

Inversão de falhas: conceitos, importância nos sistemas petrolíferos e estudo de caso na região de Río Guanaco, Bacia Austral, Argentina

Fault inversion: concepts, importance for the hydrocarbon systems and a case study in the Río Guanaco region, Austral Basin, Argentina

Henrique Zerfass | Victor A. Ramos | Hugo J. Belotti | Matias C. Ghiglione | Maximiliano Naipauer

resumo

A inversão de falhas pode ser positiva, quando o resultado final é de soerguimento, e negativa, quando há subsidência. A inversão positiva tem importante papel para o sistema petrolífero, na formação de trapas e na criação de rotas de migração. A inversão é condicionada pela orientação da falha em relação ao novo campo de tensões e pelos parâmetros mecânicos da rocha de falha. Os tipos geométricos na inversão positiva são (i) falhas individuais reativadas, produzindo feições em arpão; (ii) falhas mestras e falhas conjugadas reativadas (falhas de rompimento da capa, falhas de atalho, estruturas *pop-up* e *push-up*) e (iii) falhas contracionais que interrompem falhas distensionais. Na inversão negativa, rampas de sistemas de empurrões são parcialmente reativadas como falhas distensionais. Exemplos de inversão positiva condicionando sistemas petrolíferos são encontrados nas bacias andinas austrais (Cuyana, Neuquén, San Jorge, Malvinas e Austral – Magallanes), em função de sua história distensiva durante a ruptura do Gondwana e a posterior compressão da tectônica andina. Campos de hidrocarbonetos

dessas bacias possuem trapas em anticlinais de propagação de falhas e *push-ups*. A propagação para cima de falhas em inversão também favoreceu a criação de rotas de migração. Apresenta-se um estudo de caso da região de Río Guanaco (Bacia Austral, Argentina), onde feições de inversão positiva são mostradas tanto em afloramento quanto na sísmica 2D. Em afloramento, verifica-se a ocorrência de falhas distensionais com inversão positiva seletiva na forma de deslizamento reverso ao longo da superfície principal ou de falhas conjugadas. Em sísmica, a maioria das falhas invertidas teve a contração distribuída em uma rede de falhas conjugadas, produzindo *push-ups*. A reativação por meio de falhas inversas conjugadas é a forma mais comum de inversão na área de estudo e ocorre pelo travamento friccional na superfície da falha principal, em função da competência da seção sin-rifte e do ângulo de mergulho alto (cerca de 65°). Quando a reativação ocorre na superfície principal, ela é atribuída tanto a ângulos de mergulho mais suaves como a coeficientes de fricção mais baixos na zona da falha.

Palavras-chave: inversão de falhas | Bacia Austral | Bacia de Magallanes | Andes Patagônicos | trapas estruturais | estruturas *push-up*

abstract

Fault inversion is defined as positive when the final result is uplift, or negative, when subsidence is observed. Positive inversion plays an important role for the hydrocarbon system, creating traps and migration paths. Inversion is triggered by the orientation of the pre-existing faults in relation to a new stress field and the mechanical parameters of the fault rock. The geometrical types in positive inversion are (i) single reactivated faults producing harpoon features, (ii) reactivated master and conjugate faults (hanging wall breakthrough faults, shortcut faults, pop-up and push-up structures) and (iii) new contractional faults cutting pre-existing extensional faults. In the case of negative inversion, early thrust faults are partially reactivated as extensional faults. Examples of the role played by positive inversion in hydrocarbon systems are found in the Southern Andean basins (Cuyana, Neuquén, San Jorge, Malvinas and Austral – Magallanes), due to their extensional history during the Gondwana break-up and the subsequent compression by the Andean tectonics. Hydrocarbon fields in such basins show structural traps defined by fault propagation anticlines and push-ups. Upward propagation of inverted faults also creates migration paths. A case study, where positive inversion features are shown both in from outcrops and 2D seismic charts, in the region of Río Guanaco (Austral Basin, Argentina) is presented. Selective positive inversion of extensional faults is observed in outcrops, either in the form of reverse landslides on the main fault surface or conjugate faults. Indeed, most of the inverted faults in the seismic line have contraction distributed through a conjugate fault network, producing push-ups. Reactivation through conjugate inverse faults is the form of inversion more frequent in the studied area, and it is thought to be related to frictional lockup of the main fault surface as a function of the competent sin-rift section as well as the high dip angle (around 65°). In the cases in which reactivation occurred on the main fault surface, it is attributed both to gentler dip angles as well as lower friction coefficient in the fault zone. (Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: *fault inversion | Austral Basin | Magallanes Basin | Patagonian Andes | structural traps | push-up structures*

introdução

Inversão de falhas é o processo pelo qual uma falha ou um sistema de falhas sofre reativação sob um novo regime de tensão. A inversão é positiva quando falhas distensionais são reativadas em regime compressional, e negativa quando falhas compressionalis são reativadas em regime distensional (Williams *et al.*, 1989). Esse processo é importante para o sistema petrolífero, especialmente a inversão positiva, pois a história termal das bacias é diretamente influenciada pelo soerguimento e exumação. Além disso, novas armadilhas estruturais se desenvolvem (Bonini *et al.*, 2012), e pode ocorrer a justaposição por falha entre rochas geradoras e reservatórios. Durante a reativação, novos segmentos de falhas podem se propagar seção acima, criando rotas de migração para reservatórios mais rasos.

Os conceitos fundamentais da inversão de falhas, bem como as condições de contorno para sua ocorrência são aqui discutidos. São apresentados os principais tipos geométricos de feições estruturais produzidas por inversão, em afloramento, sísmica e em modelos físicos e geométricos. Também são mostrados exemplos de bacias andinas austrais, onde o sistema petrolífero é influenciado pela inversão. Esse contexto geológico foi escolhido devido à sua história inicial de eventos distensionais, especialmente durante o Triássico e o Jurássico, condicionando a formação de seções rifte e a sua inversão positiva por meio dos esforços compressivos da tectônica andina, entre o Cretáceo Superior e o Neogeno.

Apresenta-se também um estudo de caso na Bacia Austral, onde falhas que sofreram inversão podem ser observadas em afloramentos da região de Río Guanaco, Província de Santa Cruz, Argentina. Adicionalmente, são mostrados exemplos em sísmica 2D em área adjacente.

conceitos fundamentais e condições de ocorrência

A inversão positiva ocorre quando o processo resulta em soerguimento, o que é o caso de falhas distensionais reativadas sob regime compressional; em contrapartida, a inversão negativa implica subsidência,

o que se verifica quando falhas contracionais são reativadas como distensionais, a qual é mais rara na natureza e altamente seletiva (Williams *et al.*, 1989).

A reativação de falhas sob um campo de tensão diferente daquele que as formou é um fenômeno peculiar, uma vez que a geometria da falha original é distinta daquela esperada para as falhas que seriam geradas no novo campo de tensão. A direção da falha original pode assumir ângulos variados em relação ao novo elipsoide de tensão. Falhas geradas sob campo de tensão compressivo mantêm com o eixo principal de tensão ângulos entre 22° e 32° (Bonini *et al.*, 2012, fig. 1a). Em contrapartida, quando há falhas pre-existentes geradas em campo de tensão distensional, seu ângulo será de aproximadamente 60° com o eixo principal sub-horizontal do novo campo de tensão compressional (fig. 1b), muito próximo dos valores críticos para o travamento friccional (Bonini *et al.*, 2012). Dessa forma, alguns parâmetros mecânicos na zona da falha devem atuar no sentido de favorecer a inversão (Sibson, 1985; Mescua e Giambiagi, 2012).

Os principais fatores que facilitam a inversão são a orientação da falha em relação ao novo campo de tensão e um coeficiente de fricção baixo (Sibson, 1985). Mescua e Giambiagi (2012) desenvolveram mais detalhadamente este tema e postularam que as propriedades mecânicas das rochas nas zonas de falhas são diferentes daquelas da rocha intacta, o que em alguns casos pode favorecer a reativação. Esses autores se basearam no critério de falhamento de Coulomb-Mohr para rochas intactas, ou seja:

$$T = c + \mu \sigma_N$$

onde $|T|$ é o módulo da tensão cisalhante no momento da ruptura, c é a coesão da rocha, μ o coeficiente de atrito interno, e σ_N a tensão normal à superfície da falha, o que define o envelope de ruptura. Mescua e Giambiagi (2012) consideraram que a zona de rocha de falha com largura finita obedece ao critério de ruptura:

$$T_0 = c_0 + \mu_0 \sigma_N$$

onde c_0 e μ_0 são, respectivamente, a coesão e o coeficiente de fricção interna da rocha de falha; nas situações em que $T_0 < T$, a reativação pode ocorrer em valores menores de tensão normal. Na modelagem computacional realizada pelos autores, o coeficiente de fricção interna se mostrou o parâmetro mais efetivo no sentido de diminuir os valores de tensão normal

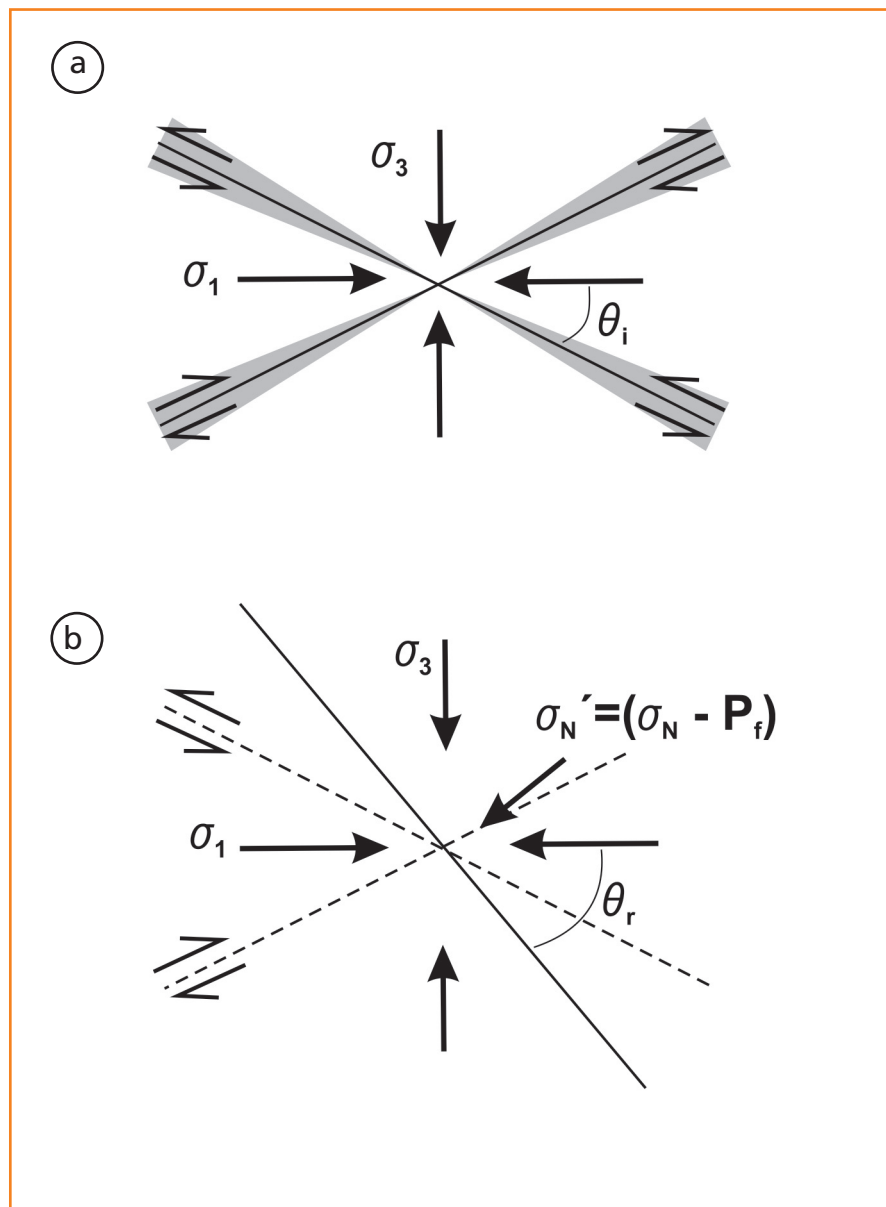


Figura 1 – (a) Atitudes possíveis para falhas formadas em rochas intactas sob campo de tensão compressional, sendo σ_2 paralelo ao plano da falha; θ_i é o ângulo mantido entre o eixo principal de tensão máximo e o plano da falha, definido como $\theta_i = 45^\circ - (\phi/2)$, sendo ϕ o ângulo de fricção interna. (b) tensão principal máxima horizontal em relação a um plano de falha preexistente, com mergulho mais alto; θ_r é o ângulo mantido entre o eixo principal de tensão máximo e a falha, σ'_N é a tensão normal efetiva, σ_N a tensão normal e P_f a pressão de fluido. Modificada de Bonini *et al.* (2012).

Figure 1 – (a) Possible orientations of faults in intact rocks under a compressional stress field, with σ_2 parallel to the fault plane; θ_i is the angle between the maximum principal stress axis and the plane of the fault formed, defined as $\theta_i = 45^\circ - (\phi/2)$; ϕ is the internal friction angle. (b) stress field with horizontal maximum principal stress axis relative to a pre-existing fault plane with a steeper dip angle; θ_r is the angle between the maximum principal stress axis and the fault, σ'_N is the effective normal tension, σ_N is the normal tension and P_f is the fluid pressure. Modified after Bonini *et al.* (2012).

necessária à reativação. A pressão de fluidos é outro fator importante para a reativação de uma falha, pois ela atua reduzindo a tensão normal necessária ao deslizamento (Eisenstadt e Sims, 2005; Bonini *et al.*, 2012; Mescua e Giambiagi, 2012). A rotação de falhas distensionais, levando a ângulos de mergulho mais suaves, também facilita a reativação sob um campo de tensão compressional (Bonini *et al.*, 2012).

As características reológicas das rochas encaixantes também têm importante papel para o fenômeno da inversão e o estilo das estruturas formadas. A modelagem física apresentada por Eisenstadt e Sims (2005) demonstrou que a reativação sob compressão de falhas distensionais é mais frequente ao se utilizarem materiais menos competentes, como argila; em contrapartida, nos ensaios em que foi utilizada areia para simular material mais competente, houve maior seletividade das falhas reativadas. Ao analisarem um caso real nos Apeninos, Pace e Calamita (2013) observaram que em seções sin-rifte compostas por rochas menos competentes, como folhelhos e evaporitos, a superfície da falha mestra distensional foi reativada; em contrapartida, quando estavam envolvidas rochas mais competentes, como carbonatos, falhas sintéticas e antitéticas absorveram melhor a contração do que a falha mestra.

Com base nestas relações, torna-se possível prever e modelar situações em que as falhas mestras e falhas sintéticas e antitéticas são passíveis de inversão. Também é possível avaliar situações em que o grau de inversão é mínimo e novas falhas se formam, como empurrões e falhas de atalho (Cooper *et al.*, 1989).

Na inversão negativa, as falhas normais da fase distensional são total ou parcialmente neoformadas (Williams *et al.*, 1989), o que pode ser explicado pela maior facilidade de geração de novas falhas deste tipo, mesmo sob tensões normais relativamente baixas, com menor aproveitamento das falhas de baixo ângulo da fase compressional. Para Ivins *et al.* (1990), o principal parâmetro que possibilita a reativação distensional de uma falha de baixo ângulo (cerca de 30°) é o coeficiente de fricção na zona da falha. Além disso, a coesão e a pressão de poros também são fatores importantes (Faccenna *et al.*, 1995).

padrões geométricos

Esta seção apresenta os principais tipos geométricos observados em sistemas de falhas

sob inversão. O conhecimento aqui compilado e organizado foi desenvolvido através de observações em seções sísmicas e afloramentos, e através de modelagem física e geométrica. Apesar de a modelagem física ser muito importante para se compreender as relações cinemáticas e geométricas, e muitos exemplos apresentados nesta seção sejam provenientes desta área do conhecimento, a organização aqui utilizada tem como objetivo auxiliar na interpretação de casos naturais, em afloramento e sísmica. Enquanto nos modelos físicos é possível diferenciar com segurança as estruturas geradas em cada regime de tensão, nos casos naturais tem-se somente o produto final da inversão. Dessa forma, enfatizou-se a relação geométrica entre a falha mestra e as estruturas associadas, mais do que as relações temporais.

inversão positiva

As estruturas desenvolvidas junto às falhas mestras originais são altos compostos pelas seções pré-rifte, sin-rifte e parte do pós-rifte. Se o relevo positivo da seção invertida chegar à superfície, uma inconformidade na seção pós-rifte pode se formar durante a inversão, e seções síncronas à inversão igualmente podem ocorrer nos flancos do alto estrutural. Os padrões geométricos são variáveis, especialmente quanto ao tipo de alto gerado e à presença ou não de falhas conjugadas. Os principais fatores condicionantes dos tipos geométricos são o estilo da superfície da falha mestra (planar, lístrica), a arquitetura estratigráfica da seção sin-rifte e as características reológicas das seções pré-rifte e sin-rifte (Mitra, 1993; McClay, 1995; Burliga *et al.*, 2010; Pace e Calamita, 2013).

As combinações de geometrias são muitas, mas é possível separar alguns padrões fundamentais, que ocorrem com variações particulares. São eles:

- (i) falhas simples reativadas;
- (ii) sistemas com reativação de falhas mestras e falhas conjugadas associadas;
- (iii) novas falhas contracionais que interrompem as falhas distensionais.

