

Relações entre a distribuição da precipitação e o relevo da bacia do alto Paraguai

Márcio de Morisson Valeriano^{1*}

Luiza Luciana Salvi²

Julio Ricardo Lisboa de Aragão¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515
12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil

* Bolsista do CNPq
{valerian, julio}@dsr.inpe.br

² Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS
Av. Ranulfo Marques Leal, 3484
79600-000 - Tres Lagoas, MS - Brasil
luizasalvi@cptl.ufms.br

Resumo: Este trabalho apresenta análises da pluviosidade na Bacia do Alto Paraguai (BAP) no período de 1993 a 1995, com vistas ao conhecimento da influência do relevo sobre a distribuição de chuvas na região. O conjunto total de dados constituiu-se de dados tabulares georreferenciados de 90 postos pluviométricos da área de estudo e Modelos Digitais de Elevação (MDE) derivados de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para representação da topografia. Os dados de chuva foram espacializados com técnicas geoestatísticas acopladas a estimativas por regressão em relação à altitude. A variabilidade espacial, avaliada em semivariogramas, resultou em maiores alcances nos invernos, numa indicação de maior continuidade espacial dos níveis registrados nos postos nesta estação. Os níveis pluviométricos mostraram-se correlatos à altitude, sobretudo nos períodos mais chuvosos, primavera e verão. As vantagens da incorporação de estimativas por correlação com a altitude foram mais evidentes em áreas de baixa densidade de postos. A verificação de imagens óticas permitiu observar um notável controle da distribuição de diferentes tipos de nuvens pela topografia, em respaldo à correlação observada. Por fim, conclui-se que uma parte expressiva do volume de águas pluviais na porção brasileira da Bacia do Alto Paraguai precipita-se nas áreas mais altas de seu entorno.

Palavras-chaves: precipitação, relevo, Modelo Digital de Elevação, correlação.

Abstract: This work presents analyses of rainfall levels at the Alto Paraguai Watershed in the 1993 to 1995 period, to understand the influence of the relief over the rain distribution in this region. The full dataset consisted of georeferenced tabular data from 90 rain gauge stations and Digital Elevation Models (DEM) derived from SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) for the presentation of topography. Rain data were spatialized with geostatistical approach coupled with regression relative to elevation. The spatial variability, evaluated in semivariograms, resulted in larger ranges on winters, as indication of relative spatial continuity of recorded levels among stations in this season. Rainfall levels were correlated with elevation, mainly in the rainy seasons, spring and summer. Gains derived from coupling elevation-estimated rain maps were more evident in regions of low density of data points. Examinations of optical images allowed the observation of a remarkable control of the distribution of different cloud types by topography, in support of the observed correlations. Finally, we conclude that a considerable amount of the precipitated water volume in the Brazilian areas of Alto Paraguai Watershed originates in its surrounding highlands

Key Words: rainfall, relief, Digital Elevation Model, correlation.

1. Introdução

Os diferentes efeitos que o relevo pode exercer sobre o clima são bem conhecidos, uma vez que as implicações ecofisiológicas afetam desde a condição natural da cobertura do solo aos usos pretendidos e correntes da atividade humana. Enquanto alguns fatores agroclimáticos, como temperatura e radiação solar, mostram-se responsivos a condições relativamente locais Ometto (1981); Oke (1987), os mecanismos que atuam sobre a precipitação são mais favoravelmente evidenciados quando observadas em escalas geográficas subordinadas a domínios morfoclimáticos Viana (2009), Valeriano et al. (2002). Estes mecanismos variam de acordo com efeitos potenciais diretos e indiretos do relevo combinados às dinâmicas predominantes na região de interesse, em padrões espaciais e temporais.

Com a profusão de diferentes fontes de MDE - Modelos Digitais de Elevação – (USGS-EROS (2009); ERSDAC (2009), os dados pluviométricos podem ser mais facilmente estudados em conjunto com dados topográficos, em duas perspectivas principais: para o conhecimento de mecanismos atuantes nos diferentes sistemas atmosféricos que controlam a distribuição de chuvas e para melhoria das técnicas de espacialização de dados pluviométricos em mapeamentos.

Ambas perspectivas se aplicam para o caso do Pantanal Matogrossense, dada a dinâmica singular dos componentes do ciclo hidrológico nessa região, aliada à precariedade da rede de postos meteorológicos disponíveis para prover o mapeamento da chuva, com a desativação do Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS) e conseqüente interrupção das medidas pluviométricas na rede de postos do Pantanal Sakamoto et al. (2008). Este trabalho tem como objetivo explorar a integração de dados pluviométricos com Modelo Digital de Elevação em Sistema de Informação Geográfica (SIG) na análise das relações entre dados de relevo para a caracterização da hidrologia da região e o mapeamento da chuva.

