

Avaliação dos Dados de Precipitação Estimados pelo Satélite TRMM para o Brasil

Gabriel Pereira^{1,2}; Maria Elisa Siqueira Silva¹; Elisabete Caria Moraes²; Francielle da Silva Cardozo²
 gabrielpereira@usp.br; elisasiq@usp.br; gabriel@dsr.inpe.br; bete@dsr.inpe.br; cardozo@dsr.inpe.br

Recebido: 28/03/12 - revisado: 18/06/12 - aceito: 28/05/13

RESUMO

A precipitação é considerada uma das variáveis mais importantes no ciclo hidrológico sendo constantemente utilizada em diversos estudos ambientais. Entretanto, em áreas extensas ou em áreas com uma baixa densidade de estações meteorológicas, torna-se necessário estimar a precipitação a partir de outros métodos. Consequentemente, produtos ambientais derivados de sensores orbitais podem auxiliar na extração de informações do volume de chuva e são constantemente empregados no entendimento do ciclo hidrológico e seus efeitos na circulação atmosférica. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho é avaliar e analisar os dados de precipitação estimados pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) para o Brasil, no período compreendido entre 1998 e 2010. Os resultados indicam que a comparação entre os dados de precipitação mensal estimada pelo TRMM e 183 estações meteorológicas espalhadas por todo o Brasil apresentam uma concordância de aproximadamente 97% (significante a $p < 0,05$; teste t-student). Entretanto, encontraram-se valores 9%, 8%, 6%, 13% e 9% maiores que os observados pelas redes de estações meteorológicas para a região Centro-Oeste, Sul, Norte, Sudeste e Nordeste, respectivamente. Ainda, as análises mensais indicam que o erro médio quadrático (RMSE) possui valores médios entre 17 ± 10 mm. Além disso, os dados do TRMM apresentam a tendência média de superestimar a precipitação mensal em 15%. Contudo, as estimativas de precipitação apresentam variação sazonal muito similar à apresentada pelos dados observados nas estações meteorológicas.

Palavras-Chave: Ciclo hidrológico, precipitação. TRMM. Estação climatológica.

INTRODUÇÃO

A precipitação é considerada uma das variáveis mais importantes no ciclo hidrológico sendo constantemente utilizada em diversas áreas do conhecimento. Esta variável é empregada para a validação de modelos numéricos de previsão de tempo e clima, balanço hídrico, radiação, entre outros. A compreensão da variabilidade espacial da precipitação em determinada região é essencial, uma vez que seu padrão interanual e sazonal é crucial para a agricultura e para diversos setores da economia. Neste contexto, a confiabilidade das estimativas de precipitação torna-se de suma importância.

Em áreas extensas como Brasil, a distribuição das estações meteorológicas não abrange todo o território, além disto, precipitações isoladas que podem ocorrer em determinada área da bacia hidrográfica e que não são contabilizadas na estação

meteorológica mais próxima, podem influenciar significativamente na análise do escoamento superficial, do déficit hídrico e do balanço de energia. Desta forma, produtos ambientais derivados de sensores orbitais podem auxiliar na extração de informações do volume de chuva de determinada região e são constantemente empregados no entendimento do ciclo hidrológico e seus efeitos na circulação atmosférica, nas alterações no calor latente e sensível e nas mudanças climáticas globais e regionais (FRANCHITO et al., 2009).

Além disto, outra vantagem do emprego do sensoriamento remoto consiste no fato de que os sensores a bordo de satélites fornecem informações essenciais em relação à variabilidade da precipitação em escala global e sobre áreas oceânicas e montanhosas, ou seja, em locais que possuem uma escassez de estações meteorológicas (FISHER, 2004). Na década de 90, foi lançado o primeiro satélite de radar aerotransportado com o objetivo de coletar dados mais refinados sobre a estrutura da precipitação, denominado *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Este satélite permite a análise da precipitação desde 1997, fornecendo informações em áreas

¹ Universidade de São Paulo/USP

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/INPE

tropicais e subtropicais a cada 3 horas (KUMMEROW et al., 2000).

Neste contexto, vários estudos foram realizados com o intuito de validar os dados de precipitação para diferentes regiões do globo (ALMAZROUI, 2011; CHEN et al., 2011; FRANCHITO et al., 2009; LIAO; MENECHINI, 2009; NESBITT; ZIPSER; KUMMEROW, 2004; ROBERTSON; FITZJARRALD; KUMMEROW, 2003). Porém, os dados observados, que podem ser desde estações meteorológicas, radares tridimensionais operando em Banda-S, reanálises de modelos meteorológicos, a extensão da área validada, assim como, os sistemas meteorológicos que atuam em cada área e o período analisado diferem significativamente entre cada estudo. Desta forma, torna-se fundamental a análise destes dados a partir de uma série temporal consistente.

Dada às circunstâncias acima descritas, o principal objetivo deste trabalho é avaliar e analisar os dados de precipitação estimados pelo TRMM para o Brasil, no período compreendido entre 1998 e 2011, comparando-os com os dados de precipitação coletados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e propor coeficientes de ajuste para a estimativa de precipitação para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e padrões de circulação na América do Sul

A área de estudo deste trabalho compreende a parte central da América do Sul, localizada entre as coordenadas geográficas com latitudes entre N 10°00' e S 40°00', longitudes entre W 95°00' e W 30°00', abrangendo as estações meteorológicas do INMET/CPTEC. A região selecionada destaca-se principalmente pelas diferenças econômicas, culturais e pela grande biodiversidade, apresentando, do ponto de vista climático, vários sistemas atmosféricos que contribuem para a determinação do clima.

