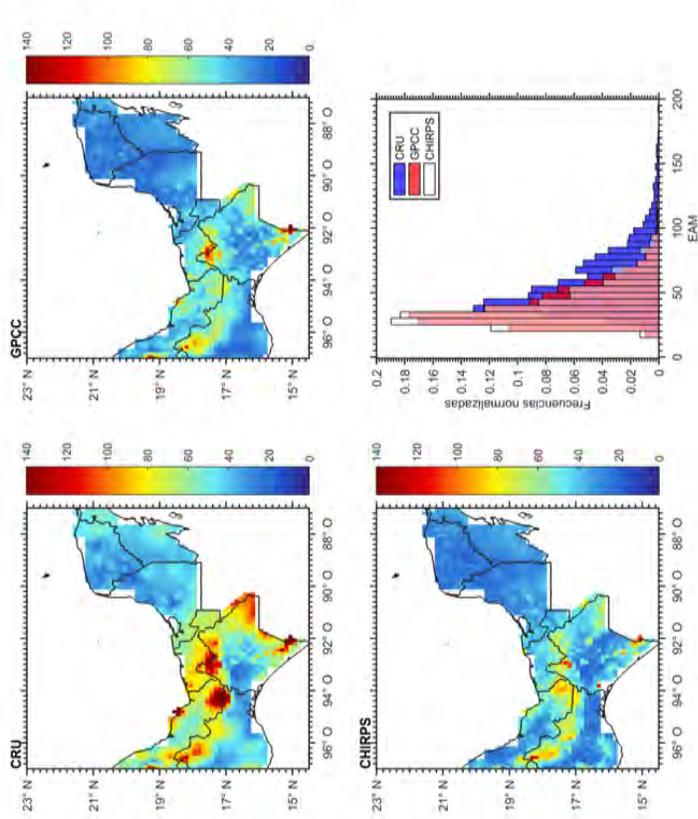


FIGURA 4.53: Distribución del EAM (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

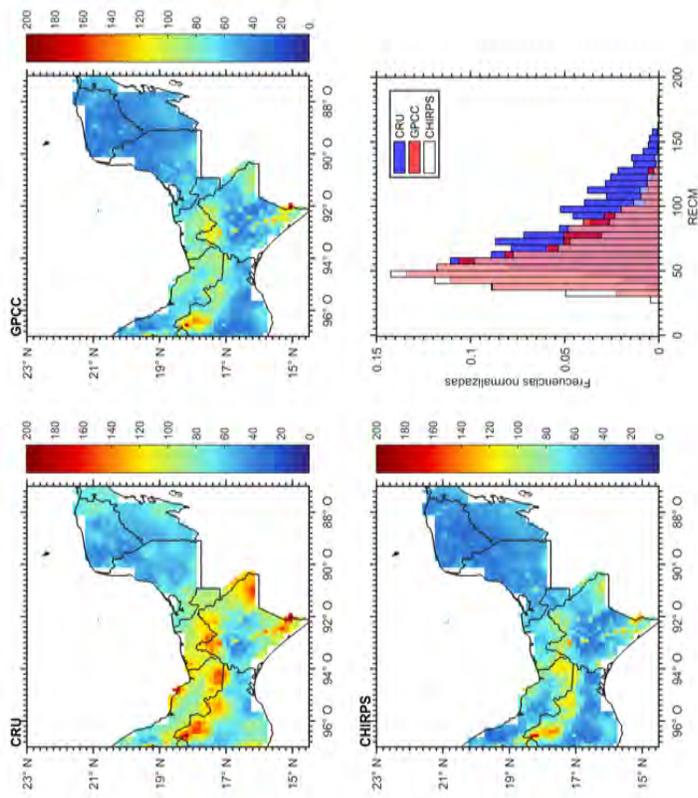


FIGURA 4.54: Distribución del RECM (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

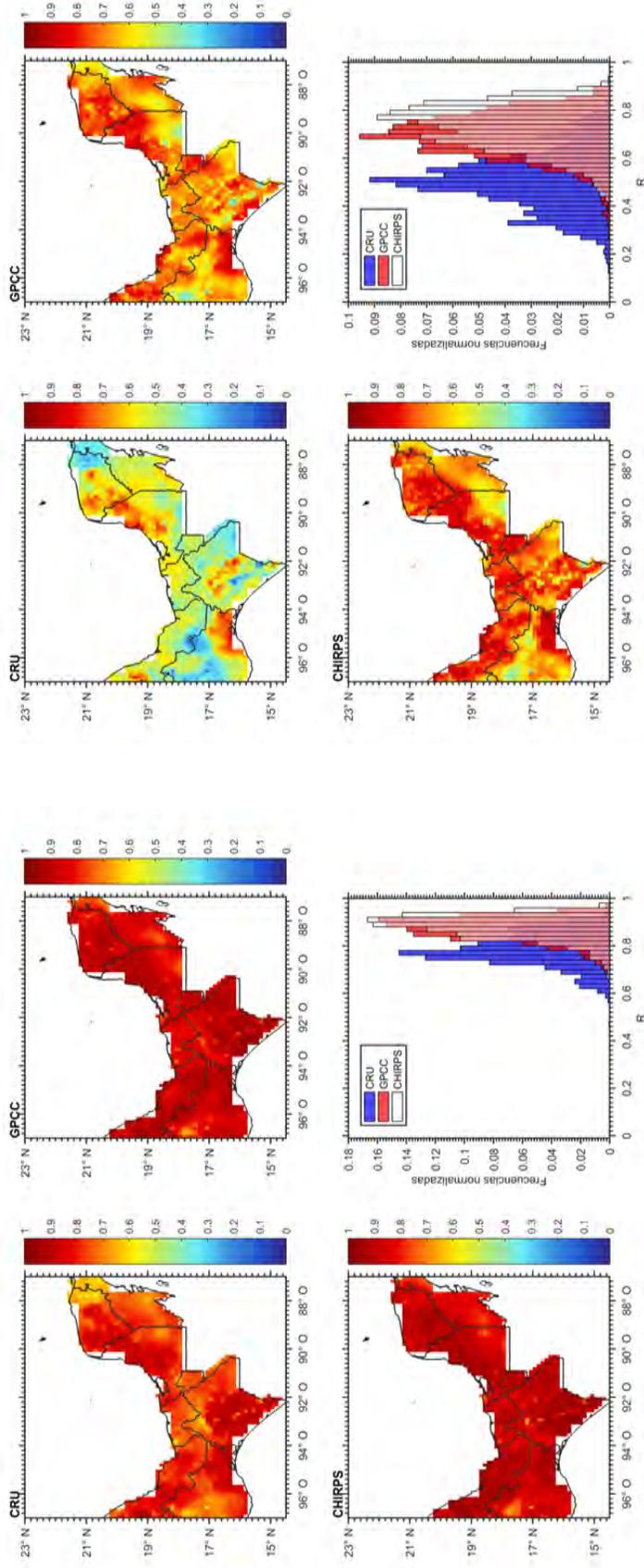


FIGURA 4.55: Distribución de R sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

FIGURA 4.56: Distribución espacial de las anomalías de R sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

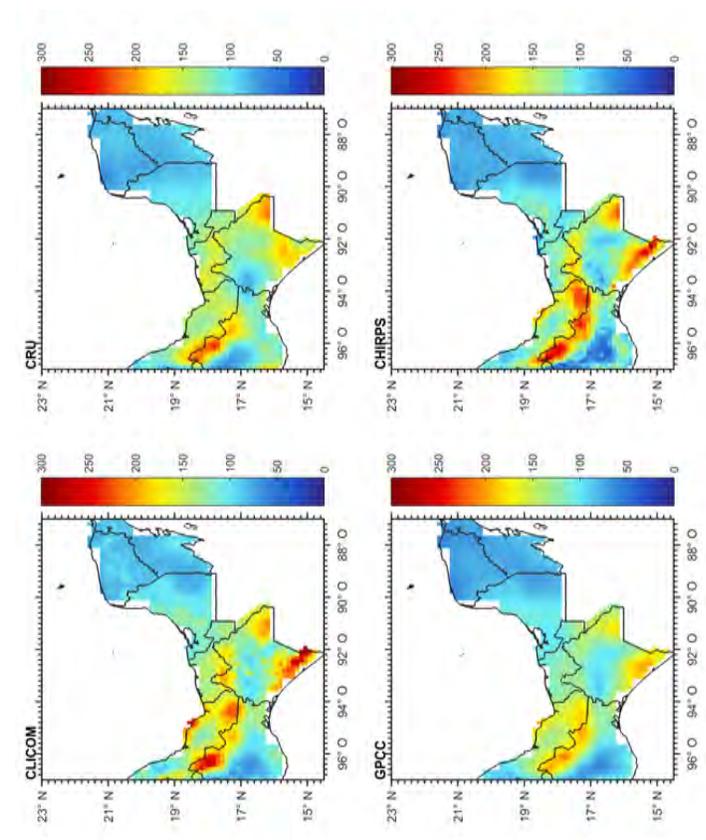


FIGURA 4.57: Distribución de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS.