2. Material e Métodos

A área de estudo corresponde à região do Pantanal Brasileiro e seu entorno, com a Bacia do Alto Paraguai (BAP) ao centro. Situa-se no interior do continente sul-americano, a leste da Cordilheira dos Andes, entre as latitudes de 14°S e 22°S e as longitudes de 52°W e 58°W. No recorte apresentado na **Figura 1**, as altitudes variam de 700m a 1300m, nos

planaltos que contornam a Bacia, e de 80m a 160m nas baixadas das Planícies e Pantanais, na porção centro-oeste. A BAP é drenada pelo alto curso do Rio Paraguai e seus afluentes.

Os dados pluviométricos provêm dos anos de 1993 a 1995, de 90 postos pluviométricos na área abrangendo a BAP e pequenas porções da Bacia Amazônica (ao norte) e da Bacia do Paraná (a leste e sudeste), e foram levantados junto à Agência Nacional de Águas e Energia Elétrica (ANEEL) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Sakamoto et al. (2008). Na **Figura 1** estão também plotados os pontos correspondentes a estes dados.

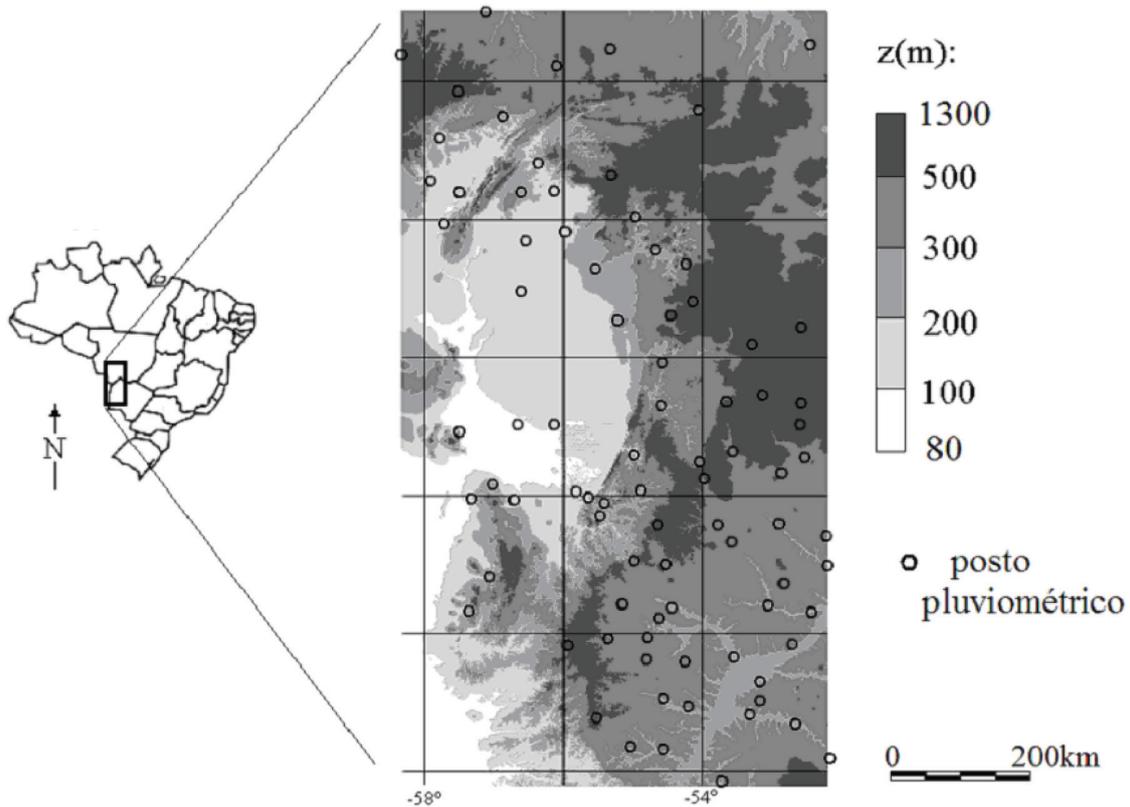


Figura 1. Hipsometria e distribuição dos postos pluviométricos na área de estudo.

Os MDE usados provêm da SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* - nas formas conhecidas por SRTM 3''*version 1* e SRTM30-*plus*, USGS-EROS (2009), com 3'' e 30'' (aproximadamente 90m e 1km) de resolução, respectivamente. Foram feitas observações esparsas para observação de feições específicas sobre o MDE do Topodata, Valeriano e Rossetti (2012), que consiste de dados SRTM 3'' refinados para a resolução de 1''. Imagens de Refletância de Superfície, Rudorff et al. (2007) diárias de 2011 do sensor MODIS - *Moderate Resolution Image Spectroradiometer* - (código MOD09) também foram examinadas, para observação do padrão de distribuição de nuvens em períodos de interesse.