Na área de estudo podem-se encontrar várias massas de ar que influenciam significativamente o tempo e o clima (HOLTON, 2004; MONTEIRO, 1999; NIMER, 1979). Entre as principais massas de ar, destacam-se: (I) Massa de Ar Polar Atlântica (mPa), formada no Anticiclone Migratório Polar, composta por um ar muito frio e seco e com forte subsidência superior; (II) Massa Tropical Atlântica (mTa), formada no Anticiclone

do Atlântico Sul, caracterizada como quente, úmida (devido ao contato da sua parte basal com o oceano) e estável; (III) Massa Tropical Continental (mTc), originada na região do Chaco e relacionada com o aquecimento do interior do continente, constituindo-se em uma massa de ar quente, seca, instável e desprovida de nebulosidade; (IV) Massa Equatorial Continental (mEc), originada na Bacia Amazônica, uma zona de baixa pressão e grande concentração de umidade, caracterizada como uma massa de ar quente, úmida e instável; e (V) Massa Equatorial Atlântica (mEa), formada nas altas pressões subtropicais do Atlântico Norte, caracterizada como uma massa de ar quente e úmida (Figura 1).

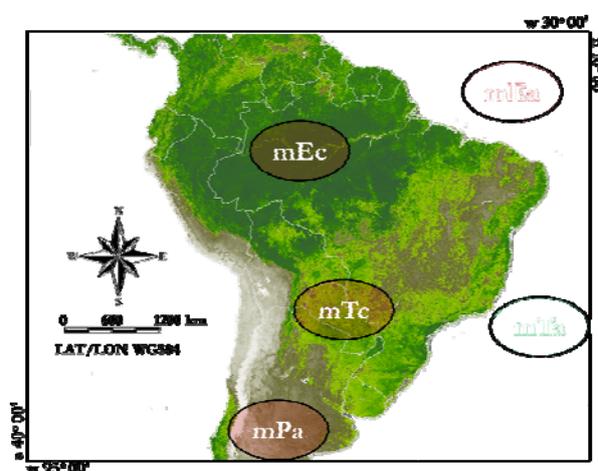


Figura 1 - Localização da área de estudo e massas de ar que afetam diretamente a região de estudo (mPa - Massa de ar Polar Atlântica; mTa - Massa de ar Tropical Atlântica; mEc - Massa de ar Equatorial Continental; mEa - Massa de ar Equatorial Atlântica; e mTc - Massa de ar Tropical Continental)

Conseqüentemente, cada massa de ar está associada a um padrão particular de circulação local e regional que se refletirá nas condições de tempo e clima de determinada região, influenciando significativamente o padrão da precipitação. A região Norte do Brasil, caracterizada pelo clima equatorial, não apresenta uma estação seca bem definida, nesta região as chuvas são ocasionadas, principalmente, por processos de convecção do calor local e disponibilidade de umidade, sendo que os meses de menor atividade convectiva concentram-se entre maio e setembro (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1996). Durante o período de verão do hemisfério sul, observa-se a

presença da Alta da Bolívia (AB) bem configurada em decorrência do grande aquecimento da superfície e das camadas inferiores da atmosfera. Alguns sistemas atmosféricos apresentam o caráter transiente nesta região, tal como: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), cujo deslocamento mais significativo ocorre na escala sazonal, atingindo latitudes mais ao sul durante o período de verão do hemisfério sul; as ondas de frio, chamadas de “friagens”, com a migração de massas de ar frio intensas e oriundas de latitudes mais altas, que atingem, por vezes, a porção sul da região Norte do Brasil; e as linhas de instabilidade, cujo deslocamento característico ocorre de NE para SW, e origina uma nebulosidade que se forma devido à convergência do ar em baixos níveis provocada pela atuação da brisa marítima na costa norte e seu posterior deslocamento para o centro do continente, acompanhando o escoamento dos alísios de nordeste. A penetração de sistemas frontais em direção a latitudes mais baixas contribui para a organização da convecção na Amazônia (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1996), sendo considerada uma fator importante na determinação das condições de tempo. Na escala climática interanual, eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS) contribuem para a definição de períodos mais secos e mais chuvosos.

As condições climáticas da região Nordeste recebem influência de diferentes origens. Em parte, pode-se dizer que condições mais secas desta região estão associadas à formação de vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAS), durante o verão do hemisfério sul, e à circulação de altos níveis formada em decorrência do forte movimento vertical ascendente sobre a região amazônica, localizada a oeste da região Nordeste. Além deste aspecto, condições mais secas são ainda produto do movimento de compensação do movimento vertical, quando a ZCIT se localiza em posições mais ao norte, contribuindo para a intensificação de movimentos descendentes sobre o NE. Apesar da circulação de escala regional contribuir para condições mais secas, a faixa litorânea norte e leste da região Nordeste presenciam precipitação anual acentuada, com valores anuais superiores a 1500 mm. No norte do Nordeste, a ZCIT é o sistema responsável por condições atmosféricas propícias à precipitação durante o período de fevereiro a maio, época do ano em que se encontra em sua posição mais ao sul. Na faixa litorânea leste, a precipitação observada decorre principalmente da convergência do ar em baixos níveis durante o inverno no hemisfério sul, devido à intensificação dos alísios de sudeste. Além

da atuação da convergência do ar, as ondas de leste propiciam a formação de nebulosidade e precipitação que, eventualmente, atingem regiões mais interioranas do Nordeste (QUADRO et al., 1996).