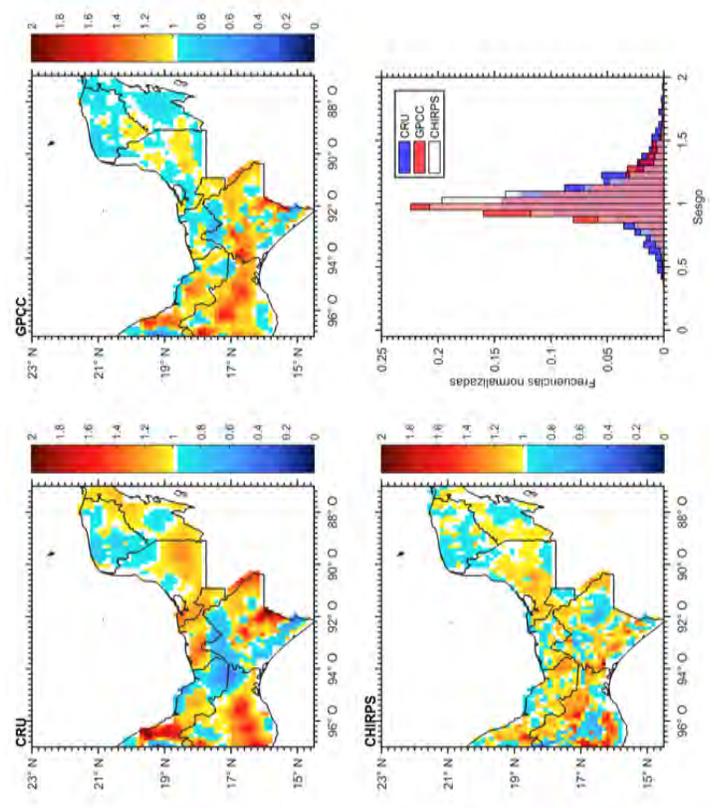


FIGURA 4.58: Distribución del sesgo sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS; e histograma de frecuencias normalizadas de los valores sobre las celdas de malla.

4.4.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos

a) EAM

La variación anual del EAM (Fig.4.59) en las tres bases sigue el mismo patrón caracterizado por errores altos durante los meses de la temporada húmeda y por errores bajos durante los meses de baja precipitación. El comportamiento del error puede clasificarse dentro de dos subperiodos de tiempo separados por un máximo que ocurre simultáneamente en las tres bases durante el 2003. En el primer subperiodo (1981-2003) los errores en las bases GPCC y CHIRPS son de magnitudes similares y no se distingue visualmente cuál de las dos tiene los errores más bajos. En el segundo subperiodo (2004-2008) los errores de GPCC aumentan de forma que CHIRPS queda como la base con los errores más bajos. A diferencia de GPCC y de CHIRPS, el comportamiento del error en CRU se mantiene constante ya que registra los valores más altos durante los dos subperiodos.

b) RECM

En las series de tiempo del RECM (Fig.4.60) los errores exhiben los mismos comportamientos que los obtenidos en el cambio temporal del EAM, la única diferencia es que el máximo del año 2003 no es perceptible.

c) Correlación lineal

En el cambio temporal de R (Fig.4.61) no se observa que las tres bases sigan un patrón en particular. Las variaciones de R oscilan entre -0.1 y 1. En GPCC y CHIRPS la correlación es superior a 0.6 durante la mayor parte del periodo y, en CRU, la correlación promedio es de aproximadamente 0.4. Al igual que en las series temporales del EAM y del RECM, el comportamiento de R también puede clasificarse dentro de dos subperiodos. Durante el primer subperiodo (1981-2003) GPCC y CHIRPS tienen variaciones muy similares y no es claro cuál de las dos bases tiene los valores de R más altos. El segundo subperiodo (2004-2008) está caracterizado por una disminución y un aumento en la variación de la correlación de GPCC, lo que deja a CHIRPS con los valores de R más altos. Por el otro lado, el comportamiento de R en CRU se mantiene constante ya que registra las correlaciones más bajas durante los dos subperiodos en cuestión.

d) Correlación lineal de las anomalías

Mediante el cálculo de la correlación para las anomalías de precipitación (Fig.4.62) el rango de valores disminuye pero no se observan mayores diferencias con los resultados del inciso anterior.

e) Desviación estándar

En la evolución temporal de σ (Fig.4.63) puede verse que los tres productos globales reproducen la misma variación anual que se observa en CLICOM, la cual está caracterizada por desviaciones estándar altas durante los meses de la temporada húmeda y por valores bajos durante los meses de baja precipitación. Las mayores diferencias destacan en CRU y GPCC, pues sus variaciones son más irregulares y suelen coincidir menos con las oscilaciones de CLICOM y de CHIRPS. Otro de los elementos más relevantes en las series de tiempo es el máximo que se observa en CLICOM durante el 2003.

f) Sesgo

Los resultados muestran que el sesgo en las tres bases se mantiene con valores cercanos a 1 durante la mayor parte del periodo (Fig.4.64). El CRU tiene el sesgo con los valores de mayor amplitud (0.2 - 2.2) a comparación del sesgo en GPCC y en CHIRPS, que varía dentro de rangos relativamente menores (0.5 - 2.1 y 0.5 - 1.6 respectivamente). En las series de tiempo el principal cambio en las variaciones se observa en el 2003, durante este año el sesgo disminuye simultáneamente en las tres bases y alcanza los valores más bajos durante los meses correspondientes a la temporada húmeda para después aumentar gradualmente. En los años posteriores a este episodio, el sesgo comienza a aumentar y a oscilar de manera más abrupta, principalmente en GPCC y en CHIRPS.

En el anexo B se muestra la evolución temporal del sesgo en escala logarítmica (Fig. B.4) para facilitar la visualización de las variaciones de este parámetro.

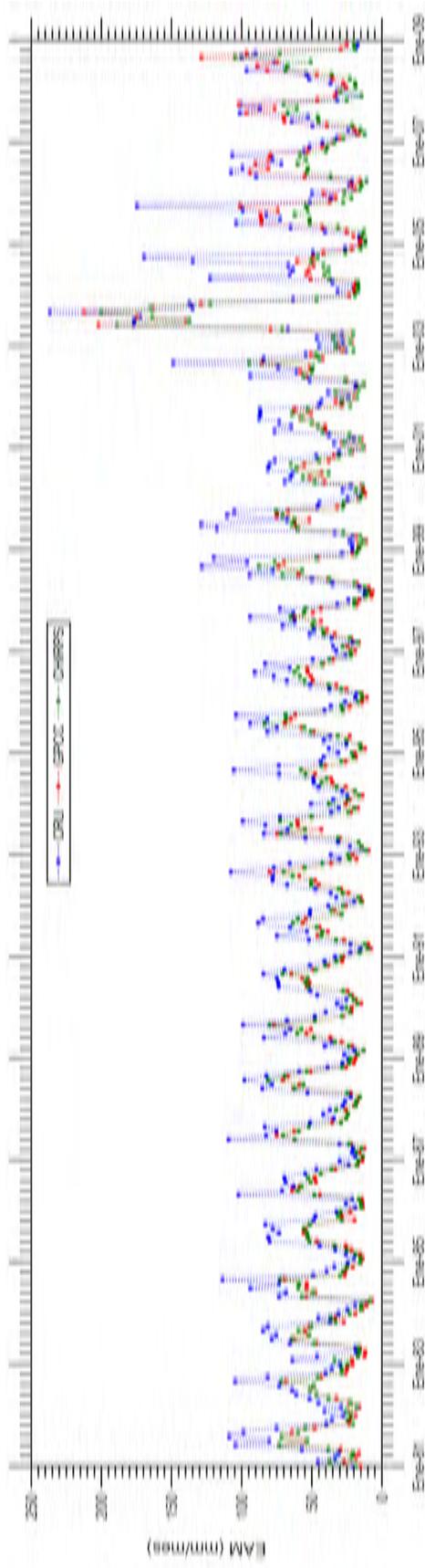


FIGURA 4.59: Evolución temporal del EAM (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

