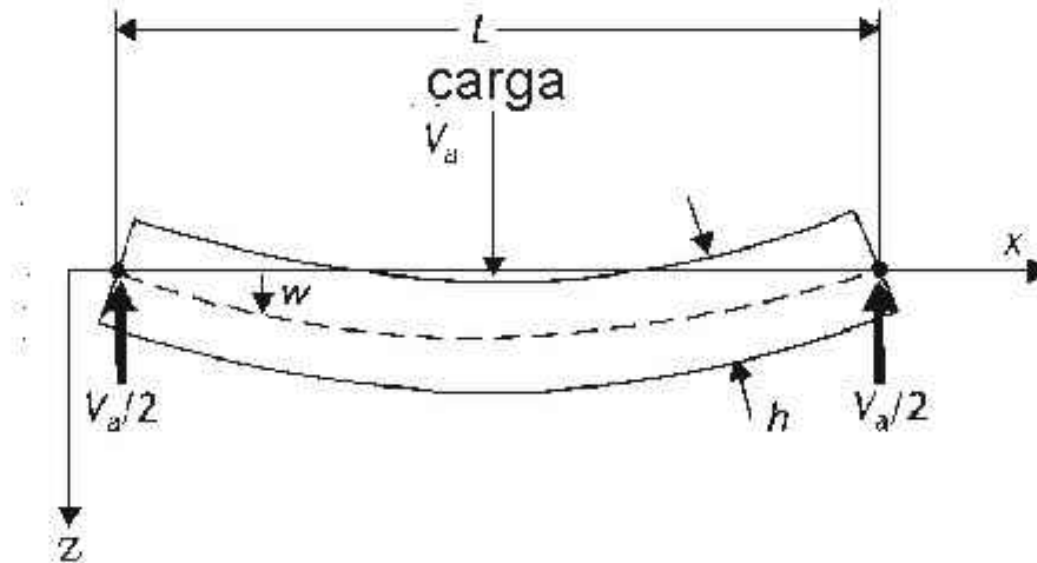
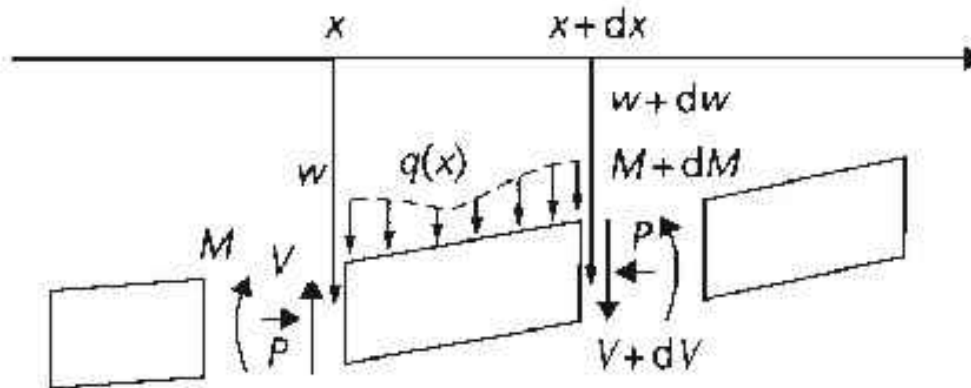


Elasticidade e Flexura



Ver derivação completa da equação em Turcotte & Schubert (1982, 2002)



W = deslocamento flexão
 h = espessura efetiva da placa elástica (T_e)
 $q(x)$ = carga vertical
 P = esforços horizontais

Elasticidade e flexura

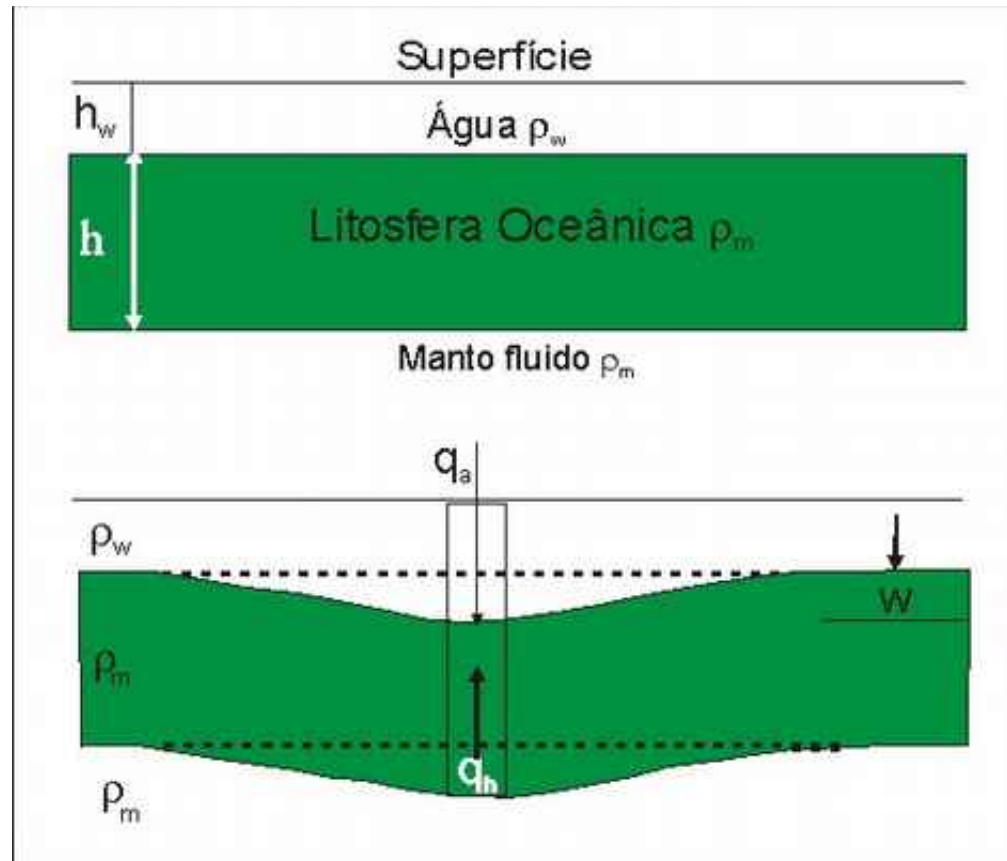
Gravimetria

Bacias de Antepaís

Evolução

Exemplos

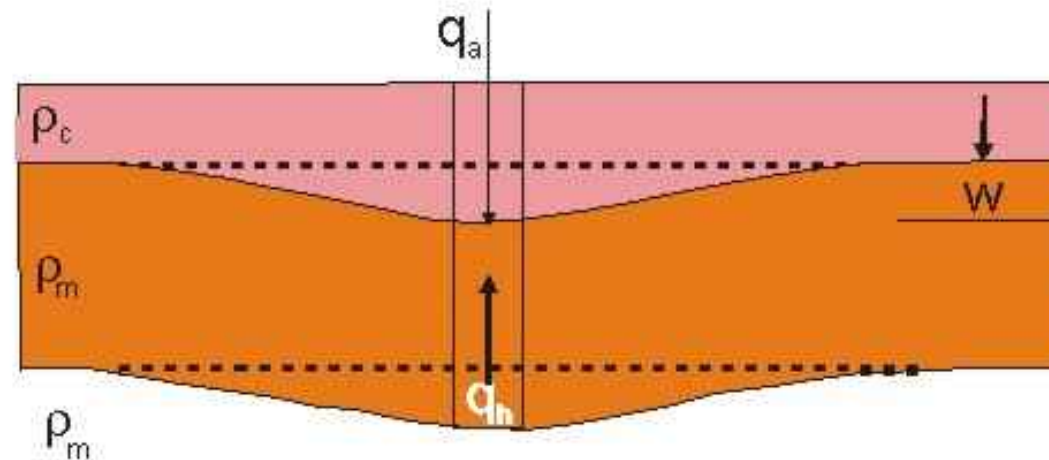
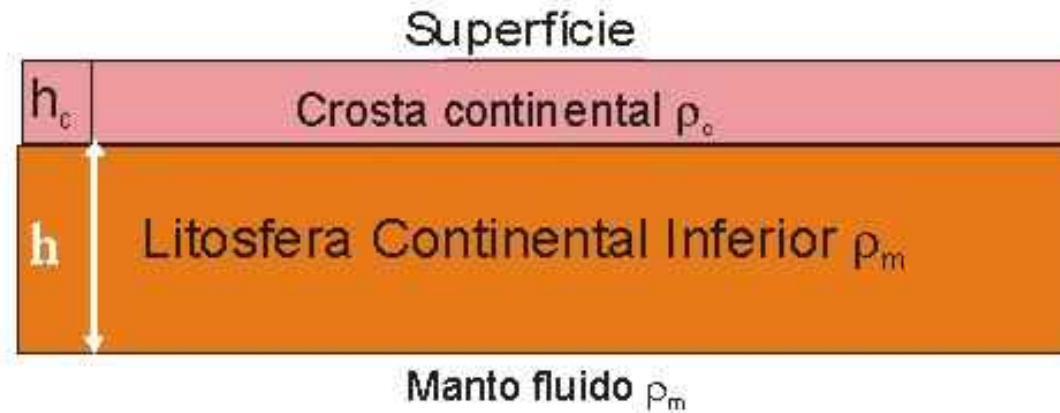
Aplicação para a Litosfera Terrestre



$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + P \frac{d^2 w}{dx^2} + \Delta \rho g w = q_a(x)$$

$$\Delta \rho = \rho_m - \rho_w$$

Aplicação para a Litosfera Terrestre



$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + P \frac{d^2 w}{dx^2} + \Delta \rho g w = q_a(x)$$

$$\Delta \rho = \rho_m - \rho_c$$

Solução Equação Diferencial Flexura 2-D

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + P \frac{d^2 w}{dx^2} + \Delta \rho g w = q_a(x)$$