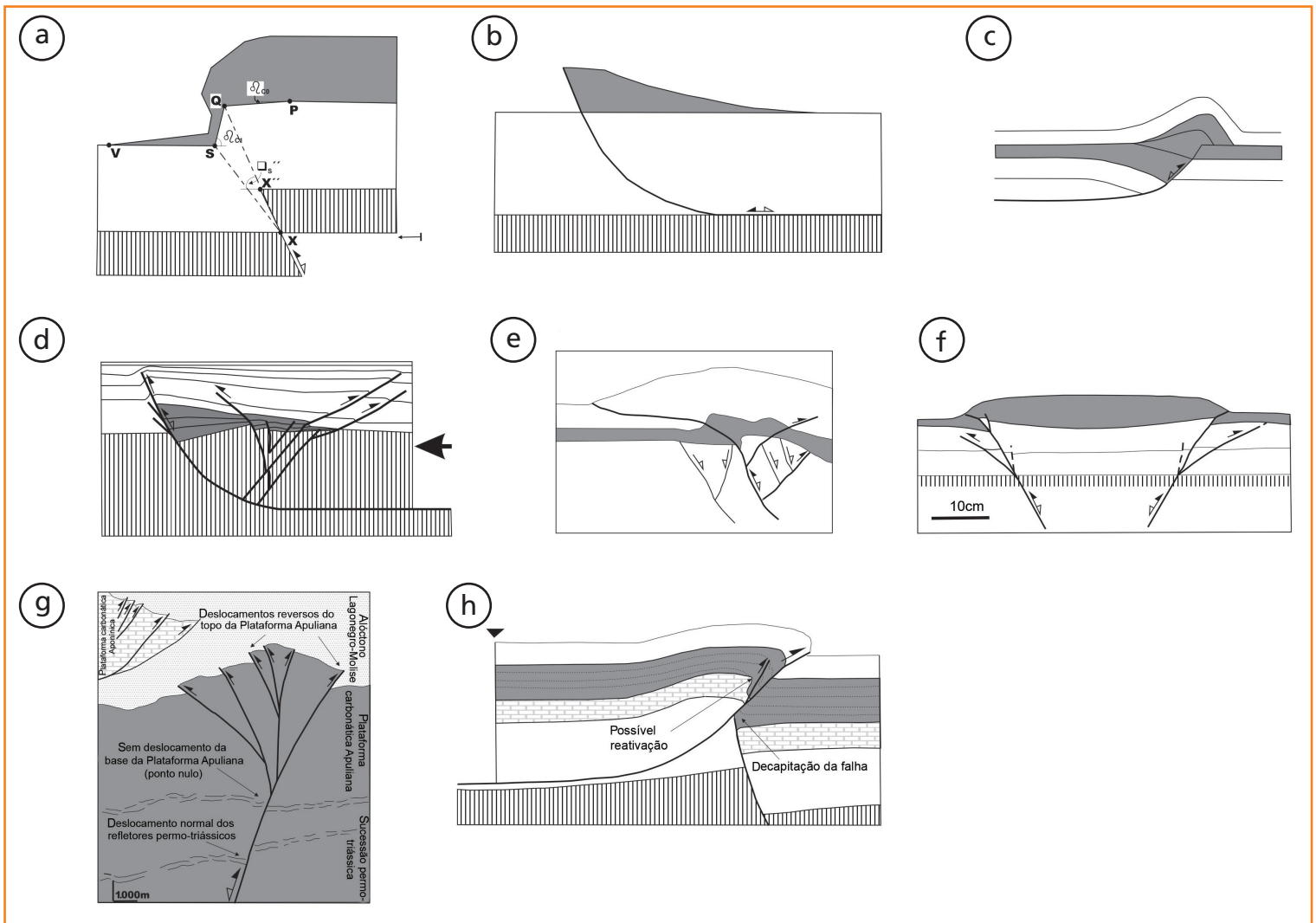


Figura 2 – Principais padrões geométricos descritos para falhas com inversão positiva. A seção sin-rifte é indicada na cor cinza; (a) Modelo geométrico de inversão parcial de falha planar simples, em que uma dobra de propagação de falha é rompida pela falha distensional e invertida, produzindo dobra de propagação de falha contracional. A, B: modificado de Mitra (1993); (b) modelo geométrico de dobra por flexão de falha lístrica. A, B: modificado de Mitra (1993); (c) desenho esquemático de modelo de falha lístrica com superfície de descolamento no topo do bloco alto e anticlinal associado. C: modificado de Hayward e Graham (1989); (d) modelo sinóptico, obtido a partir de modelagem física, de falha lístrica simples, mostrando falhas subordinadas reversas. D: modificado de McClay (1995); (e) resultado de modelagem física que destaca falhas reversas neoformadas (falhas de rompimento da capa), acomodando a contração em conjunto com a falha mestra distensional invertida; falhas distensionais fósseis são também observadas. E: modificado de Likermann et al. (2013); (f) resultado de modelagem física que mostra graben invertido e falhas de atalho. F: modificado de Koopman et al. (1987); (g) esboço interpretado de seção sísmica convertida de tempo em profundidade da estrutura de inversão tipo *push-up* de Monte Taburno, centro-sul dos Apeninos. G: modificado de Pace e Calamita (2013); (h) croqui de falha distensional jurássica cortada por falha de empurrão do Neógeno, baseado em exemplo dos Apeninos setentrionais. H: modificado de Scisciani (2009).

Figure 2 – Main geometric patterns described for faults with positive inversion. The sin-rift section is indicated in gray; (a) Geometric model of partial inversion of a planar single fault, in which a fold propagation fault is cut by the extensional fault and inverted, producing a contractional fault propagation fold. A, B: modified after Mitra (1993); (b) geometric model of listric fault bend fold. A, B: modified after Mitra (1993); (c) schematic drawing of the model of listric fault with a detachment surface on the top of the footwall and a related anticline. C: modified after Hayward and Graham (1989); (d) synoptic model of simple listric fault, obtained from physical modelling, showing subordinate reverse faults. D: modified after McClay (1995); (e) result of physical modelling highlighting newly formed reverse faults (hanging wall breakthrough faults) accommodating contraction together with the inverted extensional master fault; fossil extensional faults are also observable. E: modified after Likermann et al. (2013); (f) result of physical modelling showing an inverted graben and shortcut faults. F: modified after Koopman et al. (1987); (g) sketch from interpretation of time-to-depth converted seismic section displaying Monte Taburno *push-up* structure, South-central Apennines. G: modified after Pace and Calamita (2013); (h) sketch showing Jurassic extensional fault cut by a Neogene thrust, based on an example of the Northern Apennines. H: modified after Scisciani (2009).

falhas simples reativadas

Quando ocorre a reativação de uma falha distensional simples, toda a seção sin-rifte é soerguida, formando um anticlinal, genericamente denominado de estrutura em arpão (McClay, 1995). No caso das falhas planares, essa estrutura consiste em uma dobra de propagação da falha contracional envolvendo a seção pré-rifte e sin-rifte (fig. 2a), a qual se origina da inversão de uma dobra de propagação da falha distensional desenvolvida no bloco baixo; a dobra pode estar rompida pelo avanço da falha mestra nos casos avançados de inversão (Mitra, 1993).

Falhas lítricas com superfície de descolamento basal produzem dobras de flexão de falha, inicialmente distensionais, com seção de crescimento no bloco baixo (*rollover*); durante a contração, os horizontes dobrados são inicialmente restaurados à posição horizontal e, com o avanço do processo, forma-se uma dobra de flexão de falha contracional (Mitra, 1993) (fig. 2b). Dobras desse tipo também podem ocorrer devido à horizontalização da falha através de uma superfície de descolamento no bloco alto (Hayward e Graham, 1989; Pace e Calamita, 2013) (fig. 2c).

sistemas com reativação de falhas mestras e falhas subordinadas (sintéticas e antitéticas)

Na natureza, as falhas sintéticas e antitéticas são feições que ocorrem com frequência nos blocos baixos sob campo de tensão distensional (McClay e Scott, 1991; Peacock e Sanderson, 1991; Withjack *et al.*, 1995; Willsey *et al.*, 2002). Estas estruturas são também verificadas na fase distensional de modelos físicos de inversão (Koopman *et al.*, 1987; McClay, 1995; Eisenstadt e Sims, 2005; Konstantinovskaya *et al.*, 2007; Burliga *et al.*, 2010; Bonini *et al.*, 2012). A depender do caso, podem ocorrer falhas conjugadas sintéticas e antitéticas em iguais proporções, ou um dos tipos predominar. Uma vez que a seção presente no bloco baixo é aquela que mais sofre deformação, devido ao efeito de anteparo promovido pelo bloco alto, as falhas sintéticas e antitéticas preexistentes atuam como descontinuidades, sendo frequentemente reativadas. Os modelos físicos com falhas lítricas demonstram que a maior concentração das falhas subordinadas distensionais, em especial as antitéticas, ocorre na região da flexão dessas falhas (e.g. Mitra, 1993; McClay, 1995; Eisenstadt e Sims, 1995; Konstantinovskaya *et al.*, 2007). As falhas subordinadas podem ser reativadas durante

a compressão, juntamente com a falha mestra, gerando um alto estrutural, tipo *pop-up* (fig. 2d).

Sendo o bloco baixo uma região com alta magnitude de deformação, ali também ocorrem falhas contracionais neoformadas. Estas estruturas podem se movimentar de forma conjugada com a falha mestra durante a inversão, com vergência contrária. Entre elas estão as falhas reversas de baixo ângulo, descritas nos modelos físicos de Koopman *et al.* (1987) e de Likerman *et al.* (2013), e as falhas de rompimento da capa, estas aproximadamente ortogonais à falha mestra (Bonini *et al.*, 2012; Likerman *et al.*, 2013) (fig. 2e). Da falha mestra também podem se originar falhas que se propagam no sentido do bloco alto, denominadas falhas de atalho, que são sintéticas à falha principal, embora com ângulo de mergulho mais baixo, e possuem movimento reverso com movimentação sintética à falha mestra reativada e mesmo sentido de mergulho, com inclinação mais suave (fig. 2f). Seu surgimento tem sido relacionado com o fato de a falha mestra possuir ângulo de mergulho maior do que o ângulo crítico para sofrer reativação (Cooper *et al.*, 1989; Hayward e Graham, 1989; McClay, 1989). Sua ocorrência é descrita em modelos físicos (Koopman *et al.*, 1987; McClay, 1989; 1995) e em casos naturais (Hayward e Graham, 1989).

Há ainda sistemas reativados em que as falhas conjugadas da capa acomodam a maior parte do movimento reverso, com pouco ou nenhum deslizamento segundo a falha mestra. A geometria produzida é do tipo palmeira ou *push-up*, descrita por Pace e Calamita (2013) para casos naturais (fig. 2g). Os autores explicam o surgimento desta feição por razões reológicas, quando a seção sin-rifte é composta por rochas competentes.

falhas contracionais que interrompem falhas distensionais

As falhas distensionais, mesmo quando não reativadas, são importantes descontinuidades mecânicas, induzindo concentrações de tensão e efeitos de anteparo, que podem produzir novos empurrões (Bonini *et al.*, 2012). Estes empurrões são as falhas mais importantes em alguns sistemas de inversão, terminando por cortar a falha distensional original e suas conjugadas.

Bons exemplos são observados nos Apeninos, onde os campos de tensão distensional e compressional não são coaxiais, o que dificulta a reativação simples das falhas normais (Scisciani, 2009). Nesse caso, novos empurrões cortam as falhas normais

durante a contração (fig. 2h), sendo que estas tiveram participação no processo de inversão ao gerarem as anisotropias mecânicas que influenciaram a localização e o espaçamento das falhas de empurrão; além disso, segmentos de suas superfícies ocasionalmente serviram como atalhos para a propagação dos empurrões (Scisciani, 2009).

inversão negativa

A movimentação normal ao longo da superfície de uma falha contracional tende a ocorrer apenas em determinados segmentos, que funcionam como pontes entre as falhas normais neoformadas.

Os Apeninos apresentam exemplos de inversão negativa, pois este orógeno vem sofrendo colapso distensional desde o Plio-Pleistoceno. A

reativação normal de empurrões ocorre em especial quando estes possuem uma inclinação alta para esta família de estruturas (35° ou mais); em contrapartida, nas situações em que os ângulos são mais suaves, novas falhas distensionais são formadas (Faccenna *et al.*, 1995).

Williams *et al.* (1989) apresentaram um modelo idealizado de inversão negativa de sistemas de empurrões, em que duas rampas foram reativadas (empurrões 1 e 3 na fig. 3), apresentando rejeito distensional, enquanto as rampas inferior e superior do empurrão 2 não foram reativadas, mantendo o rejeito compressional original. O deslocamento ao longo das superfícies de descolamento horizontais, por sua vez, é considerado neutro em relação aos marcadores estratigráficos.

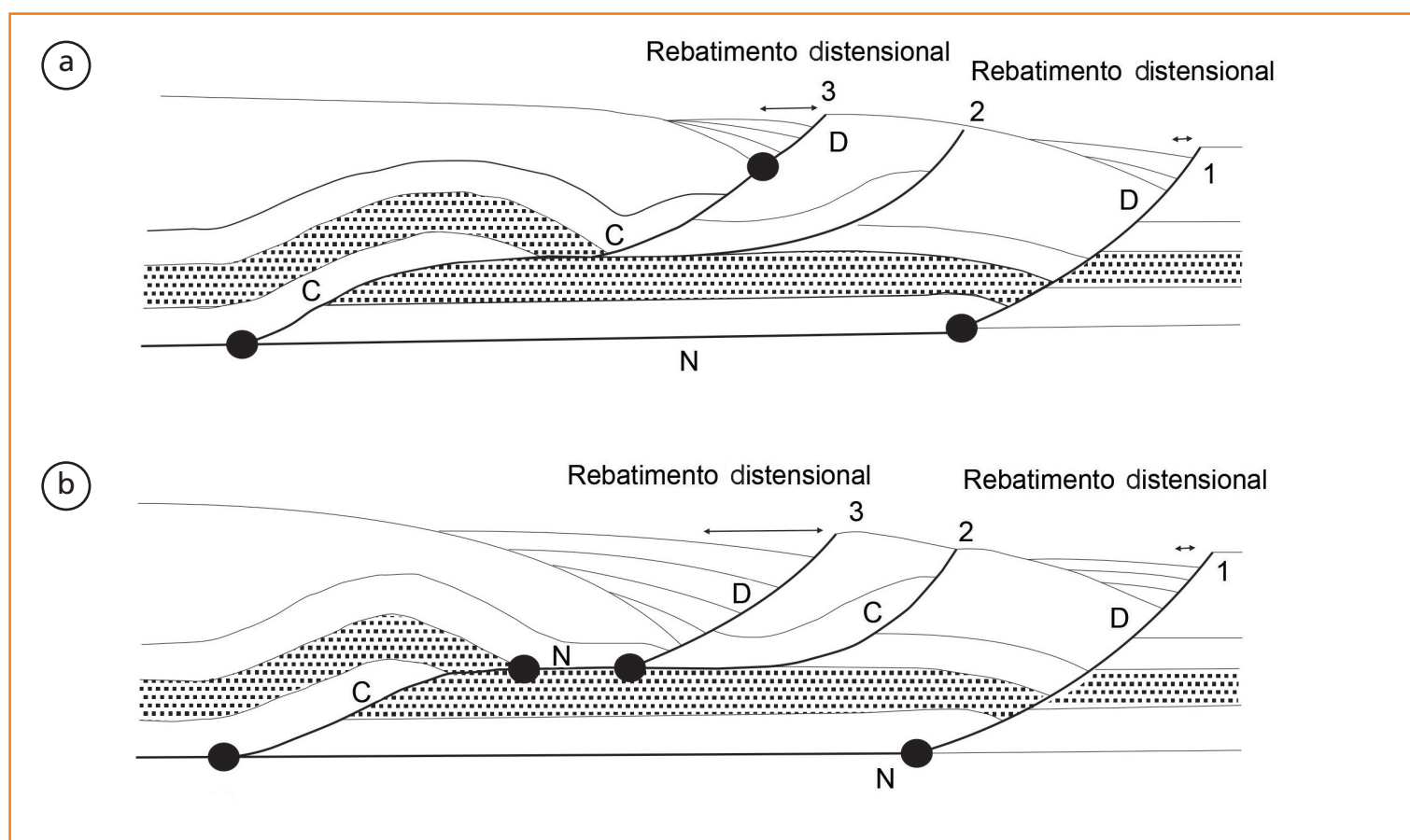


Figura 3 - Modelo de inversão negativa parcial. (a) As falhas de empurrão 1 e 3 são reativadas de forma distensional na sua parte mais rasa. (b) a falha 3 tem ampliado o segmento com reativação distensional. C = segmento com movimentação contracional, D = movimentação distensional, N = movimentação neutra; os círculos indicam os pontos de mudança de movimento aparente. Modificado de Williams *et al.* (1989).