Entre os principais recursos de análise usados, listam-se os programas MINITAB MiniTab, Inc. (2000), de análises estatísticas, VarioWin, Pannatier (1996), de análises geoestatísticas, Surfer, Golden Software (1995), para interpolações, e Idrisi, Eastman (1995), de geoprocessamento. A exemplo do refinamento dos dados SRTM para o Topodata, Valeriano e Rossetti (2012), os dados pluviométricos foram espacializados com abordagem geoestatística, seguindo metodologia já experimentada na escala 1:1.000.000, Valeriano et al. (2002): os dados de chuva foram inicialmente submetidos a análises de

tendência (MinitTab), e os resíduos foram usados na construção de semivariogramas (VarioWin). Os coeficientes geoestatísticos foram aplicados na interpolação por krigagem (Surfer) em superfícies com a mesma geometria de armazenamento dos dados SRTM-30". Estas foram convertidas para o SIG (Idrisi), em que foram feitas as avaliações e manipulações gerais, como sobreposição aos demais dados e exportação para análises posteriores.

3. Resultados e Discussão

A correlação entre os dados pluviométricos e a altitude mostrou-se variável nos períodos analisados (**Tabela 1**). Entre as estações, observa-se que o período do verão resultou nas correlações mais significativas, ao contrário do inverno, cujos níveis de chuva se mostraram independentes da altitude nos 3 anos. As demais estações apresentaram resultados intermediários a estes. Quanto aos anos, as chuvas de 1993 mostraram-se mais correlatas à altitude (com exceção do inverno) e as de 1994 as mais independentes (com exceção do verão), com o ano de 1995 numa situação de correlações pouco significativas.

Tabela 1. Análises de regressão entre dados pluviométricos (pp) e altitude (z) nos postos.

ano	verão		outono		inverno		primavera	
	regressão:	R ²	regressão:	R ²	regressão:	R ²	regressão:	R ²
1993	pp=338+0.500z**	0,247	pp=142+0.181z**	0,111	pp=81.8+0.0751z ^{ns}	0,026	pp=348+0.441z**	0,226
1994	pp=353+0.542z**	0,151	pp=268-0.037z ^{ns}	0,004	pp=102 - 0.0369z ^{ns}	0,012	pp=500+0.146z ^{ns}	0,018
1995	pp=538+0.372z*	0,071	pp=148+0.116z*	0,058	pp=51.5+0.0482z ^{ns}	0,024	pp=443+0.151z*	0,048

(1): ** - significativo a 1% de probabilidade; * - significativo a 5% de probabilidade; ns – não significativo a 5% de probabilidade.

As diferenças entre estações devem ser associadas aos diferentes mecanismos de gênese das chuvas, dado que há um padrão sazonal dos sistemas atmosféricos atuantes em ciclos anuais. Por sua vez, as diferenças de ano a ano devem ser associados à prevalência de diferentes sistemas responsáveis pela variabilidade interanual, tais como El Niño, La Niña, e eventos extremos ou ocasionais, simplesmente.

Uma análise das cotas do Rio Paraguai ao longo do século XX, em Ladário, revelou que o ano de 1995 é representativo de cheia extraordinária e o ano de 1994 é representativo de padrão médio tendendo a seco, Salvi (2001). A análise dos dados dos postos da área de estudo Sakamoto et al. (2008) mostrou, porém, que os valores médios apresentaram pouca variação, especialmente entre os anos hidrológicos de 1993-94 e 1994-95, bem como da primavera e do verão de 1993-94 e de 1994-95, enquanto os valores da mediana apresentaram-se ligeiramente superiores no verão de 1995 e no ano hidrológico de 1994-95. Não se pode esperar uma associação direta entre estas observações, por motivos de experimentais a naturais: os dados de chuva analisados não cobrem a bacia, que se estende até os Andes; o cômputo tabular do volume total precipitado pode diferir daquele feito com dados espacializados, uma vez que os valores de postos isolados são interpolados por áreas maiores do que os agrupados; e a água disponível às cheias provém do excedente hídrico, que leva em conta, além da precipitação, a evapotranspiração e o regime de armazenamento de água no solo.

Os semivariogramas dos valores sazonais de precipitação mostram diferenças na estrutura de variabilidade das chuvas (**Figura 2**), em parte concordante com os resultados da análise de correlação. Os menores alcances foram obtidos no período da primavera e do verão, numa indicação de maior variabilidade dos índices pluviométricos, corroborado pelo maior efeito pepita destes períodos, exceto o verão de 1994. A variabilidade a curta

distância e a decorrente variância espacial associada a cada observação mostram-se condizentes com uma situação em que o efeito do relevo altera a relação de semelhança entre observações próximas. No inverno, quando não se observou correlação significativa entre a chuva e a altitude (**Tabela 1**), obtiveram-se os maiores alcances e os menores níveis de efeito pepita. Tais coeficientes indicam uma relativa continuidade espacial dos valores de precipitação, coerente com uma situação de maior independência em relação a efeitos do relevo.