$P = 0$, forças horizontais são desconsideradas

$D = \text{constante}$

$q_a = \text{linha de massa ou carga digital}$

Placa contínua, placa rompida, condições de contorno
Condicionam tipo de solução

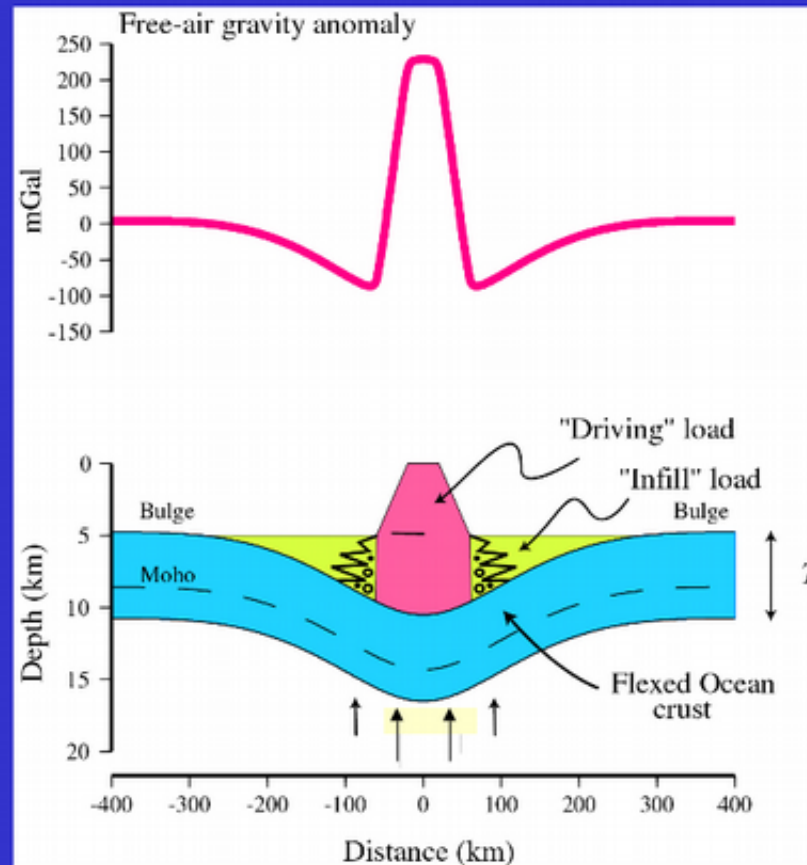
Elastic plate (flexure) model

Assumptions :

1. Linear elasticity
2. Plane stress
3. Cylindrical bending
4. Thin plates (i.e. plate thickness $\ll$ radius curvature)
5. Neutral surface, fixed at the half depth

Parameters:

D = flexural rigidity
 y = flexure
 ρ_m = density of substrate
 ρ_{infill} = density of infill
 E = Young's modulus
 T_e = elastic thickness
 ν = Poissons ratio



$$D \frac{d^4 y}{dx^4} + (\rho_m - \rho_{infill}) y g = 0$$

$$D = \frac{E T_e^3}{12 (1 - \nu^2)}$$

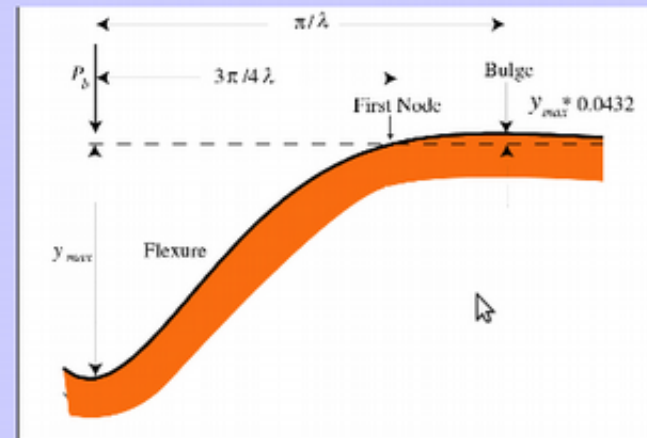
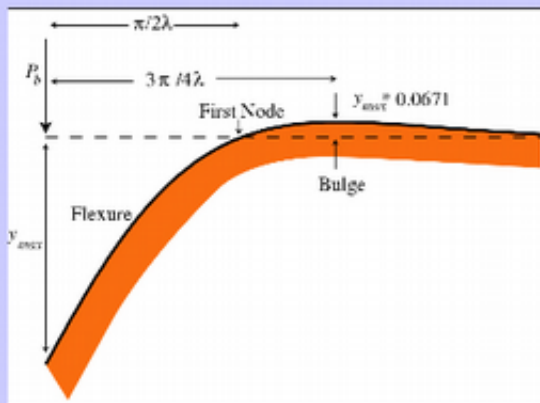
Line loads

Continuous plate :

$$y = \frac{P_b \lambda}{2 (\rho_m - \rho_{infill}) g} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x)$$

$1/\lambda$ = flexural parameter

$$\lambda = \left[\frac{(\rho_m - \rho_{infill}) g}{4 D} \right]^{1/4}$$



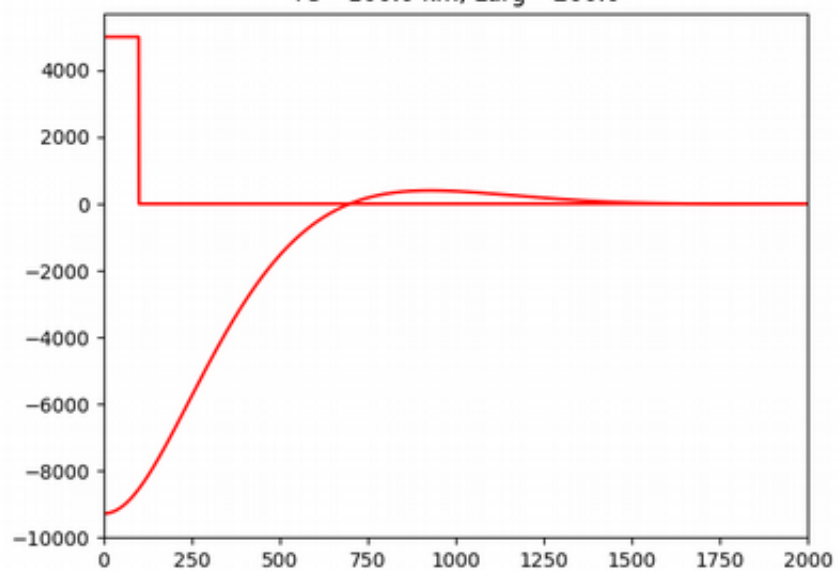
Discontinuous (ie broken) plate :

$$y = \frac{2 P_b \lambda}{(\rho_m - \rho_{infill}) g} e^{-\lambda x} \cos \lambda x$$

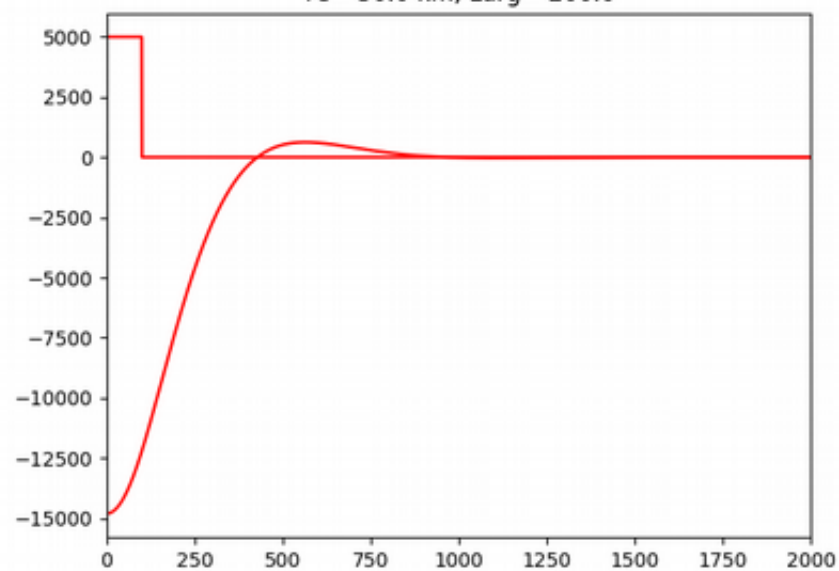
Distributed loads can be modelled as one or more line loads

Parameter	Definition	Value/Unit
$w(x)$	deflection of plate (positive down)	m
$D(x)$	flexural rigidity	N m
h	elastic plate thickness	m
F	end load	N m ⁻¹
q	vertical load	N m ⁻²
$\Delta\rho$	density contrast ($\rho_m - \rho_w$)	
g	acceleration of gravity	9.82 m s ⁻²
E	Young's modulus	6.5 x 10 ¹⁰ Pa
ν	Poisson's ratio	0.25