No Centro-Oeste e Sudeste do Brasil é possível verificar uma estação seca no inverno e uma estação chuvosa no verão e, entre os sistemas tropicais e de latitudes médias que atuam nesta região, pode-se citar as frentes frias, com atuação durante todo o ano, e a zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (ROCHA; GANDU, 1996), durante o verão. O Sul do país, de clima temperado, não possui uma estação seca bem definida devido à atuação frequente de sistemas frontais. Entre os principais sistemas atmosféricos que ocorrem nessa região, pode-se citar as frentes frias e os sistemas convectivos de mesoescala (SCM) (SILVA DIAS, 1996).

Materiais utilizados

TRMM

Os dados do TRMM foram utilizados neste trabalho para analisar a distribuição espacial da precipitação sobre a área de estudo e verificar a sua consistência em relação aos dados das estações meteorológicas. O desenvolvimento do satélite TRMM consistiu de uma iniciativa científica entre duas agências espaciais, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dos Estados Unidos e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) do Japão. O TRMM coleta informações sobre a precipitação em um amplo domínio, compreendido entre 40°N e 40°S, possuindo dois sensores principais: o *Precipitation Radar* (PR) e o TRMM Microwave Imager (TMI) (FISHER, 2004; HUFFMAN et al., 2007; JI, 2006).

Os dados de precipitação estimados a partir deste radar proporcionam a representação de aproximadamente 66% do regime hidrológico associado às chuvas. Os dados de precipitação do TRMM são estimados a partir de um algoritmo que combina múltiplos sensores orbitais originando, desta forma, os dados de precipitação global (HUFFMAN et al., 2007). De um modo geral, o lançamento do satélite TRMM permite a obtenção de informações sobre as características da precipitação em lugares que possuem uma baixa densidade de redes de estações meteorológicas como, por exemplo, nos Estados do Acre, Amapá, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará, Rondônia, Roraima, entre outros. Os dados utilizados neste

trabalho, para o período entre 1998 e 2011, foram extraídos do produto 3B43 V6, com uma resolução temporal mensal, cobertura geográfica correspondente a 50°S a 50°N e resolução espacial de 0,25° x 0,25° (disponibilizado em <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>).

Dados Meteorológicos e validação

Para avaliar as estimativas de precipitação derivados do satélite TRMM utilizaram-se as séries históricas de precipitação (mm) disponibilizadas pelo CPTEC. Estes dados correspondem às informações derivadas do *Surface Synoptic Observations* (SYNOP/INMET), das plataformas de coleta de dados (PCDs) do Centro de Missão de Coleta de Dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CMCD/INPE) e parceiros do Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH/INPE).



Figura 2 - Estações meteorológicas utilizadas pelo Grupo de Previsão Climática do INPE para a Krigagem dos dados de precipitação

Os dados meteorológicos, disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE com resolução espacial de 0,25° (aproximadamente 28x28km), foram originados a partir da interpolação por Krigagem dos dados das estações meteorológicas (Figura 2). Neste trabalho, utilizaram-se os dados mensais, porém, o período de abrangência dos dados depende da variável meteorológica e da frequência (diário ou mensal).

Conseqüentemente, os dados mensais são disponibilizados de 1961 até 2011 e os dados diários são disponibilizados a partir de 1997. Para originar a climatologia destas variáveis, foram consideradas as estações meteorológicas que continham no mínimo 15 anos de registros. Como visualizado na figura 2, as estações meteorológicas utilizadas no processo de Krigagem estão concentradas principalmente no litoral brasileiro ou próximas aos rios, sendo que no total foram utilizadas 183 estações meteorológicas, na qual 64 estão localizadas na região Nordeste, 39 no Norte, 8 no Centro-Oeste, 27 no Sul e 45 no Sudeste.

Validação e calibração dos dados do TRMM

A validação dos dados do TRMM foi feita pela comparação entre os dados mensais de precipitação disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE (a partir dos dados do SYNOP/INMET, PCDs e parceiros do PMTCRH/INPE) e os dados estimados pelo TRMM para o período compreendido entre janeiro de 1998 e dezembro de 2010. Neste trabalho, os dados obtidos por ambos os produtos foram analisados para as 183 estações meteorológicas espalhadas nas cinco regiões políticas brasileiras. Para cada região, foi feita a regressão linear entre a média da precipitação acumulada obtida dos dois conjuntos de dados, para cada mês do período analisado, totalizando uma análise de 156 meses. Para avaliar o desempenho dos dados estimados pelo TRMM, os resultados foram comparados com as estações meteorológicas do INMET/CPTEC.

A figura 3 exhibe o fluxograma da metodologia adotada neste trabalho separada em seis etapas principais. A primeira etapa consistiu em adquirir os dados de precipitação provenientes do TRMM e do INMET/CPTEC. Estes se encontravam em formato binário e foram convertidos para Geotiff e importados para o Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING) para compatibilização da grade regular. Alguns procedimentos (transformação e compatibilização de diferentes dados, extração de atributos, entre outros) foram realizados na linguagem LEGAL, implementada no SPRING (SPRING, 2005). Esta linguagem funciona a partir de linhas de comando e foi proposta por Câmara Neto (1995) com o objetivo de auxiliar as operações espaciais e análises estatísticas. Nestes procedimentos, foram eliminados eventuais ruídos associados a cada produto.

A partir da localização espacial das estações meteorológicas, os valores mensais de precipitação

para cada divisão regional do Brasil foram extraídos e uma análise por regiões foi realizada (regressões). Para cada região, analisaram-se os valores do coeficiente de correlação linear (r), RMSE, erro sistemático (BIAS) e erro absoluto para cada mês do ano (análise das incertezas). Para verificar a significância das regressões foram empregados métodos estatísticos como, por exemplo, o teste de normalidade de Lilliefors, o teste t -student, o teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov e a análise de variância (ANOVA). Por último, originaram-se três mapas climatológicos da precipitação, referentes ao período analisado (1998-2010): I) INMET/CPTEC; II) TRMM; e III) Mapa ajustado pela regressão.

