

# ASSIMETRIA DE DRENAGEM E ANOMALIA GRAVIMÉTRICA: EVIDÊNCIA DE NEOTECTÔNICA NO NORTE DA AMAZÔNIA

## Autores

Cremon, E.H. (INPE / IFG) ; Rossetti, D.F. (INPE) ; Molina, E.C. (IAG-USP) ; Alves, F.C. (INPE)

## Resumo

Este trabalho analisou a influência de atividades neotectônica utilizando o fator de assimetria topográfica transversal (FSTT) em sub-bacias do baixo curso do rio Branco, norte da Amazônia, que foi integrado com um mapa de anomalia gravimétrica Bouguer derivado de dados de satélite. Ao norte do baixo curso desse rio, sub-bacias tributárias indicaram sentido de basculamento para sul, enquanto sub-bacias da porção centro-sul indicaram basculamento em direção à calha do rio Branco. Modas secundárias de FSTT são indicativas de sub-blocos com direções opostas aos dos basculamentos principais das sub-bacias analisadas e/ou a influência de falhas transcorrentes. A gravimetria Bouguer revelou anomalia positiva relacionada com a presença, em subsuperfície, de rochas de densidade anormalmente alta de direção NNE-SSW, que coincide com o curso do rio Branco. Então, sugere-se que reativações de estruturas geológicas profundas possam ter controlado o estabelecimento da drenagem nessa região.

## Palavras chaves

*neotectônica; gravimetria; Amazônia*

## Introdução

A abordagem morfotectônica é um dos principais métodos de análise de formas de relevo, cuja interpretação permite a identificação de áreas sujeitas a controle litológico e/ou processos neotectônicos (DOORNKAMP, 1986; DVORAK, 1995). Por isso, índices morfotectônicos têm sido explorados para auxiliar em interpretações neotectônicas. Entretanto, poucos trabalhos foram realizados em regiões de relevo predominantemente plano com sedimentação ativa concomitante a atividades tectônicas. Este é o caso de boa parte dos sistemas fluviais amazônicos, onde tem sido demonstrado que a sedimentação quaternária e os sistemas de drenagem são fortemente controlados por reativação de falhas (c.f. ROSSETTI, 2014). Nessas áreas, de acesso difícil e com carência de exposições naturais, a análise morfotectônica se apresenta como uma ferramenta valiosa na análise de controle estrutural. A bacia de drenagem do rio Branco é uma das principais do norte da Amazônia. Existe a hipótese de que este rio incluiu uma bacia de drenagem antiga, chamada Proto-Berbice (CRAWFORD et al, 1985; GIBBS & BARRON, 1993; SCHAEFER & DALRYMPLE, 1996). Esta bacia teria drenado de SW para NE em direção ao mar do Caribe durante o Neógeno/Quaternário. A erosão de rochas do Escudo das Guianas teria permitido a conexão entre as bacias sedimentares Tacutu e Solimões, localizadas respectivamente a norte e sul da bacia do rio Branco. Este processo teria promovido a reorganização da drenagem, revertendo o fluxo principal para sul, com a formação do rio Branco, processo que favoreceu sua conexão com o rio Negro (SCHAEFER & DALRYMPLE, 1996). Tal cenário é também sugerido pela ocorrência de espécies de peixes comuns nas bacias de drenagem dos rios Essequibo (que deságua no mar do Caribe) e Branco (c.f. LUJAN & ARMBRUSTER, 2011). O rio Branco é compartimentado em três grandes setores: (i) o alto rio Branco, que se estende da confluência dos rios Uraricoera e Tacutu à confluência do rio Mucajá; (ii) o médio rio Branco, que corresponde ao trecho entre esta confluência e as corredeiras próximas à cidade de Caracará; e (iii) o baixo rio Branco, que se estende até de Caracará à foz na confluência com o rio Negro (Fig. 1). A área entre o baixo rio Branco e o médio rio Negro é considerada uma extensão da Bacia do Solimões, com cerca de 100.000 km<sup>2</sup>, denominada de Pantanal Setentrional (PS) (SANTOS et al., 1993). De acordo com esses autores, essa área corresponde a uma bacia sedimentar continental. O preenchimento sedimentar desta bacia ocorreu principalmente no Pleistoceno Médio ao Holoceno por um sistema fluvial entrelaçado (ROSSETTI et al., 2015), além de sistemas de megaleques (ROSSETTI et al, 2012; 2014), em parte retrabalhados por dunas eólicas. O contexto geológico/geomorfológico do baixo rio Branco e do PS é ainda pouco conhecido, e esse entendimento é chave para uma melhor compreensão da hipótese de captura de drenagem do rio Branco. Devido à grande extensão, i.e., várias centenas de quilômetros quadrados, essa região pode ser melhor investigada por meio de produtos de sensoriamento remoto e da análise da rede de drenagem. A interpretação geológica desses dados de superfície pode ser melhorada com a integração de dados de subsuperfície de natureza regional. Dados gravimétricos gerados por satélites podem servir a esse propósito. Essa base de dados mede