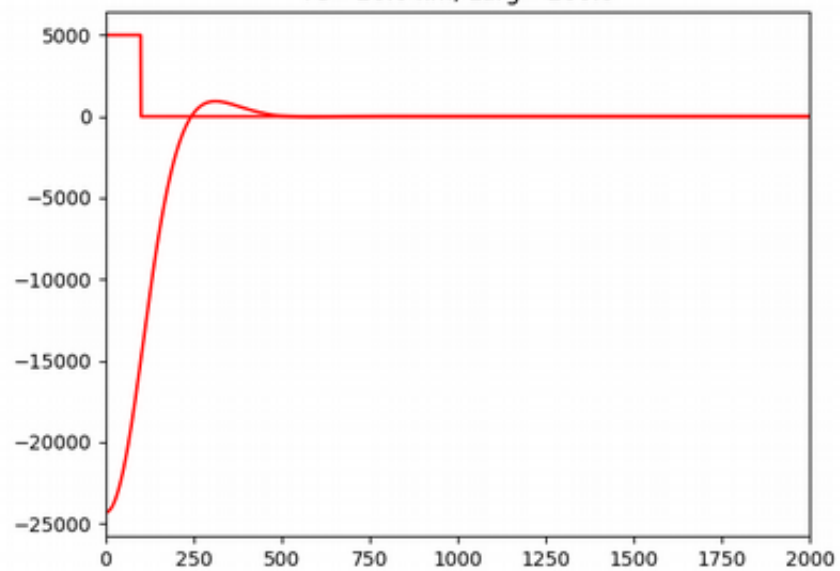
Te= 100.0 km, Larg= 200.0



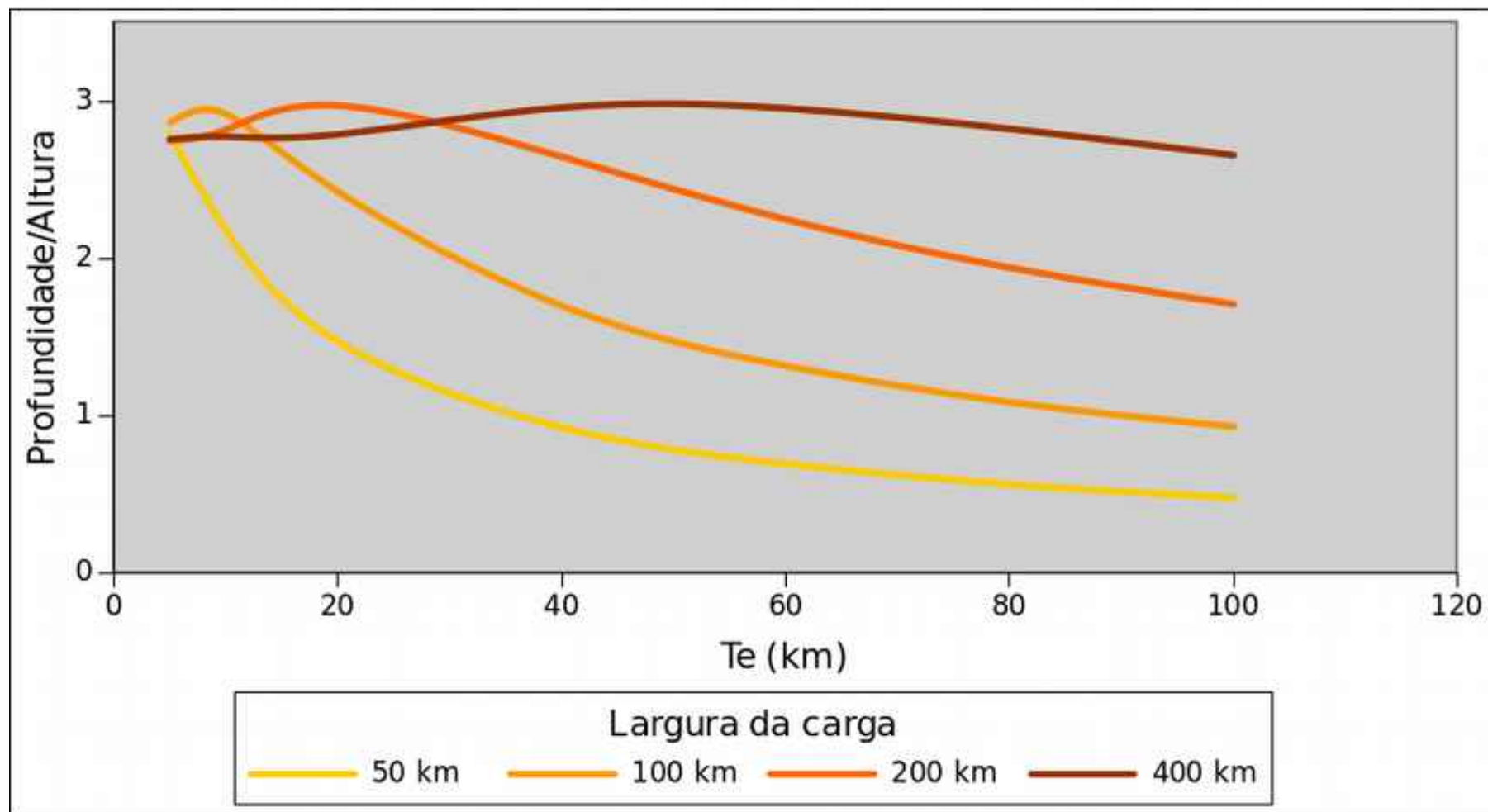
Te= 50.0 km, Larg= 200.0



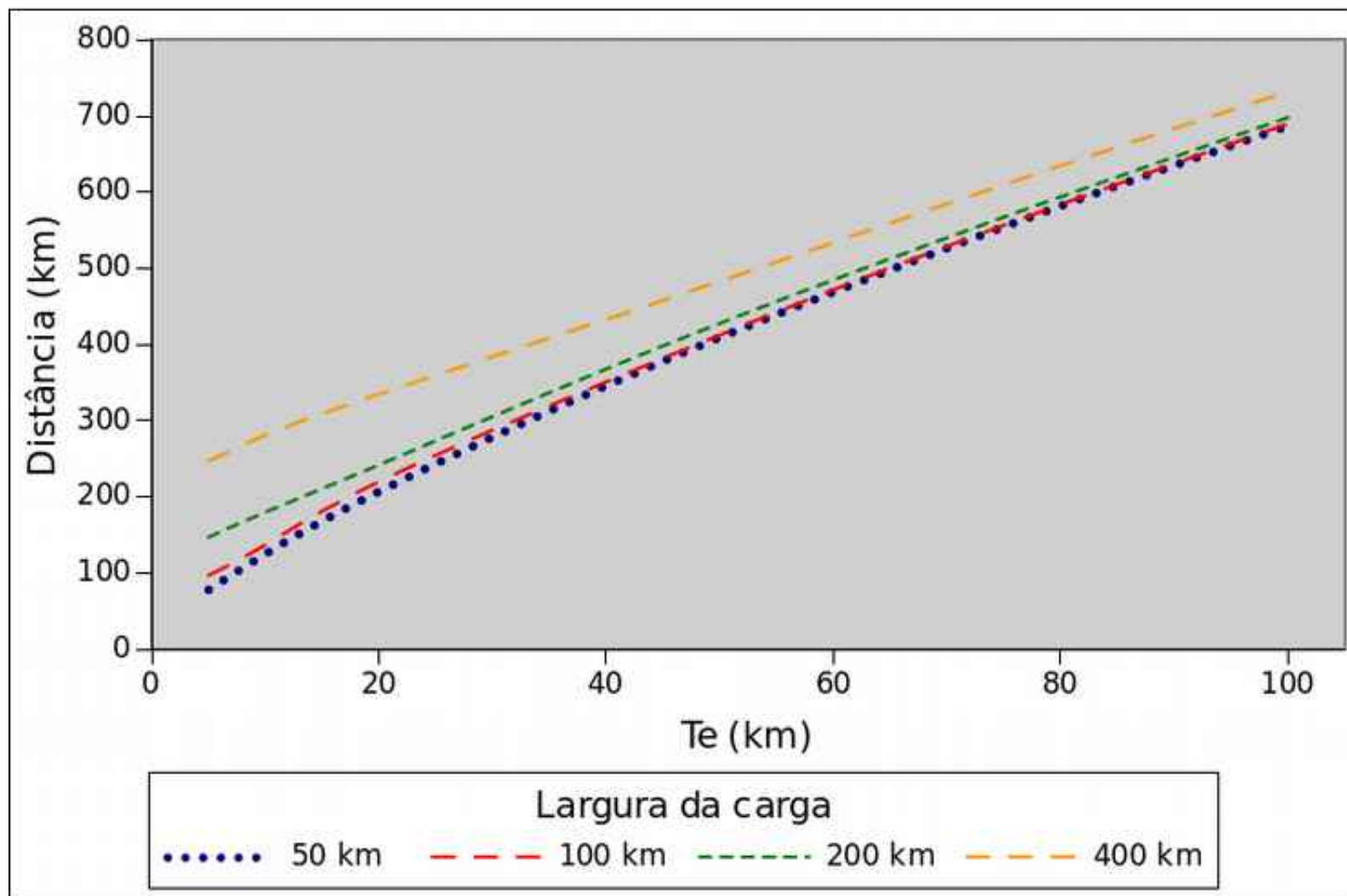
Te= 20.0 km, Larg= 200.0



Profundidade em função de T_e e largura da carga



Distância do início da ombreira flexural

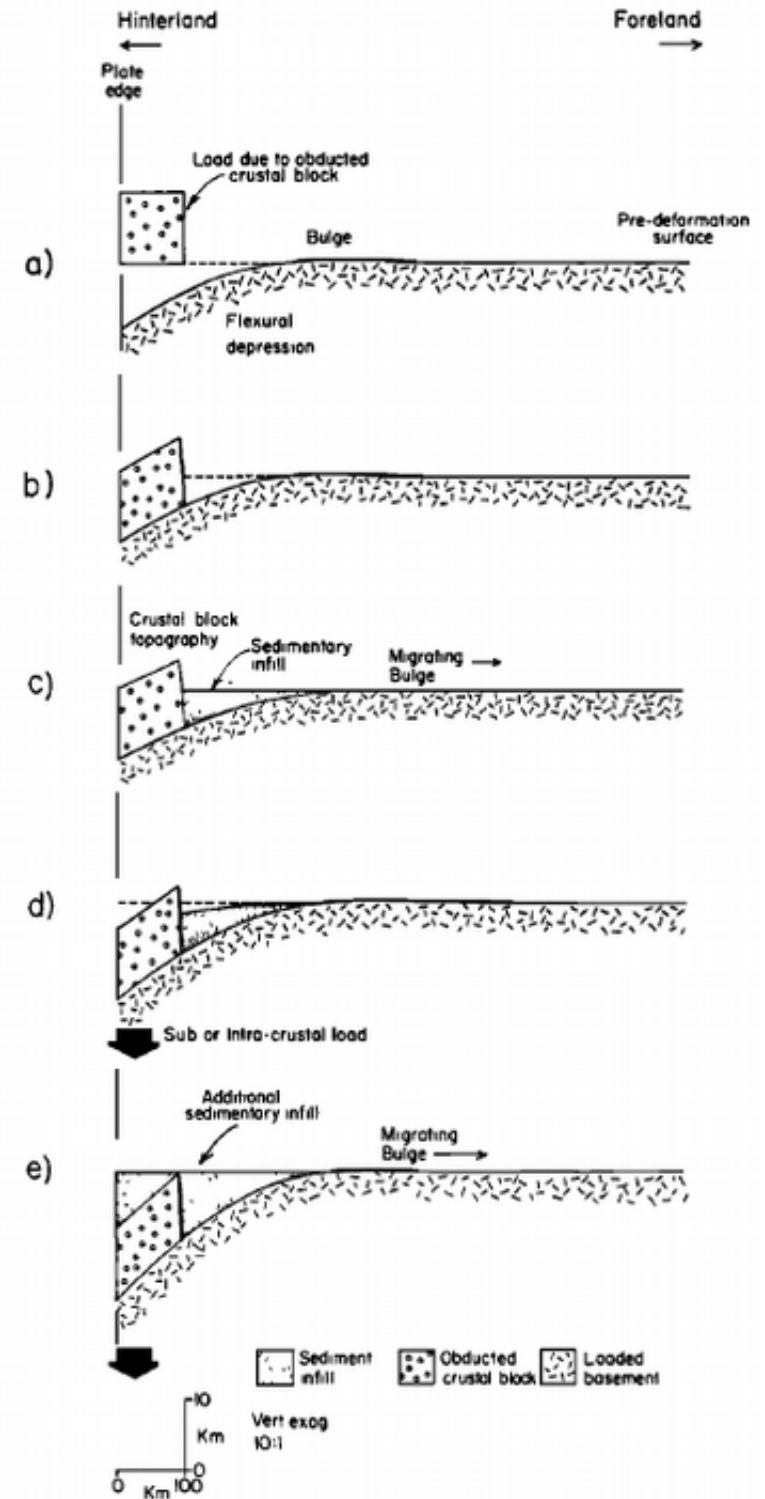


Esquemas de Carregamento

Himalaias

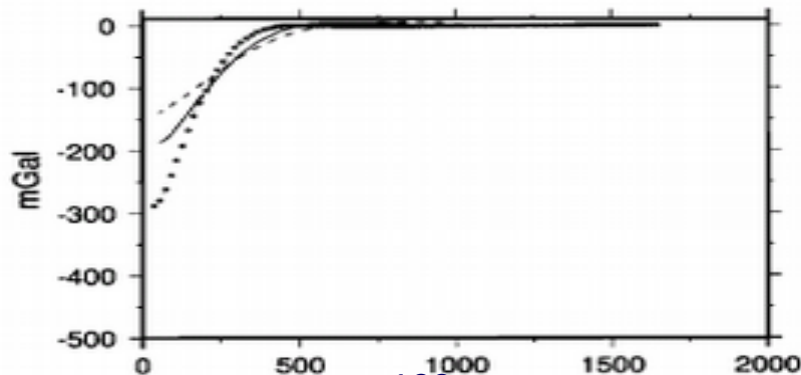


Alpes & Apalaches

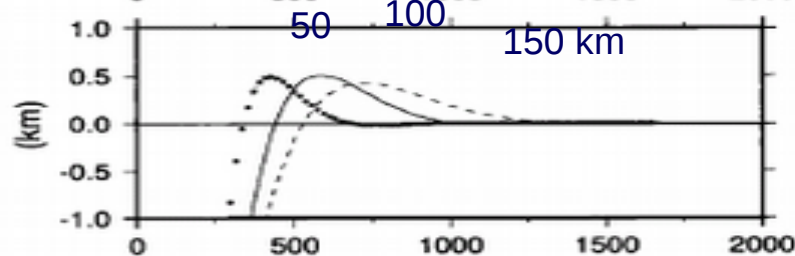


Solução Equação Diferencial de Flexura Placa Rompida

Gravimetria



Bacias de
Antepaís



Evolução

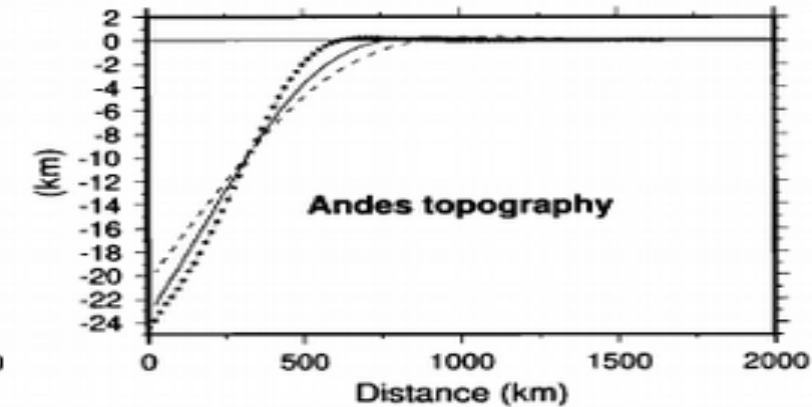
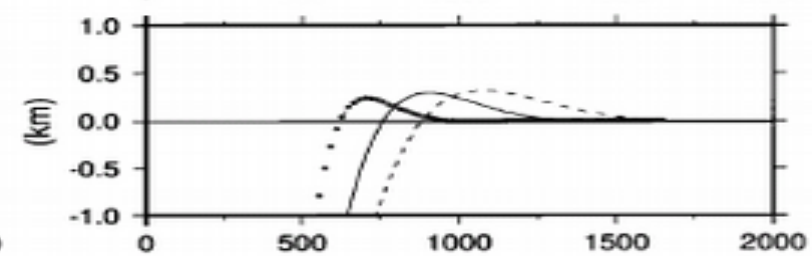
