



Fatores condicionantes do arcabouço estrutural da tectônica gravitacional do Cone do Amazonas

Valterlene de Oliveira¹, Antonio Tadeu dos Reis² e Cleverson Guizan Silva¹

¹ LAGEMAR-UFF, Brazil (valterlene@yahoo.com.br)

² Departamento de Oceanografia /Uerj-Brazil.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11 – 14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The Amazon Cone, part of the Amazon Mouth Basin, is intensely affected by gravity-driven tectonics. In this work, approximately 9000 km of multichannel seismic reflection lines were analysed, which enabled us to create a structural map, as well as a map of the morphology of detachment surface and isopach of Neomiocen–Recent sedimentary cover. Three main structural domains were identified in the region: a proximal extensive domain, which extends since the edge of the shelf to the depth of 500 m, an intermediate domain that translate in a rigid way and a contractional domain which covers an area of approximately 1000 m to 1500 m in depth. The extensive domain is characterised as having synthetic listric faults and rollovers. On the other hand, the contractional domain is characterised as having thrust faults. The Amazon Cone thin-skinned extension system, whose detachment surface is located at the base of the Neomiocene sequence, is divided in two main compartments, which are: the South-eastern Compartment and the North-western Compartment. The South-eastern Compartment is characterised as a narrow gravitational system (115 km wide), geographically limited to the continental slope and its extension can reach up to 1500 m in depth. However, the North-western Compartment is characterised as a wider gravitational system (152 km wide), which reaches up to 2500 m in depth. The morphology of the surface detachment (base of the shale layer under pressure) seems to represent an important role in the development of the structural framework of the area. Extensional faults are located in the region of higher gradient of the detachment surface, while the thrust faults are in the region of lower gradient. The mechanism of differential sedimentary overload is another important factor of development of the structural framework in the region, because the extensive structures are located in the thickest part of the depocentres and the

thrust faults are located on the borders of the depocentres.

Introdução

Nas últimas décadas, o estudo da tectônica gravitacional tem recebido especial atenção da comunidade científica (e.g. Vendeville e Cobbold, 1988; Vendeville, 1991; Nelson, 1991; Vendeville e Jackson, 1992 a e 1992b; Mohriak *et al.*, 1995; Morley e Guerin, 1996) pelo fato de que importantes áreas potenciais e/ou produtoras de petróleo serem estruturalmente afetadas por deformações geradas por essa modalidade de tectônica.

O Cone do Amazonas, localizado na porção equatorial da Margem Continental Brasileira (entre as coordenadas 0° e 6° N e 47° e 51° W) apresenta-se estruturado pela tectônica gravitacional (figura 1), e já foi objeto de estudo por alguns autores (Bruno, 1987; Silva *et al.*, 1999; e Cobbold *et al.*, 2004). No entanto, estes estudos interpretam de forma distinta o arcabouço estrutural da área, assim como propõem diferentes mecanismos de disparo da instabilidade gravitacional da cobertura sedimentar Neomioceno-Recente.

Neste trabalho, focalizamos os fatores condicionantes da evolução estrutural da tectônica gravitacional, baseado principalmente no mapeamento da espessura sedimentar sobre a superfície de décollement, assim como na morfologia da desta superfície basal.

Metodologia

A realização desse trabalho foi baseada principalmente em dados de perfis sísmicos de reflexão multicanal de diferentes níveis de resolução. Os perfis sísmicos estão dispostos em uma malha sísmica com 39 linhas, perfazendo um total de cerca de 9000 km de linhas com penetração de até 13 s e um espaçamento médio entre eles de 15 km (figura 1).

Para a análise tectono-sedimentar empreendida na região do Cone do Amazonas, os dados sísmicos foram interpretados focalizando as principais estruturas presentes (falhas listricas sintéticas e antitéticas, e falhas de empurrão) (figura 2 e 3), e segundo os princípios gerais da estratigrafia sísmica (ex: Mitchum *et al.*, 1977a; Mitchum *et al.*, 1977b).