mudanças gravitacionais terrestres e fornece elementos para anomalias geradas por variações na densidade do material geológico em subsuperfície, que podem revelar estruturas profundas com reflexo na superfície. O objetivo do presente trabalho foi analisar a influência da neotectônica no baixo curso do rio Branco, por meio da análise do fator de assimetria topográfica transversal (FSTT). Esses dados foram integrados com dados gravimétricos de anomalia Bouguer, a fim de confirmar se as características morfológicas são compatíveis com estruturas geológicas detectáveis em subsuperfície, que tenham sido reativadas mais recentemente.

## Material e métodos

Os principais produtos utilizados no presente trabalho foram: o modelo digital de elevação (MDE) derivado da *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), dados cartográficos de rede de drenagem e dados gravimétricos de anomalia Bouguer. Os dados SRTM (acesso em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/cbanddataproducts.html>) possuem 3 arcos de segundo de resolução espacial (~ 90m) e resolução vertical de 1 m. O mapa da rede de drenagem em formato vetorial foi extraído do Ministério do Meio Ambiente (acesso em: <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>). Algumas correções vetoriais foram necessárias para homogeneização cartográfica. Para isso imagens ópticas e de radar foram utilizadas para uma reedição de trechos específicos da rede de drenagem (c.f. CREMON, 2012). Com o intuito de avaliar a direção de basculamento das principais sub-bacias tributárias do baixo curso do rio Branco e sua relação com estruturas tectônicas, foi aplicado o FSTT (COX, 1994). Tendo em vista o relevo relativamente plano da área de estudo, movimentos suaves de blocos verticais teriam sido suficientes para promover uma reorganização da rede de drenagem, cujas mudanças são passíveis de serem detectadas com este índice (p.e. IBANEZ et al, 2014). Para aplicação do FSTT foi necessário o uso da base da rede de drenagem do Ministério do Meio Ambiente-MMA reeditada na escala 1:100.000. Como pré-processamento, foi feita a operação burn streams na extensão HEC-GeoRAS do aplicativo ArcGIS10.1, onde o MDE-SRTM teve um aprofundamento dos dados vetoriais de drenagem. Com base no MDE-SRTM pré-processado, foi utilizado o aplicativo TecDEM (*Tectonics from Digital Elevation Models*), implementado em ambiente MATLAB (SHAHZAD & GLOAGUEN, 2011) para a extração semi-automática do FSTT. Com base no MDE, a drenagem e bacias respectivas foram extraídas automaticamente, sendo esses últimos dados utilizados para o cálculo do índice FSTT. Como parâmetro de entrada, foi utilizado 10 km<sup>2</sup> de área de contribuição para a extração da drenagem sobre o MDE. Foram selecionadas seis sub-bacias representativas do baixo rio Branco nas áreas abrangidas pela bacia sedimentar do Pantanal Setentrional, as dos rios: Ajarani, Anauá, Água Boa do Univini, Catrimani, Itapará e Xeriuni (Fig. 1). Para cada sub-bacia selecionada, foi aplicado o FSTT ao longo do canal principal em intervalos regularmente espaçados a cada 2 km, no intuito de se obter amostras estatisticamente representativas. O resultado foi um conjunto de vetores, cuja magnitude e direção foram representados em diagramas polares e de rosetas. Adicionalmente, foi também calculado o azimute médio ponderado pelo comprimento dos segmentos dos vetores do FSTT, como um indicativo geral da direção de basculamento. Para fins de validação da direção preferencial de basculamento das sub-bacias analisadas, foi utilizado dado de gravimetria orbital e integrados pelo modelo EIGEN-6C para obtenção do produto de anomalia Bouguer (FÖRSTE et al., 2008; PAVLIS et al., 2012, SHAKI et al., 2014). Este tipo de dado possui relação direta com a densidade dos materiais em subsuperfície. Dados dos satélites LAGEOS-1/2 (*Laser Geodynamics Satellite*), da missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e do GOCE (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*) foram utilizados na integração dos dados gravimétricos. O produto de anomalia Bouguer foi gerado com resolução espacial de 180 arcos de segundo. As sub-bacias tiveram suas áreas divididas simetricamente, tendo sido extraída a média dos valores gravimétricos para cada lado da sub-bacia (esquerdo e direito). Os maiores valores médios de cada lado da sub-bacia avaliada foram interpretados como indicativos do lado preferencial de basculamento.