Numa tentativa de explorar estas análises no processo de espacialização, temos duas vias de abordagem, dadas pela geoestatística pura e pela correlação com o relevo. No primeiro aspecto, os níveis de efeito pepita indicam haver fatores que perturbam a relação de semelhança entre observações próximas, como já visto em normais climatológicas, Valeriano et al. (2002). Quanto ao relevo, as correlações indicam uma fração da variação dos níveis de chuva determinada pela altitude, definida pelos coeficientes de determinação (R²). As regressões correspondem a transformações lineares do MDE que, ao serem aplicadas, resultam numa superfície de cotas com média igual e distribuição aproximada à da chuva, mas com o mesmo detalhamento exibido pelas cotas altimétricas. As interpolações, por sua vez, tendem a formar superfícies mais suaves, mais ou menos aderidas aos dados de chuva, com desvios locais em função da variabilidade entre observações próximas e do método utilizado. Tais considerações sugerem que uma combinação direta entre as duas superfícies poderia trazer algum detalhamento às superfícies obtidas por interpolação de dados pluviométricos relativamente esparsos. Foi testada uma abordagem mista, como média ponderada entre ambas superfícies, com o peso da estimativa pelo relevo equivalente a seu coeficiente de determinação, para promover o detalhamento em relação àquele possibilitado pela densidade dos postos de observação.

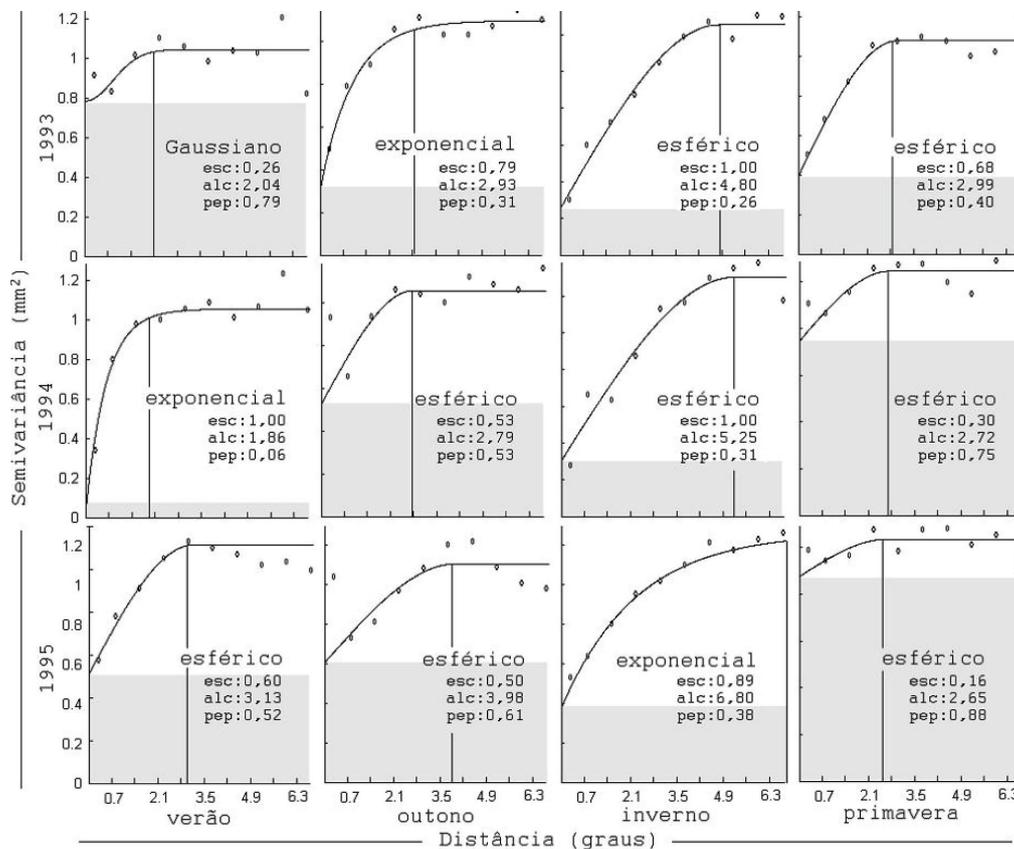


Figura 2. Semivariogramas obtidos para os valores sazonais de precipitação. Área em cinza correspondente ao efeito pepita e linha vertical correspondente ao alcance.