Uma vez que o objeto de estudo se trata da tectônica gravitacional, foram também confeccionados mapas de alguns dos parâmetros que influenciam a mecânica

envolvida na deformação, tais como: mapa da morfologia da superfície basal de destacamento sobre a qual a cobertura sedimentar translada (figura 6); e, mapa da distribuição espacial da cobertura sedimentar (mapa de isópacas) (figura 7). Esses mapas foram confeccionados em tempo, devido a falta de dados de velocidade do sinal, para que fosse feita a conversão dos valores em tempo para profundidade.

Resultados

O Cone do Amazonas apresenta no seu pacote sedimentar uma diversidade de estruturas associadas ao mecanismo do sistema de deformação superficial extensiva (*thin-skinned extension*) divididas em três domínios (figura 4): um **domínio proximal extensivo**, um **domínio intermediário pouco deformado** e um **domínio distal contraccional**.

O **domínio extensivo** distribui-se ao longo de uma faixa proximal de direção geral NW-SE localizado aproximadamente entre as profundidades de 300 e 500 m (figura 4). Este domínio apresenta uma largura média de aproximadamente 46 km na porção noroeste do cone e de aproximadamente 38 km na sua porção sudeste. Caracterizado pela presença predominante de falhas normais lítricas com extensão de linha de falha de no máximo 80 km. Algumas falhas são aflorantes e formam escarpas de até 180 m de desnível no fundo submarino. Também são observadas falhas sintéticas e antitéticas conjugadas formando cunhas sedimentares sintectônicas (*expanding wedges*). O **domínio estrutural intermediário** pouco deformado é observado entre os domínios extensivo e contraccional. Sua presença é pouco expressiva no Cone do Amazonas (aproximadamente 30 km de largura) (figura 4). Além disso, este domínio estrutural não é sistematicamente observado ao longo de todos os perfis no sentido da bacia (*dip lines*). Algumas vezes o domínio extensional é imediatamente seguido de falhas reversas que caracterizam o domínio contraccional. Finalmente, o **domínio contraccional** constitui o domínio estrutural mais distal distribuindo-se ao longo de uma faixa de direção geral NW-SE. Sua largura contudo é variável, apresentando aproximadamente 70 km na porção noroeste do cone, e aproximadamente 40 km na porção sudeste (figura 4). Esse domínio é representado por falhas de empurrão (*thrust faults*) com mergulho em direção ao continente. O comprimento de linha de falha é de no máximo 60 km. Algumas dessas falhas são aflorantes e formam altos topográficos e/ou escarpas. Esses altos delimitam sub-bacias sedimentares com pacote sedimentar pouco deformado. São também observadas na porção frontal do domínio contraccional falhas reversas aparentemente neo-formadas.

A análise estrutural e a integração dos dados disponíveis possibilitaram a compartimentação (anteriormente já identificada por Cobbold *et al.*, 2004) do sistema tectono-gravitacional da região do Cone do Amazonas em dois compartimentos principais, baseados na variação do estilo estrutural ao longo do talude e elevação continental da área de estudo: um *Compartimento Sudeste* e um *Compartimento Noroeste* (figura 5). O sistema *Canyon*-canal submarino atual do Amazonas representa um eixo que divide geograficamente os dois compartimentos.

O *Compartimento Sudeste* (figura 5) estende-se de 300 até cerca de 1500 m de profundidade, com uma largura de aproximadamente 115 km. Representa um compartimento geograficamente mais restrito ao talude continental superior, correspondendo desta forma à porção proximal da província fisiográfica do *Cone Superior*. A estruturação do sistema de deformação gravitacional observada nesse compartimento apresenta uma configuração mais uniforme, com as estruturas (extensionais e compressionais) seqüenciadamente dispostas seguindo um maior paralelismo entre elas. O *Compartimento Noroeste* do Cone do Amazonas (figura 5) apresenta-se mais complexamente estruturado que o *Compartimento Sudeste*, sendo caracterizado por um sistema gravitacional geograficamente mais amplo que estende-se até cerca de 2500 m de profundidade (figura 5) com uma largura de cerca de 152 km englobando na área a quase totalidade do província fisiográfica do Cone Superior. A estruturação nesse compartimento é relativamente mais complexa que no compartimento sudeste, pois apresenta um padrão anastomosado, onde as falhas (normais e reversas) parecem se interdigitar (figura 5).