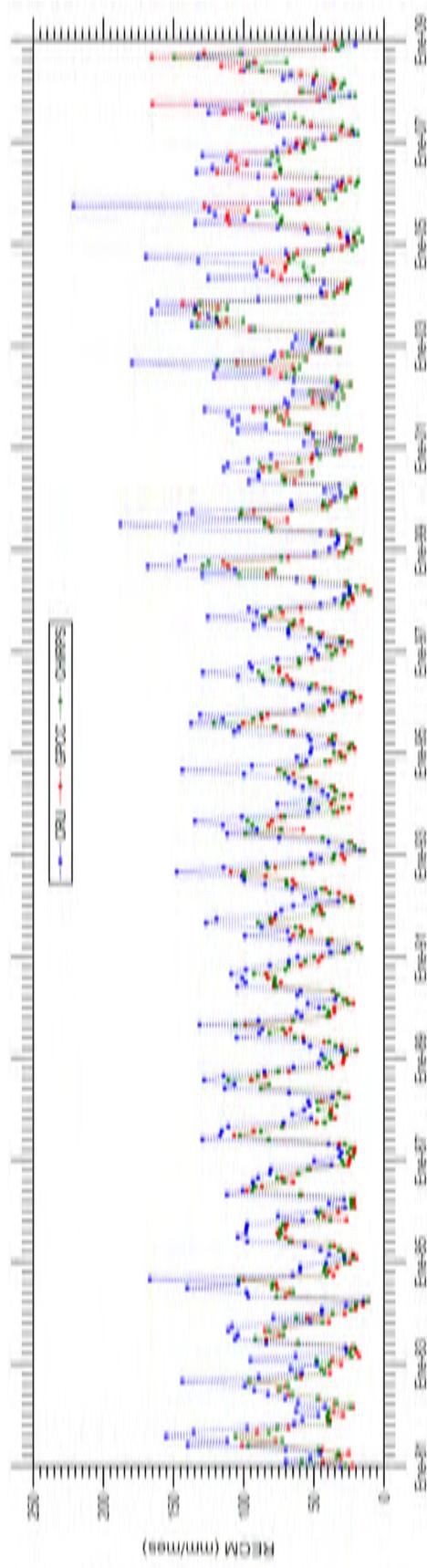


FIGURA 4.60: Evolución temporal del RECM (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

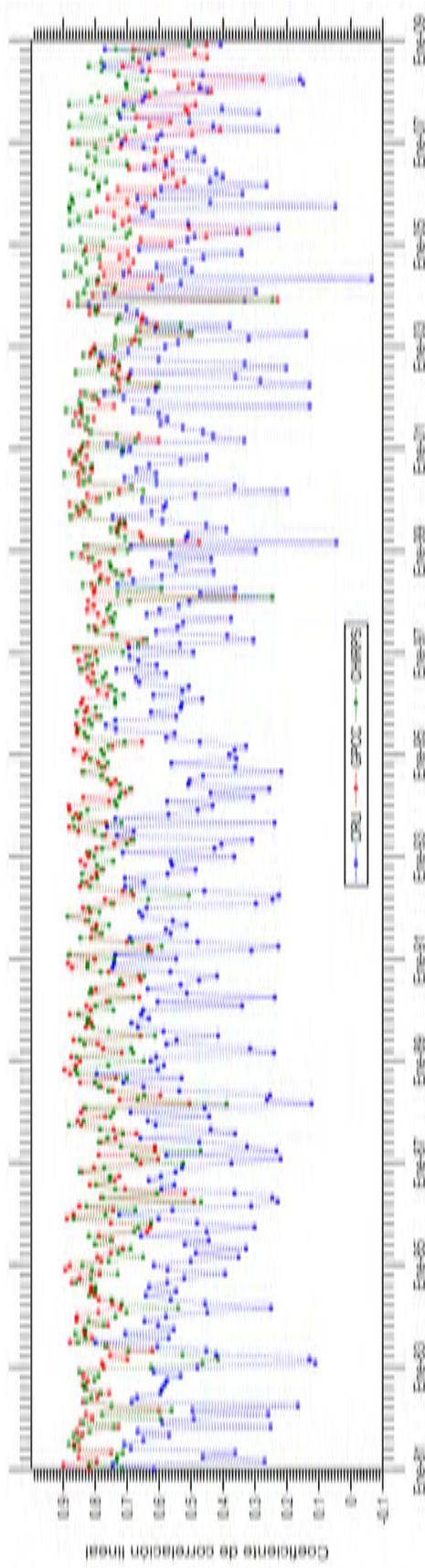


FIGURA 4.61: Evolución temporal de R sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

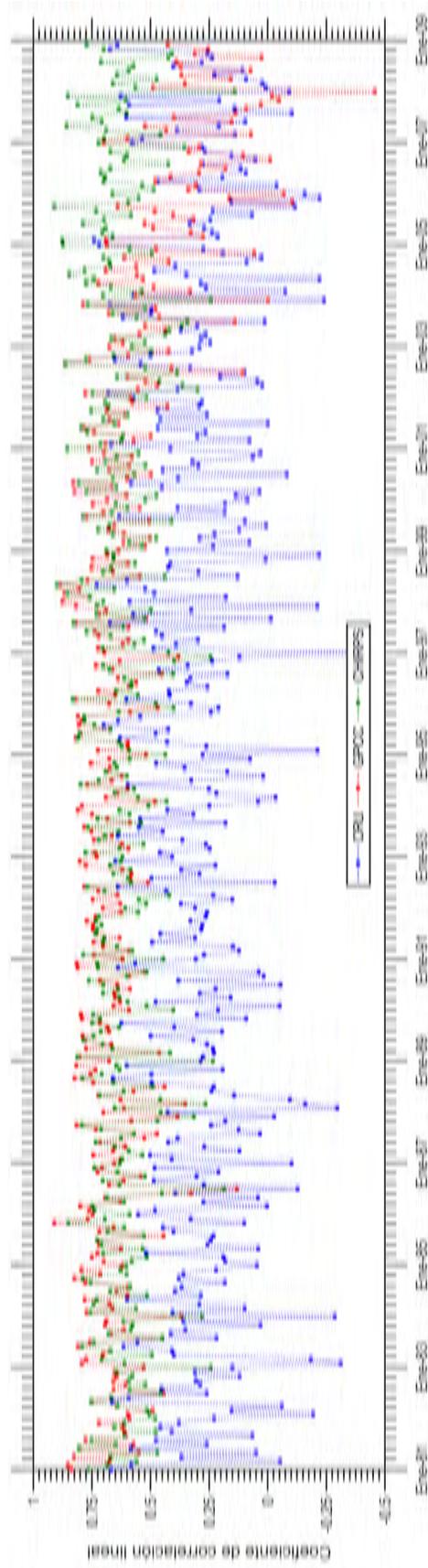


FIGURA 4.62: Evolución temporal de las anomalías de R sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

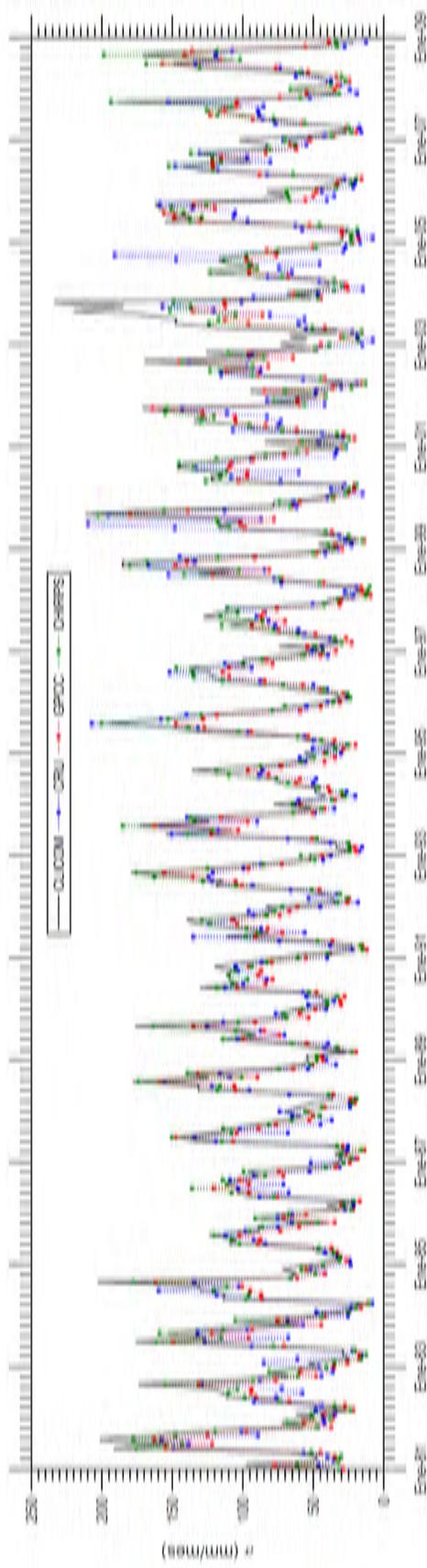


FIGURA 4.63: Evolución temporal de la desviación estándar (mm/mes) sobre la región sureste en las bases CLICOM, CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