## Resultado e discussão

A análise do mapa Bouguer indica um cinturão curvilíneo de cerca de 500 km de extensão caracterizado por valores de gravimetria anormalmente altas distribuídos na direção NNE-SSW (Fig. 1). Os valores de gravimetria variam de 25 mGal para norte até 60 mGal na parte central e menos de 20 mGal para sul. Esse cinturão sugere domínio de material geológico de alta densidade localizado em subsuperfície. O ponto de interesse para este trabalho é que esse cinturão de anomalia positiva tem configuração, posicionamento e direcionamento coincidentes aos apresentados pelo curso do rio Branco (Fig. 1). A análise dos valores de FSTT das sub-bacias da área de estudo apresentam valores médios que variam entre 0,01 e 0,59 (Fig. 2 e 3). As sub-bacias da porção sul dessa área, representativas dos rios Itapará e Xeriuni, apresentam os menores valores de FSTT em relação às demais sub-bacias avaliadas (i.e., 0,14 e 0,01, respectivamente). Entretanto, o alto valor de desvio padrão apresentado pelo rio Itapará ( $S = 0,58$ ), indica segmentos locais deste rio com alta assimetria. Também foi possível observar que em parte das sub-bacias houve uma moda secundária dos vetores do FSTT, que é associada à direção oposta do basculamento principal. Nas sub-bacias dos rios Ajarani, Anauá e Catrimani, ocorrem moda secundária representada pelos valores de desvio padrão do FSTT, bem como gráficos polares e de roseta (Fig. 2). A análise da direção principal do FSTT revelou que as duas sub-bacias (i.e., Ajarani e Anauá) localizadas na borda norte do PS possuem direções indicativas de basculamento para o interior da bacia sedimentar a sul (Fig. 2). Com exceção do rio Xeriuni, as demais sub-bacias avaliadas seguem orientação com decaimento preferencial para a calha do rio Branco em ambas de suas margens (setas cinza na Fig. 2). De maneira geral, os resultados obtidos pela análise do FSTT são condizentes com os dados gravimétricos de anomalia Bouguer (Fig. 3). Assim, as duas sub-bacias ao norte, correspondentes aos rios Ajarani e Anauá, possuem valores gravimétricos médios maiores na metade sul de cada parte das bacias, indicando pendente para WSW-SW e SE, respectivamente. Para o caso das sub-bacias dos rios Água Boa do Univini, Catrimani, Itapará e Xeriuni, foram encontradas as seguintes direções de pendente gravimétrica: ESE, SW, WNW e ESE (ver valores na Fig. 3). De todas as sub-bacias analisadas, apenas as dos rios Catrimani e Xeriuni apresentaram decaimento em função de gravimetria em direção oposta ao indicado pelo FSTT. Os baixos valores da média e mais elevados de desvio padrão do FSTT para os rios Xeriuni e Itapará podem estar relacionados a essas bacias estarem em mais de um bloco de basculamento com direções de decaimento opostas e áreas aproximadas, assim a média tende a zero e o desvio padrão dos dados aumenta. Análise de dados gravimétricos de anomalia Bouguer em áreas representadas por bacias sedimentares permite interpretar o estado de compensação isostática local, com valores positivos e negativos indicando, respectivamente, sub e sobre-compensações. O fato da subsuperfície da área de estudo ser marcada por um cinturão de anomalia gravimétrica positiva de orientação NNE-SSW coincidente com a disposição do rio Branco (Fig. 1) sugere que o estabelecimento desse rio pode ter ocorrido por reativações dessa estrutura geológica, coincidente com o alinhamento rio Branco descrito por Bezerra (2003). O direcionamento de assimetria para o sul das sub-bacias ao norte da área de estudo (Ajarani e Anauá) e das demais sub-bacias para a calha do rio sugere desvio do rio Branco, originalmente com fluxo para o Mar do Caribe, para sul, a fim de se juntar aos tributários da bacia amazônica. A constatação de sub-bacias hidrográficas assimétricas ao longo do baixo curso do rio Branco, onde ocorrem apenas depósitos de idade quaternária, bem como as diferenças gravimétricas obtidas pela análise das anomalias Bouguer, são tidas como evidências de reativações neotectônicas nessa região. Levando em consideração o contexto geológico proposto para a região amazônica, é possível sugerir que as modas secundárias de basculamento registradas em boa parte das sub-bacias analisadas pode estar relacionada a movimentos de falhas transcorrentes ou falhas obliquas (com transcorrência e componente vertical) em tempos geológicos relativamente recentes, como já indicado por Bezerra (2003) para o PS. Um número crescente de publicações tem defendido que reativações neotectônicas de falhas transcorrentes desempenharam um papel importante nas terras baixas amazônicas, provavelmente representando o principal mecanismo