Figure 3 - Model of partial negative inversion. (a) Thrusts 1 and 3 are extensionally reactivated in the shallower part. (b) the segment with extensional reactivation of fault 3 is lengthened. C = segment with contractional displacement, D = extensional displacement, N = neutral displacement; the circles indicate points of apparent slip changes. Modified after Williams *et al.* (1989).

inversão de falhas e sistema petrolífero: exemplos das bacias andinas austrais

A margem oeste da América do Sul possui bacias distensionais do Triássico e Jurássico, que foram invertidas durante a Orogênese Andina, no Cretáceo Superior e Cenozoico (Uliana *et al.*, 1995). Várias bacias registram ocorrências econômicas de

hidrocarbonetos, e os processos de inversão de falhas influenciaram a estruturação de alguns campos. A distensão na margem sudoeste do Gondwana, em especial no Jurássico, tem sido associada ao início da fragmentação deste supercontinente e ao regime de subducção com *roll-back* negativo da placa do Paleopacífico (Uliana e Biddle, 1988; Ramos, 2010). Para as bacias de idade triássica, também é considerada a sua relação com as fases finais da orogênese Gondwanides (Uliana e Biddle, 1988; Uliana e Legarreta, 1993; Veevers e Powell, 1994; Zerfass *et al.*, 2004). A figura 4 mostra a localização das bacias apresentadas a seguir.

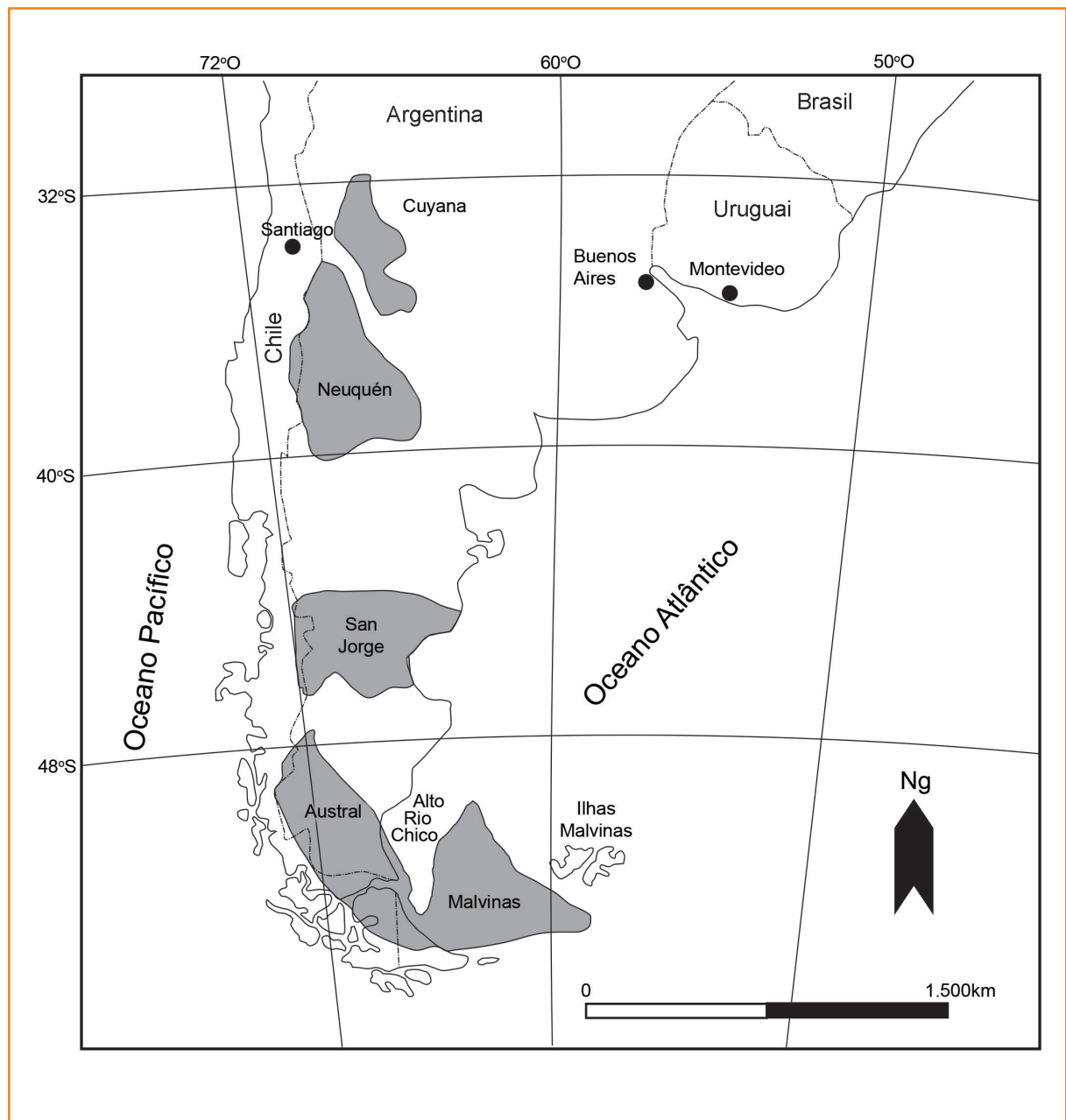


Figura 4
Mapa de localização das bacias andinas austrais referidas no texto. Modificado de Kozlowski *et al.* (2005).

Figure 4
Location map of Southern Andean basins referred to in the text. Modified after Kozlowski *et al.* (2005).

A Bacia Cuyana (províncias de Mendoza e San Juan, Argentina) está estruturada numa série de depocentros tipo *graben* e meio-*graben* com direção geral NO-SE (Dellapé e Hegedus, 1995). O preenchimento desses depocentros é registrado em duas sequências sin-rifte, (i) Río Mendoza – Cerro de las Cabras (Triássico Médio) e (ii) Potrerillos – Cacheuta – Río Blanco (Triássico Superior) (Zerfass *et al.*, 2004). O principal gerador da bacia são os depósitos lacustres da sequência sin-rifte II (Formação Cacheuta). A deposição de uma espessa seção pós-rifte, com idades do Jurássico ao Paleogeno, contribuiu para a maturação da matéria orgânica; arenitos e conglomerados fluviais do topo da sequência sin-rifte II e da seção pós-rifte são os principais reservatórios (Dellapé e Hegedus, 1995; Zencich *et al.*, 2005). O orógeno andino na província de Mendoza é caracterizado como *thick-skinned*, com vergência para leste, o qual interagiu de forma complexa com os riftes triássicos, produzindo uma faixa de empurrões,

zonas transtrativas e inversão de falhas distensionais (Zencich *et al.*, 2005).

Dellapé e Hegedus (1995) mostram exemplos interpretados de seções sísmicas, onde as unidades depositadas na fase distensional foram soerguidas no Neogeno, formando anticlinais. O soerguimento foi controlado pela reativação reversa da falha mestra, bem como de falhas antitéticas e sintéticas secundárias, formando estruturas tipo *push-up* (fig. 5). A inversão das falhas normais produziu altos estruturais, que são armadilhas importantes, além de colocar em contato gerador e reservatório, como nos campos de Tupungato-Piedras Coloradas e La Ventana-Río Tunuyan, entre outros (Dellapé e Hegedus, 1995).

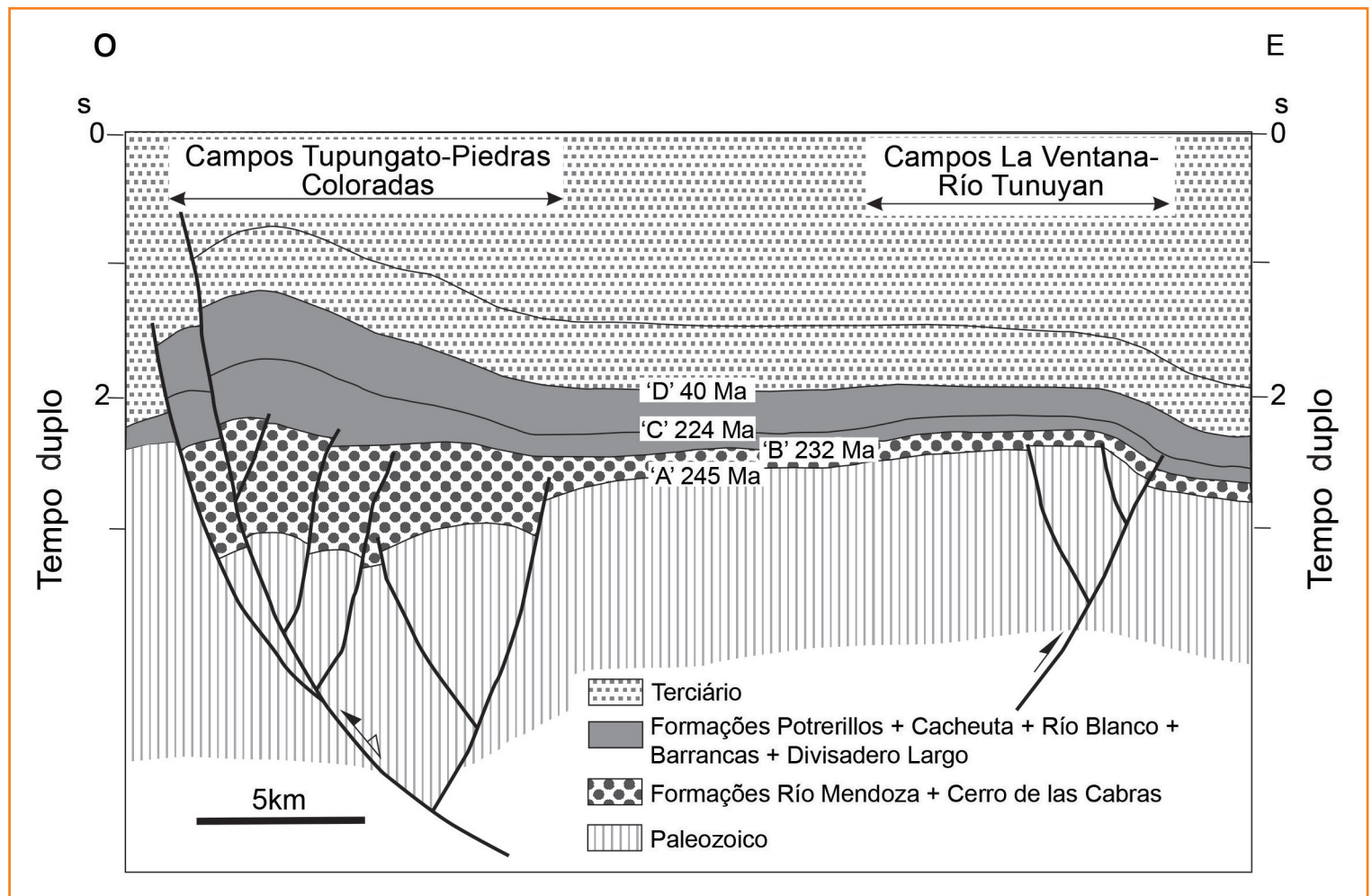
O trapecamento do Campo Barrancas é devido a um anticlinal de propagação de uma falha distensional invertida no Mioceno, tendo como principal nível produtor os arenitos e conglomerados fluviais da Formação Barrancas, do Jurássico Superior, selados por derrames basálticos da

Figura 5

Seção transversal da Bacia Cuyana baseada em interpretação sísmica, mostrando a estrutura dos campos de Tupungato – Piedras Coloradas e La Ventana – Río Tunuyan, onde se verifica a inversão dos depocentros triássicos. Modificada de Dellapé e Hegedus (1995).

Figure 5

Dip cross-section of the Cuyana Basin, based on seismic interpretation, showing the structure of Tupungato – Piedras Coloradas and La Ventana – Río Tunuyan fields, where inversion of Triassic depocenters is noticeable. Modified after Dellapé and Hegedus (1995).



Formação Punta de las Bardas (Zencich *et al.*, 2005). Esses autores ainda mencionam as estruturas de Tupungato–Refugio e de La Piona como exemplos de inversão; esta última é bastante complexa, devido à proximidade com a frente de avanço orogênico, onde se observa a interação das falhas mestras distensionais e falhas antitéticas, assim como empurrões neoformados.

Na Bacia de Neuquén também há exemplos de depocentros tipo meio-*graben* de idade triássica e jurássica (fase Pré-Cuyo), invertidos em diversos eventos compressionais ligados à tectônica andina, principalmente no Jurássico Superior e Cretáceo, com reativações menos intensas no Mioceno (Ramos *et al.*, 2004; Arregui *et al.*, 2011). Alguns campos, como Cerro Bandera, Loma Negra e Sierra Barrosa–Aguada Toledo, estão estruturados como anticlinais formados pela inversão de falhas mestras de hemi-grábens invertidos (Uliana e Legarreta, 1993; Limeres *et al.*, 2005).

Os principais geradores foram depositados na fase de subsidência termal, que se estendeu do Jurássico Médio ao Cretáceo Superior, nos momentos de ingressão marinha a partir do Oceano Pacífico (formações Los Molles, Vaca Muerta e Agrio) (Uliana e Legarreta, 1993; Vergani *et al.*, 2011). Os reservatórios mais importantes se relacionam com intervalos regressivos, igualmente da fase de

subsidência termal; rochas de origem continental da fase de antepaís, do Cretáceo Superior (Grupo Neuquén), também são reservatórios a serem considerados (Vergani *et al.*, 2011).

Na área da Dorsal de Huincul é possível observar a complexidade dos processos de inversão tectônica. Essa feição estrutural possui direção leste-oeste, sendo ortogonal à margem andina. De acordo com Mosquera *et al.* (2011), o traço tectônico foi originado pela colisão da microplaca da Patagônia, ocorrida no Paleozoico Superior. Segundo os autores, a Dorsal passou por uma fase de inversão negativa (Triássico Superior-Jurássico Inferior), condicionando alguns dos hemigrábens da fase Pré-Cuyo. A inversão positiva ocorreu devido à tensão intraplaca produzida pela convergência andina, a qual teve início no intervalo entre o fim da deposição do grupo Pré-Cuyo e a deposição da Formação Los Molles (Pliensbachiano), e se estendeu até o Mioceno (Mosquera e Ramos, 2006). Uma estrutura de inversão significativa na Dorsal de Huincul é o anticlinal Aguada Toledo – Meseta Barrosa, que consiste em uma dobra de propagação de falha com eixo leste-oeste, com 40km² de superfície, envolvendo os depósitos de sin-rifte (Pré-Cuyo), com um levantamento de 700m, e de pós-rifte, com reservatórios em três níveis, descritos por Pángaro *et al.* (2005), como segue.

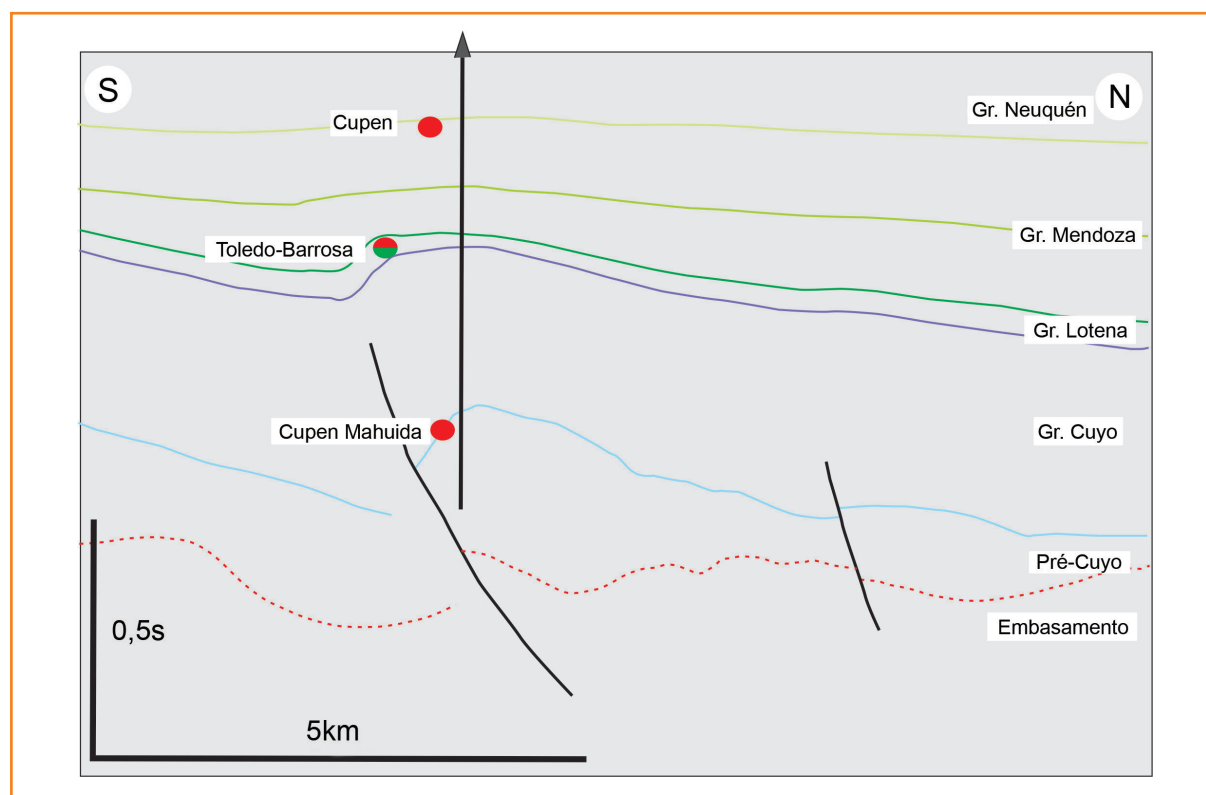


Figura 6
Interpretação da estrutura Aguada Toledo – Meseta Barrosa, baseada em sísmica. Modificada de Pángaro *et al.* (2005).