A existência dessa compartimentação estrutural do sistema gravitacional na região do Cone do Amazonas leva a questionamentos sobre o porquê dos estilos estruturais identificados, e finalmente sobre os fatores condicionadores do arcabouço estrutural de cada compartimento.

A análise do mapa morfológico (figura 6) da superfície basal de destacamento e do mapa de isópacas da seqüência sedimentar Neomioceno-Recente, que constitui o Cone do Amazonas possibilitaram a averiguação de alguns fatores condicionadores. A morfologia da base de destacamento parece influenciar a formação das estruturas existentes no Cone do Amazonas. Observa-se que as falhas normais lítricas localizam-se normalmente na região de maior gradiente relativo da superfície basal de destacamento; enquanto as estruturas contraccionais (falhas reversas) estão na região de quebra de gradiente, a partir de onde este quase se horizontaliza. A relação entre as estruturas e a morfologia da superfície de destacamento corroboram com uma série de estudos de casos e com modelos analógicos, segundo os quais as falhas normais acupam, via de regra, regiões proximais de maior gradiente (Vendeville e Cobbold, 1988; Cobbold e Szatmari, 1991; Reis, 2001; Reis *et al.*, *in press*) enquanto que as estruturas contraccionais (falhas reversas e/ou diapíricas) ocupam regiões distais com tendência à diminuição de gradiente (Vendeville, 1987; Cobbold *et al.*, 1989). As estruturas compressionais se instalam em função dos baixos gradientes que diminuem o movimento de translação do pacote sedimentar, criando uma zona de contração. Neste sentido, a configuração das direções de gradiente da superfície de deslizamento (radial convergente) explicaria em parte, a configuração do compartimento estrutural noroeste do Cone do Amazonas, onde múltiplas e complexas frentes de encurtamento se desenvolvem próximos à região de convergência radial dos gradientes da superfície de destacamento (direção preferencial da translação).

O mapa de isópacas do pacote sedimentar Neomioceno-Recente (figura 7) que representa o Cone do Amazonas

demonstra que o sistema de deformação superficial extensiva do Cone do Amazonas está aparentemente condicionado pela sobrecarga sedimentar, pois os dois compartimentos estruturais (Sudeste e Noroeste) estão localizados na área equivalente aos dois principais depocentros (D1 e D2) identificados no cone. O domínio extensional, de forma geral, está localizado na porção de maior espessura relativa de cada depocentro; enquanto o domínio contracional localiza-se nas bordas dos depocentros, onde se tem uma diminuição da sobrecarga sedimentar. No domínio extensional, ainda observa-se que as falhas normais lísticas que formam escarpamentos estão geralmente alinhadas ao longo do depocentro, pois seu caráter de falhas sin-sedimentares favorece o próprio desenvolvimento do depocentro, através do espessamento sin-tectônico das cunhas sedimentares delimitadas entre os planos de falha e os *rollovers*.

As estruturas que compõem todo o sistema de deformação superficial extensiva do Cone do Amazonas estão ancoradas em uma superfície basal de destacamento (figuras 2 e 3) localizada na base de um nível móvel (folhelhos super-pressurizados ?), semelhantemente ao que ocorre no Delta do Niger (Damuth, 1994; Hooper, *et al.*, 2002). Essa provável camada de folhelhos super-pressurizados, já identificada anteriormente por Silva *et al.* (1999), é também considerada neste trabalho. Sua interpretação sísmica foi definida através da análise de fácies sísmicas de uma camada presente na base da cobertura sedimentar estruturada. Esta camada é limitada na base e no topo por refletores sísmicos com alta amplitude, e internamente por refletores descontínuos ou mesmo quase com ausências de reflexões (figura 4-3). A super pressurização nesta camada estaria, provavelmente, associada à presença de gás metano (Bruno, 1987; Brandão e Feijó, 1994; Silva *et al.*, 1999). Porém, Cobbold *et al.* (2004) não associam a geração das estruturas à movimentação de uma camada de folhelhos super-pressurizados, e sim, a uma descontinuidade gerada simplesmente pela presença de gás metano, formada pela presença de fluidos numa superfície basal de destacamento. Os autores afirmam que seria improvável a existência de sedimentos não compactados na profundidade em que se encontra a superfície de destacamento (cerca de 10 km). O presente trabalho também concorda com o fato de que à profundidade em que se encontra a camada de folhelhos, esta normalmente estaria compactada, mas a presença de fluidos super pressurizados (gás metano) possivelmente lhe proporcionaria mobilidade (comportamento dúctil). O fato de existir gás nessa região não descartaria a importância do movimento da camada de folhelhos como motor da instabilidade gravitacional da cobertura sedimentar Neomioceno-Recente e sua conseqüente estruturação. Desta forma, as hipóteses da presença de folhelho super pressurizado e de gás metano não parecem excludentes.