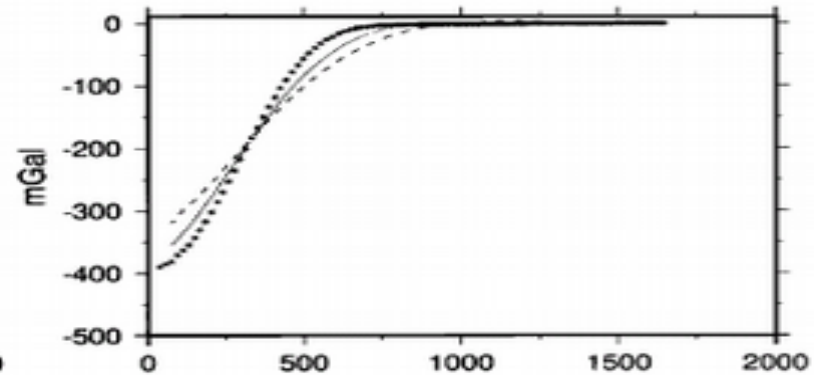
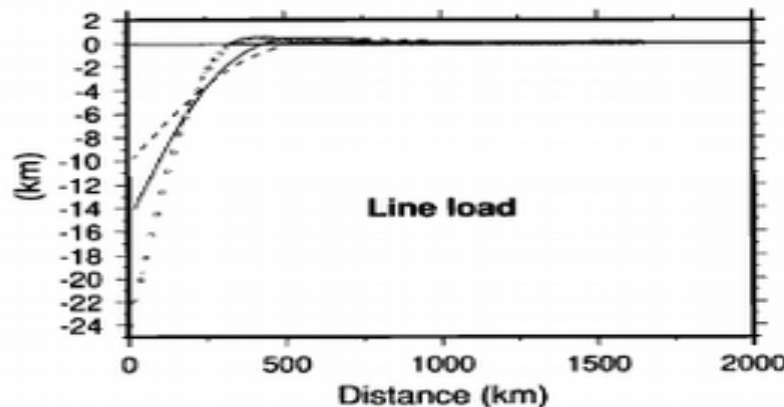


Figure 9. Two-dimensional flexural deformation of a semi-infinite elastic plate and corresponding gravity effect. Left column is for a plate loaded by a line of mass at $x=0$, right column is for a broken plate with its edge at $x=0$ and loaded by a distributed load (Andes topography) 300 km wide and varying altitude. See parameters of the elastic and gravity models in Table 1. Effective elastic thickness (T_e) increases from 50, 100, and 150 km from left to right in all graphs. $T_e=50$ km (dotted line), $T_e=100$ km (continuous line), and $T_e=150$ km (dashed line).