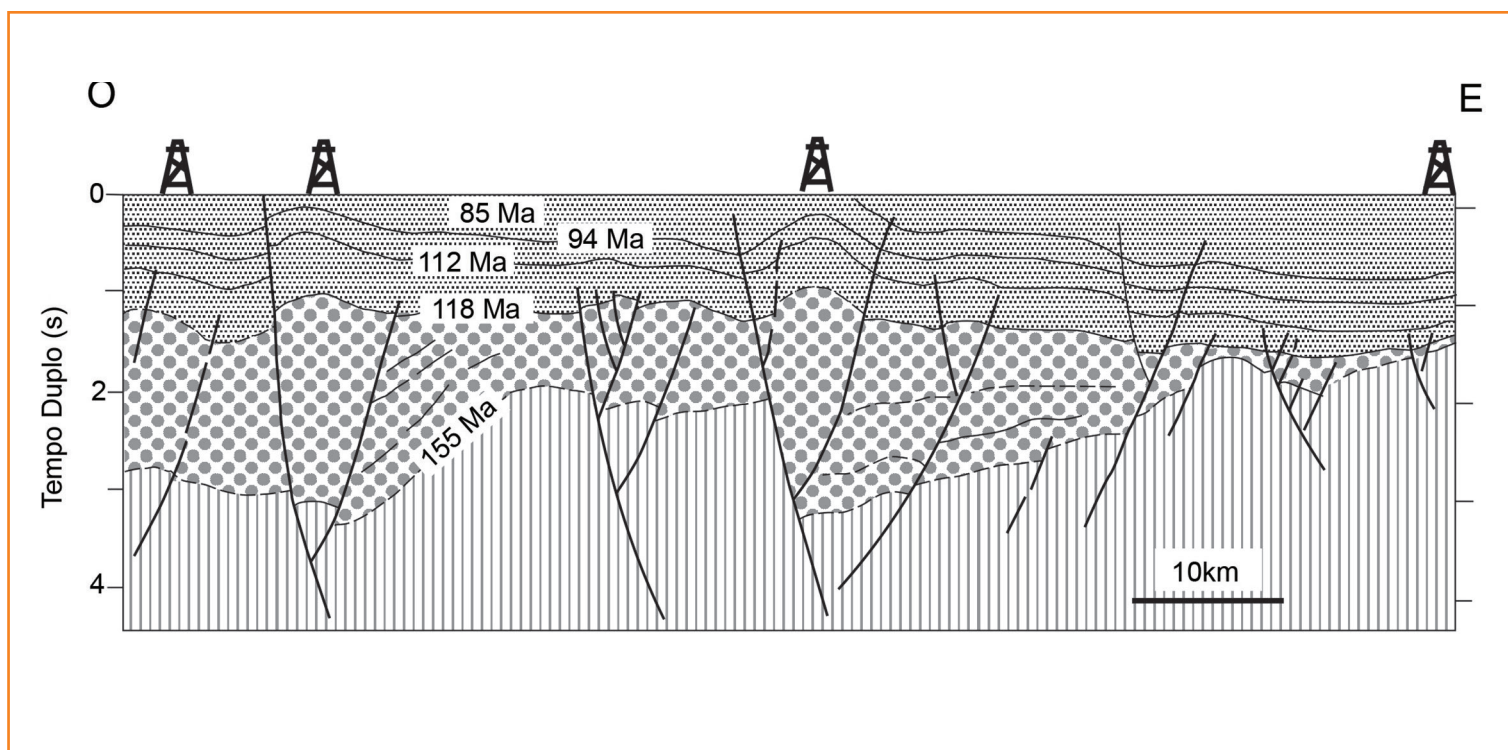
Figure 6
Interpretation of the Aguada Toledo – Meseta Barrosa structure, based on seismic charts. Modified after Pángaro *et al.* (2005).

O nível produtivo mais profundo é o Campo Cupen Mahuida (fig. 6), que possui reserva de 65Mboe de gás seco, com reservatório vulcano-clástico do Grupo Pré-Cuyo atingindo mais de 1.500m de espessura. A rocha-fonte são folhelhos da Formação Los Molles, e o selo são níveis piroclásticos de baixa permeabilidade (menos de 0,1mD) do próprio Grupo Pré-Cuyo. Um sistema de falhas ortogonal de origem transtrativa, peculiar à evolução da Dorsal, é considerado importante para a migração vertical descendente que alimentou esse reservatório. O nível intermediário (Campo Agua-da Toledo–Meseta Barrosa) (fig. 6) é produtor de óleo e gás, com reserva recuperável original de 6.700.000m³ de óleo e 17.000.000.000m³ de gás. O reservatório é composto por rochas siliciclásticas do Grupo Lotena, do Jurássico Superior. O petróleo tem sido vinculado à Formação Vaca Muerta como rocha-geradora, e o grande volume de gás permite postular sua origem na Formação Los Molles. O reservatório superior é o campo Cupen, produtor de gás com importância secundária (fig. 6), cujo reservatório é siliciclástico (Formação Centenário, Cretáceo Inferior), e o selo é formado por paleossolos. Este campo é interpretado como produto de remobilização da coroa de gás do campo Aguada Toledo–Meseta Barrosa através das falhas transtrativas mencionadas.

A Bacia de San Jorge (ou do Golfo San Jorge) contribui com 47% dos hidrocarbonetos líquidos da Argentina e se localiza em ambiente intracratônico (Paredes *et al.*, 2013), com processos de contração e inversão ocorridos devido à tensão intraplaca originária da orogênese andina. A bacia passou por episódios distensionais alternados com fases de subsidência termal entre o Triássico e o Cretáceo, no período compreendido entre a fragmentação do Gondwana e o início da geração de crosta oceânica no Atlântico Sul (Fitzgerald *et al.*, 1990). Um novo período de distensão ocorreu no Cretáceo Superior e Paleogeno, ligado ou à transtração gerada por falhas transformantes de origem oceânica, ou a uma fase distensional na região andina (Fitzgerald *et al.*, 1990; Condat, 1995). Os hemigrábens formados na primeira fase de subsidência mecânica foram preenchidos inicialmente por rochas vulcânicas, recobertas por depósitos lacustres que constituem um dos geradores (Condat, 2005; Paredes *et al.*, 2013). No início da fase termal (Cretáceo Inferior), houve a deposição de outros geradores lacustres (Formação Poço D-129) e reservatórios fluviais. No final desta fase (Cretáceo Superior e Paleoceno), depositaram-se os reservatórios mais importantes, também de origem fluvial (formações Mina del Carmen, Comodoro Rivadavia e El Trebol); a distensão tardia produziu as principais rotas de migração (Fitzgerald *et al.*, 1990; Peroni *et al.*, 1995; Condat, 2005).

Figura 7
Seção baseada em interpretação sísmica das estruturas de inversão próximo à área de Río Deseado – Cerro Bayo, faixa de dobramentos San Bernardo, Bacia de San Jorge. Modificada de Peroni *et al.* (1995).

Figure 7
Cross section based on seismic interpretation of the inversion structures near Río Deseado – Cerro Bayo area, San Bernardo fold and thrust belt, San Jorge Basin. Modified after Peroni *et al.* (1995).



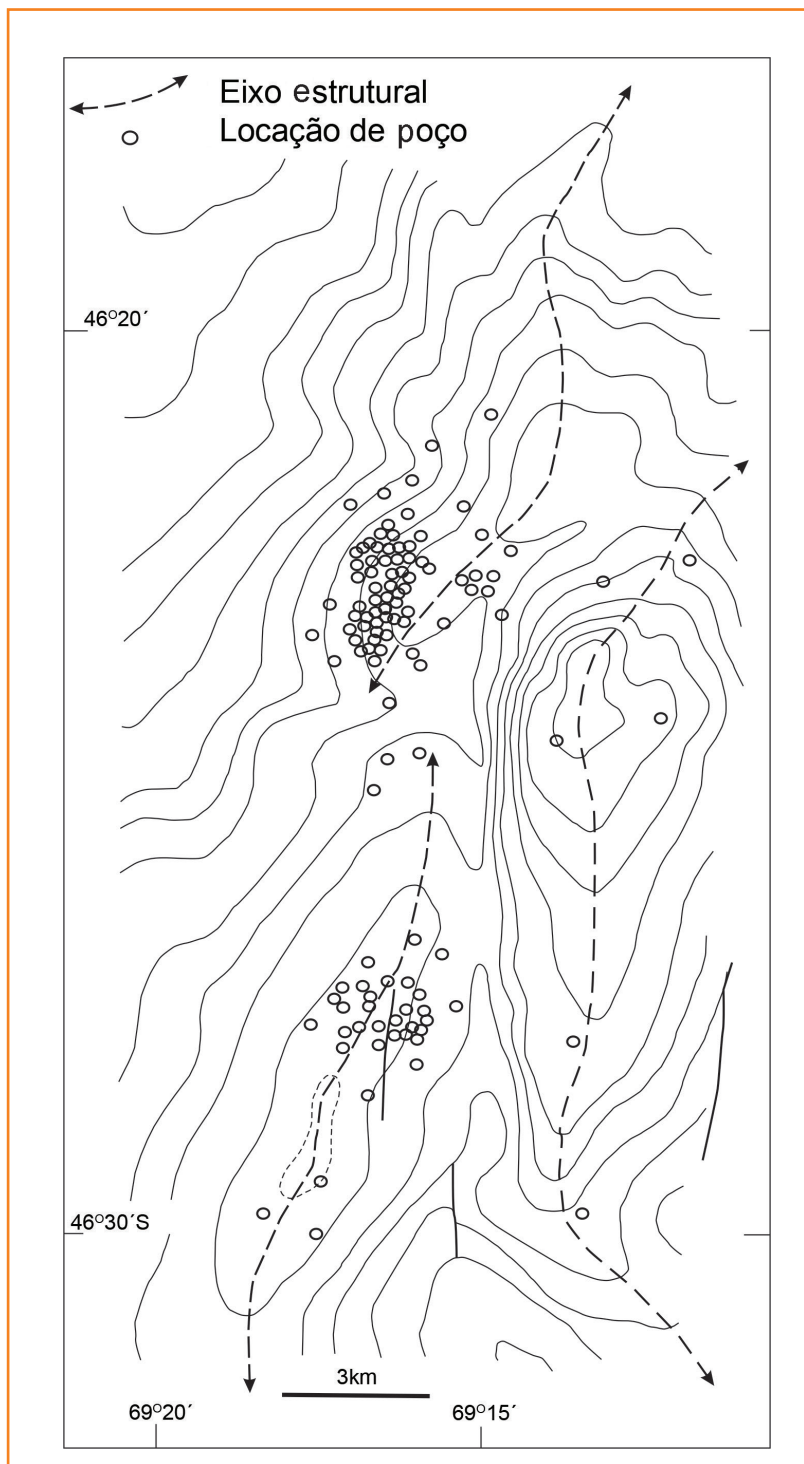


Figura 8 – Mapa de contorno de geometria estrutural mostrando concentração de anticlinais com ocorrência de óleo próximo a Cerro Guadal – Loma del Cuy, faixa de dobramentos San Bernardo, Bacia de San Jorge. Modificado de Peroni et al. (1995).

Figure 8 – Structural geometry contour map displaying a cluster of anticlines with oil occurrences near Cerro Guadal – Loma del Cuy, San Bernardo fold and thrust belt, San Jorge Basin. Modified after Peroni et al. (1995).

O regime compressivo na bacia se instalou no Neogeno e as estruturas mais evidentes estão na faixa de dobramentos San Bernardo, incluindo falhas reversas de alto ângulo e dobras associadas, produto de reativação de falhas normais com embasamento envolvido (Fitzgerald et al., 1990; Peroni et al., 1995; Paredes et al., 2013). Essa faixa de dobramentos está orientada na direção NNO-SSE, com mais de 600km de comprimento e 100km de largura (Peroni et al., 1995). O estilo estrutural desta província pode ser descrito como de falhas de embasamento que se ramificam no sentido do topo da seção, ao cortarem as unidades mesozoicas e cenozoicas; o grau de inversão é moderado, sendo possível observar rejeitos reversos nos níveis mais rasos, ao passo que em maiores profundidades os rejeitos se mantêm normais (Peroni et al., 1995). A inversão produziu dobras de propagação de falha segundo as falhas mestras distensionais e *pop-ups* observáveis em escala sísmica (Peroni et al., 1995, fig. 7). Os autores mencionam que os anticlinais de propagação de falha promovem o fechamento dos campos da região em zonas mais rasas (fig. 8), e falhas distensionais invertidas limitam os flancos de alguns campos. O principal período de migração ocorreu antes da inversão, e as trapas primárias estão provavelmente relacionadas às estruturas distensionais; a inversão ocorrida no Neogeno promoveu a acomodação dos hidrocarbonetos (Peroni et al., 1995).

estudo de caso: inversão de falhas na região de Río Guanaco, Bacia Austral

Denominada Bacia Austral na Argentina e Magallanes no Chile, esta é a bacia mais austral do antepaís andino, juntamente com a Bacia das Malvinas. As duas bacias encontram-se separadas pelo alto de Río Chico, um prolongamento do embasamento da Patagônia na plataforma continental atlântica (fig. 4). A Bacia Austral experimentou uma fase distensional no Jurássico e Cretáceo Inferior, de forma concomitante ao início da fragmentação do Gondwana

sul-ocidental, quando se formaram riftes continentais no antepaís e uma bacia de pós-arco (Rocas Verdes), com desenvolvimento de crosta oceânica incipiente (Dalziel *et al.*, 1974; Uliana e Biddle, 1988). Os riftes são preenchidos principalmente por rochas vulcânicas, estratigraficamente descritas como Complexo El Quemado (Galeazzi, 1998; Kraemer, 1998; Giacosa *et al.*, 2012; Zahid e Barbeau, 2010). Uma transgressão marinha a partir do Paleopacífico ocorreu na transição entre as fases de subsidência mecânica e termal (Jurássico tardio – Cretáceo inicial), condicionando a deposição do principal reservatório, os arenitos costeiros da Formação Springhill (Riccardi, 1971; Galeazzi, 1998; Rodríguez *et al.*, 2008; Schwarz *et al.*, 2011), e do principal gerador, os lutitos plataformais sobrepostos da Formação Río Mayer (Arbe, 2002; Rodríguez *et al.*, 2008; Ricchiano, 2014).

Essa fase da evolução foi comum às bacias Austral e das Malvinas, de modo que as unidades estratigráficas de ambas as bacias são as mesmas, inclusive com os mesmos nomes. A distinção do empilhamento estratigráfico dessas bacias passou a ocorrer a partir do Cretáceo Superior, em virtude do diacronismo da tectônica compressional de origem andina.

Na borda oeste da Bacia Austral, o regime tectônico tornou-se compressional próximo ao limite Cretáceo Inferior – Superior, quando a geração de crosta oceânica no Atlântico Sul impeliu a placa sul-americana para oeste. O principal registro sedimentar da primeira fase compressional é a Formação Cerro Toro (Albiano Superior – Santoniano), composta por lutitos plataformais e clásticos grossos de canais submarinos (Kraemer, 1998; Arbe, 2002). Também são associadas à primeira fase compressional as formações Alta Vista e Anita, do Campaniano, que se assentam sobre a Formação Cerro Toro na parte setentrional da Bacia Austral e que correspondem, respectivamente, a ambientes marinhos e transicionais (Kraemer, 1998; Arbe, 2002; Rodríguez *et al.*, 2008; Ghiglione *et al.*, 2014). Os depósitos mais superiores do Cretáceo tornam-se gradativamente mais rasos até registrarem paleoambientes continentais, os quais perduraram ao longo do Cenozoico, com algumas transgressões marinhas intercaladas. Alguns reservatórios de importância secundária se relacionam a esse intervalo, inclusos na

Formação Magallanes, de idade cenozoica (Rodríguez *et al.*, 2008).

As falhas distensionais com direção NNO-SSE e NNE-SSO foram reativadas durante as fases compressionalis do Cretáceo Superior, Eoceno e Mioceno, na Bacia Austral (Kraemer, 1998; Ghiglione *et al.*, 2014), e do Eoceno tardio a Plioceno na Bacia das Malvinas (Galeazzi, 1998). A inversão se atenua de oeste para leste, no sentido da margem ativa para a margem flexural.

Embora ainda não exista produção na Bacia das Malvinas, há ocorrências de óleo nos potenciais reservatórios, e o traçamento estrutural é, em parte, condicionado por estruturas de inversão de falhas distensionais. Galeazzi (1998) mostra exemplos, em sísmica, de dobras de propagação de falha e *push-ups*, gerando altos estruturais que podem se constituir em focalizadores de hidrocarbonetos (vide suas figs. 23g, 23h e 24).

A Bacia Austral, por sua vez, é uma das principais produtoras da Argentina. Os sistemas petrolíferos comprovados Río Mayer Inferior – Springhill e Río Mayer Médio-Superior – Magallanes foram bastante influenciados pela inversão (Rodríguez *et al.*, 2008; Belotti *et al.*, 2014). As trapas são do tipo estrutural ou estrutural-estratigráfico, onde a reativação de falhas da fase rifte teve papel importante, produzindo anticlinais e blocos limitados por falhas (Rodríguez *et al.*, 2008). Durante a inversão, a propagação para o topo da seção de falhas originalmente distensionais foi importante para a migração vertical, alimentando os reservatórios da Formação Magallanes (Argüello *et al.*, 2005; Saccavino *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008).