Conclusões

Dois fatores principais foram então reconhecidos como possíveis condicionadores do arcabouço estrutural da tectônica gravitacional no Cone do Amazonas: **a morfologia da base de destacamento e a sobrecarga sedimentar diferencial**. Esses dois fatores possuem, aparentemente, diferentes intensidades de atuação nos compartimentos estruturais (Sudeste e Noroeste). O *Compartimento Noroeste* parece ter uma maior influência da sobrecarga sedimentar, pois se encontra em uma região onde está a maior espessura sedimentar do depocentro principal (D1) do Cone do Amazonas. Porém, o seu domínio extensional está localizado na porção onde a superfície basal de destacamento não apresenta os maiores valores relativos de gradiente, e sim valores intermediários. Já o *Compartimento Sudeste* está, provavelmente, submetido a uma menor influência da sobrecarga sedimentar, pois ele está localizado na região do menor depocentro (D2), e uma influência mais expressiva da morfologia da base de destacamento, uma vez que o seu domínio extensivo ocupa a região de maior gradiente relativo.

Referências Bibliográficas

- Brandão, J. A. S. L.; Feijó, F. J.** (1994). Bacia da Foz do Amazonas. Boletim de Geociências da Petrobrás. **8**: 91 -99.
- Bruno, G.** (1987). Argilocinese no Cone do Amazonas. Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto – MG. 103p. (Dissertação de Mestrado).
- Cobbold, P. R.; Rosselo, E. A.; Vendeville, B.** (1989). Some experiments on interacting sedimentation and deformation above salt horizons. Bull. Soc.Géol. France. **8** (3): 453 - 460.
- Cobbold, P. R.; Szatimari, P.** (1991). "Radial gravitational gliding on passive margins." Tectonophysics. **188**: 249 -289.
- Cobbold, P. R.; Mourgues, R.; Boyd, K.** (2004). Mechanism of thin-skinned detachment in the Amazon Fan: assessing the importance of fluid overpressure and hydrocarbon generation. Marine and Petroleum Geology. **21**: 1013 - 1025.
- Damuth, J. E.** (1994). Neogene gravity tectonics and depositional processes on the deep Niger Delta continental margin. Marine and Petroleum Geology. **11**: 320 -246.
- Damuth, J. E.; Kumar, N.** (1975). Amazon Cone: Morphology, sediments, age e growth Pattern. G.S.A Bulletin. **86**: 863 - 878.
- Hooper, R. J.; Fitzsommons, R. J.; Grant, N.; Vendeville, B. C.** (2002). The role of deformation in controlling depositional patterns in the south-central Niger Delta, West Africa. Journal of Structural Geology. **24**: 847-859.
- Mitchum, R.M., Vail, P.R., and Sangree, J.B.** (1977a). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 7: Seismic stratigraphy interpretation procedures. In: C.E. Payton (Editor), Seismic

Stratigraphy: Application to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir 26, pp. 135-143.

Mitchum, R.M., Vail, P.R. and Sangree, J.B. (1977b). Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: Seismic stratigraphy interpretation procedures. In: C.E. Payton (Editor), Seismic Stratigraphy: Application to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir 26, pp. 117-133.

Morley, C. K.; Guerin, G. (1996). Comparison of gravity - driven deformation styles and behavior associated with mobile shales and salt tectonics. *Tectonics*. **15**: 1154 - 1170.

Reis, A.T., Gorini, C. & Mauffret, A. (in press). Implications of Salt-sediment Interactions for the Architecture of the Gulf of Lions deep-water sedimentary systems – Western Mediterranean Sea, Gulf of Lions Special Issue, *Marine and Petroleum Geology*.