Os resultados desta abordagem mostraram modificações gerais poucas sugestivas de uma distribuição mais realista dos valores, exceto por um detalhamento das linhas gerais, eventualmente mais aproximadas a efeitos de ruídos do que de estruturas coerentes. Porém, algumas modificações em áreas desprovidas de dados sugerem vantagens localizadas, como nas porções NE e SW dos mapas do verão e da primavera de 1993. Apenas os períodos cuja regressão foi significativa a 1% (**Tabela 1**) tiveram seus mapas produzidos com abordagem mista (**Figura 3**). Nestes mapas é possível observar que os níveis pluviométricos mínimos de todos os períodos estiveram associados à área da planície de inundação.

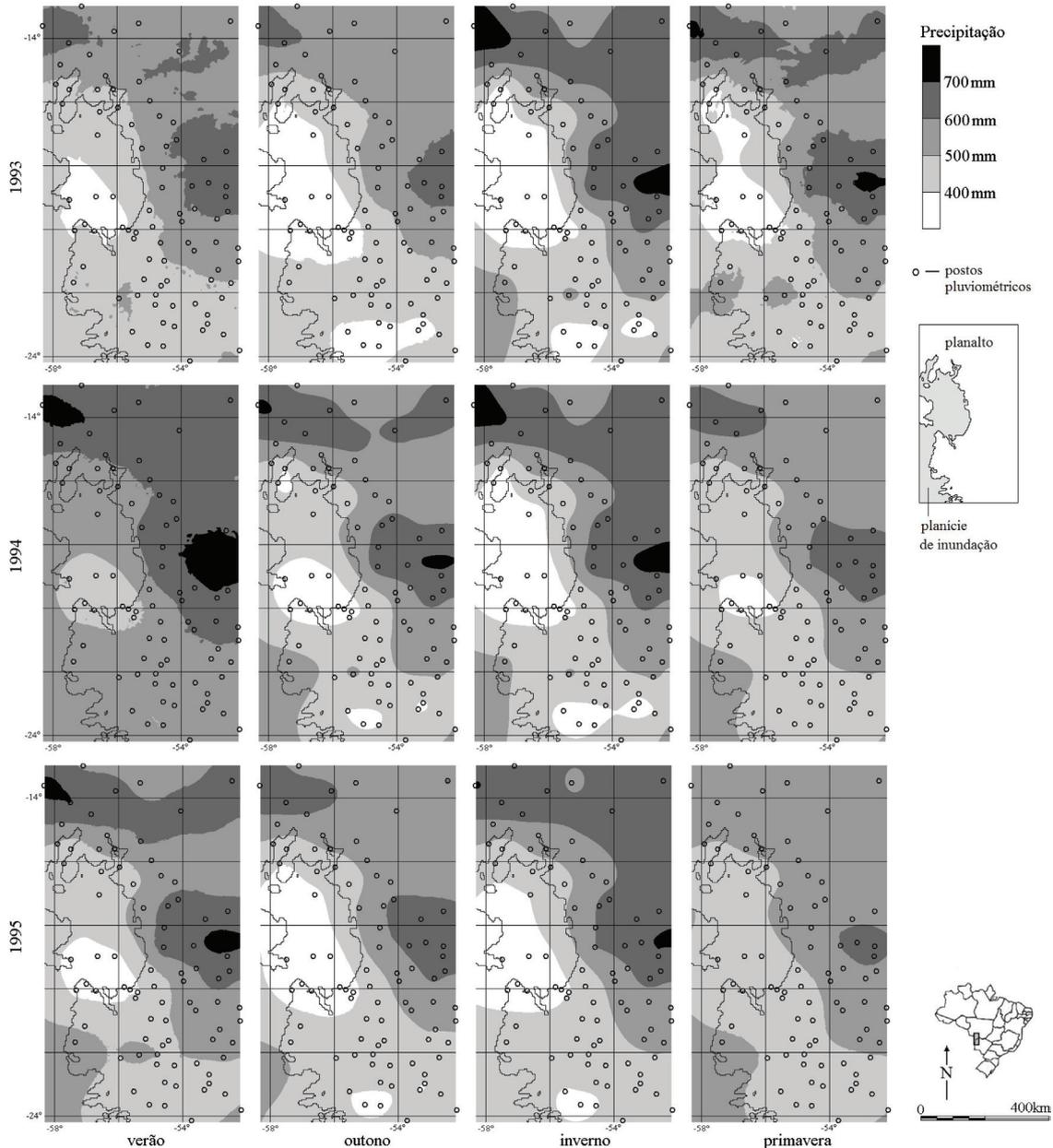


Figura 3. Mapas de precipitação nos períodos analisados.

A análise do total precipitado no triênio (1993 a 1995) permitiu observar mais claramente a associação dos níveis de chuva ao relevo na área de estudo (**Figura 4**). A área da planície de inundação teve os menores índices pluviométricos, com níveis progressivamente maiores à medida que se desloca para sua periferia (**Figura 4A**).