Exemplos

Feições Flexurais

● Perfil flexural placa continua x rompida

Para uma mesma carga, e mesmo T_e placa rompida flexiona mais e ombreira mais próxima da carga;

2. Amplitude da ombreira flexural é cerca de 4% da flexão da placa sob a carga (máxima flexão) nos dois casos;

3. Quanto mais rígida a placa, maior o comprimento de onda da flexão;

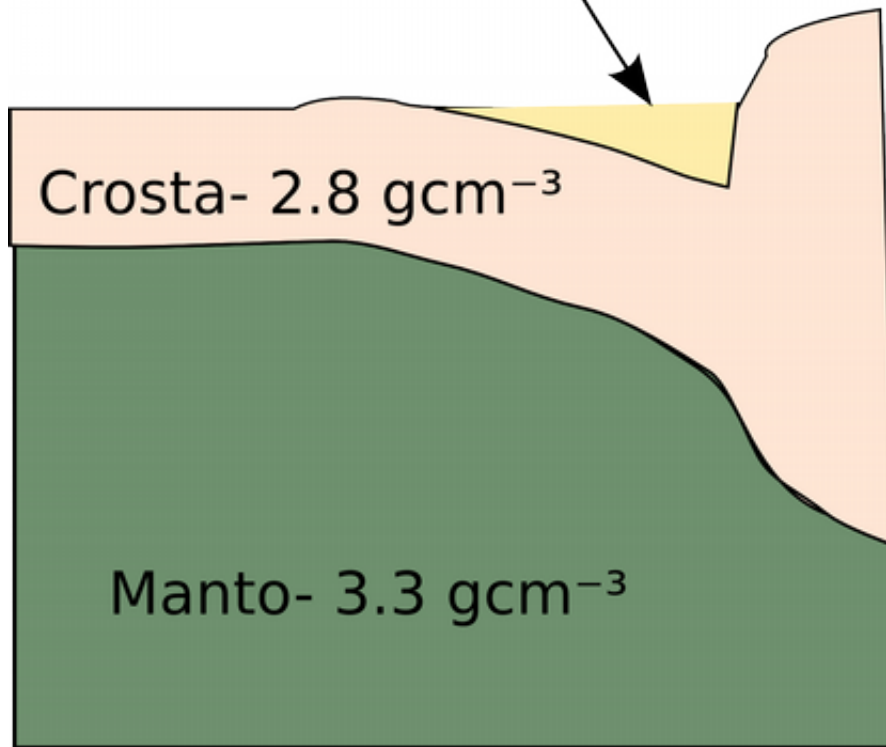
4. Dificuldade de reconhecer posição da ombreira, por isso utiliza-se anomalias de gravidade para modelar deformação.

Anomalias de Gravidade e Flexura da Litosfera em Cadeias de Montanhas

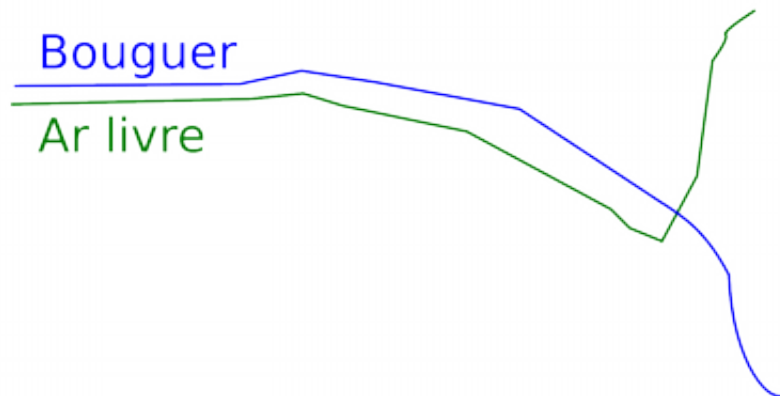
Artigo: Karner, G.D.; Watts, A .B., 1983

Journal of Geophysical Research, 88, 10.449-10.477

Baixo flexural não compensado
Anomalias: Ar livre negativa
Bouguer negativa

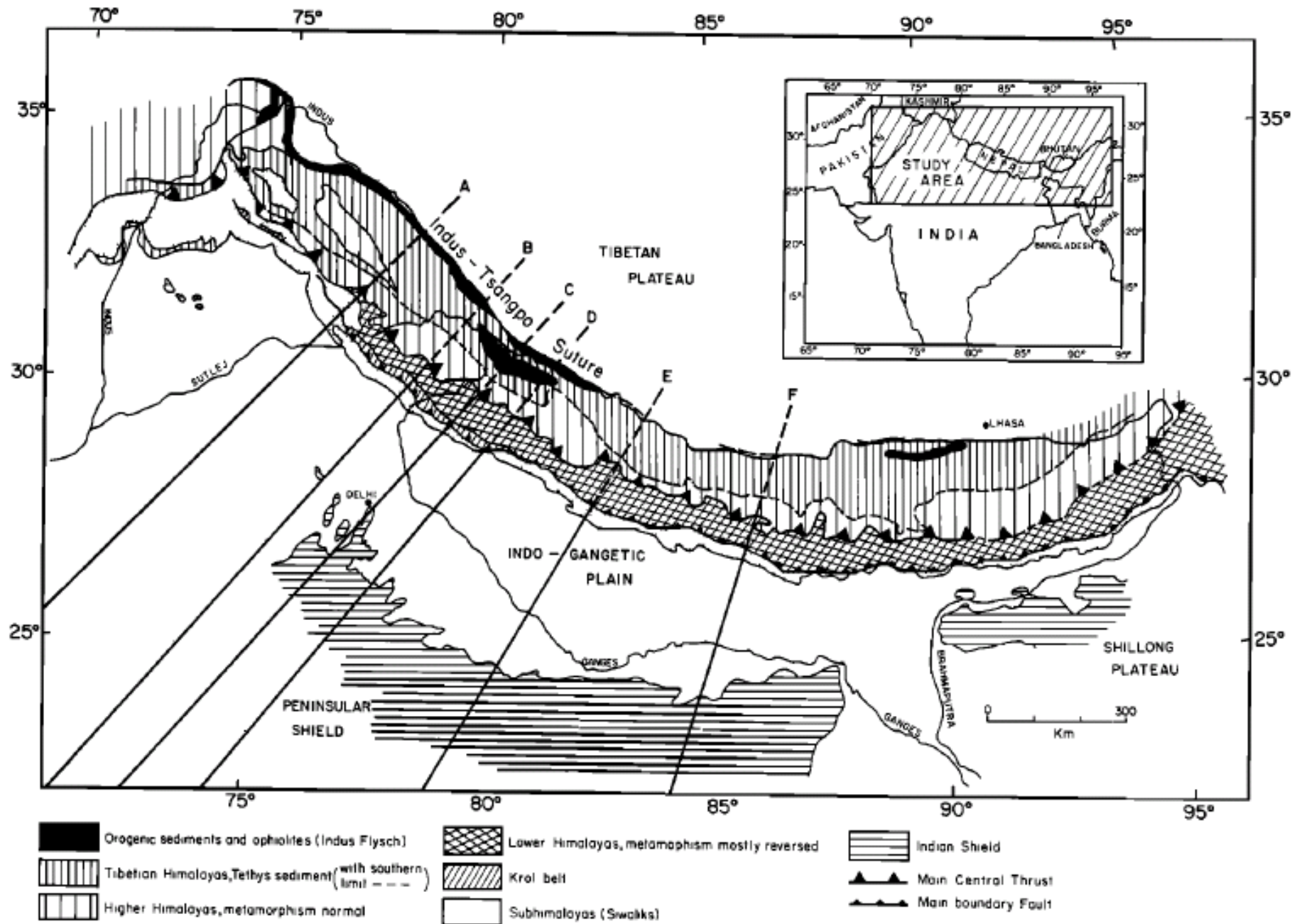


Alto topográfico compensado
por raiz crustal profunda:
Anomalias: Ar livre positiva,
Bouguer negativa