responsável pela renovação da deposição sedimentar do Neógeno ao Holoceno (p.e. PIMIENTA, 1958; COSTA et al, 1996, 1997, 2001.; COSTA & HASUI, 1997; BEZERRA, 2003; LATRUBESSE & FRANZINELLI, 2005; MERTES e DUNNE, 2007; HAYAKAWA & ROSSETTI, 2015; ROSSETTI et al., 2012; ROSSETTI, 2014).

Figura 1

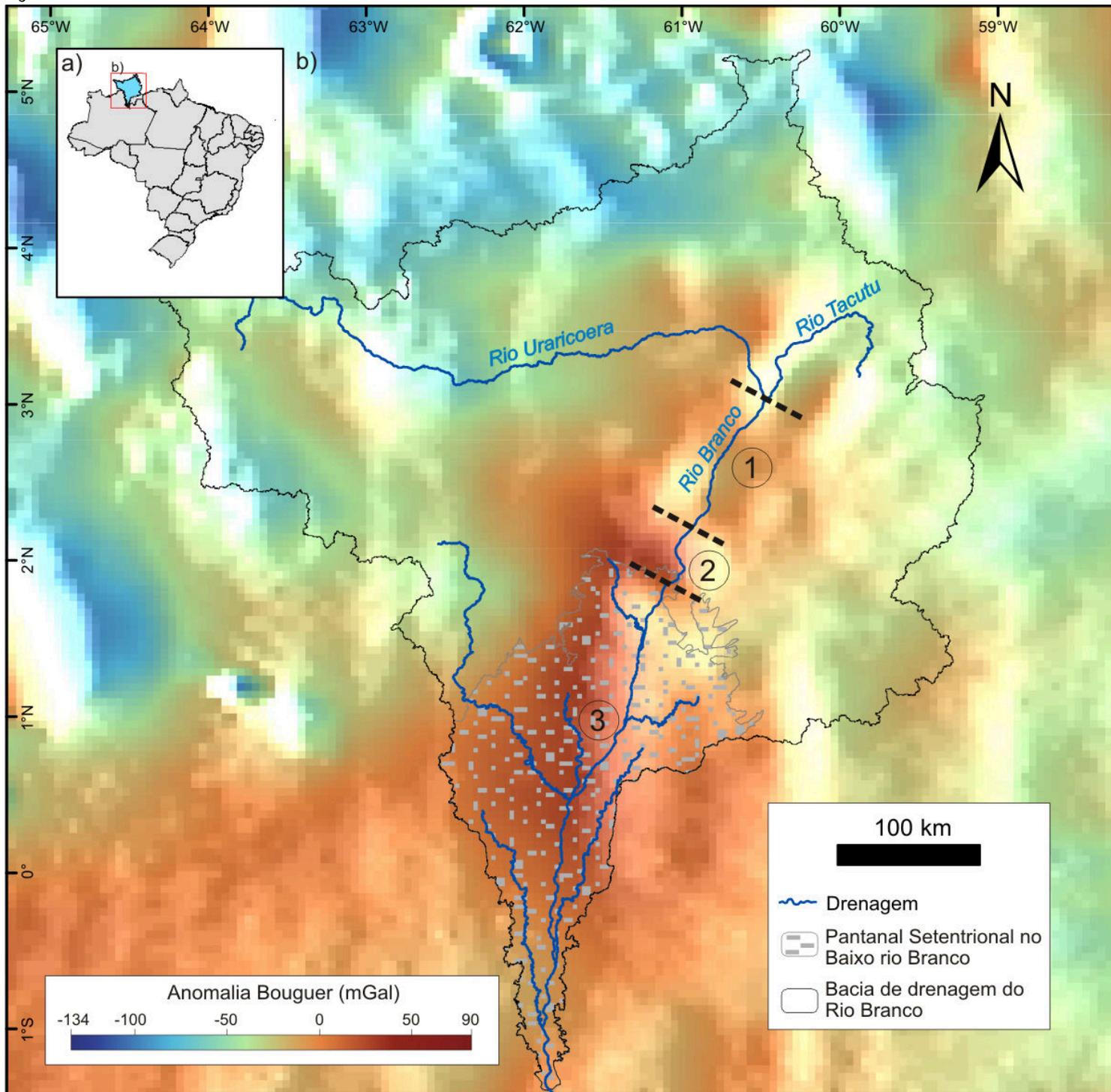
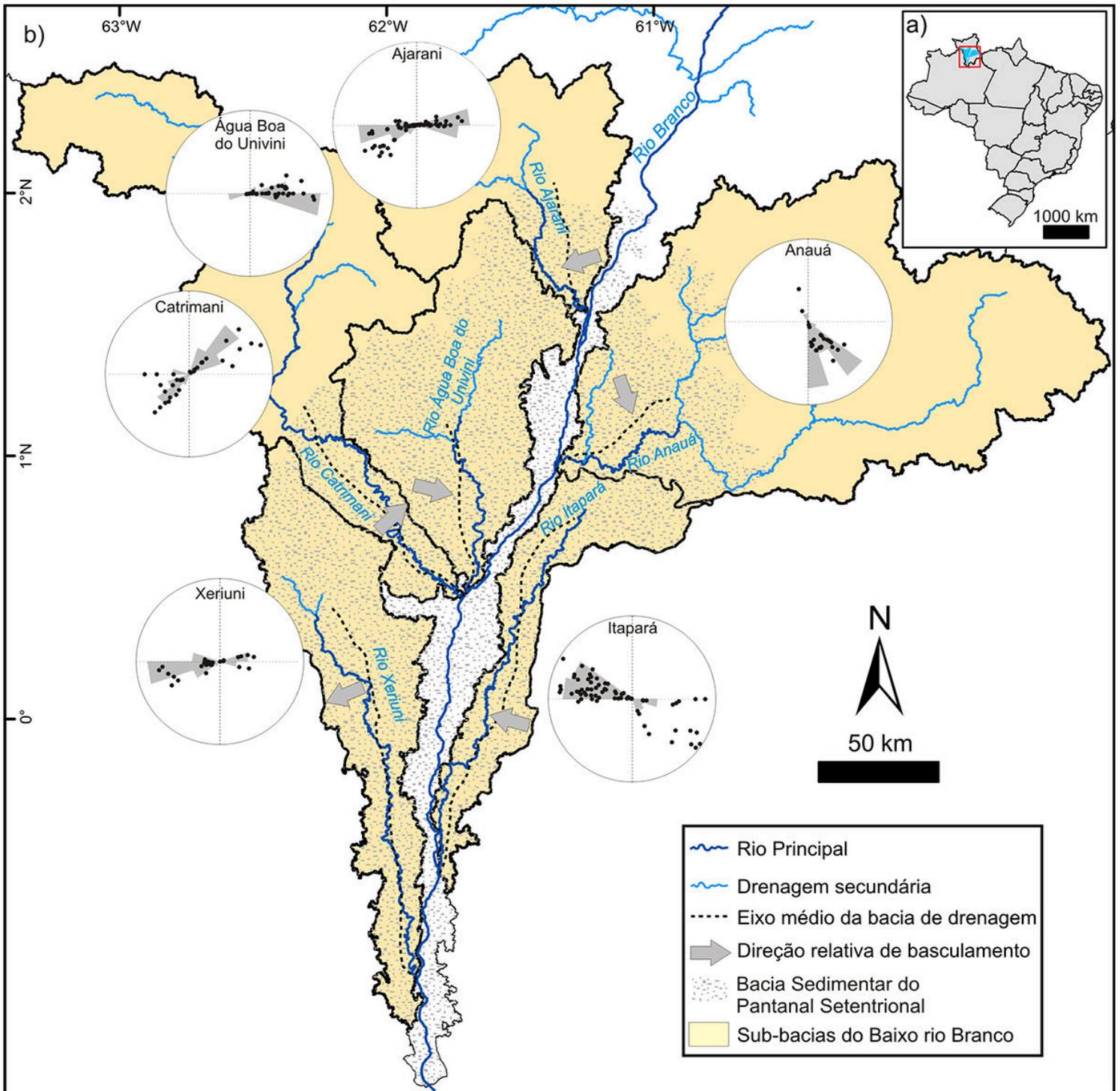