Reis, A.T. (2001). La tectonique salifère et son influence sur l'architecture sédimentaire Quaternaire de la marge du Golfe du Lion - Méditerranée Occidentale. Ph. D. Thesis, Université Pierre&Marie Curie - Paris VI, Paris, 372 pp.

Silva, S. R. P.; Maciel, R. R.; Severino M. C. G. (1999). Cenozoic Tectonics of Amazon Mouth Basin. *Geo - Marine Letters*. **18**: 256 - 262.

Vendeville, B. C.; Cobbold, P. R. 1987. Glissements gravitaires synsedimentaires et failles normales listriques: modèles expérimentaux. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris*. 1313-1319

xcVendeville, B.; Cobbold, P. R. (1988). "How normal faulting and sedimentation interact to produce listric fault profiles and stratigraphy wedges". *Journal of Structural Geology*. **10**(7): 649-659.

Vendeville, B. (1991). Mechanisms generating normal fault curvature: a review illustrated by physical models. *Geological Society Special Publication*. **56**: 241-249.

Vendeville, B. C.; Jackson, M. P. A. (1992). The fall of diapirism during thin-skinned extension. *Marine and Petroleum Geology*. **9**: 354-372.

Vendeville, B. C.; Jackson, M. P. A. (1992). The rise of diapirism during thin-skinned extension. *Marine and Petroleum Geology*. **9**: 331-352.

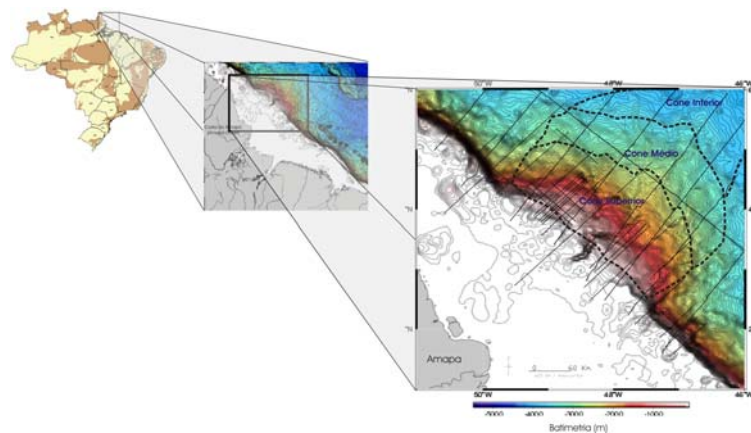


Figura 1. Mapa de localização da área de estudos apresentando as províncias fisiográficas do Cone do Amazonas e a localização das linha sísmicas utilizadas no trabalho.

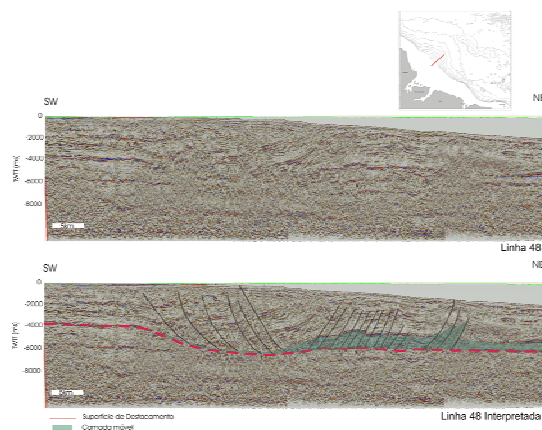


Figura 2. Linha sísmica interpretada onde é observada a estruturação e a superfície de destacamento no Compartimento Sudeste do Cone do Amazonas.

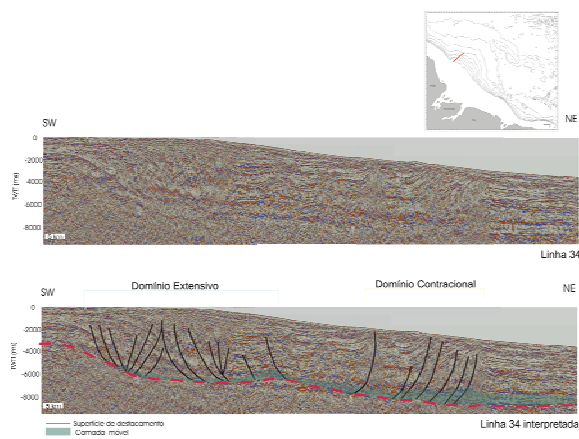


Figura 3. Linha sísmica interpretada onde é observada a estruturação e a superfície de destacamento no Compartimento Noroeste do Cone do Amazonas.