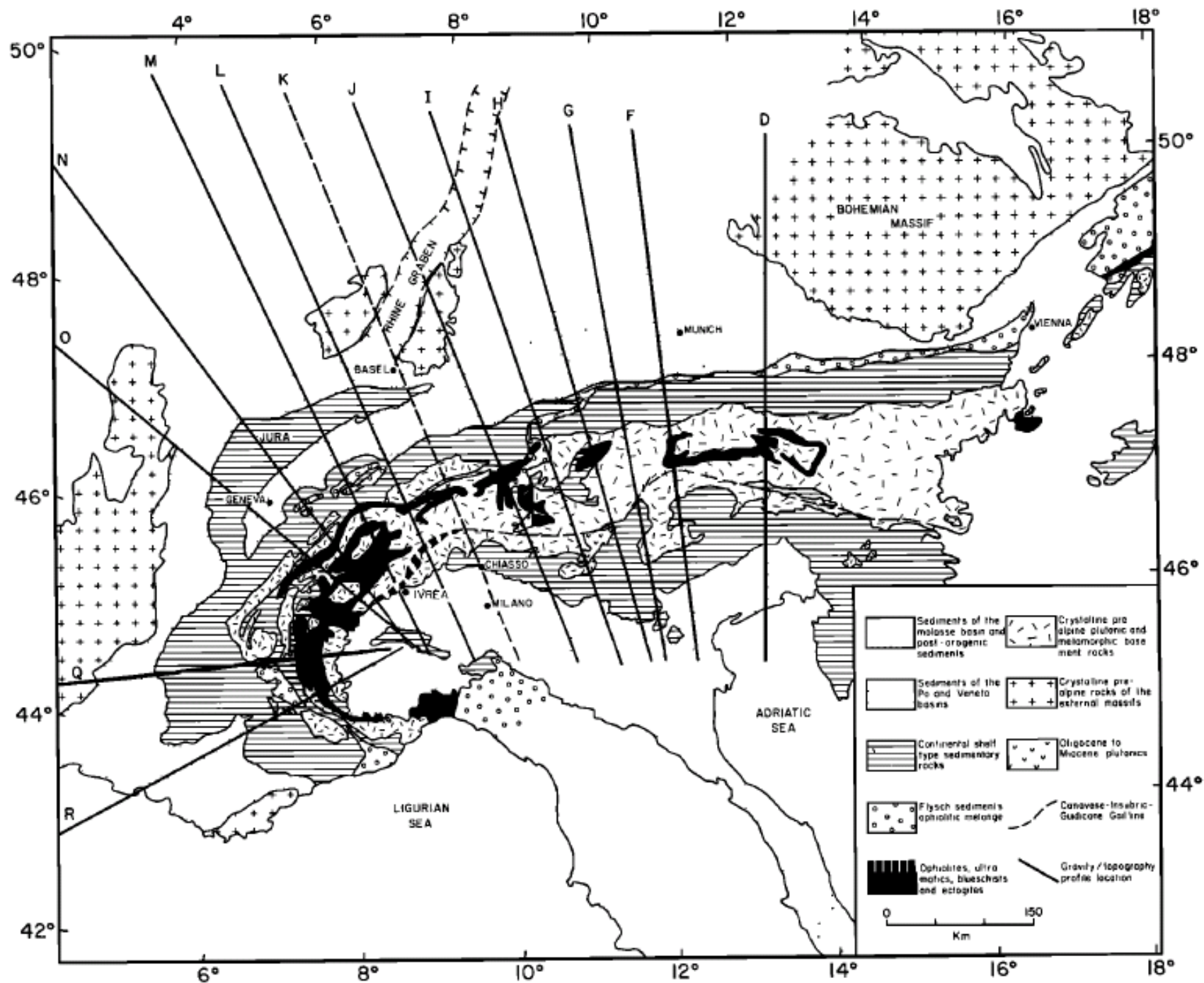


Assinatura gravimétrica

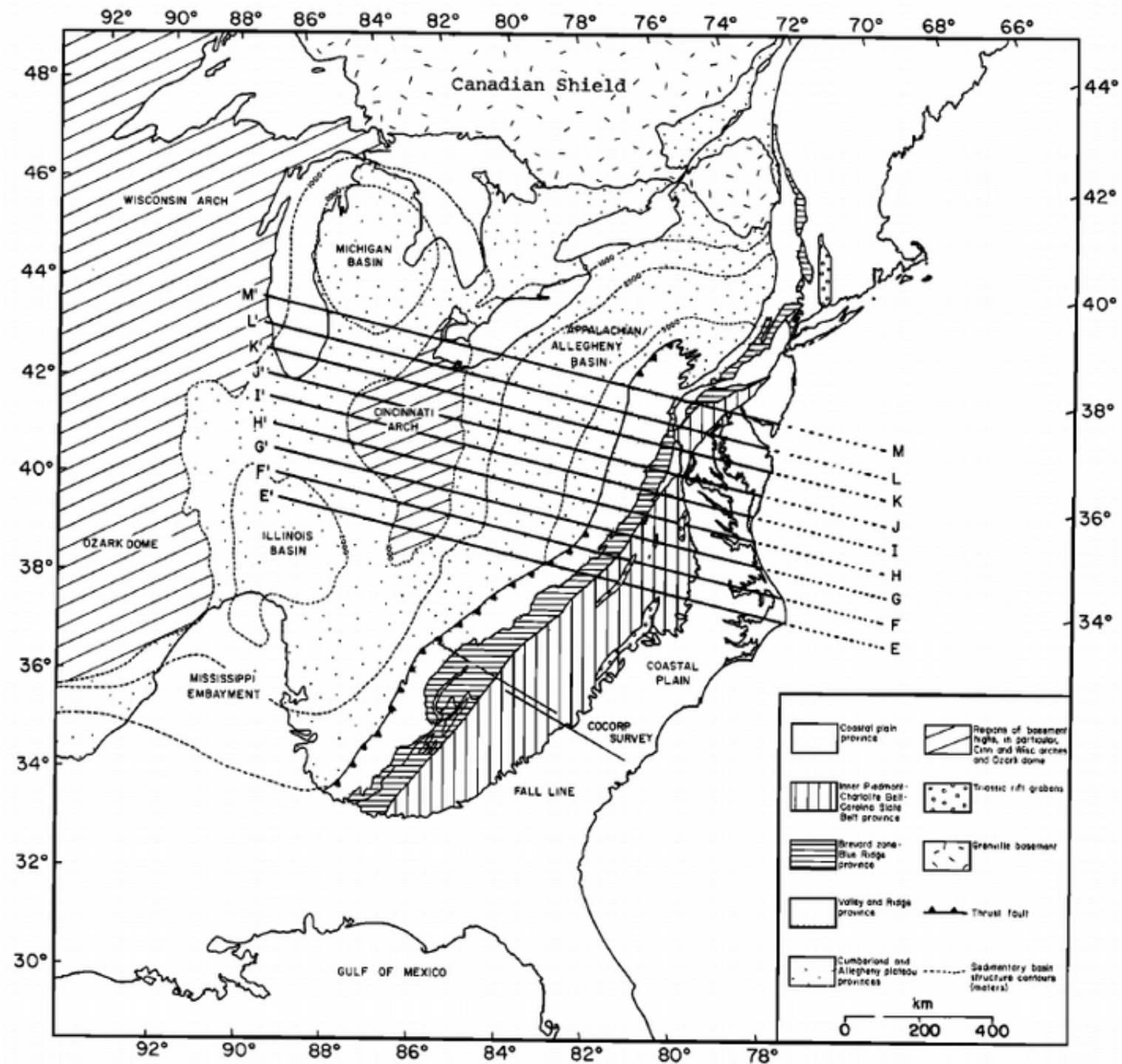
Himalaiias



Alpes Europeus

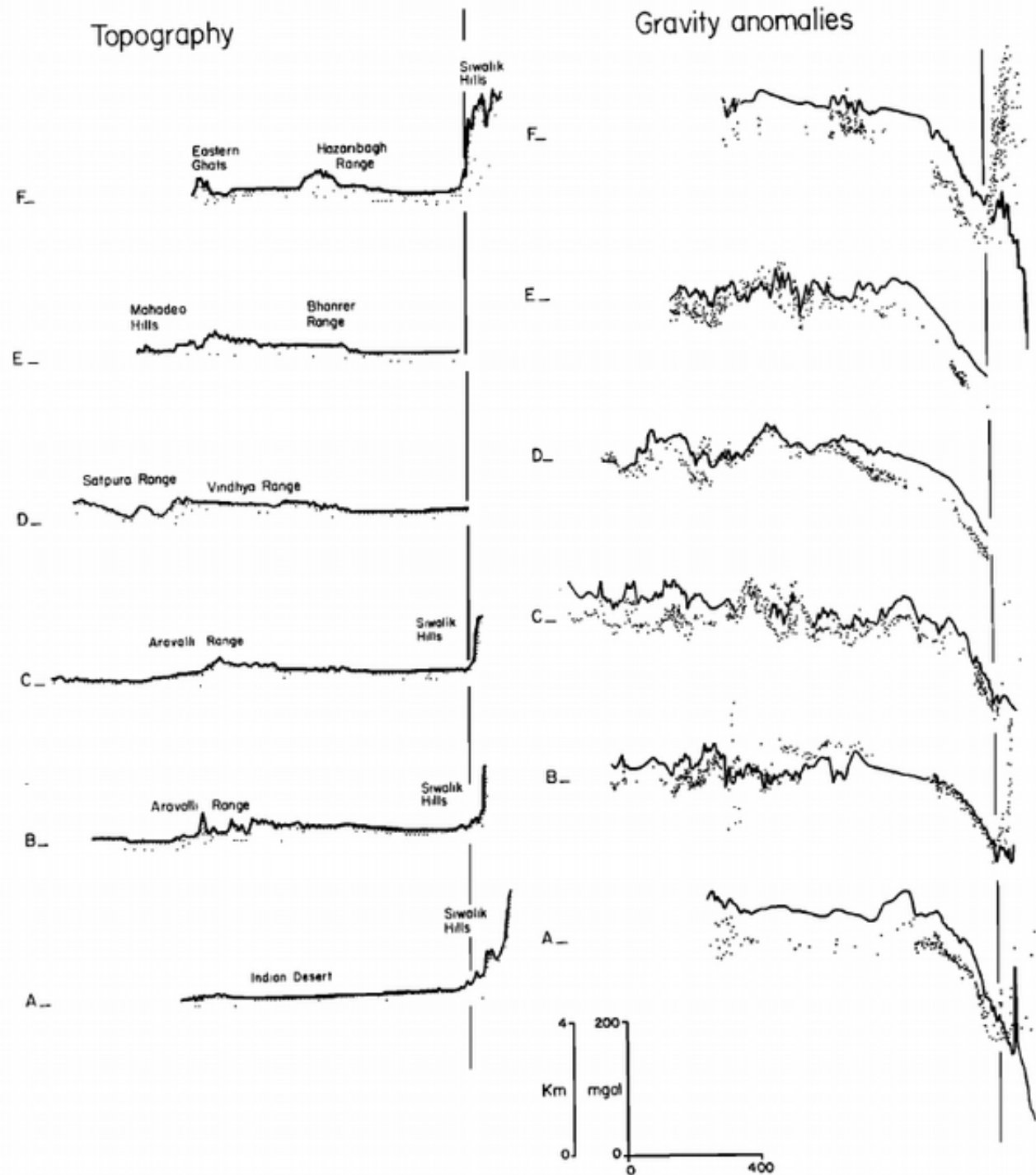


Apalaches (Estados Unidos)