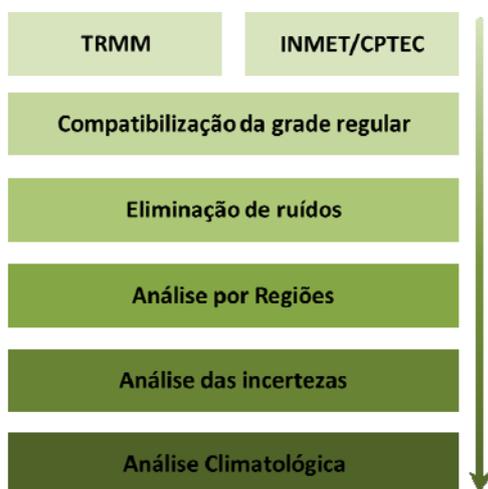


Figura 3 - Fluxograma da metodologia

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 4a apresenta a relação entre os dados de precipitação para a região Centro-Oeste, que embora apresente um número reduzido de estações apresentou o mesmo comportamento das demais regiões.

De um modo geral, observa-se uma concordância de 96% entre os dados observados e os dados estimados pelo TRMM (significante a $p < 0,05$, teste t -student). Entretanto, os dados estimados a partir do TRMM apresentam valores 9% maiores que os valores de precipitação acumulada observados pelas redes de estações meteorológicas do INMET/CPTEC. Do mesmo modo, os dados do TRMM para a região Sul (Figura 4b) apresentaram valores 8% maiores que os dados observados nas estações meteorológicas e um coeficiente de correlação de 95% (significante a $p < 0,05$, teste t -student).

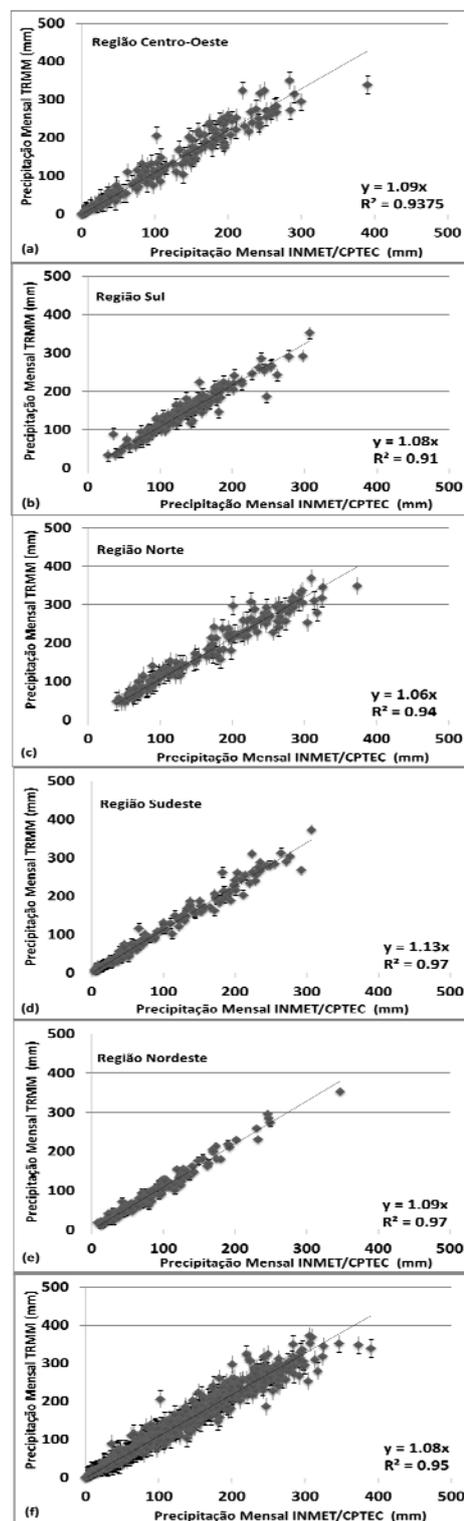


Figura 4 - Relação entre os dados mensais de precipitação (mm) para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010 (significante a $p < 0,05$; teste t -student) para: (a) Região Centro-Oeste; (b) Região Sul; (c) Região Norte; (d) Região Sudeste; (e) Região Nordeste; e (f) Brasil

Tabela 1 - Valores do coeficiente de correlação linear (r), RMSE, BIAS e erro absoluto, para cada mês do ano