De acordo com Belotti *et al.* (2014), a tectônica distensional, em sua fase final (Cretáceo Inferior), controlou a espessura dos geradores marinhos; quando da inversão positiva, os depocentros tornaram-se altos estruturais. Os autores destacam o fato de que há uma coincidência entre as maiores espessuras dos depocentros, as zonas de sobrepressão e as estruturas de inversão, o que condiciona a existência tanto de reservatórios convencionais atualmente em produção, como de não convencionais potencialmente produtivos, estes últimos consistindo em alguns níveis de folhelhos geradores da Formação Palermo Aike (que corresponde aproximadamente

à Formação Río Mayer em subsuperfície). Entre os campos produtores com esta configuração podem ser mencionados Campo Boleadoras, Laguna del Oro e Campo Indio, situados na margem ativa da bacia.

Um exemplo da margem flexural é o campo de óleo Estancia La Maggie, com reservatório convencional na Formação Springhill. O reservatório está soerguido pela ação de uma inversão moderada de falhas distensionais, sendo estruturado em um suave anticlinal cortado por falhas normais NNO-SSE (Argüello *et al.*, 2005). De acordo com os autores, no processo de inversão a parte central do campo, que era inicialmente um paleovale, tornou-se uma feição positiva, a qual funciona como uma trapa combinada estrutural-estratigráfica.

O estudo de campo foi realizado na região de Río Guanaco, que se localiza entre os lagos Argentino e Viedma, na Província de Santa Cruz, Argentina. De acordo com Ghiglione *et al.* (2009), a área se situa no domínio do embasamento da faixa de dobramentos e empurrões dos Andes Patagônicos, próximo à borda ocidental da Bacia Austral (fig. 9). Esta unidade se encontra em contato tectônico com o Batólito Patagônico, situado a oeste, o qual corresponde às raízes do arco magmático, soerguidas no Neogeno. Por se tratar da unidade mais elevada, o batólito está sob o Campo de Gelo do Sul da Patagônia (fig. 9). Na área de estudo (figs. 9 e 10), afloram os depocentros da fase rifte do Jurássico, representados por derrames dacíticos (Complexo El Quemado), que se assentam sobre rochas metassedimentares da Formação Bahía de la Lancha, do Paleozoico Superior. Já o Complexo El Quemado é recoberto por arenitos da Formação Springhill, seguida pelos níveis inferior, médio e superior da Formação Río Mayer (*sensu* Ricchiano, 2014), sendo que as espessuras da parte inferior são controladas localmente pelas falhas distensionais. Os níveis inferior e superior são compostos por lutitos, e o nível intermediário por margas, todos depositados em ambiente marinho plataforma. Na área mapeada ainda ocorre uma rocha de composição dacítica intercalada com os níveis basais da Formação Río Mayer, inédita até o momento, denominada informalmente Dacito Río Guanaco.

A trama tectônica da faixa de dobramentos e empurrões que bordejia a Bacia Austral é construída por empurrões e retroempurrões com direção principal N-S e NNO-SSE, herança da fase rifte jurássica (figs. 9 e 10). As unidades stratigráficas mencionadas estão soerguidas na área de Río Guanaco, devido à ação de retroempurrões com vergência para o oeste (fig. 10). Os mesmos estão associados a um empurrão principal que ocorre a oeste do limite da área, com vergência para leste, formando a zona triangular da cadeia Masters (fig. 9). Estudos de geologia regional (e.g. Ramos e Ghiglione, 2008; Fosdick *et al.*, 2013) e local (e.g. Kraemer, 1998; Cuitiño e Scasso, 2013) apontam uma fase intensa de deformação, soerguimento e magmatismo no Mioceno inferior, atribuindo-se a essa mesma idade a formação das estruturas contracionais citadas.

inversão de falhas em afloramento na seção de Río Guanaco

Na parte norte da área há uma exposição com direção leste-oeste (figs. 10 e 11), previamente descrita por Kraemer (1998), onde é possível observar vários estágios do processo de inversão. A estrutura dominante é um retroempurrão em escala regional (R na fig. 11a), que coloca em contato tectônico rochas do Complexo El Quemado e Formação Springhill com rochas da parte inferior da Formação Río Mayer e do Dacito Río Guanaco. O encurtamento produziu um anticlinal no bloco alto, no qual ocorrem várias falhas distensionais em diferentes estágios de inversão, as quais serão descritas.

falhas normais

Estruturas com rejeito aparente normal e que não revelam nenhuma evidência de inversão positiva. São estas as falhas 1 e 2 nas figuras 11a, 11b e 11c. Elas apresentam direção de NNO-SSE a NNE-SSO e os ângulos de mergulho mais altos entre as falhas estudadas (em torno de 65° para oeste). As mesmas deslocam, com rejeitos em escala decamétrica, os estratos do Complexo El Quemado, Formação Springhill e parte inferior da Formação Río Mayer. A falha normal 1 produziu

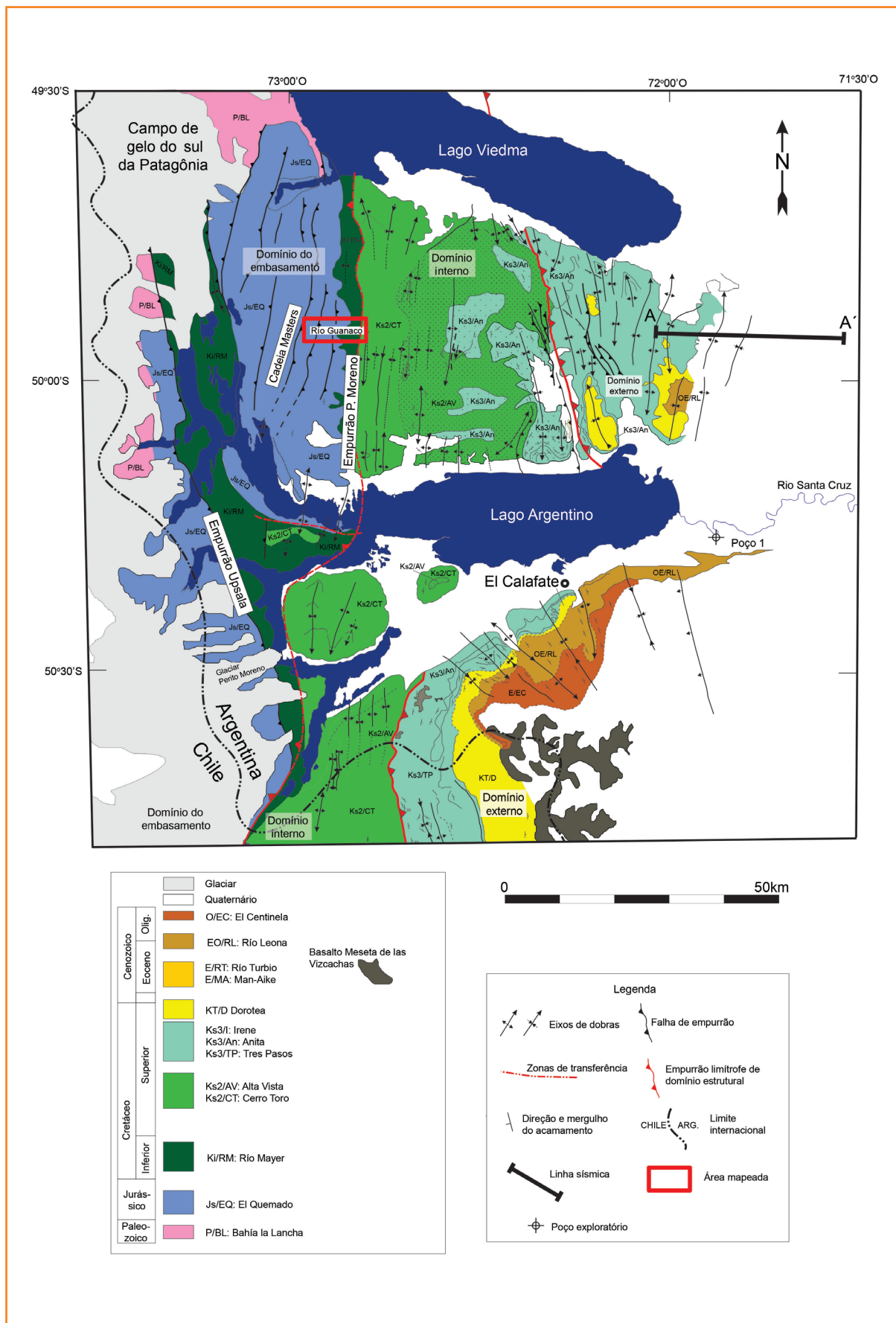


Figura 9
 Mapa geológico de um segmento da faixa de dobramentos e empurrões dos Andes Patagônicos meridionais, com a localização da área mapeada em Río Guanaco (fig. 10) e da linha sísmica interpretada (fig. 12). Modificado de Ghiglione et al. (2009).

Figure 9
 Geological map of a segment of the Southern Patagonian Andean fold and thrust belt, showing the location of the mapped area in Río Guanaco (fig. 10) and the interpreted seismic line (fig. 12). Modified after Ghiglione et al. (2009).

uma seção de crescimento na parte inferior da Formação Río Mayer.

A falha normal 2 gerou dobras de arraste nos lutitos da parte inferior da Formação Río Mayer. A preservação dessas dobras de arraste indicando movimento normal é uma evidência de que não houve inversão positiva ao longo da superfície dessa falha.

falhas normais invertidas

Possuem rejeito aparente normal, a julgar pelos marcadores estratigráficos, e que apresentam indícios de inversão. Uma delas é a falha 3 (figs.

11a e 11b), cuja superfície principal é indicada pelo triângulo pontilhado, em vista da perspectiva da foto. Esta falha possui direção aproximada norte-sul e mergulho em ângulo alto (cerca de 65° para oeste). Embora com rejeito normal, são observadas falhas contracionais conjugadas, como uma estrutura do tipo *push-up* no bloco baixo, que se propaga a partir da falha principal e que eleva, com rejeitos métricos, os níveis inferior e médio da Formação Río Mayer. Em adição, as falhas reversas presentes no bloco alto são interpretadas como falhas de atalho (fig. 11b).

A falha 4 (figs. 11a e 11d) possui a mesma direção norte-sul e mergulho para oeste, com uma

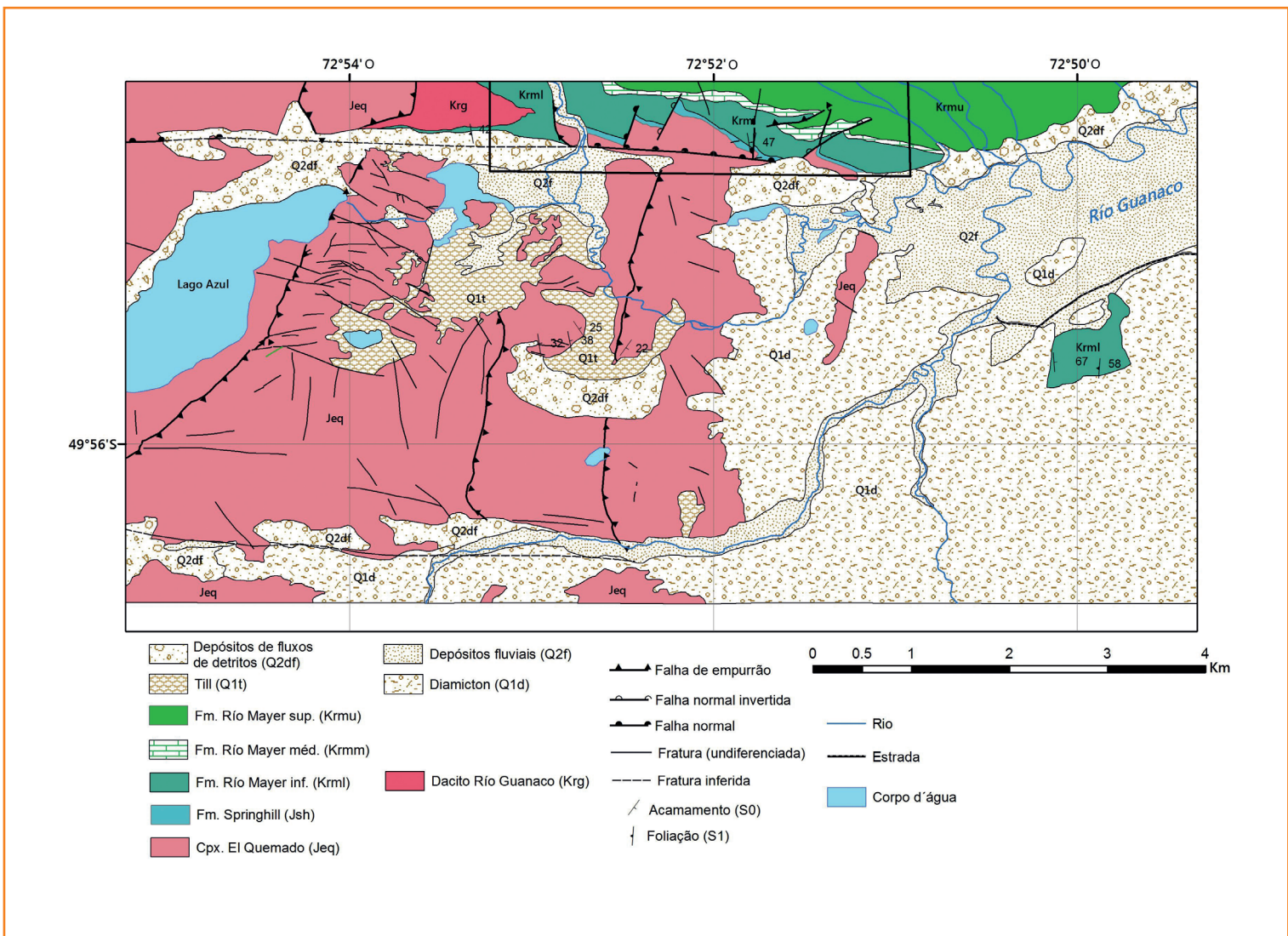


Figura 10 – Mapa geológico da área de Río Guanaco. A localização da seção de Río Guanaco, exibida na figura 11, é indicada pelo retângulo.

Figure 10 – Geological map of Río Guanaco area. The location of the Río Guanaco section, shown in figure 11, is indicated by the rectangle.

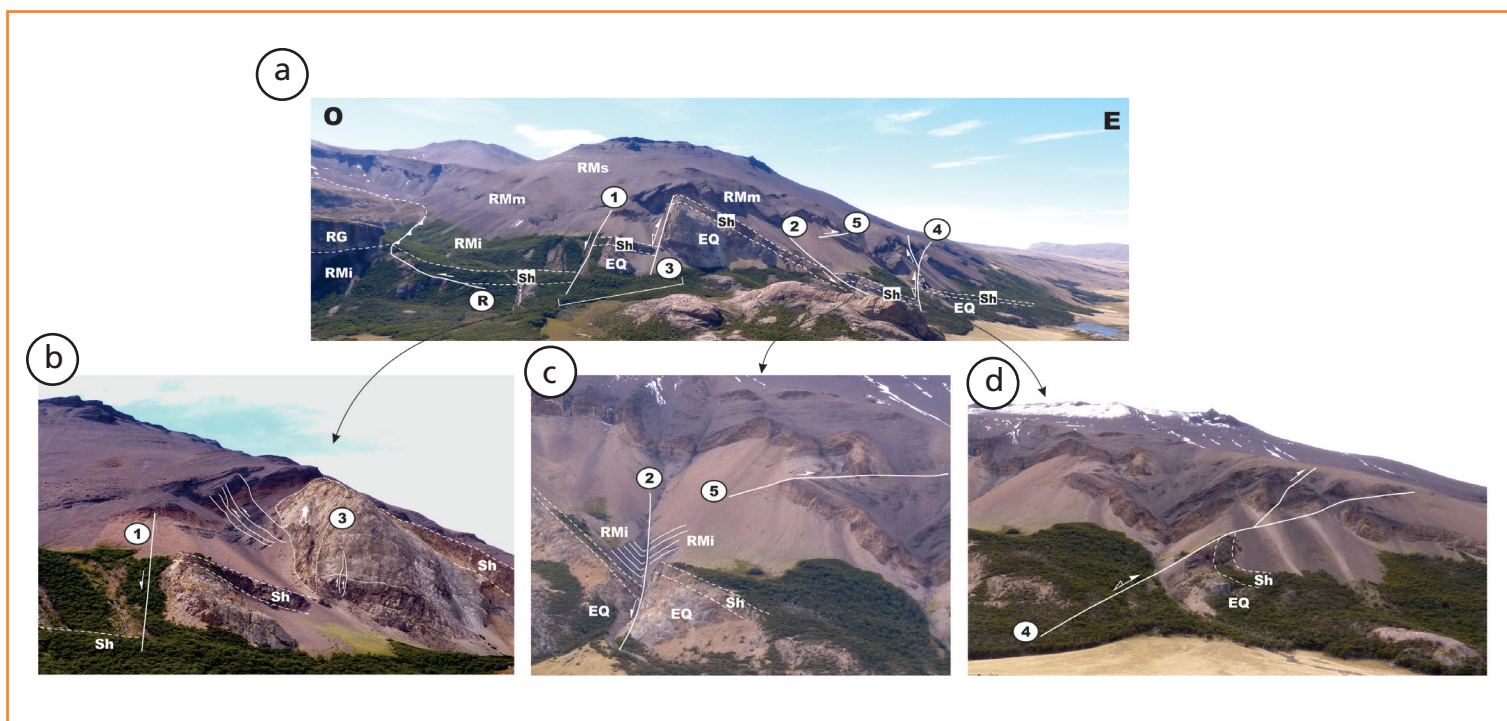


Figura 11 – Seção de Río Guanaco; (a) Vista geral com as principais estruturas e contatos estratigráficos; EQ = Complexo El Quemado, Sh = Formação Springhill, RG = Dacito Río Guanaco, RMi, RMm, RMs = partes inferior, média e superior da Formação Río Mayer; (b) detalhe de falha normal e falha normal invertida no setor oeste da seção. O espelho de falha exposto é delimitado pela linha pontilhada; (c) detalhe de falha normal e falha de empurrão no setor central; (d) detalhe de falha normal invertida no setor leste.