Figura 2



Sub-bacias do baixo rio Branco com indicação de diagramas polares e rosetas. Setas cinzas indicam sentido principal de basculamento.

Figura 3

<b>Nome da Bacia de Drenagem</b>	<b>Média (X)</b>	<b>Desvio padrão (S)</b>	<b>Direção de Basculamento (°)</b>	<b>Lado direito (mGal)</b>	<b>Lado esquerdo (mGal)</b>	<b>Direção do decaimento gravimétrico</b>
Ajarani	0,42	0,30	SW	19,07	13,95	SW
Anauá	0,25	0,23	SE	3,47	3,48	SE
Água Boa do Univini	0,28	0,24	ESE	20,46	26,51	ESE
Catrimani	0,59	0,28	NE	12,89	11,04	SW
Itapará	0,14	0,58	WNW	16,78	15,96	WNW
Xeriuni	0,01	0,27	WSW	-2,30	5,27	ESE

Parâmetros extraídos com o cálculo do FSTT e média gravimétrica para as sub-bacias do baixo rio Branco.

## Considerações Finais

A análise dos valores de FSTT, combinados com os dados gravimétricos de anomalia Bouguer, é condizente com a proposta de que a região do baixo rio Branco sofreu basculamentos decorrentes de reativações tectônicas. Considerando-se o contexto geológico regional, é possível sugerir que modas secundárias em sentidos opostos aos dos basculamentos sugeridos para as sub-bacias analisadas podem estar associadas a falhas transcorrentes ou oblíquas. O direcionamento principal de basculamento das sub-bacias está de acordo com a disposição de um cinturão de anomalias gravimétricas positivas, detectado em subsuperfície com base na análise do mapa Bouguer. A coincidência da configuração, posicionamento e direcionamento desse cinturão com o curso do rio Branco confirma que a deformação tectônica teve efeito na paisagem atual.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo financiamento do projeto 13/50475-5 e ao Dr. Everton Bomfim, pelas primeiras discussões sobre o tema deste trabalho.