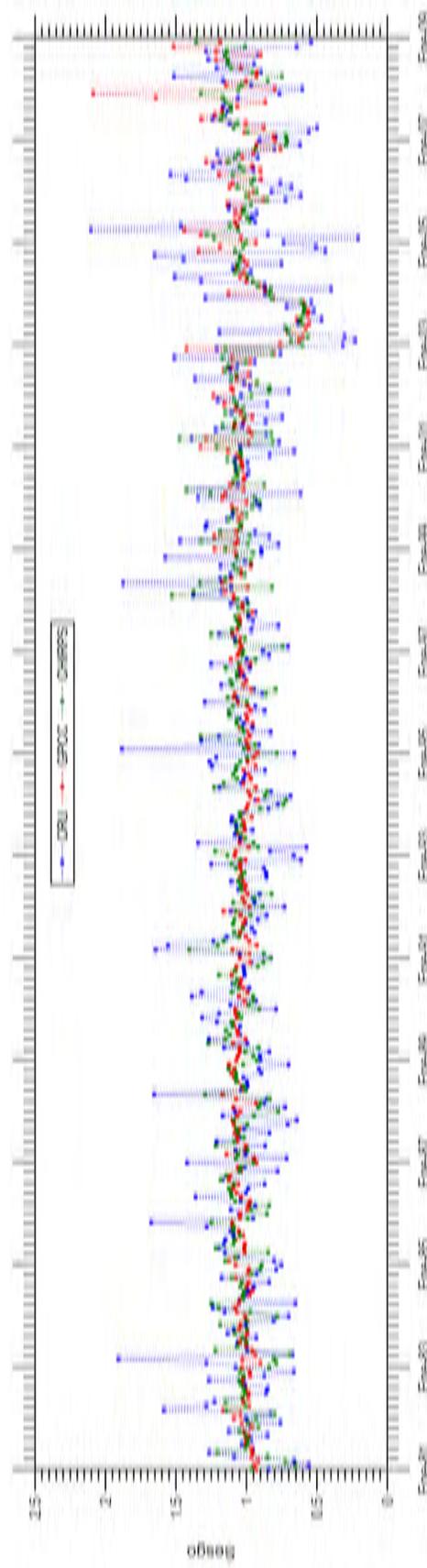


FIGURA 4.64: Evolución temporal del sesgo sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

5. Discusión

5.1. Comparación de la climatología mensual

Al comparar la climatología mensual (1981-2008) de la base CLICOM con las climatologías de los tres productos globales se obtuvo lo siguiente:

- En la región NO, GPCC fue la base que mejor reprodujo la climatología de la base CLICOM durante los doce meses.
- En la región NE, GPCC reprodujo mejor a la base CLICOM durante los meses de enero a noviembre. Durante diciembre no hubo una base que mejor reprodujera la climatología pues, tanto CHIRPS como GPCC, difirieron en el patrón de variación de la precipitación sobre el dominio espacial y en la amplitud del rango de dicha variación, respectivamente.
- En la región CS, GPCC se desempeñó mejor durante enero-abril, noviembre y diciembre, mientras que durante mayo-octubre CHIRPS logró reproducir mejor la climatología de la región.
- En la región SE, GPCC tuvo el mejor desempeño durante enero, junio-septiembre y diciembre, y CHIRPS durante febrero-mayo, octubre y noviembre.

Que CHIRPS haya tenido un mejor desempeño durante algunos meses se debió principalmente a que su desviación estándar fue la más cercana a la de la base CLICOM ya que la desviación del GPCC tuvo valores más bajos.

En relación con la representación de la canícula en el ciclo anual, el SE es la única región en donde las tres bases globales lograron reproducirla, observándose que ocurre durante julio-agosto. Sobre el NE y el CS, la señal de la canícula en el ciclo anual se observa suavizada pues sobre estas regiones coexisten zonas en donde la canícula no se presenta o bien es de diferente duración (ver Fig.3.3).

A partir del sesgo, se calculó la diferencia relativa (no mostrada) para poder comparar los resultados con los generados en Perdígón-Morales et al. (2018), que concluyeron que CHIRPS sobresti-

ma la precipitación durante junio-noviembre y la subestima durante diciembre-mayo, observándose las diferencias más pequeñas durante el periodo de canícula (junio-agosto), mientras que las diferencias máximas suelen presentarse durante el invierno en el sur del país, durante la primavera en el noroeste y durante el otoño en la región este. Las similitudes entre los resultados de Perdigón-Morales et al. (2018) y los generados en este análisis se observaron sobre las regiones CS y SE, cuyos periodos de sobrestimación/subestimación respectivos fueron junio-septiembre/octubre-mayo y mayo-octubre/noviembre-abril. Sobre estas regiones las diferencias mínimas no se observaron exactamente durante junio-agosto, pero en general, fueron menores al 4 % durante esos meses. Por último, el CS fue la única región sobre la que se observó el mismo comportamiento de las diferencias máximas, que se presentaron durante el invierno en los meses de enero-marzo.

5.2. Comparación de la precipitación media anual acumulada

La precipitación media anual acumulada fue calculada a partir de las climatologías usadas en el análisis anterior y con este análisis pudo observarse que al utilizar una resolución temporal menor puede obtenerse un comportamiento regional más claro. Sobre las regiones del norte (NO y NE) la base que mejor logró reproducir la precipitación acumulada de la base CLICOM fue la base GPCC, en cambio, sobre las regiones del sur del país (CS y SE) CHIRPS fue la base que tuvo mayor similitud con CLICOM.

De igual manera, el uso de los datos promediados redujo las diferencias entre las tres bases globales, especialmente entre GPCC y CHIRPS. De acuerdo al sesgo resultante, sobre las cuatro regiones, el orden de la subestimación y sobrestimación de la precipitación nunca fue mayor al 7 %.

Sobre el NO y el NE, la principal diferencia entre GPCC y CHIRPS fue que GPCC tuvo una mejor correlación con el patrón de variación de la precipitación del CLICOM sobre el dominio espacial. Sobre el CS y el SE, las dos bases representaron al patrón espacial pero en GPCC las variaciones fueron de menor amplitud en comparación con las de CHIRPS y las de CLICOM.

El hecho de que las diferencias entre GPCC y CHIRPS fueran pequeñas también muestra que GPCC logra capturar a la precipitación media anual acumulada que se registra en CLICOM de una forma similar a como lo hace la base CHIRPS, a pesar de tener una resolución espacial más baja comparada con la de esta última.

5.3. Comparación de las celdas de malla

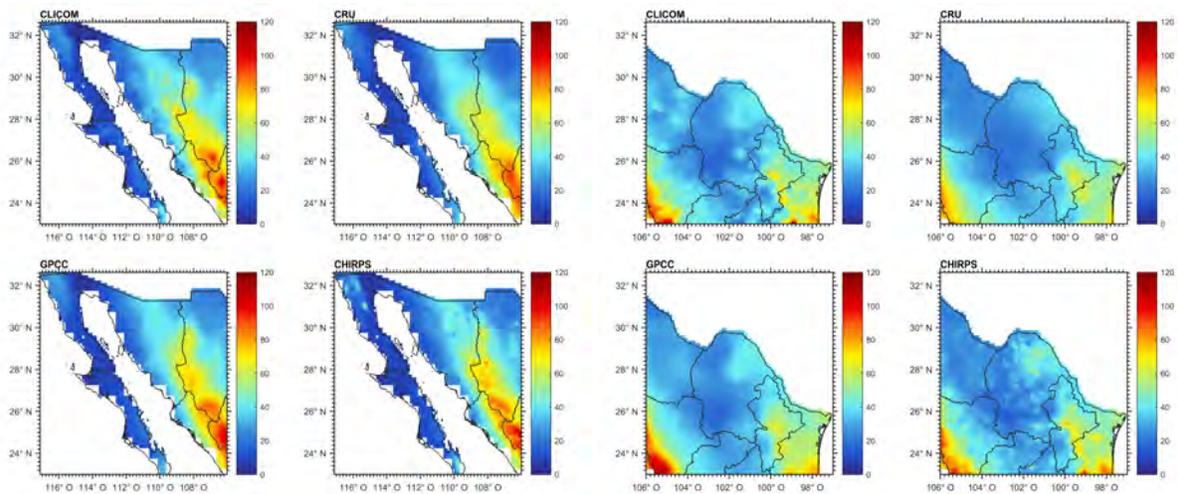
En este análisis no fue posible determinar cuál de los productos globales es el que mejor logra reproducir la precipitación mensual del CLICOM sobre la totalidad de las celdas de malla. En la mayoría de las regiones pudo observarse que más de una base tuvo un desempeño relativamente alto sobre distintas zonas de las mismas, sin embargo, descartando estas porciones de área, pudo identificarse en cada región los aspectos enlistados a continuación:

- En la región NO, GPCC fue la base que mejor reprodujo la precipitación mensual sobre la mayor cantidad de celdas de malla en comparación con CRU y con CHIRPS.
- En las regiones NE y CS, a pesar de que la resolución de la malla de la base CHIRPS es más fina que la malla de GPCC, la carencia de pruebas de significancia estadística impide el identificar a la base con mayor similitud con CLICOM.
- En la región SE, los parámetros estadísticos calculados para CHIRPS indicaron que fue la base con el mejor desempeño sobre la mayor cantidad de celdas de malla de la región.