Himalayas

Gravidade X Topografia Himalaias



Gravidade X Topografia Alpes Ocidentais

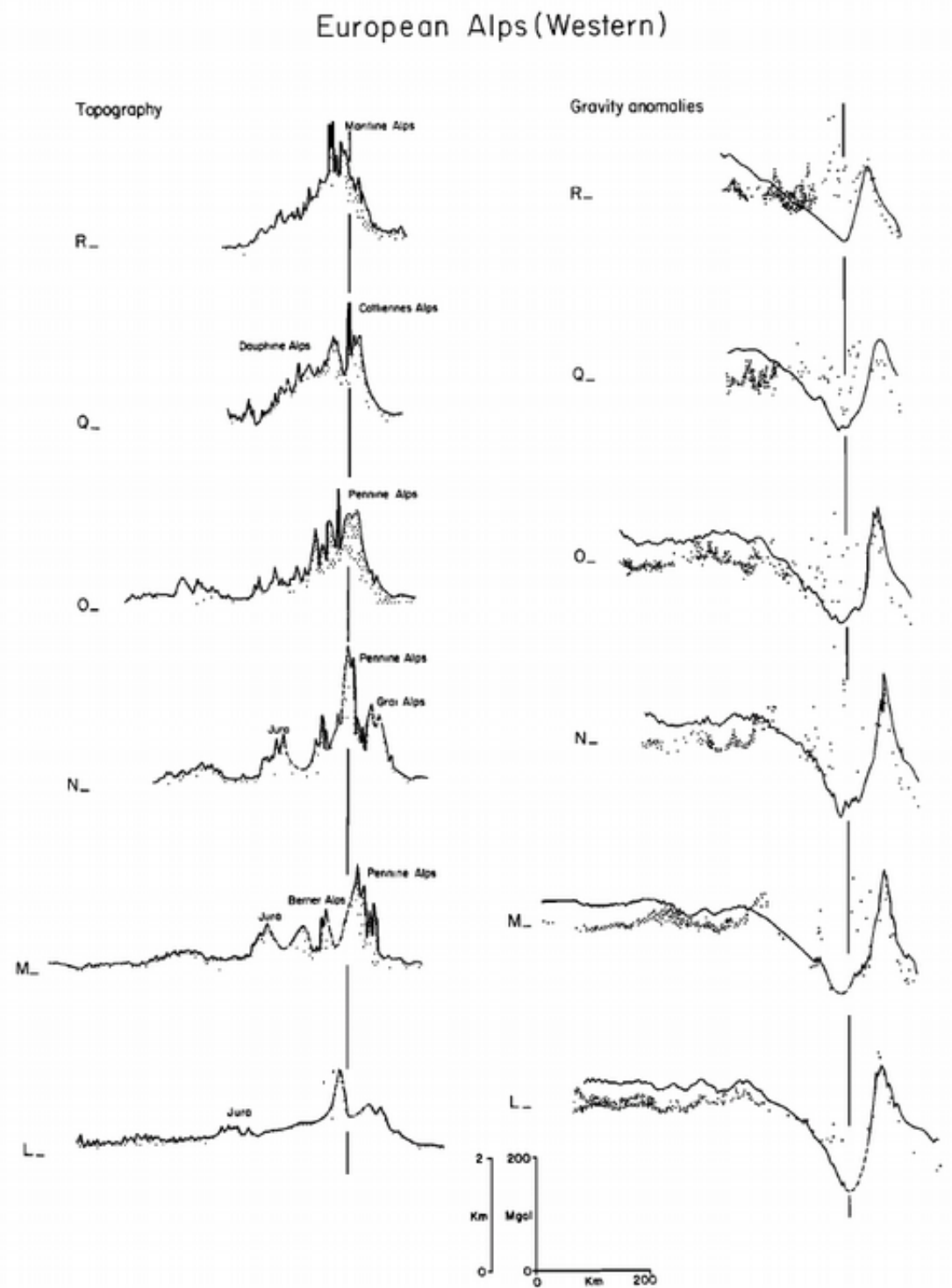
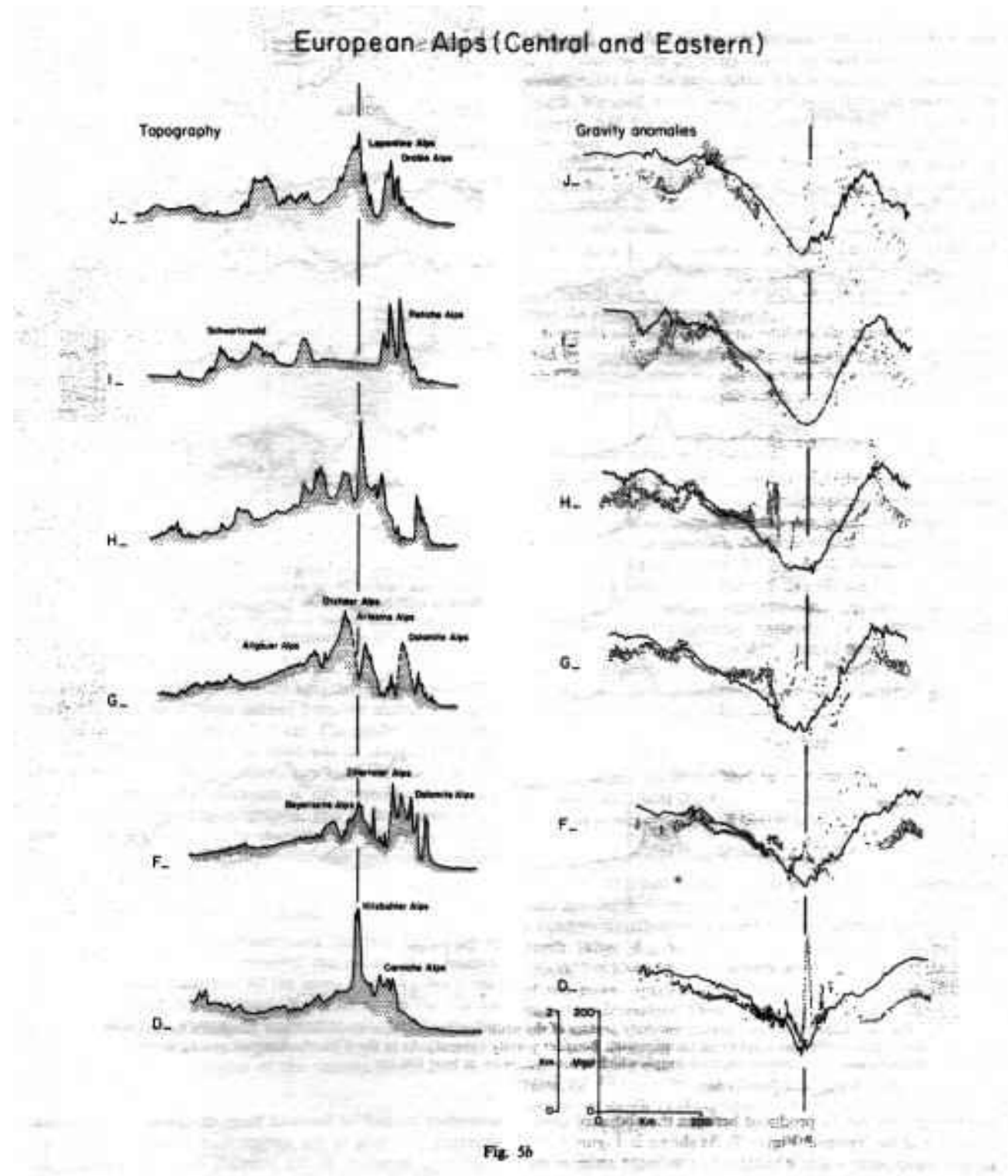