Os resultados do presente estudo apenas sugerem tal padrão, uma vez que provêm de dados restritos ao triênio 1993-1995. Porém são corroborados pelo mapeamento de Cardoso e Marcuzzo (2010) sobre as médias sazonais em período de 30 anos, de 1977 a 2006. Embora restritos à planície de inundação, estes mapas também apresentam seus respectivos mínimos no centro da área de estudo.

Nos perfis numéricos de transectos (Figura 4B), verifica-se que a planície tem níveis pluviométricos pouco acima de 4000mm, que aumentam até em torno de 8000mm, no planalto. No transecto N, a aderência entre os níveis pluviométricos e altimétricos mostra-se mais evidente, devido ao forte gradiente observado em ambas variáveis. Abstraídas as diferenças entre as formas (da isoietia mínima e da planície, Figura 4A), é possível observar um ligeiro deslocamento da distribuição de chuvas para oeste em relação à área de inundação, o que em perfil corresponde a um aumento da precipitação ainda em sua porção leste, antes do planalto, como se pode ver no transecto E (Figura 4B). A regressão entre o total precipitado e a altitude (Figura 4C) resultou num gradiente de 4mm de chuva a cada metro de altitude, ou 1,33mm/m em bases anuais, com coeficiente de determinação de 43%, bem maior do que aqueles obtidos para os dados tabulares e por estações (Tabela 1).

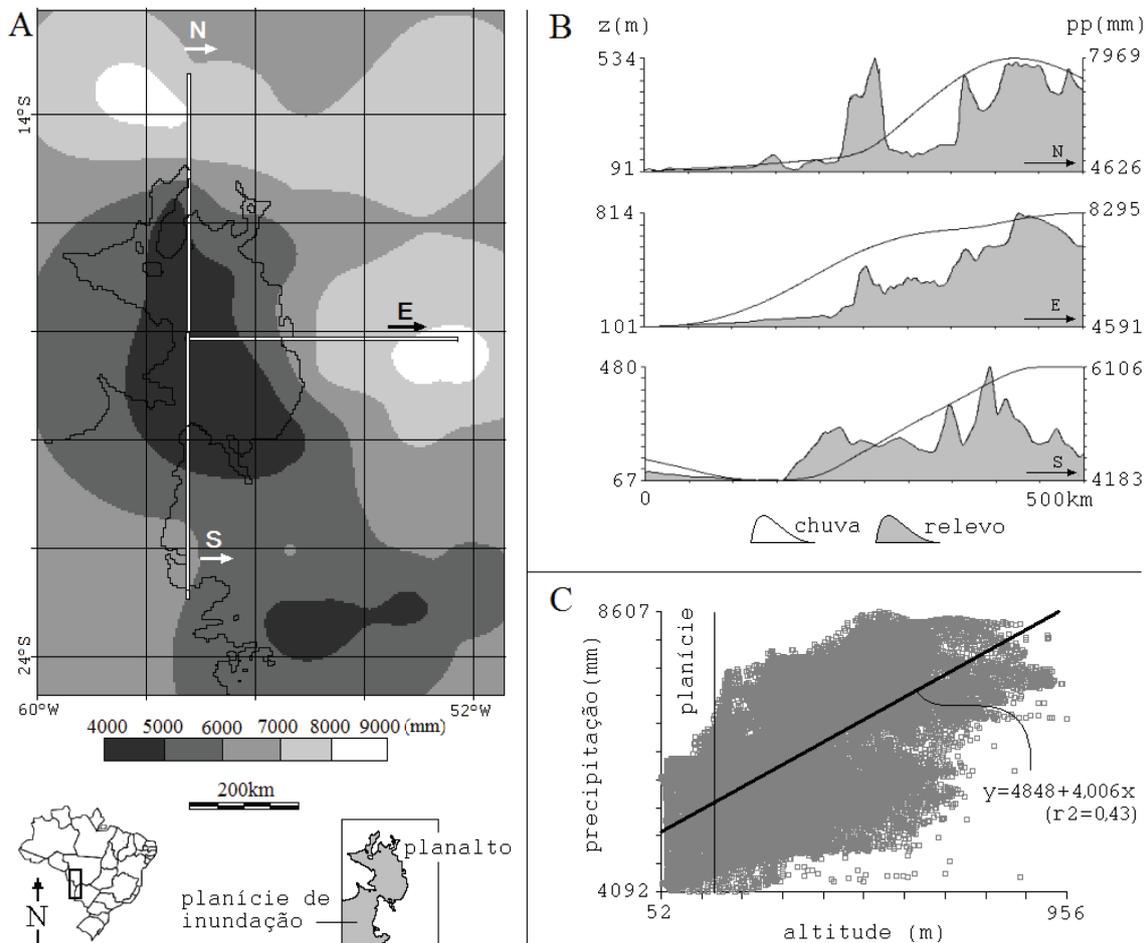


Figura 4. Análise do nível pluviométrico total do triênio 1994-95: (A) localização da planície de inundação e dos transectos N, E e S sobre a distribuição do total de chuvas; (B) perfis N, E e S de altitude e precipitação; e (C) dispersão da precipitação em relação à altitude.