Mês	Região	r	RMSE	BIAS	Erro Absoluto
Janeiro	Centro-Oeste	0,76	52,89	21,92	+18,46
	Norte	0,62	42,64	15,14	+12,29
	Nordeste	0,98	20,60	17,92	+17,24
	Sul	0,91	30,86	16,43	+16,19
Fevereiro	Sudeste	0,93	35,55	14,70	+12,44
	Centro-Oeste	0,86	34,60	13,35	+11,79
	Norte	0,67	34,26	11,58	+08,71
	Nordeste	0,98	16,05	12,11	+08,47
Março	Sul	0,97	19,07	10,74	+09,23
	Sudeste	0,94	25,98	16,41	+15,22
	Centro-Oeste	0,84	31,56	15,37	+12,93
	Norte	0,80	28,45	8,56	+02,87
Abril	Nordeste	0,94	24,02	13,10	+11,99
	Sul	0,98	16,57	12,11	+12,11
	Sudeste	0,97	20,34	12,36	+10,93
	Centro-Oeste	0,80	20,30	18,96	+11,58
Maio	Norte	0,88	24,95	9,48	+08,31
	Nordeste	0,98	21,34	12,93	+11,33
	Sul	0,96	23,22	15,88	+13,57
	Sudeste	0,97	12,49	21,48	+19,59
Junho	Centro-Oeste	0,91	12,07	18,79	+07,86
	Norte	0,91	16,88	7,33	+06,10
	Nordeste	0,97	13,48	12,33	+09,20
	Sul	0,96	14,15	8,14	+05,00
Julho	Sudeste	0,96	6,19	12,82	+06,26
	Centro-Oeste	0,98	4,16	19,80	+05,78
	Norte	0,89	18,46	14,97	+14,77
	Nordeste	0,90	10,52	9,14	+05,83
Agosto	Sul	0,91	18,62	19,31	+18,19
	Sudeste	0,98	4,43	24,44	+22,85
	Centro-Oeste	0,93	6,29	31,72	+19,23
	Norte	0,80	12,63	12,10	+11,25
Setembro	Nordeste	0,86	8,08	10,50	+00,67
	Sul	0,97	13,53	9,32	+09,25
	Sudeste	0,95	3,78	15,32	+08,41
	Centro-Oeste	0,98	8,04	32,59	+24,22
Outubro	Norte	0,84	8,52	11,58	+09,94
	Nordeste	0,94	3,96	8,39	+04,43
	Sul	0,99	7,14	6,60	+06,30
	Centro-Oeste	0,73	30,05	21,53	+12,64
Novembro	Norte	0,57	19,20	16,47	+14,22
	Nordeste	0,97	7,74	28,84	+23,99
	Sul	0,95	17,49	8,55	+04,15
	Sudeste	0,96	21,96	21,81	+21,80
Dezembro	Centro-Oeste	0,82	24,82	12,71	+11,89
	Norte	0,86	19,35	11,74	+09,40
	Nordeste	0,92	9,27	17,42	+12,72
	Sul	0,95	21,22	12,53	+07,08
Outubro	Sudeste	0,91	32,74	15,44	+15,44
	Centro-Oeste	0,83	35,48	14,86	+13,44
	Norte	0,95	26,04	12,10	+10,71
	Nordeste	0,98	12,68	18,31	+17,44
Novembro	Sul	0,95	20,17	14,29	+10,87
	Sudeste	0,90	39,14	15,28	+15,28
	Centro-Oeste	0,95	27,62	11,54	+07,45
	Sudeste	0,98	7,50	14,32	+10,41

Setembro	Sudeste	0,95	7,89	34,07	+34,07
	Centro-Oeste	0,91	17,74	29,58	+20,16
	Norte	0,93	8,76	10,33	+04,57
	Nordeste	0,96	5,99	14,59	+09,90
Outubro	Sul	0,92	27,62	11,54	+07,45
	Sudeste	0,98	7,50	14,32	+10,41
	Centro-Oeste	0,73	30,05	21,53	+12,64
	Norte	0,57	19,20	16,47	+14,22
Novembro	Nordeste	0,97	7,74	28,84	+23,99
	Sul	0,95	17,49	8,55	+04,15
	Sudeste	0,96	21,96	21,81	+21,80
	Centro-Oeste	0,82	24,82	12,71	+11,89
Dezembro	Norte	0,86	19,35	11,74	+09,40
	Nordeste	0,92	9,27	17,42	+12,72
	Sul	0,95	21,22	12,53	+07,08
	Sudeste	0,91	32,74	15,44	+15,44
Outubro	Centro-Oeste	0,83	35,48	14,86	+13,44
	Norte	0,95	26,04	12,10	+10,71
	Nordeste	0,98	12,68	18,31	+17,44
	Sul	0,95	20,17	14,29	+10,87
Novembro	Sudeste	0,90	39,14	15,28	+15,28

A comparação entre a precipitação mensal observada e estimada para a região Norte (Figura 4c) apresentou uma correlação de 97% (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*). Nesta região, os valores do TRMM superestimaram a precipitação mensal em 6%, sendo, portanto, a região que apresentou a melhor concordância dos valores estimados com os dados observados pelo INMET/CPTEC. Para as regiões Sudeste e Nordeste (Figuras 4d e 4e, respectivamente), a regressão entre os dados observados e estimados apresentaram uma correlação de aproximadamente 98% (significante a $p < 0,05$, teste *t-student*), porém, os valores de precipitação estimados pelo TRMM diferem significativamente entre as duas regiões. Para a região Sudeste estes valores foram superestimados em 13%, enquanto que para a região Nordeste os valores foram 9% maiores. Ao relacionar os dados estimados pelo TRMM e as 183 estações espalhadas por todo o Brasil (Figura 4f), constata-se que estes superestimam a precipitação mensal em aproximadamente 8% e apresentam uma concordância de aproximadamente 97%.

Com o objetivo de analisar a variabilidade mensal dos erros, os dados de precipitação mensal foram separados em meses do ano e agrupados para cada região do Brasil. A tabela 1 apresenta os valores

mensais do coeficiente de correlação (r) entre os dados provenientes do INMET/CPTEC e os dados estimados pelo TRMM, além do erro médio quadrático (RMSE), do erro sistemático (BIAS) e do erro absoluto (%).