Las áreas con los valores de EAM y RECM más altos tendieron a localizarse sobre el terreno montañoso que, a su vez, coincidieron con las zonas de mayor precipitación (Fig.5.1).

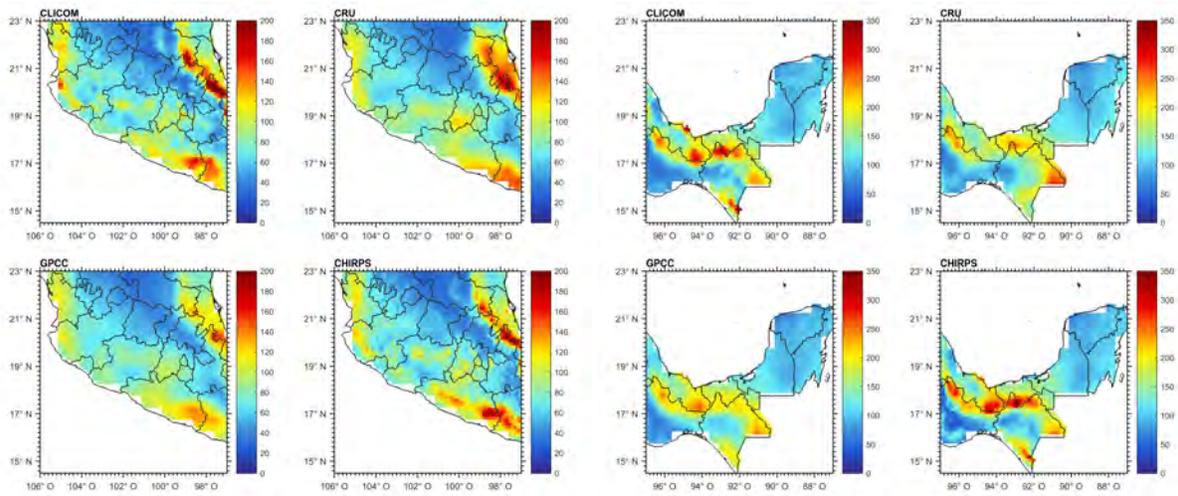
Al igual que en la distribución espacial de los errores, en la desviación estándar se observó que su distribución también coincidió con la distribución de la precipitación. Por otra parte, también se observó que la desviación estándar de CLICOM tendió a ser más alta que la desviación de los productos globales, lo cual sugiere que la variabilidad interanual de la precipitación que captura CLICOM es mayor que la que capturan las bases globales.

En el caso de la correlación lineal se aprecia que parte del patrón de distribución espacial en las cuatro regiones coincidió con la distribución de los errores, esto es más perceptible en la distribución de la correlación calculada con las anomalías de la precipitación. Sin embargo, también se identificaron algunas zonas en las distribuciones espaciales de R que no coincidieron con las distribuciones del EAM o del RECM.



(a) Región noroeste

(b) Región noreste



(c) Región centro sur

(d) Región sureste

FIGURA 5.1: Distribución espacial de la precipitación mensual media (1981-2008) del CLICOM y de las tres bases globales CRU, GPCC y CHIRPS sobre las regiones a) noroeste, b) noreste, c) centro sur y e) sureste.

Sobre las cuatro regiones, las distribuciones espaciales del sesgo de las tres bases no mostraron compartir un patrón en común y estas tampoco correspondieron con las distribuciones de los otros parámetros estadísticos. Solamente algunas zonas con valores de sesgo muy altos o muy bajos coincidieron con zonas de baja correlación y de errores altos, pero en general no fue el caso.

Mediante los otros análisis no es posible determinar si las diferencias entre las bases globales y CLICOM son producidas por las diferencias entre los métodos de interpolación utilizados en la construcción de las bases o si son producidas por las diferencias entre las observaciones puntuales

que incluye CLICOM y los valores estimados de la precipitación. Sin embargo, con este análisis puede obtenerse una primera aproximación para poder identificar la causa de las diferencias comparando visualmente las distribuciones espaciales de los parámetros con la distribución de las estaciones de medición sobre el país (ver Fig.1.2).

5.4. Comparación de la variación temporal de los parámetros estadísticos

A través de la comparación de la evolución temporal de los valores promediados del dominio espacial se caracterizaron los cambios temporales de las diferencias entre la malla del CLICOM y la malla de los productos globales. Estos cambios se generalizaron sobre todo el país durante los mismos dos intervalos de tiempo, el primero abarca el periodo entre el año 1981 y el año 2003 y el segundo del año 2004 al año 2008.

1) 1981 - 2003

- La región NO fue la única región en la que este periodo comenzó en el año 1981 y finalizó en el año 2004, durante estos años GPCC fue la base que tuvo la mayor similitud con CLICOM durante la mayor parte de los pasos de tiempo.
- En la región NE, los resultados de los parámetros estadísticos también indicaron que GPCC tuvo las menores diferencias con CLICOM durante la mayor parte del periodo.
- En la región CS, GPCC reprodujo mejor los valores de la base CLICOM durante los meses de baja precipitación, mientras que en los meses con mayores precipitaciones, tanto GPCC como CHIRPS reprodujeron a la base CLICOM con un desempeño similar.
- En la región SE, GPCC y CHIRPS reprodujeron a la base CLICOM de forma similar ya que los parámetros estadísticos en ambas bases tomaron valores similares durante este periodo.

2) 2004 - 2008

- La región NO fue la única región en la que este periodo comenzó en el año 2005 y finalizó en el año 2008, durante estos años CHIRPS tuvo mayor similitud con CLICOM durante los

meses de la temporada húmeda, mientras que durante los meses de bajas precipitaciones tanto GPCC como CHIRPS tuvieron el mismo desempeño al reproducir a la base CLICOM.

- En la región NE, las diferencias estadísticas entre GPCC y CHIRPS no permitieron distinguir entre las dos bases a la del desempeño más alto.
- En las regiones CS y SE, las diferencias estadísticas indicaron que CHIRPS tuvo un mejor desempeño que GPCC al reproducir a la base CLICOM.

El factor principal que influyó en que CHIRPS tuviera un mejor desempeño durante el segundo periodo (2004-2008) fue el cambio en el rendimiento del GPCC observado a inicios de los años 2000. Este cambio también fue reportado por Dinku et al. (2008), quienes identificaron a la disminución en el número de mediciones como la causa principal. De acuerdo con Schneider et al. (2014), el número de estaciones de medición que son incorporadas para la construcción de la base GPCC ha disminuido considerablemente por el retraso en la entrega de los datos y por la aplicación de los procedimientos de control de calidad. Por dar un ejemplo, de las 50 000 estaciones que se tenían contabilizadas en 1987, para el año 2016 se redujeron a menos de 15 000 (Fig.5.2).

En Dinku et al. (2008) también se hace mención de que la reducción en la cantidad de estaciones de medición en GPCC no representa un inconveniente mayor para la representación de las climatologías y de la precipitación media anual acumulada. Este resultado también fue reproducido en esta tesis pues, como se discutió en las secciones 5.1 y 5.2, GPCC tuvo un alto desempeño en ambos análisis.

El comportamiento estacional del sesgo observado sobre las regiones NO, NE y CS fue producido por las propiedades de la expresión utilizada (Ec. 3.2), la cual suele dar mayor peso a la razón entre cantidades pequeñas que a la razón entre cantidades grandes, aun cuando las diferencias son de la misma magnitud. Por ejemplo, durante un mes de baja precipitación en el que se tengan 10 mm/mes en CLICOM y 20 mm/mes en CRU el sesgo resultante será de 2, mientras que un mes lluvioso en el que se registren 140 mm/mes en CLICOM y 150 mm/mes en CRU el sesgo calculado será de 1.07. En el SE no se observó este comportamiento ya que en la región se registran las mayores cantidades de precipitación y, en consecuencia, las proporciones entre los valores tuvieron pesos similares.