A precipitação pluvial, quando relacionada à topografia por mecanismos diversos, é tipicamente anisotrópica, devido à interação entre as formas de relevo e a dinâmica das massas de atmosféricas que condicionam sua ocorrência. O efeito orográfico ocorre em terrenos montanhosos ou associado a feições expressivas, como a região de planalto diante da extensa planície de inundação do Pantanal Matogrossense. O mecanismo mais reconhecido consiste em promover a ascensão do ar, o que favorece a condensação através de resfriamento adiabático. Num exame expedito sobre *quicklooks* globais diários de imagens MODIS (~5km de resolução) do ano de 2011, desenvolvidos no contexto da organização de seus subprodutos Aragão et al. (2012), foi possível observar diversas situações do controle topográfico sobre a distribuição de nuvens, de implicações evidentes sobre o regime de chuvas. Além da intensa ocupação por pastagens plantadas nas terras altas do planalto circunvizinho, pôde-se perceber a planície de inundação livre de nuvens em contraste com seu entorno em diversas datas. Outra observação recorrente foi a disposição do contato dos sistemas frontais coincidente com os limites da planície. As ocasiões em que se observa a planície sob densas nuvens correspondem aos episódios em que o corredor da Zona de Convergência Atlântico Sul (ZCAS) ou grandes massas frontais do Sul estiveram sobre a área. Na **Figura 5**, ilustra-se a situação mais freqüente, que é a disposição de nuvens de maior potencial pluviométrico no entorno da área, enquanto em seu interior se pode observar a formação local de pequenas nuvens convectivas.