Os resultados das correlações mensais para cada região indicam que os dados estimados pelo TRMM apresentam uma boa concordância (em média 90%) com os dados das redes de estações meteorológicas. Ainda, as análises mensais indicam que o RMSE, frequentemente utilizado para verificar as diferenças entre os dados estimados e observados, possui valores médios entre 17 ± 10 mm. Além disso, os dados do TRMM apresentam a tendência média de superestimar a precipitação mensal em 15%. Contudo, as estimativas de precipitação apresentam variação sazonal muito similar à apresentada pelos dados observados nas estações meteorológicas, para cada região de estudo (Figura 5).

Observa-se na figura 5 que nos quatro primeiros meses do ano, período do ano que constitui a maior parte da época chuvosa das regiões Centro-Oeste, Norte, Nordeste e Sudeste, a relação entre os dados estimados e observados apresentaram comportamento similar. De maneira geral, as regiões Centro-Oeste e Norte apresentaram os menores valores de correlação (com R^2 entre 62% e 88%) com erro absoluto de até 53 mm em relação aos dados observados. Estas regiões diferem significativamente das demais, que apresentaram R^2 superiores a 91%. Em todas as regiões, os valores observados nas estações foram superestimados pelo TRMM, variando entre 8% e 20%.

Para o período seco (maio a setembro), as correlações das regiões Centro-Oeste e Norte aumentam consideravelmente, apresentando valores de R^2 superiores a 80%. Neste mesmo período a explicação da variância para as demais regiões permanecem entre 90% e 98%. Na média, os valores estimados pelo TRMM superestimaram a precipitação do período seco em aproximadamente 10%. Porém, é comum encontrar casos em que o valor mensal da precipitação é 4% (Agosto, Região Nordeste) ou mesmo 34% maior (agosto, Região Sudeste) do que o observado nas pelas estações meteorológicas.

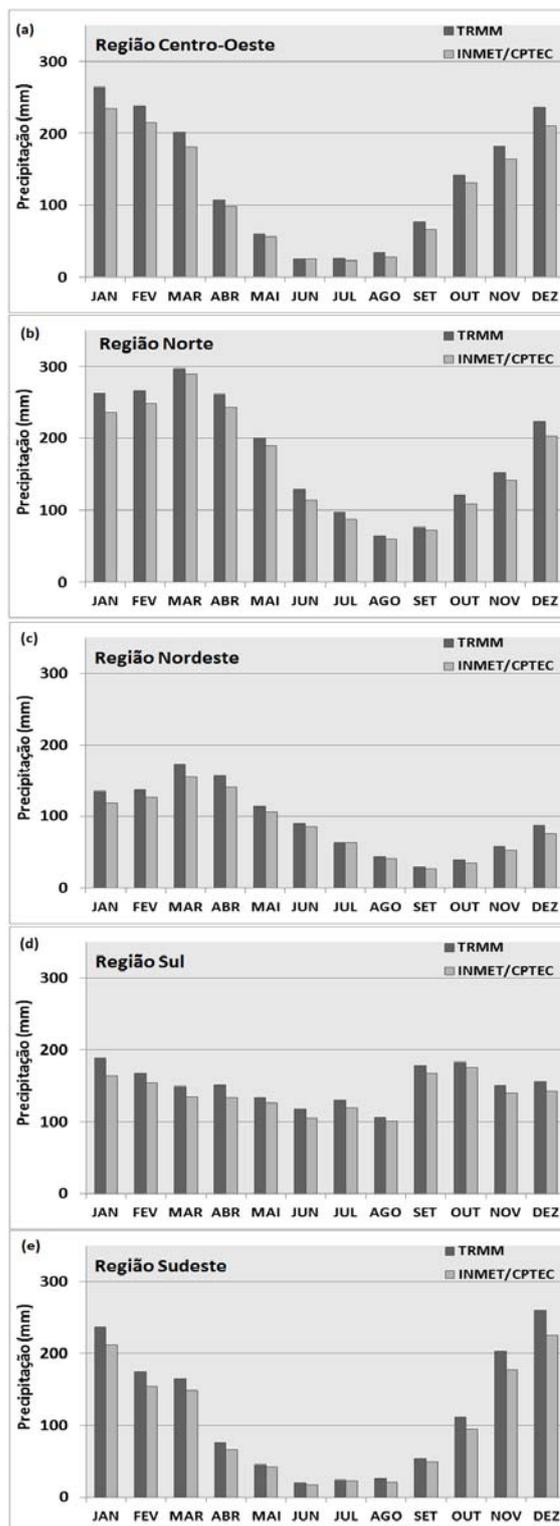


Figura 5 - Distribuição média mensal da precipitação acumulada, entre 1998 e 2010, para as regiões brasileiras (a) Centro-Oeste, (b) Norte, (c) Nordeste, (d) Sul e (e) Sudeste, de acordo com o estimado pelo TRMM e o observado nas estações meteorológicas

No período de transição da estação seca para a chuvosa (outubro a dezembro na maior parte do Brasil), os erros aumentam nas regiões Norte e Centro-Oeste (RMSE acima de 20 mm) e a correlação linear decresce, podendo alcançar 57% (Região Norte, outubro). Para estes meses, anteriores à estação chuvosa, os valores de precipitação foram superestimados em aproximadamente 13%. Constata-se que, em média, os valores r^2 podem variar de 57% (Região Norte) a 99% (Região Sul), conseqüentemente, o RMSE pode ser baixo como, por exemplo, 4 mm (regiões Nordeste e Sudeste) e alcançar valores superiores a 50 mm, equivalente a 25% do total de precipitação acumulada no mês em questão. Ainda, para todas as regiões do Brasil e para todos os meses, os dados do TRMM superestimaram a precipitação em aproximadamente $12 \pm 6\%$.