Figure 11 – Río Guanaco section; (a) General view showing the main structure and stratigraphic contacts; EQ = El Quemado Complex, Sh = Springhill Formation, RG = Río Guanaco Dacite, RMi, RMm, RMs = lower, middle and upper part of Río Mayer Formation; (b) detailed view of normal fault and inverted normal fault in the western sector of the section. The exposed slickenside is within the dashed line; (c) detailed view of normal fault and thrust fault in the central sector; (d) detailed view of inverted normal fault in the eastern sector.

inclinação mais suave, em torno de 40°. A falha possui um rejeito aparente normal, porém se pode observar uma dobra de arraste em camadas pertencentes ao Complexo El Quemado e Formação Springhill, a qual aponta para um sentido reverso de deslizamento, evidenciando inversão positiva ao longo da superfície principal.

falha de empurrão

Uma falha com ângulo de mergulho muito suave (em torno de 10° para oeste) é referida como falha 5 (figs. 11a e 11c), deslocando estratos da parte inferior, média e superior da Formação Río Mayer. Esta falha não apresenta conexão aparente com a falha distensional que ocorre na parte inferior da seção e é interpretada como uma falha formada nas fases finais do evento de contração. Durante a formação do anticlinal do bloco alto, as camadas da parte média da Formação Río Mayer, compostas por margas, sofreram um dobramento

suave por acomodação, e o rompimento de uma dessas dobras produziu a falha.

inversão de falhas em sísmica na faixa de dobramentos e empurrões externa

Realizou-se a interpretação de uma linha sísmica 2D localizada a leste da área mapeada (AA' na fig. 9), através do reconhecimento e da delimitação dos traços estruturais e dos principais horizontes estratigráficos. Estes, por sua vez, foram interpretados a partir da correlação com horizontes em outras seções sísmicas 2D situadas mais ao sul e que possuem controle estratigráfico no Poço 1, indicado na figura 9. Na sísmica é possível observar estruturas aqui interpretadas como as falhas mestras dos hemigrábens jurássicos, com espaçamento de 12km a 45km e que cortam o embasamento com mergulhos acentuados (fig. 12).

A falha mestra, indicada com o número 1 na figura 12, apresenta evidências de se ter propagado seção acima, produzindo um anticlinal de propagação de falha suave, que se deforma desde o Complexo El Quemado até o intervalo correspondente às formações Cerro Toro e Alta Vista. Falhas conjugadas sintéticas na capa também acomodam parte da contração, formando uma estrutura do tipo *push-up*.

A falha 2 (fig. 12) também se propaga seção acima e se ramifica. Além disso, o movimento reverso ocorre segundo uma falha conjugada antitética no bloco baixo, o que produz uma feição em *pop-up*. Também é interpretada a presença de uma falha de atalho.

A falha 3 (fig. 12) não apresenta sinais claros de propagação seção acima. Não obstante, a deformação contracional é interpretada como tendo sido acomodada inteiramente no complexo de falhas conjugadas subverticais no bloco baixo, o que caracteriza uma estrutura do tipo *push-up*.

A inclinação da falha 4 não permite a avaliação da sua continuidade seção acima, uma vez que ela se prolonga para além do limite oeste da seção. Entretanto, é possível observar a presença de falhas conjugadas subverticais na capa, embora neste caso a movimentação reversa pareça ter sido moderada, talvez em escala subsísmica.

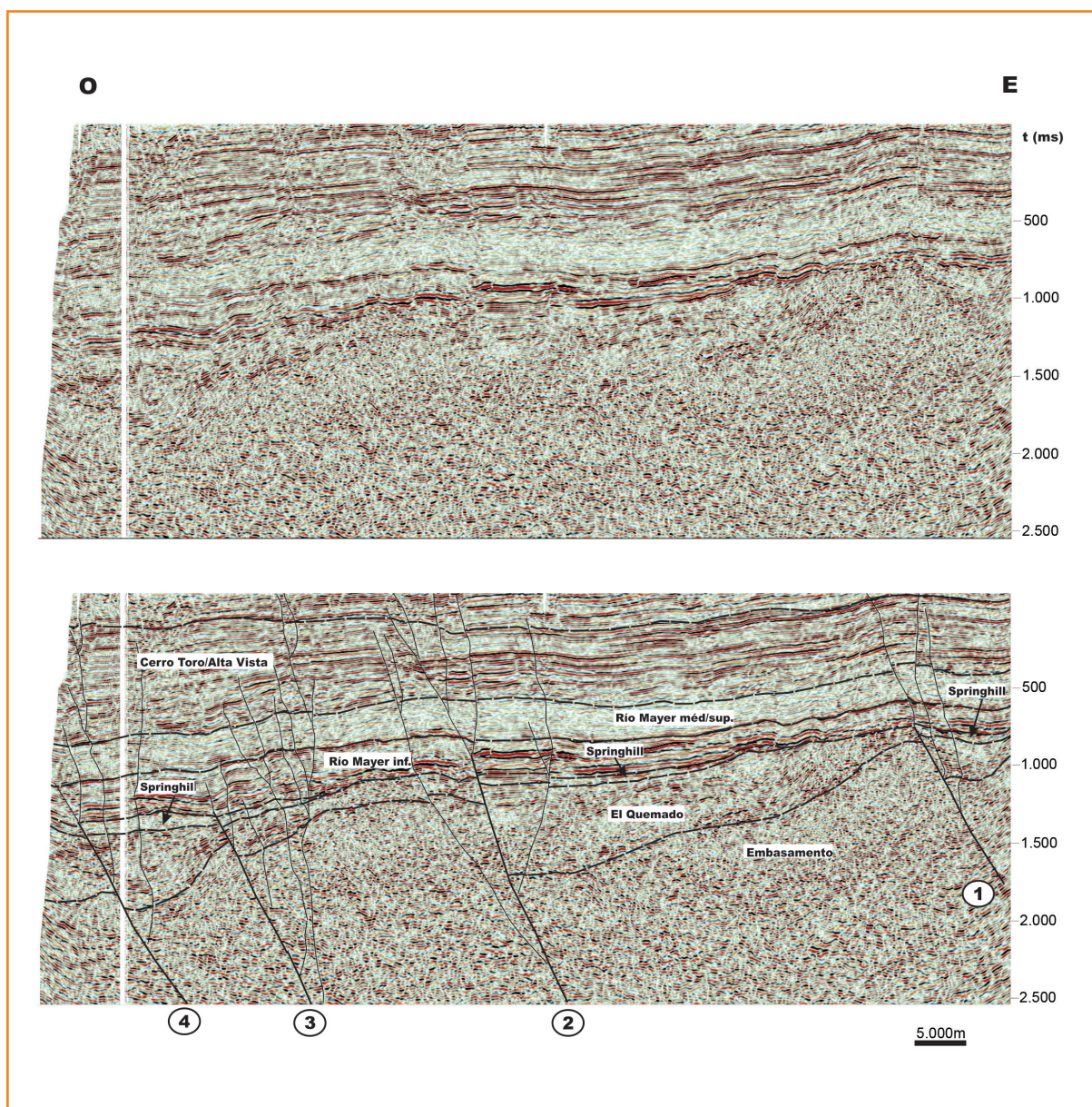


Figura 12
Seção sísmica 2D (AA' na fig. 9) em tempo (ms).

Figure 12
2D seismic section (AA' on fig.9) in time (ms).

Uma síntese das feições de inversão observadas na área é mostrada na figura 13. Tanto na escala de afloramento como de sísmica, foi possível identificar feições positivas como dobras de propagação de falhas reversas e *push-ups*. Falhas de atalho também foram observadas, nesse caso subordinadas à estrutura tipo *push-up*, a qual acumulou o maior rejeito reverso. A escala de sísmica possibilitou ainda o reconhecimento de estruturas de meio-graben invertido, que não são perceptíveis na escala de afloramento.

estilos de inversão de falhas na Bacia Austral e implicações para a exploração de hidrocarbonetos

A comparação das falhas invertidas em afloramento e sísmica no setor estudado da Bacia Austral sugere estilos semelhantes, apesar da diferença de escala. Em algumas falhas, o movimento reverso

produzido durante a inversão positiva ocorreu ao longo da superfície principal, enquanto em outras falhas isto não foi verificado. Quando não há evidências de deslizamento reverso, uma feição presente nas duas escalas são os sistemas de falhas reversas conjugadas nos blocos baixos. Desses, os mais comuns na Bacia Austral são do tipo *push-up*, conforme descrito por Pace e Calamita (2013) nos Apeninos. O fato de que nem sempre as falhas principais são reativadas tem uma explicação mecânica.

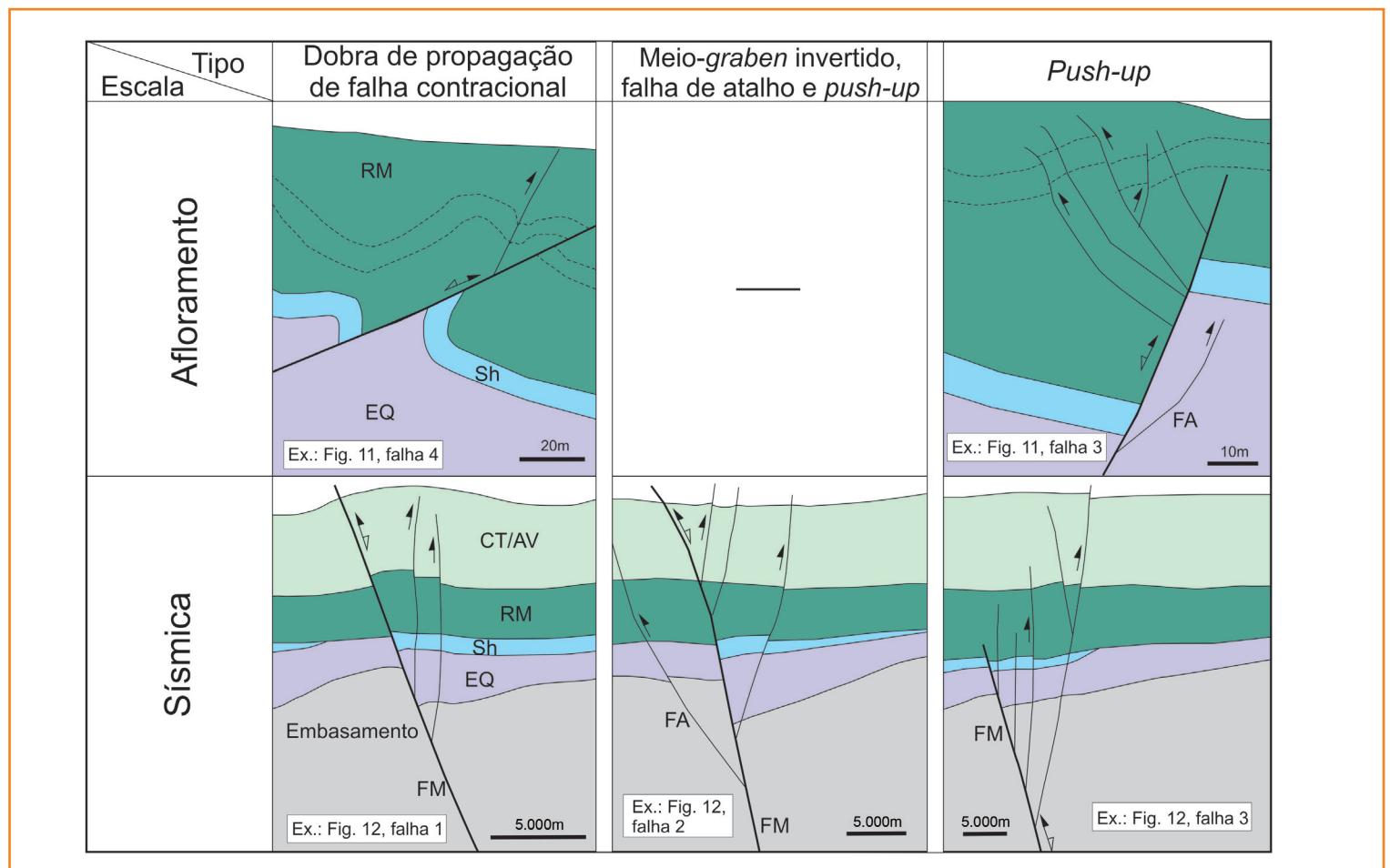
Na Bacia Austral, as falhas da fase rifte têm direção aproximada norte-sul, enquanto a compressão promovida pela tectônica andina assume uma direção principal aproximada leste-oeste. Superfícies de falhas preexistentes ortogonais à contração podem sofrer travamento friccional, em especial se os seus mergulhos forem superiores a 60° (Bonini *et al.*, 2012). Na seção de Río Guanaco, a falha distensional da figura 11c possui um ângulo de mergulho de 65° e nenhuma evidência de reativação contracional. A falha da direita na figura 11b possui ângulo semelhante ao da anterior, e sua

Figura 13

Quadro sinóptico com as principais feições de inversão reconhecidas da área de Río Guanaco e adjacências, na escala de afloramento e de sísmica. EQ = Complexo El Quemado, Sh = Fm. Springhill, RM = Fm. Río Mayer, CT/AV = formações Cerro Toro e Alta Vista indivisas, FM = falha mestra, FA = falha de atalho.

Figure 13

Synoptic chart showing the main inversion features which were recognized in Río Guanaco area and vicinities, in both outcrop and seismic scales. EQ = El Quemado Complex, Sh = Springhill Fm., RM = Río Mayer Fm., CT/AV = Cerro Toro and Alta Vista formations undivided, FM = master fault, FA = shortcut fault.



superfície também não apresenta evidências de reativação. Neste caso, a contração foi observada pelo desenvolvimento de uma estrutura *push-up*. A falha mostrada na figura 11d possui um ângulo mais suave em relação à família de falhas normais (cerca de 40°), com evidência de reativação reversa segundo sua superfície principal. Seu ângulo mais suave é interpretado como produto de rotação durante o levantamento do anticlinal mostrado na figura 11a, uma vez que esta falha ocorre no flanco da estrutura. O exemplo da seção de Río Guanaco mostra a importância do ângulo de mergulho da falha para se estimar se a mesma pode ou não ser invertida.

Entre as falhas distensionais com ângulo mais alto, raras são aquelas que sofreram movimentação reversa ao longo da superfície principal. Um desses casos é o da falha 1 na seção sísmica (fig. 12), onde é interpretado um anticlinal de propagação de falha, produzido pelo deslizamento reverso ao longo da superfície principal. Conforme discutido por Mescua e Giambiagi (2012), a reativação torna-se possível sempre que houver uma redução nos valores dos parâmetros mecânicos da rocha da zona de falha, como o coeficiente de fricção interna. As rochas encaixantes mais importantes em termos de espessura de seção são metassedimentares do embasamento, entre as quais há xistos de origem lutítica, e dacitos da seção sin-rifte, estes últimos alterados para sericita. A argilosidade alta das rochas encaixantes pode ter sido um fator importante para gerar rochas de falha com baixo coeficiente de fricção.

Em contrapartida, o padrão mais frequente observado na sísmica é o de estruturas *push-up* acomodando a contração. Nesse caso, se o bloco baixo tiver uma alta magnitude de deformação, o que pode ocorrer devido ao desenvolvimento de falhas conjugadas sintéticas e antitéticas durante a distensão, esta complexa rede de falhas será o veículo de distribuição da contração através de deslizamento reverso, juntamente com falhas conjugadas neoformadas. O rejeito em cada plano é pequeno, às vezes em escala subsísmica. Pace e Calamita (2013) observaram esta situação nos Apeninos, nos casos em que a seção sin-rifte era composta por rochas carbonáticas, mais competentes. No caso da Bacia Austral, a seção sin-rifte é composta por rochas vulcânicas, que também são competentes.

Esta constatação tem implicações para a exploração de hidrocarbonetos na Bacia Austral e em outras bacias com situação similar. Sempre que a reativação reversa for mais efetiva ao longo das superfícies das falhas conjugadas, os altos estruturais ocorrerão não sobre a falha mestra, mas deslocados no sentido do bloco baixo. O deslocamento pode ser da ordem de 10km, tomando-se como exemplo a seção sísmica estudada (fig. 12).