## Referências

- Bezerra, P. E. L. [b]Compartimentação morfotectônica do interflúvio Solimões-Negro [b]. 2012. 335 p. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém: UFPA, 2003.
- Costa, J.B.S.; Hasui, Y. Evolução geológica da Amazônia. In: Costa, M.L., Angélica, R.S. (Eds.), [b]Contribuições à Geologia da Amazônia [b]. Soc. Bras. Geol., Belém, pp. 15–19, 1997.
- Costa, J.B.S.C.; Bemerguy, R.L.; Hasui, Y.; Borges, M.S. Tectonics and paleogeography along the Amazon River. [b]J. South Am. Earth Sci. [b], v. 14, p. 335–347, 2001.
- Costa, J.B.S.; Bemerguy, R.L.; Hasui, Y.; Borges, M.S.; Ferreira Jr, C.R.P.; Bezerra, P.E.L.; Costa, M.L.; Fernandes, J.M.G. Neotectônica da região amazônica-aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. [b]Geonomos [b], v. 4, p. 23–44, 1996.
- Costa, M.L.; Moraes, E.L.; Behling, H.; Melo, J.C.V.; Siqueira, N.V.M.; Kern, D.C. Os sedimentos de fundo da Baía de Caxiuanã. In: Lisboa, P.L.B. (Eds.), [b]Caxiuanã: Populações Tradicionais, Meio Físico e Diversidade Biológica [b]. Mus. Par. Emilio Goeldi, Belém, pp. 121–137, 1997.
- Cox, R.T. Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: An example from the Mississippi Embayment. [b]Geological Society of America Bulletin [b], v. 106, p. 571–581, 1994.
- Crawford et al. Geology and exploration in the Takutu graben of Guyana Brazil. [b]J. Petrol. Geol. [b], v. 8, p. 5-36, 1985.
- Cremon, É. H. [b]Caracterização morfológica do sistema fluvial do Rio Demini (Amazônia Setentrional) com base em sensoriamento remoto [b]. 2012. 165 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.05.13.53-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
- Doornkamp, J. C. Geomorphological approaches to the study of neotectonics. [b]Journal of the Geological Society [b], v. 143, p. 335-342, 1986.
- Dvorák, L. Application of Modern Geomorphological Methods in Theory and Practice: Case Study of the Bohemian Highlands (Czech Republic). [b]GeoJournal [b], v. 35(4), p. 425-430, 1995.
- Förste, C.; Flechtner, F.; Schmidt, R.; Stubenvoll, R.; Rothacher, M.; Kusche, J.; Neumayer, H.; Biancale, R.; Lemoine, J.-M.; Barthelmes, F.; Bruinsma, S.; Koenig, R.; Meyer, U. EIGEN-GL05C-A new global combined high-resolution GRACE-based gravity field model of the GFZ-GRGS cooperation. [b]Geophys. Res. Abst. [b] 10, EGU2008-A-03426, Ref-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-03426, 2008.