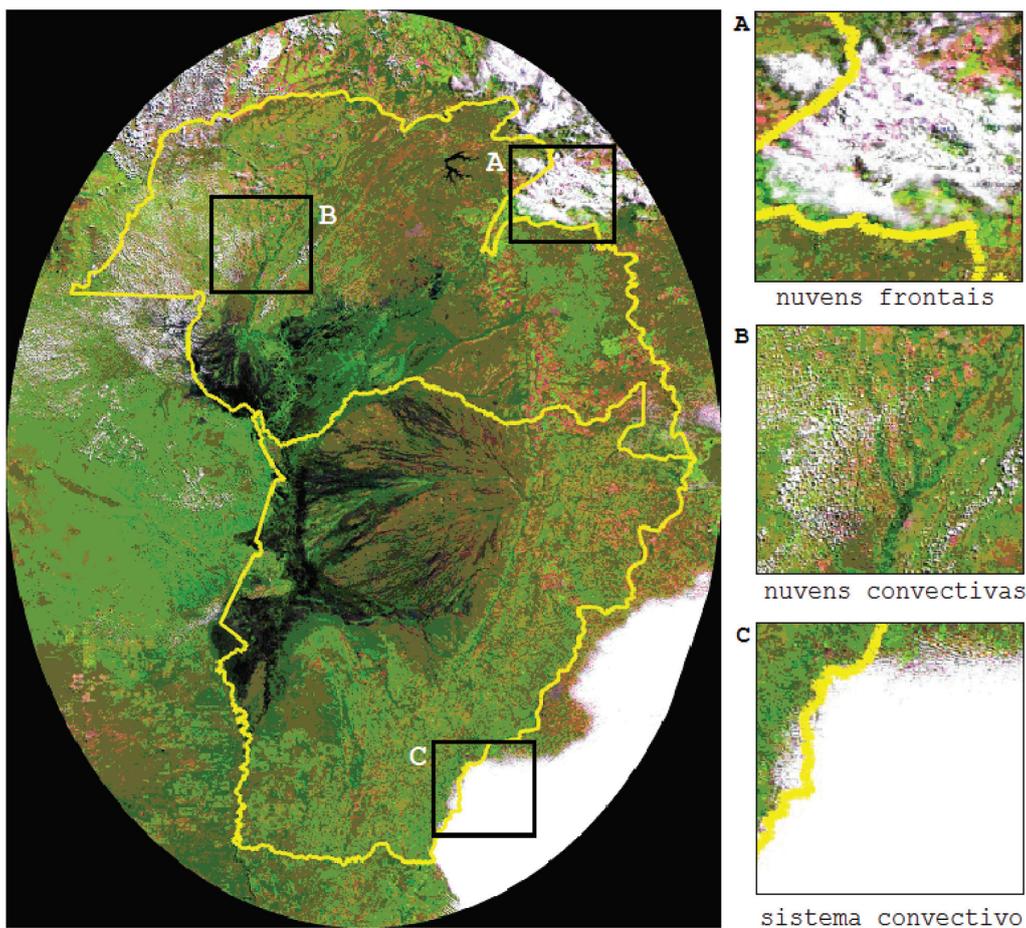


Figura 5. Composição colorida do produto MOD09 (RGB:1,2,6), de 28/abr/2011, com os limites da área de inundação (do território brasileiro) sobrepostos à imagem. Note o controle topográfico sobre os diferentes sistemas de nuvens: (A) nuvens frontais

adjacentes à borda NE da bacia; (B) nuvens convectivas no interior da planície; e (C) sistema convectivo na borda externa a SE da bacia.

4. Conclusões e sugestões

As observações deste estudo indicaram a existência de uma correlação positiva entre os níveis pluviométricos e a altitude na região do Pantanal e seu entorno, sobretudo nos períodos mais chuvosos. Porém, tal correlação não pôde ser aproveitada de imediato para o aprimoramento das técnicas de especialização de dados de chuva, embora tenha sido importante para sanar artefatos em áreas de poucos postos de observação.

Os mapas gerados evidenciaram que o planalto recebeu índices anuais em torno do dobro daqueles observados na planície no período de 1993 a 1995. Corroborados por mapeamentos de períodos mais abrangentes e observações diárias de imageamento ótico, estes resultados sugerem que, na porção brasileira da Bacia do Alto Paraná, uma fração expressiva da água de inundação seja originada nas áreas de planalto, que têm forte ocupação agropecuária, numa indicação da extensão necessária aos cuidados relativos ao Pantanal Matogrossense.

5. Referências

- Aragão, J. R. L.; Arai, E.; Sato, F. Y.; Valeriano, M. M.; Shimabukuro, Y. E. Sintetização da descrição dos produtos MODLAND – uma nova classe de imagens orbitais para monitoramento do Pantanal Matogrossense. In: Geopantanal, 4o, 2012, Bonito, MS. **Anais ...** São José dos Campos, SP: INPE, 2012. CD-ROM.
- Cardoso, M. R. D.; Marcuzzo, F. F. N. Mapeamento de três decênios da precipitação pluviométrica total e sazonal do bioma Pantanal. In: Geopantanal, 3o, 2010, Cáceres, MS. **Anais ...** São José dos Campos, SP: INPE, 2010. p. 84-94.
- Eastman, J. R. **Idrisi for Windows: User's Guide**. Worcester: Clark University, 1995. 440p.
- ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center). **ASTER GDEM**. 2009. <http://www.GDEMem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>. Acesso em: 20 jun. 2012.
- Golden Software. Surfer Version 6.01- Surface Mapping System. Golden: Golden Software, Inc., 1995.
- Minitab Inc. **Meet MINITAB, Release 13 for Windows**. Pennsylvania: State College, 2000. não paginado.
- Oke, T.R. **Boundary layer climates**. New York: Routledge, 1987, 464 p.
- Ometto, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981, 425p.
- Pannatier, Y. **VarioWin: Software for Spatial Data Analysis in 2D**. New York: Springer-Verlag, 1996.
- Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. **Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos, SP: Editora Parentese, cap. 2, p 23-35, 2007.
- Sakamoto, A. Y.; Salvi, L. L.; Queiroz Neto, J. P.; Valeriano, M. M.; Quérol, H.; Negrão, W. H. Pluviosidade na bacia do alto Paraguai e dinâmica hídrica no pantanal da Nhecolândia (Brasil) - padrão seco (1993/94) e chuvoso (1994/95). In: Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 8.o., 2008, Caparaó, MG. **Anais ...** Uberlândia, MG : Universidade Federal de Uberlândia, 2008. v. 1. p. 278-290.
- Salvi, L. L. **A Chuva na Bacia do Alto Paraguai: contribuição ao estudo de aspectos das flutuações interanuais durante o século XX**. Tese (Doutorado em Ciências – Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.
- USGS/EROS (U.S. Geological Survey/Earth Resources Observation and Science Center). **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. 2009. http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/SRTM Acesso em: 13 jun. 2012.
- Valeriano, M. M. ; Rossetti, D. F. . Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.

Valeriano, M. M.; Picini, A. G.; Mello, M. H. A. Estratificação de efeitos anisotrópicos do relevo na geração de mapas pluviométricos por geoprocessamento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, n.1, p.167-177, 2002.

Viana, D. R. **Comportamento espaço-temporal da precipitação na Região Sul do Brasil utilizando dados TRMM e SRTM**. (INPE-15738-TDI/1484) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009.