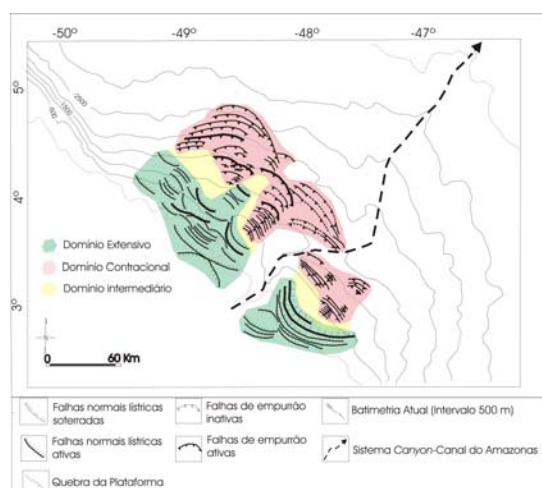


Figura 4. Mapa estrutural apresentando os domínios estruturais existentes no Cone do Amazonas.

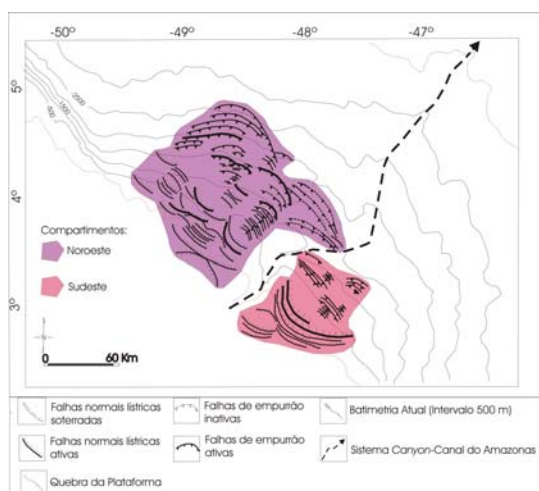


Figura 5. Mapa com os Compartimentos estruturais do Cone do Amazonas.

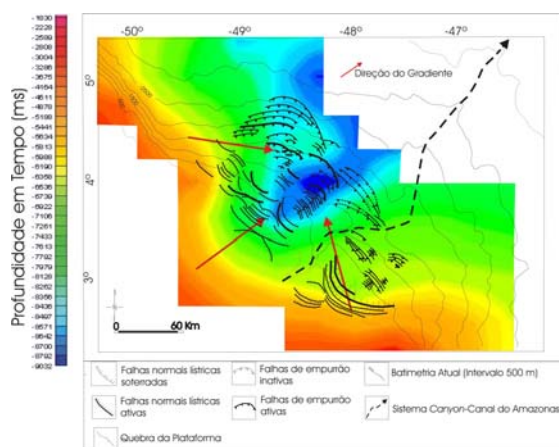


Figura 6. Mapa da morfologia da base de destacamento com as direções de gradiente e as estruturas observadas no Cone do Amazonas.

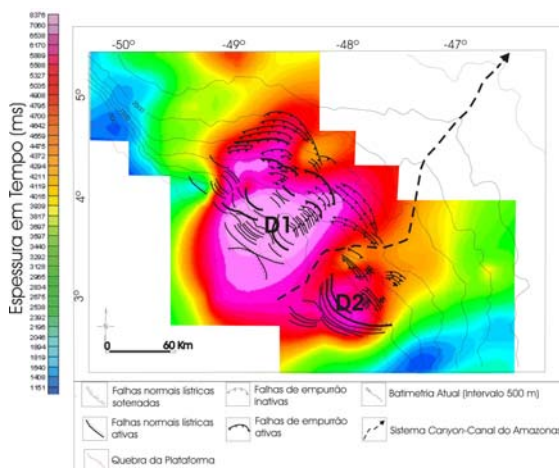


Figura 7. Mapa de isópacas Neomioceno-Recente do Cone do Amazonas. D1 depocentro principal e D2 depocentro secundário.