- Gibbs, A. K.; Barron, C. N. [b]The Geology of the Guiana Shield[/b]. Oxford Univ. Press, New York, 1993.
- Ibanez, D.M.; Riccomini, C.; De Miranda, F.P. Geomorphological evidence of recent tilting in the Central Amazonia Region. [b]Geomorphology[/b] (Amsterdam), v. 214, p. 378-387, 2014.
- Latrubesse, E.M.; Franzinelli, E. The late Quaternary evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: Implications for island and floodplain formation in large anabranching tropical systems. [b]Geomorphology[/b], v. 70, p. 372–397, 2005.
- Lujan, N. K.; Armbruster, J. W. The Guiana Shield. In: Albert J.S., Reis R.E., (Eds.), [b]Historical Biogeography of Neotropical Freshwater Fishes[/b]. Univ. of California Press, Berkeley, USA, pp. 211-224, 2011
- Mertes, L.A.K.; Dunne, T. Effects of tectonism, climate change and sea level change on the form and behaviour of the modern Amazon River and its floodplain. In: Gupta, A. (Ed.), [b]Large Rivers: Geomorphology and Management[/b]. John Wiley & Sons, United Kingdom, pp. 115–144, 2007.
- Pavlis, N.K.; Holmes, S.A.; Kenyon, S.C.; Factor, J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). [b]J. Geophys. Res. [/b], 117, B04406, 2012.
- Pimienta, J. Modifications climatiques et subsidence récent affectant le glacis sud du Bassin de l' Amazone. [b]C. R. Acad. Sci. [/b], v. 246, p. 2268–2271, 1958.
- Rossetti, D.F.; Zani, H.; Cohen, M.C.L.; Cremon, É.H. A Late Pleistocene-Holocene wetland megafan in the Brazilian Amazonia. [b]Sediment. Geol. [/b], v. 281, p. 50–68, 2012.
- Rossetti, D.F.; Zani, H.; Cremon, É.H. Fossil megafans evidenced by remote sensing in the Amazonian wetlands. [b]Zeitschrift für Geomorphologie[/b], v. 58, p. 145–161, 2014.
- Rossetti, D.F. The role of tectonics in the late Quaternary evolution of Brazil's Amazonian landscape. [b]Earth-Science Reviews[/b], v. 139, p. 362–389, 2014.
- Rossetti, D. F.; Cohen, M. C. L.; Tatum, S. H.; Sawakuchi, A. O.; Cremon, É. H.; Mittani, J. C. R.; Bertani, T. C.; Munita, C. J. A. S.; Tudela, D. R. C.; Yee, M.; Moya, G. Mid-late pleistocene OSL chronology in western Amazonia and implications for the transcontinental Amazon pathway. [b]Sedimentary Geology[/b], v. 330, p. 1-15, 2015.
- Santos, O., Nelson, B., Giovannini, C.A. Corpos de areia sob leitos abandonados de grandes rios. [b>Ciência Hoje[/b], v. 16, p. 22–25, 1993.
- Schaefer, C. E. R.; Dalrymple, J. Pedogenesis and relict properties of soils with columnar structure from Roraima, north Amazonia. [b>Geoderma[/b], v. 71, p. 1–17, 1996.
- Shahzad, F.; Gloaguen, R. TecDEM: A MATLAB based toolbox for Tectonic Geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis. [b>Computer and Geosciences[/b], 37:261-271, 2011.
- Shaki, R.; Förste, C.; Abrikosov, O.; Bruinsma, S.; Marty, J.-C.; Lemoine, J.-M.; Flechtner, F.; Neumayer, H.; Dahle, C. In: Flechtner, F., Sneeuw, N. Schuh, W.-F. (Eds.), [b>Observation of the System Earth from Space - CHAMP, GRACE, GOCE and future missions: Advanced Technologies in Earth Sciences[/b]. Springer-Verlag, Heidelberg, pp 155-161, 2014.

## REALIZAÇÃO



(<http://www.ugb.org.br/>)



(<http://www.uem.br/>)



(<http://www.pge.uem.br/>)

**DGE**

Departamento  
de Geografia

(<http://www.dge.uem.br/>)



(<http://www.gema.uem.br/>)

## APOIO



[\(http://www.ufpr.br/\)](http://www.ufpr.br/)



[\(http://www.unioeste.br/\)](http://www.unioeste.br/)



[\(http://portal.uepg.br/\)](http://portal.uepg.br/)



[\(http://www.rc.unesp.br/\)](http://www.rc.unesp.br/)



[\(http://www.unicesumar.edu.br/\)](http://www.unicesumar.edu.br/)



## PATROCINADORES

---



[\(http://www.uem.br/\)](http://www.uem.br/)



XI SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia - UGB - União da Geomorfologia Brasileira  
[\(http://www.igi.com.br/\)](http://www.igi.com.br/)