A formação de altos estruturais desse tipo pode ser importante para o traqueamento de reservatórios da Formação Springhill e da Fm. Magallanes. Além da estrutura focalizadora em si, o soerguimento produzido pela inversão pode ser responsável por um contato lateral entre o reservatório da Fm. Springhill e os níveis geradores da Fm. Río Mayer, estes situados estratigraficamente acima. Se a geração for simultânea ou posterior à inversão, pode ocorrer o carregamento lateral do reservatório através da falha, se esta não for selante.

A reativação e a formação de novas falhas conjugadas nos blocos baixos de falhas distensionais durante a inversão produzem uma rede de falhas que se propaga no sentido do topo da seção, como se pode observar na figura 12. Estas estruturas são referidas como as rotas de migração para o carregamento de reservatórios da Formação Magallanes (Argüello *et al.*, 2005; Saccavino *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008). Porém, para que este processo seja efetivo, é importante que se compreenda a relação temporal entre geração, migração e formação da estrutura. Geração e migração síncronas ou posteriores à formação da estrutura seriam ideais para seu carregamento. No entanto, o desenvolvimento tardio da estrutura também poderia ser positivo para a reestruturação do reservatório Magallanes, embora também possa causar ruptura de selo.

A geração e a migração são altamente diácronas na Bacia Austral, tendo se iniciado em torno de 80-75 Ma nas regiões mais profundas e ocorrendo até o Recente em zonas mais rasas (Argüello *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008). Assim, há várias situações possíveis de *timing* em relação às estruturas de inversão produzidas no Mioceno, a depender da região da bacia. Recomenda-se que em trabalhos futuros seja feita uma análise pormenorizada da relação temporal entre a migração e o desenvolvimento dessas trapas estruturais nos diferentes compartimentos da Bacia Austral.

considerações finais

Neste artigo procurou-se discutir as condições mecânicas que induzem a inversão de falhas, bem como os principais tipos geométricos observados em sísmica, afloramentos e modelos físicos. A inversão de falhas tem importância para o sistema petrolífero, e exemplos de acumulações de hidrocarbonetos foram apresentados nas bacias andinas austrais. Estruturas como anticlinais de propagação de falhas, *push-ups* e *pop-ups*, formados pelo movimento reverso de falhas conjugadas, estão entre as principais armadilhas estruturais descritas.

Em estudo de caso na Bacia Austral, constatou-se que as falhas observadas na escala de afloramento na seção de Río Guanaco são exemplos de inversão positiva parcial, onde os rejeitos não deixam de ser normais do ponto de vista estratigráfico. Em sísmica 2D em área adjacente, a inversão também é moderada, tendo-se observado predomínio de feições tipo *push-up*. Acredita-se que isto se deva ao fato de que a maior quantidade de encurtamento tenha se dado através do deslizamento ao longo das falhas conjugadas de capa. Este pode vir a ser um critério preditivo na prospecção de trapas estruturais.

agradecimentos

O pós-doutorado do primeiro autor foi custeado por PDRHE da Universidade Petrobras e realizado no Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber da Universidad de Buenos Aires, sendo os autores gratos a estas instituições. Os autores também agradecem à Gerência de Exploração da Petrobras Argentina, pelo suporte logístico e autorização para o uso de dados sísmicos, e ao Departamento Nacional de Parques Naturais da República Argentina, pela autorização de acesso ao Parque Nacional Los Glaciares, a G. S. Anjos-Zerfass, pela leitura crítica do manuscrito, e a M. Agüera, M. Cagnolatti, G. Conforto, G. Köhler, E. Nigro e J. Rodríguez, pelas discussões técnicas. Os autores agradecem ainda aos dois revisores anônimos pelas valiosas recomendações.

referências bibliográficas

ARBE, H. A. Análisis estratigráfico del Cretácico de la Cuenca Austral. In: CONGRESO GEOLÓGICO ARGENTINO, 15., 2002, El Calafate. **Relatórios...** El Calafate, 2002. v. 1-8, p. 103-128.

ARGÜELLO, J.; TRAPICHE, A.; BERDINI, O.; PEDRAZZINI, M.; BENOTTI, S. Entrampamiento de Petróleo y Gas en la Formación Springhill, sector continental de la Cuenca Austral, República Argentina. In: CONGRESO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE HIDROCARBUROS, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata: Instituto Argentino del Petróleo y Gas, 2005. p. 457-477.

ARREGUI, C.; CARBONE, O.; LEANZA, H. A. Contexto tectosedimentario. In: LEANZA, H. A.; ARREGUI, C.; CARBONE, O.; DANIELI, J. C.; VALLÉS, J. M. (Ed.). **Geología y recursos naturales de la Provincia del Neuquén**. Neuquén: Asociación Geológica Argentina, 2011. p. 29-36.

BELOTTI, H.; RODRIGUEZ, J. F.; CONFORTO, G. A.; PAGAN, F.; MAZAS, A. P.; AGÜERA, M.; PORRAS, J.; KÖHLER, G.; CAGNOLATTI, M.; WEINER, G.; NIGRO, E.; CANGINI, A. La Formación Palermo Aike como reservorio no convencional en la Cuenca Austral, Provincia de Santa Cruz, Argentina. In: CONGRESO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE HIDROCARBUROS, 9., 2014, Mendoza. **Anais...** Mendoza: Instituto Argentino del Petróleo y Gas, 2014. p. 137-160.

BONINI, M.; SANI, F.; ANTONIELLI, B. Basin inversion and contractional reactivation of inherited normal faults: a review based on previous and new experimental models. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 522-523, p. 55-88, Feb. 2012.

BURLIGA, S.; KOYI, H. A.; KRZYWIEC, P. Modelling cover deformation and decoupling during inversion, using the mid-polish trough as a case study. **Journal of Structural Geology**, New York, v. 42, p. 62-73, Sep. 2010.

CONDAT, P. Modelos conceptuales de trampas en el Yacimiento El Tordillo, Cuenca del Golfo San Jorge, Provincia del Chubut, Argentina. In: CONGRESO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE

- HIDROCARBUROS, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata: Instituto Argentino del Petróleo y Gas, 2005. p. 399-414.
- COOPER, M. A.; WILLIAMS, G. D.; DE GRACIANSKY, P.C.; MURPHY, R. W.; NEEDHAM, T.; DE PAOR, D. G.; STONELEY, R.; TODD, S. P.; TURNER, J. P.; ZIEGLER, P. A. Inversion tectonics: a discussion. In: COOPER, M. A.; WILLIAMS, G. D. (Ed.). **Inversion tectonics meeting**. London: Geological Society, 1989. (Special Publications, v. 44). p. 335-347.
- CUITIÑO, J. I.; SCASSO, R. A. Reworked pyroclastic beds in the early Miocene of Patagonia: reaction in response to high sediment supply during explosive volcanic events. **Sedimentary Geology**, Paris, v. 289, p. 194-209, 2013.
- DALZIEL, I. W. D.; DE WIT, M. J.; PALMER, K. F. A fossil marginal basin in the Southern Andes. **Nature**, London, v. 250, p. 291-294, 1974.
- DELLAPÉ, D.; HEGEDUS, A. Structural inversion and oil occurrence in the Cuyo Basin of Argentina. In: TANKARD, A. J.; SUÁREZ, R.; WELSINK, H. J. (Ed.). **Petroleum basins of South America**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1995. (AAPG Memoir, 62). p. 359-368.
- EISENSTADT, G.; SIMS, D. Evaluating sand and clay models: do rheological differences matter? **Journal of Structural Geology**, New York, v. 27, n. 8, p. 1399-1412, 2005.
- FACCENNA, C.; NALPAS, T.; BRUN, J. P.; DAVY, P.; BOSI, V. The influence of pre-existing thrust faults on normal fault geometry in nature and experiments. **Journal of Structural Geology**, New York, v. 17, n. 8, p. 1139-1149, 1995.
- FITZGERALD, M. G.; MITCHUM JUNIOR, R. M.; ULIANA, M. A.; BIDDLE, K. T. Evolution of the San Jorge Basin, Argentina. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v. 74, n. 6, p. 879-920, 1990.
- FOSDICK, J. C.; GROVE, M.; HOURIGAN, J. K.; CALDERÓN, M. Retroarc deformation and exhumation near the end of the Andes, southern Patagonia. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 361, p. 504-517, 2013.
- GALEAZZI, J. S. Structural and stratigraphic evolution of the Western Malvinas Basin, Argentina. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v. 82, n. 4, p. 596-636, 1998.
- GHIGLIONE, M. C.; SUAREZ, F.; AMBROSIO, A.; DA POIAN, G.; CRISTALLINI, E. O.; PIZZIO, M. F.; REINOSO, R. M. Structure and evolution of the Austral Basin fold-thrust belt, Southern Patagonian Andes. **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, Buenos Aires, v. 65, n. 1, p. 215-226, 2009.
- GHIGLIONE, M. C.; LIKERMANN, J.; BARBERÓN, V.; GIAMBIAGI, L. B.; AGUIRRE-URRETA, B.; SUÁREZ, F. Geodynamic context for the deposition of coarse-grained deep-water axial channel systems in the Patagonian Andes. **Basin Research**, Oxford, v. 26, n. 6, p. 726-745, 2014.
- GIACOSA, R.; FRACCHIA, D.; HEREDIA, N. Structure of the Southern Patagonian Andes at 49oS, Argentina. **Geologica Acta**, Barcelona, v. 10, n. 3, p. 265-282, Sep. 2012.
- HAYWARD, A. B.; GRAHAM, R. H. Some geometrical characteristics of inversion. In: COOPER, M. A.; WILLIAMS, G. D. (Ed.). **Inversion Tectonics**. London: Geological Society, 1989. (Special Publications, v. 44). p. 17-39.
- IVINS, E. R.; DIXON, T. H.; GOLOMBEK, M. P. Extensional reactivation of an abandoned thrust: a bound on shallowing in the brittle regime. **Journal of Structural Geology**, New York, v. 12, n. 3, p. 303-314, 1990.
- KONSTANTINOVSKAYA, E. A.; HARRIS, L. B.; POULIN, J.; IVANOV, G. M. Transfer zones and fault reactivation in inverted rift basins: insights from physical modelling. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 441, n. 1, p. 1-26, 2007.
- KOOPMAN, A.; SPEKSNIJDER, A.; HORSFIELD, W. T. Sandbox model studies of inversion tectonics. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 137, p. 379-388, 1987.
- KOZŁOWSKI, E.; BOLL, A.; VERGANI, G. (Ed.). Las trampas de hidrocarburos en las cuencas productivas de Argentina. In: CONGRESO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE HIDROCARBUROS, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata: Instituto Argentino del Petróleo y Gas, 2005. p. 261-270.

- KRAEMER, P. E. Structure of the Patagonian Andes: regional balanced cross section at 50oS, Argentina. **International Geology Review**, Lawrence, v. 40, p. 896-915, 1998.
- LIKERMAN, J.; BURLANDO, J. F.; CRISTALLINI, E. O.; GHIGLIONE, M. C. Along-strike structural variations in the Southern Patagonian Andes: insights from physical modelling. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 590, p. 106-120, 2013.
- LIMERES, M.; DAJCZGEWAND, D.; ORCHUELA, I. Estilo de entrapamiento en el Yacimiento Loma Negra, Cuenca Neuquina, Provincia de Río Negro. In: KOZLOWSKI, E.; BOLL, A.; VERGANI, G. (Ed.). **Las trampas de hidrocarburos en las cuencas productivas de Argentina**. Mar del Plata: Instituto Argentino del Petróleo y Gas, 2005. p. 383-390.
- McCLAY, K. R. Analogue models of inversion tectonics. In: COOPER, M. A.; WILLIAMS, G. D. (Ed.). **Inversion Tectonics**. London: Geological Society, 1989. (Special Publications, v. 44). p. 41-59.
- McCLAY, K. R.; SCOTT, A. D. Experimental models of hangingwall deformation in ramp-flat listric extensional fault systems. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 188, n. 1, p. 85-96, Mar. 1991.
- McCLAY, K. R. The geometries and kinematics of inverted fault systems: a review of analogue model studies. In: BUCHANAN, J. G.; BUCHANAN, P. G. (Ed.). **Basin Inversion**. London: Geological Society, 1995. (Special Publications, v. 88). p. 97-118.
- MESCUA, J. F.; GIAMBIAGI, L. B. Fault inversion vs. new thrust generation: a case study in the Malargüe fold-and-thrust belt, Andes of Argentina. **Journal of Structural Geology**, New York, v. 35, p. 51-63, 2012.
- MITRA, S. Geometry and kinematic evolution of inversion structures. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v. 77, n. 7, p. 1159-1191, 1993.
- MOSQUERA, A.; RAMOS, V. A. Intraplate deformation in the Neuquén Embayment. In: KAY, S. M.; RAMOS, V. A. (Ed.). **Evolution of an Andean margin: a tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat)**. New York: The Geological Society of America, 2006. p. 97-123. (Special Paper, 407).
- MOSQUERA, A.; SILVESTRO, J.; RAMOS, V. A.; ALARCÓN, M.; ZUBIRI, M. La estructura de la Dorsal de Huincul. In: LEANZA, H. A.; ARREGUI, C.; CARBONE, O.; DANIELI, J. C.; VALLÉS, J. M. (Ed.). **Geología y recursos naturales de la Provincia del Neuquén**. Neuquén: Asociación Geológica Argentina, 2011. p. 385-398.
- PACE, P.; CALAMITA, F. Push-up inversion structures v. fault-bend reactivation anticlines along oblique thrust ramps: examples from the Apennines fold-and-thrust belt (Italy). **Journal of the Geological Society**, v. 171, n. 2, p. 227-238, Mar. 2013.
- PÁNGARO, F.; MELLI, A. T.; MALONI, P.; CEVALLOS, M.; SORACI, A.; MOSQUERA, A.; KIM, H. J. Modelos de entrapamiento de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina, Argentina. In: KOZLOWSKI, E.; BOLL, A.; VERGANI, G. (Ed.). **Las trampas de hidrocarburos en las cuencas productivas de Argentina**. Mar del Plata: Instituto Argentino del Petróleo y Gas, 2005. p. 331-368.
- PAREDES, J. M.; PLAZIBAT, S.; CROVETTO, C.; STEIN, J.; CAYO, E.; SCHIUMA, A. Fault kinematics and depocenter evolution of oil-bearing, continental successions of the Mina del Carmen Formation (Albian) in the Golfo San Jorge basin, Argentina. **Journal of South American Earth Sciences**, Amsterdam, v. 46, p. 63-79, 2013.
- PEACOCK, D. C. P.; SANDERSON, D. J. Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones. **Journal of Structural Geology**, New York, v. 13, n. 6, p. 721-733, 1991.
- PERONI, G. O.; HEGEDUS, A. G.; CERDAN, J.; LEGARRETA, L.; ULIANA, M. A.; LAFFITTE, G. Hydrocarbon accumulation in an inverted segment of the Andean foreland: San Bernardo Belt, Central Patagonia. In: TANKARD, A. J.; SUÁREZ S. R.; WELSINK, R. J. (Ed.). **Petroleum Basins of South America**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1995. (AAPG Memoir, 62). p. 403-419.
- RAMOS, V. A.; GHIGLIONE, M. C. Tectonic Evolution of the Patagonian Andes. In: RABASSA, J. (Ed.). **Lake Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego. Developments in Quaternary Sciences**, Amsterdam, v. 11, p. 57-71, 2008.
- RAMOS, V. A.; ZAPATA, T.; CRISTALLINI, E.; INTRO-CASO, A. The Andean thrust system - latitudinal