A figura 6 apresenta os valores médios da precipitação anual para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010, correspondentes aos dados disponibilizados pelo INMET/CPTEC (Figura 6a), a partir dos dados do TRMM (Figura 6b) e a partir da precipitação ajustada pelas regressões regionais e aplicadas aos dados do TRMM (Figura 6c). Embora os dados do TRMM apresentem apenas 13 anos de observações, percebe-se uma boa concordância entre os padrões espaciais da precipitação anual. Entre as regiões que apresentaram as maiores diferenças, pode-se citar a região noroeste do Estado do Amazonas e a região nordeste dos Estados do Pará e do Amapá, com valores observados entre 2700 e 3000 mm e estimados entre 3000 e 3900 mm pelo TRMM. Avaliando as características destas regiões, percebe-se que as maiores variações entre os dados originados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE e estimados pelo TRMM ocorrem em áreas com grande atividade convectiva.

Entre os fatores que podem originar estes erros pode-se citar a resolução temporal do sensor, que obtém informações da precipitação em intervalos de tempo regulares e a frequência de observações, que é muito maior nas altas latitudes que em regiões próximas ao Equador. Segundo Franchito et al. (2009) as estimativas mensais de precipitação provenientes do TRMM podem originar erros devido a amostragem discreta desta variável. Ainda, o imageamento da atmosfera e estimativa da precipitação são realizados a partir de uma órbita polar (com baixa altitude em relação à superfície terrestre), desta forma, algumas regiões possuem uma frequência de observações maiores que outras. Conseqüentemente, as estimativas mensais de precipitação são calculadas a partir de uma média das obser-

vações adquiridas para determinado pixel, com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Como demonstrado na análise estatística, em geral, os dados provenientes do TRMM superestimam a precipitação mensal entre 6-13%.

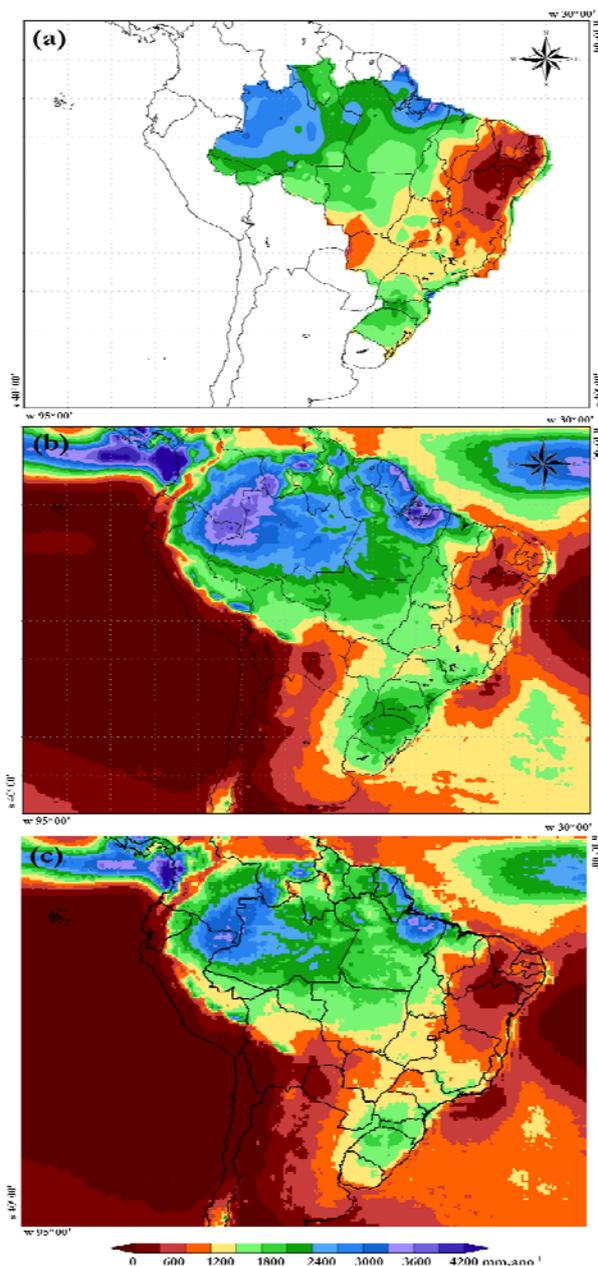


Figura 6 - Valores médios da precipitação anual (mm) para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010. (a) Valores médios da precipitação anual estimada a partir dos dados INMET/CPTEC; (b) Valores médios da precipitação anual estimada pelo TRMM; e (c) Valores médios da precipitação anual ajustados pelas regressões regionais e aplicados aos dados do TRMM

Com base na informação das superestimativas para cada divisão regional do Brasil (Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste) originou-se um mapa com os valores médios da precipitação anual calibrados pelas regressões regionais e aplicados aos dados do TRMM (Figura 6c). Neste mapa, percebe-se uma melhora significativa em comparação com o mapa originado pelo INMET/CPTEC. Ao calibrar os dados do TRMM, percebe-se um melhor ajuste da precipitação por todas as regiões estudadas. No extremo noroeste do Brasil, com o ajuste dos dados, a precipitação proveniente do TRMM passou de 3300 mm para 3000 mm, muito próximo ao esperado. Ainda, percebe-se um melhor ajuste na Região Nordeste e Sudeste, principalmente nos Estados da Bahia e Minas Gerais.