Otra cuestión relevante de este análisis fue la anomalía positiva identificada durante el año

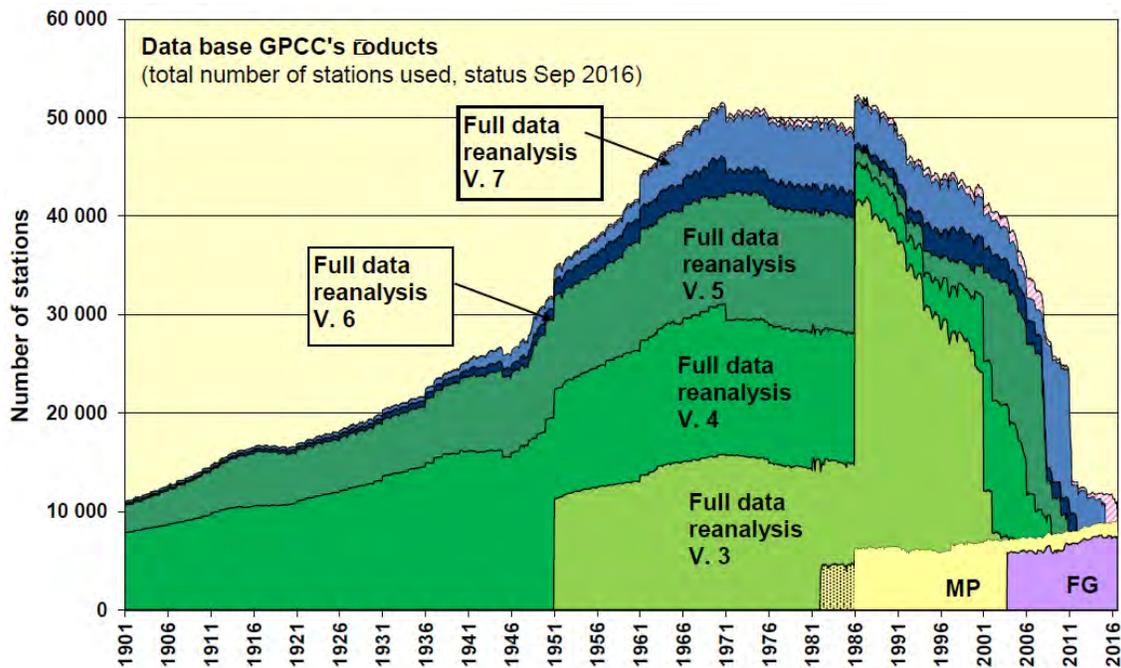


FIGURA 5.2: Número de estaciones climatológicas utilizadas en la construcción del reanálisis GPCP v.7. Fuente: Schneider et al. (2016).

2003 sobre las regiones NE, CS y SE de la base CLICOM y que no fue reproducida por las tres bases globales. De acuerdo al comportamiento histórico de la precipitación acumulada del periodo enero-noviembre (SIAP-SAGARPA, 2010), las únicas entidades federativas en donde las precipitaciones del 2003 fueron mayores a las de los otros años fueron Baja California Sur, Guanajuato, Querétaro y Quintana Roo. En una primera revisión de la literatura, no hubo registro de este máximo en otras bases interpoladas tales como en la base L15 de Livneh et al. (2015) y en la versión 3B42 del *Tropical Rainfall Measuring Mission* (De Jesús et al., 2016), por lo que posiblemente se deba a un error generado por las técnicas de construcción de la malla. No obstante, es necesario realizar un análisis más exhaustivo a fin de determinar las causas posibles de esta anomalía.

Para finalizar, el aspecto que tuvieron en común los cuatro análisis comparativos fue el hecho de que la base CRU fuera la base menos adecuada para representar a los datos de precipitación de la malla de la base CLICOM. Además de tener el desempeño más bajo, las diferencias CRU-GPCP y CRU-CHIRPS también fueron más grandes en comparación con las diferencias GPCP-CHIRPS. En algunos trabajos (Dinku et al., 2008; Belo-Pereira et al., 2011) ya se había concluido anteriormente que GPCP logra reproducir mejor a los datos observados que la base CRU.

6. Conclusiones

Las bases interpoladas son fuentes importantes de información climática para países como México en los que existen regiones con una escasa cobertura de estaciones meteorológicas. No obstante, varios trabajos han demostrado que las bases de precipitación en particular, presentan diferencias sustanciales entre sí y con las observaciones reales que hacen que su uso pueda estar condicionado.

En la presente tesis se compararon estadísticamente los datos mensuales de precipitación de las bases CRU TS3.23, GPCC v.7 y CHIRPS v.2.0 con la malla interpolada CLICOM-CICESE. Para esto se definieron cuatro regiones sobre las que se analizaron las climatologías mensuales de la precipitación y la precipitación media anual acumulada, así como la precipitación sobre cada celda de malla y la precipitación promediada sobre el dominio espacial durante cada paso de tiempo.

Los resultados obtenidos en cada uno de los análisis conducidos sobre las cuatro regiones sugieren que la capacidad de las bases globales para reproducir la precipitación mensual de la base CLICOM depende de la escala temporal, así como de la región de México que se busque analizar. Dentro de los resultados más relevantes se encontró que GPCC y CHIRPS tienen una afinidad relativamente alta con el conjunto CLICOM en comparación con la base CRU, que tuvo el peor desempeño sobre las cuatro regiones y durante todo el periodo analizado. También se identificó que la integración de una menor cantidad de observaciones en la base GPCC en los últimos años está provocando una disminución en la calidad de su información.

De comprobarse los resultados presentados en este estudio, se tendrían serias implicaciones con respecto a la forma en que estos conjuntos de datos han sido utilizados en sustitución de las observaciones in situ. En primer lugar deben de realizarse pruebas de significación estadística para poder analizar el nivel de significancia de cada uno de los resultados de las comparaciones entre las bases de precipitación. También es imprescindible verificar estos resultados mediante la evaluación de los productos globales con registros continuos y actualizados, principalmente los referidos a la baja aptitud de la base CRU para simular al conjunto CLICOM y a la disminución del desempeño de la base GPCC durante los años posteriores al 2000. Del mismo modo, es necesario realizar un análisis exhaustivo de la malla CLICOM para verificar su calidad de representación de los datos

observados, así como para obtener más información sobre los inconvenientes inherentes al método de construcción de la malla.

Es importante mencionar que, debido a la poca cobertura de estaciones sobre el país, existen regiones en las que no se están generando mediciones con las cuales las bases interpoladas como CRU, GPCC y CHIRPS puedan ser comparadas. Por consiguiente, la evaluación sobre estas regiones solo podrá realizarse mediante la ampliación y el robustecimiento de la red nacional de estaciones meteorológicas.

Otro aspecto a considerar a largo plazo es la creación de una base mexicana propia en la que se unifique toda la información climática generada en el país que, a su vez, sea abierta, de fácil acceso y permita eliminar la dependencia de los productos extranjeros. Esto bien podría lograrse a través de la actualización y optimización de la base CLICOM, la cual probablemente sea la base interpolada única de México que integre, hasta la fecha, la mayor cantidad de observaciones mensuales.

Dada la crisis climática que tendrá que enfrentar la humanidad durante el presente siglo, la falta de registros continuos de información tiene serias implicaciones no solo de interés académico sino también de interés social, pues el monitoreo continuo de las diversas variables meteorológicas nos permite identificar la variación natural del clima y estimar el cambio climático a escala local, lo cual es fundamental para crear planes de acción adecuados para cada región del país. Ahora más que nunca se requiere del fortalecimiento de la cooperación científica y del trabajo colaborativo entre las diferentes entidades del país que permita generar observaciones climatológicas confiables y de calidad.

Anexos

Anexo A

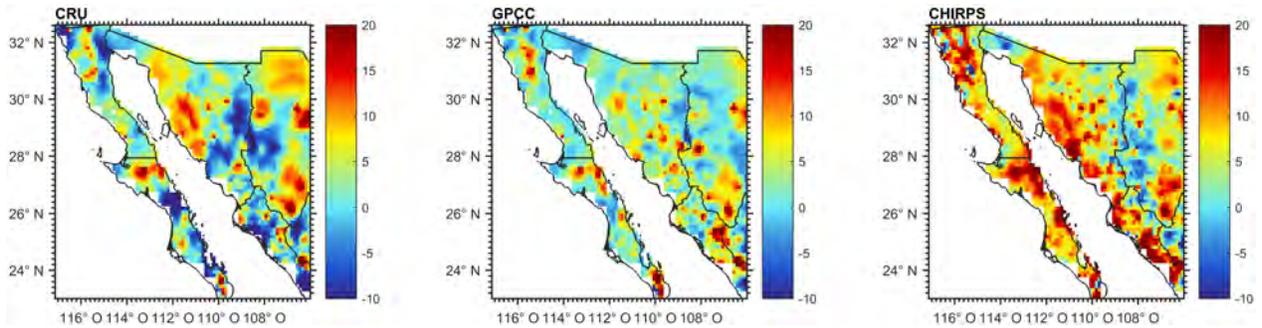


FIGURA A.1: Distribución de las diferencias entre la desviación estándar de los tres productos globales y la desviación estándar de la base CLICOM sobre la región noroeste.