- variations in structural styles and orogenic shortening. In: McCLAY, K. R. (Ed.). **Thrust tectonics and hydrocarbon systems**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2004. (AAPG Memoir, 82). p. 30-50.
- RAMOS, V. A. The tectonic regime along the Andes: present-day and Mesozoic regimes. **Geological Journal**, Sussex, v. 45, p. 2-25, 2010.
- RICCARDI, A. C. Estratigrafía en el oriente de la Bahía de la Lancha, Lago San Martín, Santa Cruz, Argentina. **Revista del Museo de La Plata**. Sección Geología, La Plata, v. 7, n. 61, p. 245-318, 1971.
- RICCHIANO, S. Lower Cretaceous anoxic conditions in the Austral basin, southwestern Gondwana, Patagonia Argentina. **Journal of South American Earth Sciences**, Amsterdam, v. 54, p. 37-46, 2014.
- RODRÍGUEZ, J. F.; MILLER, M.; CAGNOLATTI, M. Sistemas petroleros de Cuenca Austral, Argentina e Chile. In: CRUZ, C. E.; RODRÍGUEZ, J. F.; HECHEM, J. J.; VILLAR, H. J. (Ed.). **Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas**. Mar del Plata: Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, 2008. p. 1-31.
- SACCAVINO, L. L.; ECHEVARRÍA, C.; GUTIERREZ, F.; CAGNOLATTI, M.; MARTEAU, V. M.; PEDRAZZINI, M.; BARCAT, C. Las trampas de hidrocarburos de la Formación Magallanes, Cuenca Austral, República Argentina. In: KOZLOWSKI, E.; BOLL, A.; VERGANI, G. (Ed.). **Las trampas de hidrocarburos en las cuencas productivas de Argentina**. Mar del Plata: Instituto Argentino del Petróleo y Gas, 2005. p. 479-499.
- SCISCIANI, V. Styles of positive inversion tectonics in the Central Apennines and in the Adriatic foreland: implications for the evolution of the Apennine chain (Italy). **Journal of Structural Geology**, New York, v. 31, p. 1276-1294, 2009.
- SCHWARZ, E.; VEIGA, G. D.; SPALLETTI, L. A.; MASSAFERRO, J. L. The transgressive infill of an inherited-valley system: the Springhill Formation (lower Cretaceous) in southern Austral Basin, Argentina. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 28, n. 6, p. 1218-1241, 2011.
- SIBSON, R. H. A note on fault reactivation. **Journal of Structural Geology**, New York, v. 7, n. 6, p. 751-754, 1985.
- ULIANA, M. A.; BIDDLE, K. T. Mesozoic-Cenozoic paleogeographic and geodynamic evolution of Southern South America. **Revista Brasileira Geociências**, São Paulo, v. 18, p. 172-190, 1988.
- ULIANA, M. A.; LEGARRETA, L. Hydrocarbon habitat in a Triassic to Cretaceous sub-Andean Setting: Neuquén Basin, Argentina. **Journal of Petroleum Geology**, Beaconsfield, v. 16, n. 4, p. 397-420, 1993.
- ULIANA, M. A.; ARTEAGA, M. E.; LEGARRETA, L.; CERDÁN, J. J.; PERONI, G. O. Inversion structures and hydrocarbon occurrence in Argentina. In: BUCHANAN, J. G.; BUCHANAN, P. G. (Ed.). **Basin Inversion**. London: Geological Society, 1995. (Special Publications, v. 88). p. 211-233.
- VEEVERS, J. J.; POWELL, C. McA. **Permian-Triassic Pangean basins and foldbelts along the Panthalassan Margin of Gondwanaland**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994. (AAPG Memoir, 184). 368p.
- VERGANI, G.; ARREGUI, C.; CARBONE, O. Sistemas petroleros y tipos de entrapamientos en la Cuenca Neuquina. In: CONGRESO GEOLÓGICO ARGENTINO, 18., 2011, Neuquén. **Relatórios...** Neuquén: Asociación Geológica Argentina, 2011. p. 646-656.
- WILLIAMS, G. D.; POWELL, C. M.; COOPER, M. A. Geometry and kinematics of inversion tectonics. In: COOPER, M. A.; WILLIAMS, G. D. (Ed.). **Inversion Tectonics**. London: Geological Society, 1989. (Special Publications, v. 44). p. 3-15.
- WILLSEY, S. P.; UMHOEFER, P. J.; HILLEY, G. E. Early evolution of an extensional monocline by a propagating normal fault: 3D analysis from combined field study and numerical modelling. **Journal of Structural Geology**, New York, v. 24, p. 651-669, 2002.
- WITHJACK, M. O.; ISLAM, Q. T.; LA POINTE, P. R. Normal faults and their hanging-wall deformation: an experimental study. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v. 79, n. 1, p. 1-18, 1995.

ZAHID, K. M.; BARBEAU JUNIOR, D. L. Provenance of eastern Magallanes foreland basin sediments: heavy minerals analysis reveals Paleogene tectonic unroofing of the Fuegian Andes Hinterland. **Sedimentary Geology**, Paris, v. 229, n. 1, p. 64-74, Jun. 2010.

ZENCICH, S.; CALEGARI, R.; SCOLARI, J. C.; POSSE, J.; GÓMEZ, G.; BOGGETTI, D.; MANCEDA, R. Trampas de hidrocarburos de la Cuenca Cuyana. In: CONGRESO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE HIDROCARBUROS, 6., 2005, Mar del Plata. **Anais...** Mar del Plata: Instituto Argentino del Petróleo y Gas, 2005. p. 93-110.

ZERFASS, H.; CHEMALE JUNIOR, F.; SCHULTZ, C. L.; LAVINA, E. Tectonics and sedimentation in Southern South America during Triassic. **Sedimentary Geology**, Paris, v. 166, n. 3, p. 265-292, 2004.

expanded abstract

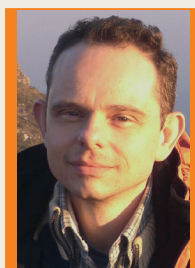
Fault inversion is the process of fault reactivation under a second-phase stress field, differing from the conditions that formed the original fault arrangement. Fault inversion is defined as positive when the final result is uplift, and negative when subsidence is the final result. The process is important to hydrocarbon migration and trapping. Positive inversion triggers the development of structural traps, and this process also allows the lateral contact between source-rocks and reservoirs. In addition, upward propagation of faults during reactivation creates migration paths. Fault reactivation depends on the orientation of the pre-existing fault system in relation to the new stress field and the mechanical properties of the affected rocks. A decrease in both internal friction coefficient and cohesive strength of the fault rock in relation to the intact rock facilitates reactivation. Incompetent rocks in the faulted blocks facilitate the slip on the main fault surface, whereas competent rocks make the slip of the main surface more difficult. In the latter case, reactivation of conjugate fault surfaces is the mechanism used by the fault system under inversion to accommodate shortening. Different mechanical behavior produced distinct geometric types. In the present work these types are organized focusing their identification and interpretation in outcrop and seismic surveys. In positive inversion, there are three general categories, as follows: (i) single faults are reactivated, producing fault propagation and fault bend anticlines (harpoon features); (ii) master and conjugate faults reactivated together, in different degrees of intensity; features such as hanging wall breakthrough faults, pop-ups and push-ups, as well as footwall shortcut faults belong to this category; (iii) new thrust faults are generated, cutting the extensional main fault and conjugate faults. Negative inversion is less frequent and only partial in the known cases. This occurs because the tensile stresses facilitate the formation of new extensional faults rather than reactivating pre-existing low-angle thrusts and reverse faults. A model of a negative inversion system is a thrust system with partial reactivation of the ramps. Southern Andean basins such as Cuyana, Neuquén, San Jorge, Malvinas and Austral-Magallanes present many examples of positive inversion, influencing hydrocarbon migration and trapping. Positive

inversion occurred due to the history of extension in Triassic and Jurassic ages, during the final phases of the Gondwanides orogeny and Gondwana break-up, followed by compressional phases in the Andean tectonism, mainly during Late Cretaceous, Eocene and Miocene times. In the Cuyana Basin, Triassic sin-rift lacustrine deposits are the main source-rock (Cacheuta Formation). Important reservoirs are fluvial sandstones and conglomerates of the lattermost sin-rift and post-rift phases as well. Fault inversion produces traps in structural highs, such as push-up structures, inversion anticlines and newly formed thrusts, producing lateral contact between reservoir and source-rocks. Examples are the Tupungato, Piedras Coloradas, Chañares Herrados, Barrancas and La Pilona oil fields. The depositional history of the Neuquén Basin began with half-grabens of Triassic and Jurassic age (known as Pre-Cuyana phase), filled with continental volcanic and sedimentary rocks, including a source-rock (Puesto Kauffmann Formation). The main source-rocks are of Jurassic and Lower Cretaceous ages, related to transgressions occurred during the sag phase, which are represented by the Los Molles, Vaca Muerta and Agrío formations. The reservoirs are also related to the sag phase, deposited during regressions; continental reservoirs of the foreland phase in the Upper Cretaceous age are also reported (Neuquén Group). Fault inversion anticlines are present as structural traps, as in the case of the Cerro Bandera, Loma Negra and Sierra Barrosa-Aguada Toledo fields. The complexity of the inversion processes in this basin is evident in the Huincul High, a tectonic feature orthogonal to the Andean front. This structural high was formed in the Late Palaeozoic age due to the collision of the Patagonia microplate with Gondwana, and the tectonic fabric gave rise to half-grabens during the Pre-Cuyana phase, in a negative inversion process. One phase of positive inversion occurred in the Late Jurassic – Early Cretaceous age, developing fault propagation anticlines. One of these anticlines is the Aguada Toledo – Meseta Barrosa, which has trapped hydrocarbons in three independent accumulations. The San Jorge Basin was developed as an extensional basin related to the Atlantic Ocean opening and its latter deformation history was dominated by intraplate compressional stresses produced by the Andean orogeny. The basin experienced three extensional phases in the Mesozoic and the Late Cretaceous – Palaeogene ages. The

first phase of extension produced half-grabens filled with volcanic and lacustrine deposits (Lonco Trapial Formation), the latter constituting one of the source-rocks. In the second and third rift phases, another lacustrine source-rock (Pozo D-129 Formation) and the more important reservoirs were deposited, with fluvial origin (Mina del Carmen, Comodoro Rivadavia and El Trebol formations). The second extensional phase produced the main migration paths. The Neogene compression is more evident in the San Bernardo fold and thrust belt, where inverted normal faults display fault propagation folds and push-up features; the anticlines produced by inversion are important in promoting the structural closure of some oil fields. The Malvinas and Austral-Magallanes basins are separated by the Río Chico basement high, and present a similar Mesozoic depositional history. The Jurassic extensional phase produced half-grabens filled by the volcanics of the El Quemado Complex and Tobífera Formation. Concomitantly with the most recent events of mechanical subsidence, a marine transgression took place, leading to the deposition of the main reservoir, the coastal sandstones of the Springhill Formation, which are covered by the main source-rock, the shelf shales of the Río Mayer Formation. The Malvinas Basin experienced compressional deformation only in the Cenozoic age. In the Austral Basin, the Andean compression took place in three pulses, in the Late Cretaceous, Eocene and Miocene ages. Although there is still no production in the Malvinas Basin, hydrocarbon shows are observed in the potential reservoirs, and structural traps produced by fault inversion seem to be important, such as fault propagation folds and push-ups. In the Austral Basin, fault propagation anticlines constitute some of the most important traps, as in the example of the Estancia Dos Lagunas field. Upward propagation of reactivated extensional faults under compression was important to the migration and charging of the Tertiary Magallanes Formation as a shallow reservoir. A case study in the Austral Basin is presented, in the area of Río Guanaco (50°S), where a series of inverted and fossil extensional faults of Lower Cretaceous age are observed. The structure in this area was uplifted by an anticline due to the displacement of a west-verging backthrust. In addition, an E-W-striking 2D seismic section in an external location relative to the deformation front is studied, in order to describe the inversion structures on a smaller scale.

In the Río Guanaco area, extensional faults oriented NNW to NNE affect the sin-rift volcanics of the El Quemado Complex, the Springhill Formation and the lower levels of the Río Mayer Formation. The faults in the Río Guanaco section are spaced hundreds of meters apart. Some of the steeper extensional faults (dipping about 65° to the west) were not inverted, showing a normal throw (taking into account the stratigraphic units), and drag folds indicating normal movement. Another high-angle fault displays a normal throw, but exhibits a series of conjugate structures related to inversion, such as push-ups and shortcut faults. A gentler angle fault dipping about 40° to the west exhibits a drag fault, indicating a reverse slip despite the normal stratigraphic offset. The seismic section displays 12km to 45km spaced extensional faults, interpreted as the half-graben master faults. These faults show evidence of upward propagation during inversion. The predominant features observed are push-ups; a fold propagation anticline and a shortcut fault are also observable. In both outcrop and seismic scales it is possible to observe the presence of extensional faults with reverse movement concentrated in conjugate faults. One explanation is that the competence of both pre-rift and sin-rift sections – metamorphic and volcanic, respectively – complicated the reverse slip along the main fault surface, and the contraction was accommodated in a network of conjugate faults. On the other hand, the slip occurred along the main surface of normal-inverted faults with gentler dips, as observed in the outcrop. The fault propagation anticline in seismic charts is an exceptional case, in which the slip occurred along the surface of the master fault despite its steeper angle; this fact could be explained by a lower internal friction coefficient or lower shear strength of the fault rock. The occurrence of push-up features in the Austral Basin is important to oil exploration, as the structural highs can be located some kilometers away from the master fault, towards the hanging wall.

autores



Henrique Zeffass

Recursos Humanos
Universidade Petrobras
Escola de Ciência e Tecnologia de E&P
Programa de Capacitação em Geologia e Geofísica

henrique.zeffass@petrobras.com.br

Henrique Zeffass é geólogo pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) (1998) e Doutor em Ciências, área de concentração em Estratigrafia, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (2003). Atuou como pesquisador da Unisinos em projeto na área de fotoestratigrafia na Bacia de Santa Bárbara (RS), em 2003-2004, e no Serviço Geológico do Brasil (CPRM), de 2004 a 2008, tendo realizado mapeamento geológico para o Programa de Levantamentos Geológicos Básicos nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Trabalha como geólogo da Petrobras desde 2008, atuando na Universidade Petrobras como instrutor e orientador didático de cursos nas áreas de geologia estrutural, tectônica de bacias e sedimentologia. Em 2014, realizou pós-doutorado pelo Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber da Universidad de Buenos Aires, com o tema de inversão de falhas na Bacia Austral, Argentina.



Victor A. Ramos

Universidad de Buenos Aires – Conicet
Instituto de Estudios Andinos
Laboratorio de Tectónica Andina

andes@gl.fcen.uba.ar

Victor A. Ramos é bacharel em Geologia pela Universidad de Buenos Aires (UBA) em 1965, doutorando-se nessa universidade em 1970. Realizou estudos de pós-graduação no ITC de Delft, Holanda, obtendo o grau de MSc. em levantamentos aéreos para geociências em 1968. Geólogo do Serviço Geológico Nacional Argentino em 1963-1968 e 1974-1983. Trabalhou no Geophoto Services, no Brasil, de 1971 a 1974, realizando levantamentos aeroespectrométricos, aeromagnéticos e geológicos em diversas regiões do Brasil para a CPRM e várias empresas privadas. Em 1984, integrou-se ao Departamento de Geologia da Universidad de Buenos Aires, recebeu a bolsa da Fundação Guggenheim para estudar os sistemas montanhosos do Hemisfério Norte e no seu retorno ministrou numerosos cursos de geotectônica e tectônica andina até sua aposentadoria em 2010. É professor emérito da UBA e investigador superior do Conicet. Tem numerosas publicações sobre a evolução geológica dos Andes, tendo recebido vários prêmios e distinções. É membro da Academia de Ciências da Argentina, Brasil e Chile, assim como da National Academy of Sciences dos Estados Unidos e da Third World Academy of Sciences de Trieste. É membro honorário da Geological Society of the America e da Asociación Geológica Argentina. Recebeu o Prêmio Bernardo Houssay do Ministério de Ciências e Tecnologia, o Prêmio Konex de Platino e o Prêmio México 2013 de Ciência e Tecnologia.



Hugo J. Belotti

Petrobras Argentina S.A.
Gerencia de Exploración

hugo.belotti@petrobras.com

Hugo J. Belotti é licenciado em Geologia pela Universidad Nacional de Rio Cuarto, Córdoba, Argentina, em 1981. Em 1982, fez pós-graduação em geologia do petróleo na Universidad de Buenos Aires. Trabalhou na YPF de 1983 a 1991, na Bacia do Noroeste, Argentina. Entre 1991 e 2003, atuou pela Perez Companc S.A. e, desde então, na Petrobras Argentina e Inter-TEC/EXP/ER, no Rio de Janeiro. Possui ampla experiência em avaliação e geração de prospectos exploratórios em bacias subandinas da América do Sul e Caribe, bem como em bacias do Norte da África. Assumiu diversas funções como geólogo de projetos, líder de equipes e gerente, sempre na área de exploração.

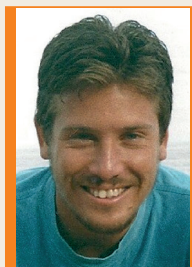


Matias C. Ghiglione

Universidad de Buenos Aires – Conicet
Instituto de Estudios Andinos
Laboratorio de Tectónica Andina

mcghiglione@gmail.com

Matias C. Ghiglione é bacharel em Geologia pela Universidad de Buenos Aires (UBA) em 1998. Doutor em Geologia pela UBA em 2013. Professor adjunto de Geologia Estrutural e Geologia Estrutural Avançada na UBA, e investigador adjunto do Conicet. Uma trajetória de 15 anos em pesquisa acadêmica, suporte à indústria e docência universitária, incluindo o ensino em várias disciplinas de pós-graduação. Campo de estudo em geodinâmica de orógenos ativos, faixas de dobramentos e bacias de antepaís associadas nos Andes Centrais e Austrais da Argentina e Chile, e o Sistema Subandino da Argentina, Bolívia e Peru.



Maximiliano Naipauer

Universidad de Buenos Aires – Conicet
Instituto de Estudios Andinos
Laboratorio de Tectónica Andina

maxinaipauer@hotmail.com

Maximiliano Naipauer obteve o título de Doutor em Ciências Naturais com ênfase em Geologia na Universidad Nacional de La Plata (UNLP) em 2007, e o tema de estudo foi a análise de proveniência de rochas sedimentares e metassedimentares do Neoproterozoico-Cambriano das Sierras Pampeanas e da Precordillera. Fez pós-doutorado na Universidad de Buenos Aires (bolsa do Conicet) sobre a proveniência sedimentar com base em idades U-Pb em zircões detríticos da Bacia de Neuquén (Formação Tordillo). É professor adjunto da disciplina Geologia Argentina na UNLP e pesquisador assistente do Conicet. Tem como tema principal de pesquisa a análise das idades U-Pb em zircões detríticos de depósitos marinhos e continentais de bacias argentinas. Obteve um Projeto de Pesquisa Jovem na Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica (MINCyT – Argentina) e participou em vários outros como pesquisador e colaborador. Realizou mais de dez visitas de pesquisa em laboratórios de geocronología do Brasil (UFRGS e UnB) e EUA (University of Idaho e Washington State University).