Cabe ressaltar que os dados no INMET/CPTEC correspondem a uma determinada estação meteorológica, enquanto que os dados provenientes do TRMM referem-se à precipitação média de cada pixel de 0,25°x025°.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De uma maneira geral pôde-se verificar que os dados de precipitação mensal estimada pelo TRMM e por 183 estações espalhadas por todo o Brasil (64 localizadas na região Nordeste, 39 na região Norte, 8 na região Centro-Oeste, 27 na região Sul e 45 na região Sudeste) apresentam uma concordância de aproximadamente 97%. Entretanto, encontraram-se valores 9%, 8%, 6%, 13% e 9% maiores que os observados pelas redes de estações meteorológicas do INMET/CPTEC para a região Centro-Oeste, Sul, Norte, Sudeste e Nordeste, respectivamente. Embora os dados do TRMM apresentem apenas 13 anos de observações, percebe-se uma boa concordância entre os padrões espaciais da precipitação anual.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio (2010/07083-0).

REFERÊNCIAS

ALMAZROUI, M. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998–2009. *Atmospheric Research*, v. 99, n. 3-4, p. 400-414, 2011.

CÂMARA NETO, G. *Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos*. 1995. 264 f. Tese (Doutorado) -. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo, 1995.

CHEN, C.; YU, Z.; LI, L.; YANG, C. Adaptability evaluation of TRMM satellite rainfall and its application in the Dongjiang River Basin. *Procedia Environmental Sciences*, v. 10, part A, p. 396-402, 2011.

FISCH, G.; MARENGO, J.; NOBRE, C. A. *Clima da Amazônia*. Cachoeira Paulista, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. p. 24-41. Climanálise Especial, Edição Comemorativa de 10 anos.

FISHER, B. L. Climatological validation of TRMM TMI and PR monthly rain products over Oklahoma. *Journal of Applied Meteorology*, v. 43, n. 3, p. 519-535, 2004.

FRANCHITO, S. H.; RAO, V. B.; VASQUES, A. C.; SANTO, C. M. E.; CONFORTE, J. C. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, n. D2, p. 1-9, 2009.

HOLTON, J. R. *An introduction to dynamic meteorology*. Burlington, MA: Academic Press, 2004. 535 p. (International geophysics series, v. 88, n. 5).

HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; GU, G.; NELKIN, E. J.; BOWMAN, K. P.; HONG, Y.; STOCKER, E. F.; WOLFF, D. B. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, p. 38-55, 2007.

JI, Y. Validation of diurnal cycle and intra-seasonal variability of TRMM Satellite Rainfall. *Piers Online*, v. 2, n. 6, p. 628-632, 2006.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T.; HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; KRISHNAMURTI, T.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.; SMITH, E. A.; WILHEIT, T. T.; NORTH, G.; NAKAMURA, K. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. *Journal of Applied Meteorology*, v. 39, p. 1965–1982, 2000.

LIAO, L.; MENEGHINI, R. Validation of TRMM precipitation radar through comparison of its multi-year measurements with ground-based radar. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 48, n. 4, p. 804-817, 2009.

MONTEIRO, C. A. F. *O estudo geográfico do clima*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.

NESBITT, S. W.; ZIPSER, E.; KUMMEROW, C. An examination of version-5 rainfall estimates from the TRMM microwave imager, precipitation radar and rain gauges on global, regional and storm scales. *Journal of Applied Meteorology*, v. 43, p. 1016-1036, 2004.

NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 422 p.

QUADRO, M. F. L.; MACHADO, L. H. R.; CALBETE, S.; BATISTA, N. N. M.; OLIVEIRA, G. S. *Climatologia da precipitação e temperatura*. Cachoeira Paulista, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. p. 136-139. Climanálise, Edição Especial.

ROBERTSON, F. R.; FITZJARRALD, D. E.; KUMMEROW, C. D. Effects of uncertainty in TRMM precipitation radar path integrated attenuation on interannual variations of tropical oceanic rainfall. *Geophysical Research. Letters*, v. 30, n. 4, 2003.

ROCHA, A. G.; GANDU, A. W. *A zona de convergência do Atlântico Sul*. Cachoeira Paulista, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. p. 140-142. Climanálise, Edição Especial.

SILVA DIAS, M. A. *Complexos convectivos de mesoescala sobre a região sul do Brasil*. Cachoeira Paulista, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. p. 173-179. Climanálise, Edição Especial.

SPRING. *Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas*. Versão 4.3. São Paulo: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.

Validation Of The TRMM Precipitation Data For Brazil

ABSTRACT

Precipitation is considered one of the most important variables in the hydrological cycle and is

constantly used in numerous environmental studies. However, for large areas or in areas with low density of rain gauges, is necessary to estimate the precipitation through other methods. Consequently, environmental products derived from orbital sensors can be used to extract information on rainfall rates and are constantly employed to understand the hydrological cycle and its effects on atmospheric circulation studies. Therefore, the main objective of this study is to evaluate and analyze the satellite rainfall data estimated by the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) between 1998 and 2010 for Brazil. The results indicate that correlations between the precipitation data estimated by the TRMM and from 183 weather stations distributed throughout Brazil show a concordance of approximately 97% (significant at $p < 0.05$, Student's t-test). However, in this work we estimated precipitation values 9%, 8%, 6%, 13% and 9% higher than those observed by the meteorological station networks for Midwest, South, North, Southeast and Northeast regions of Brazil, respectively. Also, the analyzes indicate that the monthly mean square error (RMSE) has average values of 17 ± 10 mm. Furthermore, the precipitation estimated through TRMM shows a tendency to overestimate the values by 15%. However, seasonal variation of precipitation is very similar to that shown by the data observed at meteorological stations.

Keywords: Satellite rainfall, TRMM, rain gauges