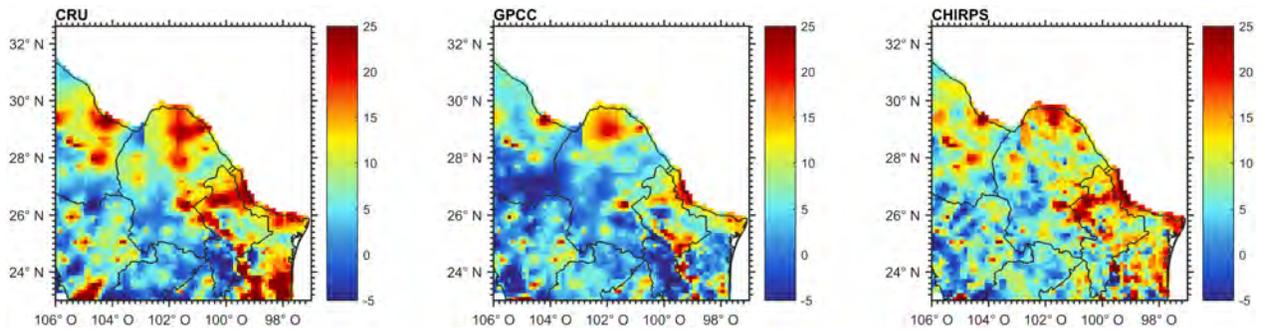


FIGURA A.2: Distribución de las diferencias entre la desviación estándar de los tres productos globales y la desviación estándar de la base CLICOM sobre la región noreste.

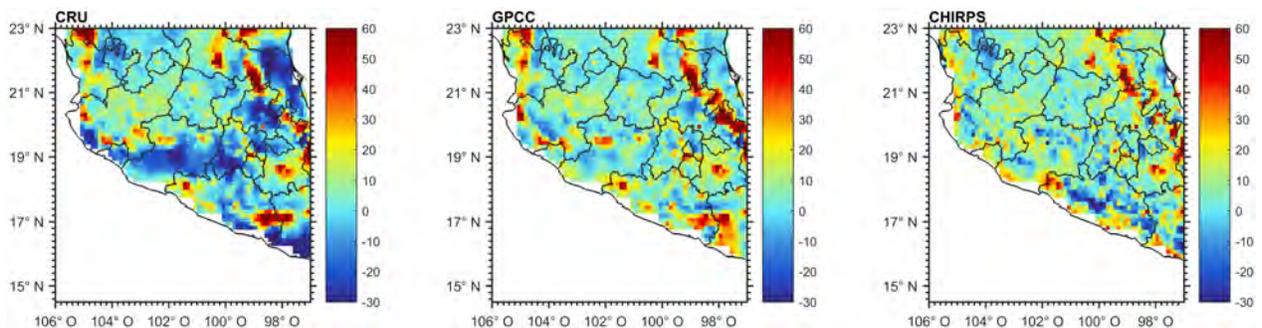


FIGURA A.3: Distribución de las diferencias entre la desviación estándar de los tres productos globales y la desviación estándar de la base CLICOM sobre la región centro sur.

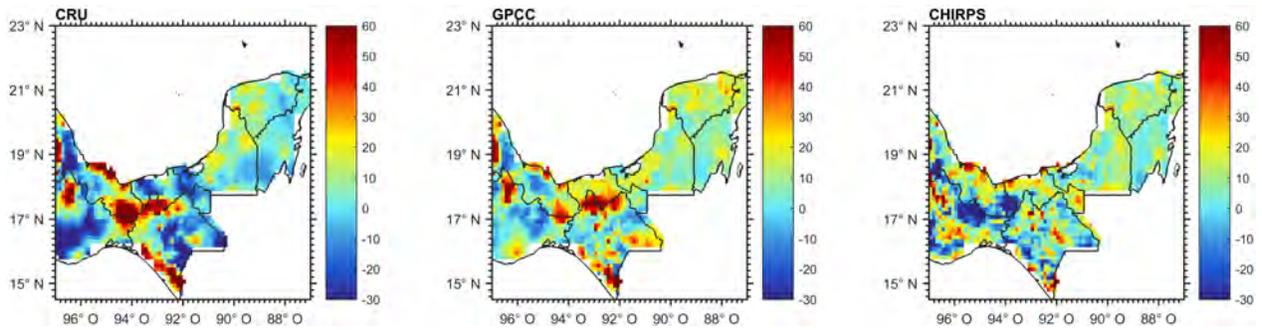


FIGURA A.4: Distribución de las diferencias entre la desviación estándar de los tres productos globales y la desviación estándar de la base CLICOM sobre la región sureste.

Anexo B

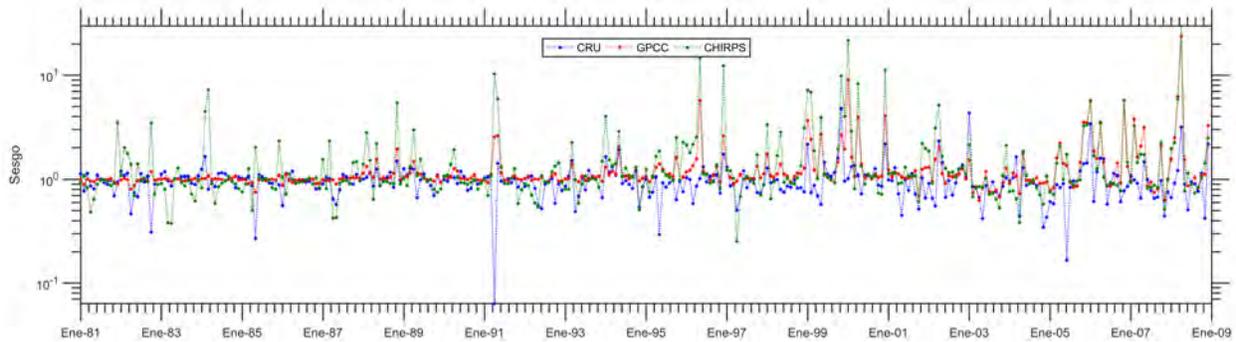


FIGURA B.1: Evolución temporal del sesgo en escala logarítmica sobre la región noroeste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

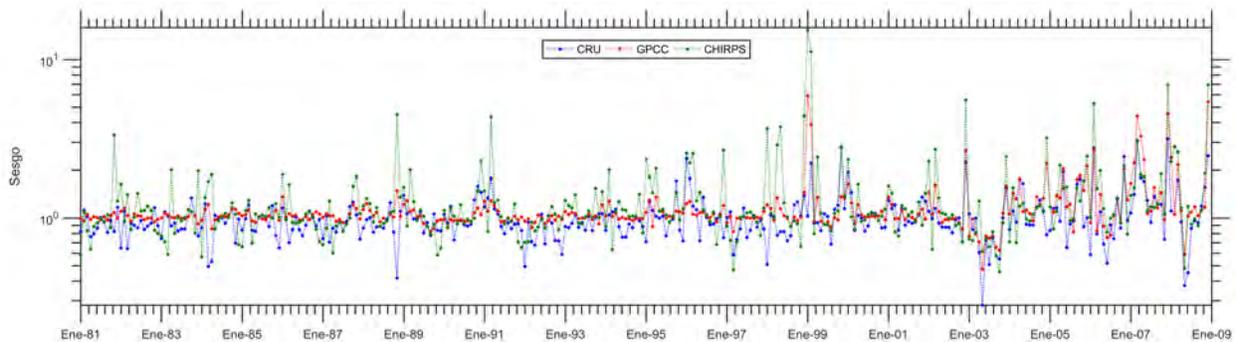


FIGURA B.2: Evolución temporal del sesgo en escala logarítmica sobre la región noreste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

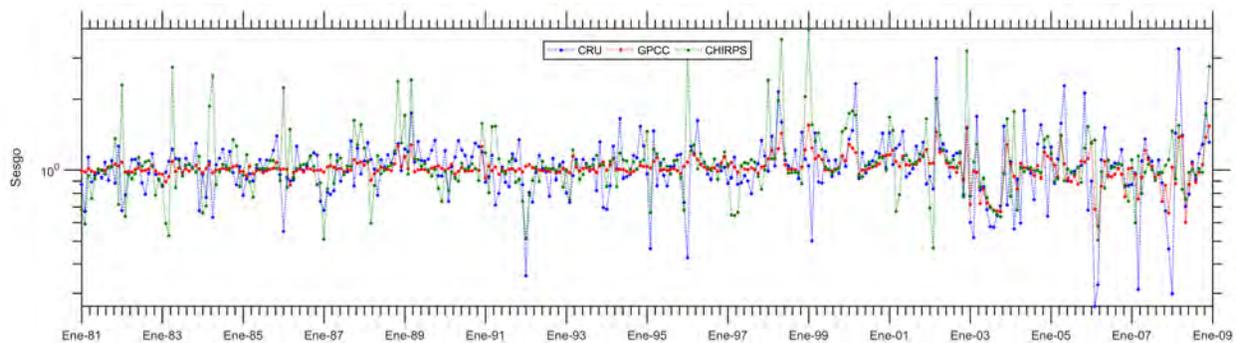


FIGURA B.3: Evolución temporal del sesgo en escala logarítmica sobre la región centro sur en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

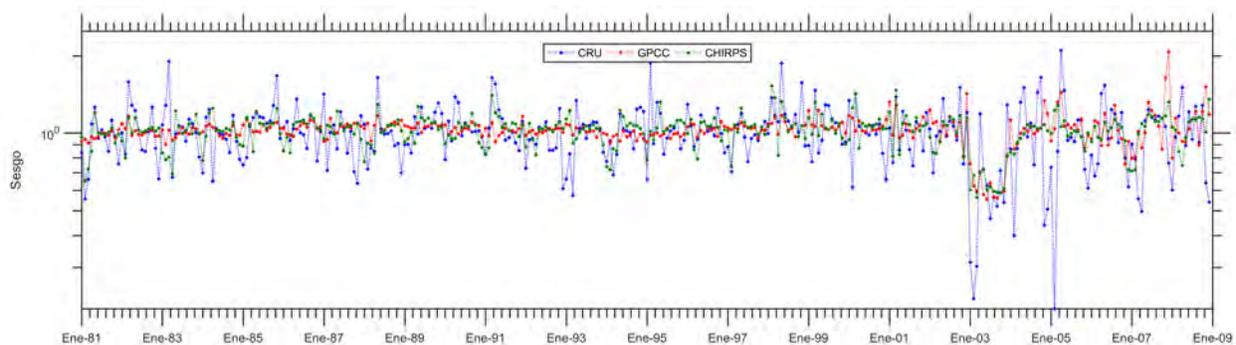


FIGURA B.4: Evolución temporal del sesgo en escala logarítmica sobre la región sureste en las bases CRU, GPCC y CHIRPS durante el periodo 1981-2008.

Referencias y bibliografía

- Adams, D. K., y Comrie, A. C. (1997). The North American Monsoon. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78(10), 2197–2214.
- Belo-Pereira, M., Dutra, E., y Viterbo, P. (2011). Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula. *J. Geophys. Res.*, 116(D20).
- Cavazos, T., Salinas, J. A., Martínez, B., Colorado, G., De Grau, P., Prieto González, R., y Bravo, M. E. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. *Informe final del proyecto al INECC*, 150.
- Chai, T., y Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geosci. Model Dev.*, 7(3), 1247–1250.
- CONAGUA. (2016a). *Atlas del Agua en México 2016*. Recuperado de http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf.
- CONAGUA. (2016b). *Estadísticas del Agua en México, edición 2016*. Recuperado de http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf.
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarez, J., y Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *Int. J. Climatol.*, 34(7), 2427–2437.
- De Jesús, A., Breña-Naranjo, J. A., Pedrozo-Acuña, A., y Alcocer-Yamanaka, V. H. (2016). The use of TRMM 3B42 product for drought monitoring in Mexico. *Water*, 8(8), 325.
- Deser, C., Phillips, A. S., Alexander, M. A., y Smoliak, B. V. (2014). Projecting North American climate over the next 50 years: Uncertainty due to internal variability. *J. Clim.*, 27(6), 2271–2296.
- Dinku, T., Connor, S. J., Ceccato, P., y Ropelewski, C. F. (2008). Comparison of global gridded precipitation products over a mountainous region of Africa. *Int. J. Climatol.*, 28, 1627–1638.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Rowland, J., ... Verdin, A. (2014). A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. *US Geological Survey Data Series*, 832(4).

- Funk, C., Peterson, P., Lansfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., . . . Michaelsen, J. (2015a). *Climate hazards group*. doi: 10.15780/G2RP4Q
- Funk, C., Peterson, P., Lansfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., . . . Michaelsen, J. (2015b). The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data*, 2. doi: 10.1038/sdata.2015.66
- García, E. (1965). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Publicaciones del Instituto de Geografía*(5), 171–191.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., y Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 34, 623–642.
- Henn, B., Newman, A. J., Livneh, B., Daly, C., y Lundquist, J. D. (2017). An assessment of differences in gridded precipitation datasets in complex terrain. *J. Hydrol.* doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.008
- Jáuregui-Ostos, E. (1970). La erosión hidráulica y eólica en México y sus efectos en las estructuras hidráulicas y en los núcleos de población. *Investigaciones Geográficas* 3, 39–60.
- Karmalkar, A. V., Bradley, R. S., y Diaz, H. F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections. *Clim. Dyn.*, 37(3-4), 605–629.
- Lamprey, B. L. (2008). Comparison of gridded multisatellite rainfall estimates with gridded gauge rainfall over West Africa. *J. Appl. Meteor.*, 47, 185–205.
- Livneh, B., Bohn, T. J., Pierce, D. W., Munoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., . . . Brekke, L. (2015). A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the US, and Southern Canada 1950–2013. *Sci. Data*, 2, 150042.
- Los datos climáticos diarios del CLICOM del SMN fueron transformados a una malla de 1/8 de grado por Zhu y Lettenmier (2007) y Muñoz-Arriola et al. (2009) y la plataforma gráfica fue desarrollada en el CICESE. (<http://clicom-mex.cicese.mx/malla>).
- Magaña, V., Amador, J. A., y Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *J. Climate*, 12(6), 1577–1588.
- Magaña, V., Zermeno, D., y Neri, C. (2012). Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Clim. Res.*, 51(2), 171–184.
- Martínez-López, B., Estrada, F., y Gay, C. (2010). Tendencias observadas de la precipitación en

- localidades cercanas al valle de México y una estimación de su evolución durante el siglo XXI. En Fernández-García, F., Galán-Gallego, E., y Cañada-Torrecilla, R. (Eds.), *Clima, ciudad y ecosistemas* (pp. 221-231). Barcelona, España: Ediciones del Serbal. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8518>.
- Maynor, Y. G., Tereshchenko, I., Fonseca-Hernández, M., Pantoja, D. A., y Montes, J. M. (2017). Evaluation of Error in IMERG Precipitation Estimates under Different Topographic Conditions and Temporal Scales over Mexico. *Remote Sens.*, 9(5), 503.
- MetEd. (2008). *Introduction to Verification of Hydrologic Forecasts. Section 6: Accuracy*. Recuperado de http://www.meted.ucar.edu/hydro/verification/intro/print_version/06-Accuracy.htm.
- Mosiño, A. P., y García, E. (1966). Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana. *Proc. Conf. Reg. Lat. Amer.*, 3, 500–516.
- Muñoz-Arriola, F., Avissar, R., Zhu, C., y Lettenmaier, D. P. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Wat. Res. Res.*, 45(11).
- National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2014). *The Climate Data Guide: Precipitation Data Sets: Overview & Comparison table*. Recuperado de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/precipitation-data-sets-overview-comparison-table>.
- Negrón-Juárez, R. I., Li, W., Fu, R., Fernandes, K., y de Oliveira-Cardoso, A. (2009). Comparison of precipitation datasets over the tropical South American and African continents. *J. Hydrometeor.*, 10(1), 289–299.
- Nkiaka, E., Nawaz, N. R., y Lovett, J. C. (2017). Evaluating global reanalysis precipitation datasets with rain gauge measurements in the Sudano-Sahel region: case study of the Logone catchment, Lake Chad Basin. *Meteorol. Appl.*, 24(1), 9–18.
- Pascale, S., Lucarini, V., Feng, X., Porporato, A., y ul Hasson, S. (2015). Analysis of rainfall seasonality from observations and climate models. *Clim. Dyn.*, 44(11-12), 3281–3301.
- Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Pérez, P. O., y Barrett, B. S. (2018). The midsummer drought in Mexico: perspectives on duration and intensity from the CHIRPS precipitation database. *Int. J. Climatol.*, 38(5), 2174–2186.

- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., y Ziese, M. (2015). *GPCC Full Data Reanalysis Version 7.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data*. doi: 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V7_050/
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., y Rudolf, B. (2014). GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theor. Appl. Climatol.*, 115, 15–40.
- Schneider, U., Ziese, M., Meyer-Christoffer, A., Finger, P., Rustemeier, E., y Becker, A. (2016). The new portfolio of global precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre suitable to assess and quantify the global water cycle and resources. *Proc. IAHS*, 374, 29–34.
- SEMARNAT. (2016). Climas. En *Atlas Digital Geográfico*. Recuperado de http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html.
- SIAP-SAGARPA. (2010). *Comportamiento Histórico de: Precipitación Mensual y Acumulada 1999 – 2008 Enero – Noviembre* [PDF]. Recuperado de http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Monitor/gas/com_prec_nov08.pdf.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106(D7), 7183–7192.
- Taylor, K. E. (2005). *Taylor diagram primer*. PCMDI.
- Universidad de Pensilvania. (2018). Lecture 29 - 4.4 R-squared and Root Mean Squared Error (RMSE). En *Fundamentals of Quantitative Modeling*. [Curso en línea]. Recuperado de <https://es.coursera.org/learn/wharton-quantitative-modeling/lecture/Nndhc/4-4-r-squared-and-root-mean-squared-error-rmse>.
- Wilks, D. S. (2006). Forecast Verification. En *Statistical methods in the atmospheric sciences* (2.^a ed., pp. 278–279). E.U.A.: Academic Press.
- Zhu, C., y Lettenmaier, D. P. (2007). Long-term climate and derived surface hydrology and energy flux data for Mexico: 1925-2004. *J. Clim.*, 20, 1936–1946.