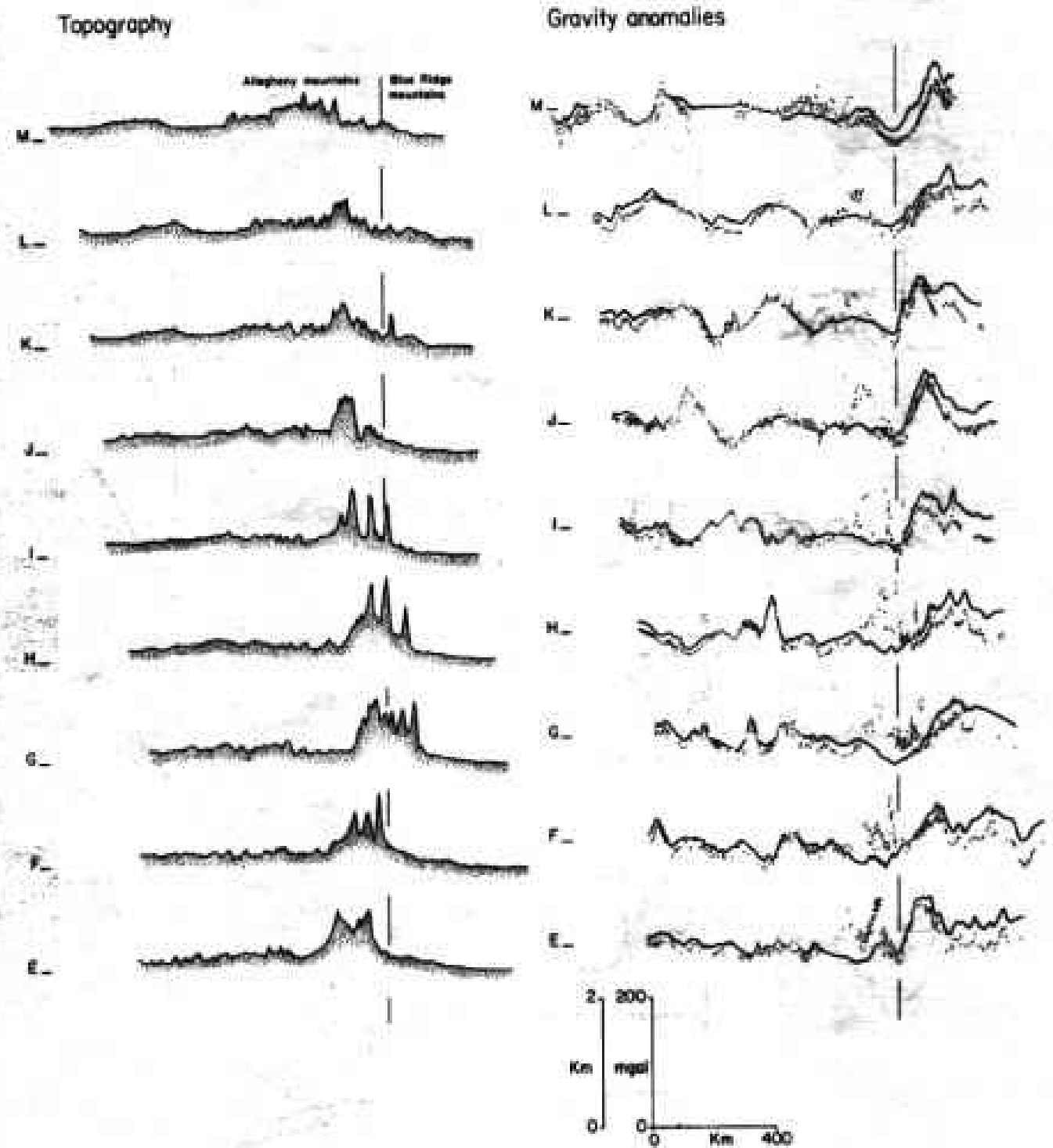
Fig. 5a

Gravidade X Topografia Alpes Centrais e Orientais

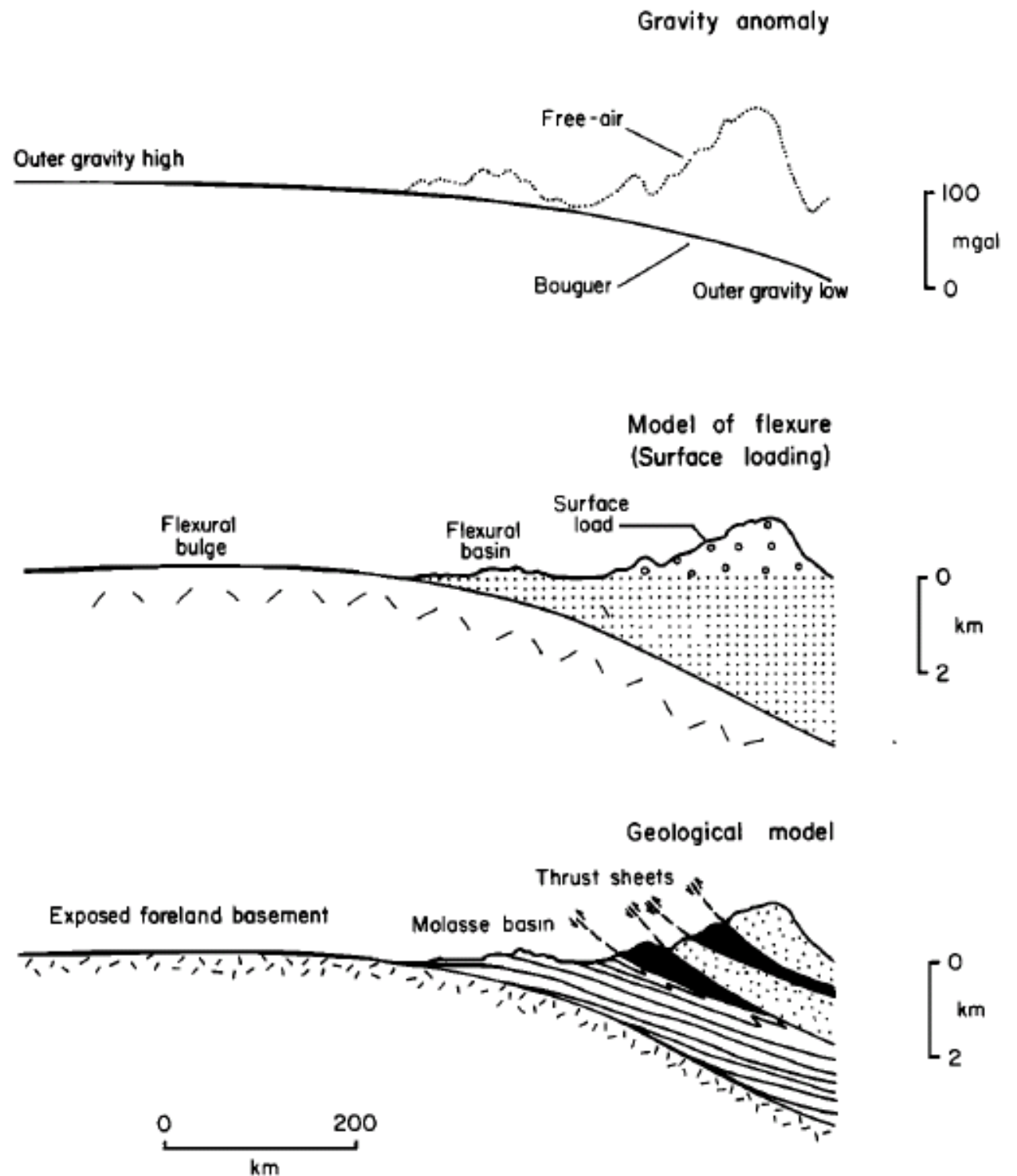


Appalachians

Gravidade X Topografia Apalaches



Modelo Flexural Simples

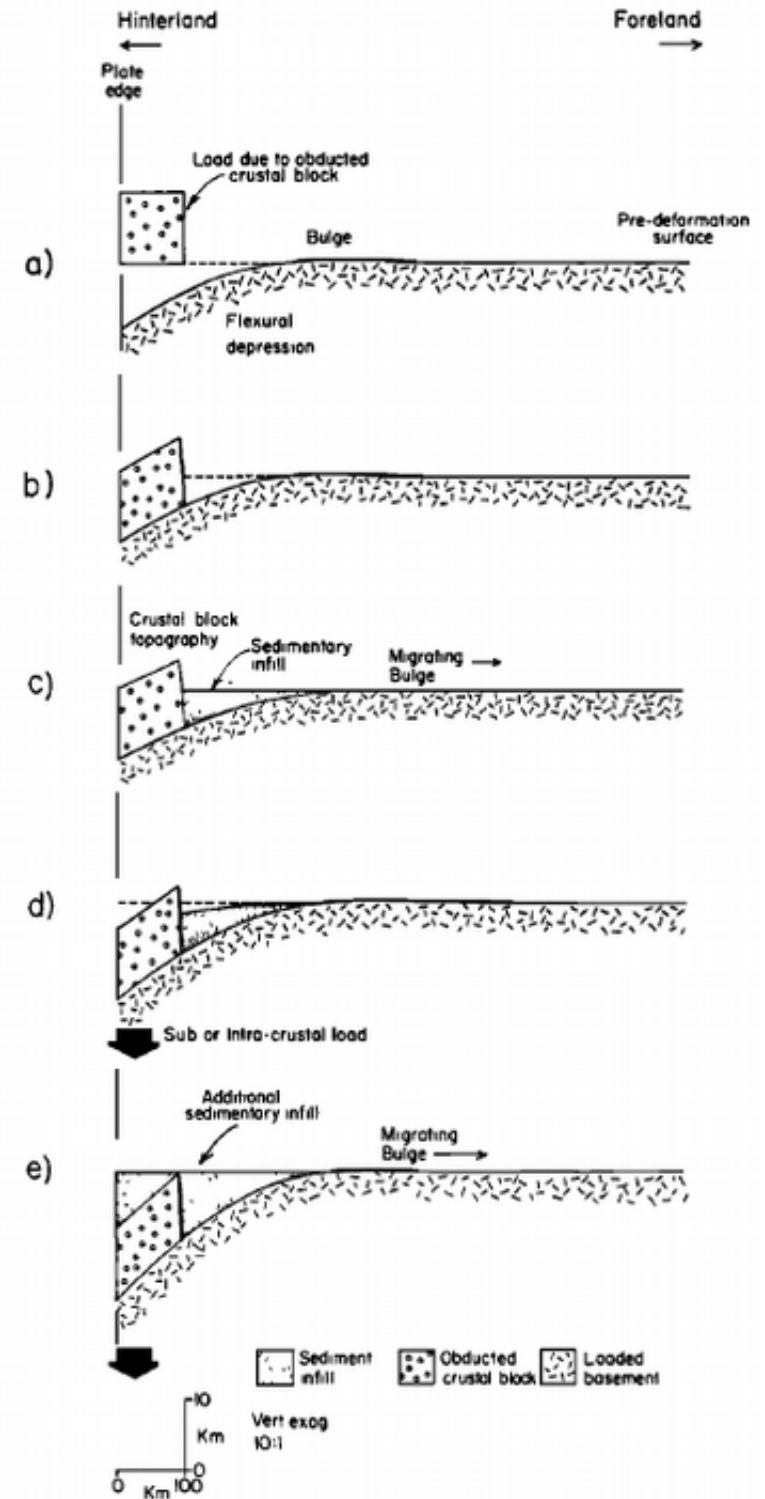


Esquemas de Carregamento

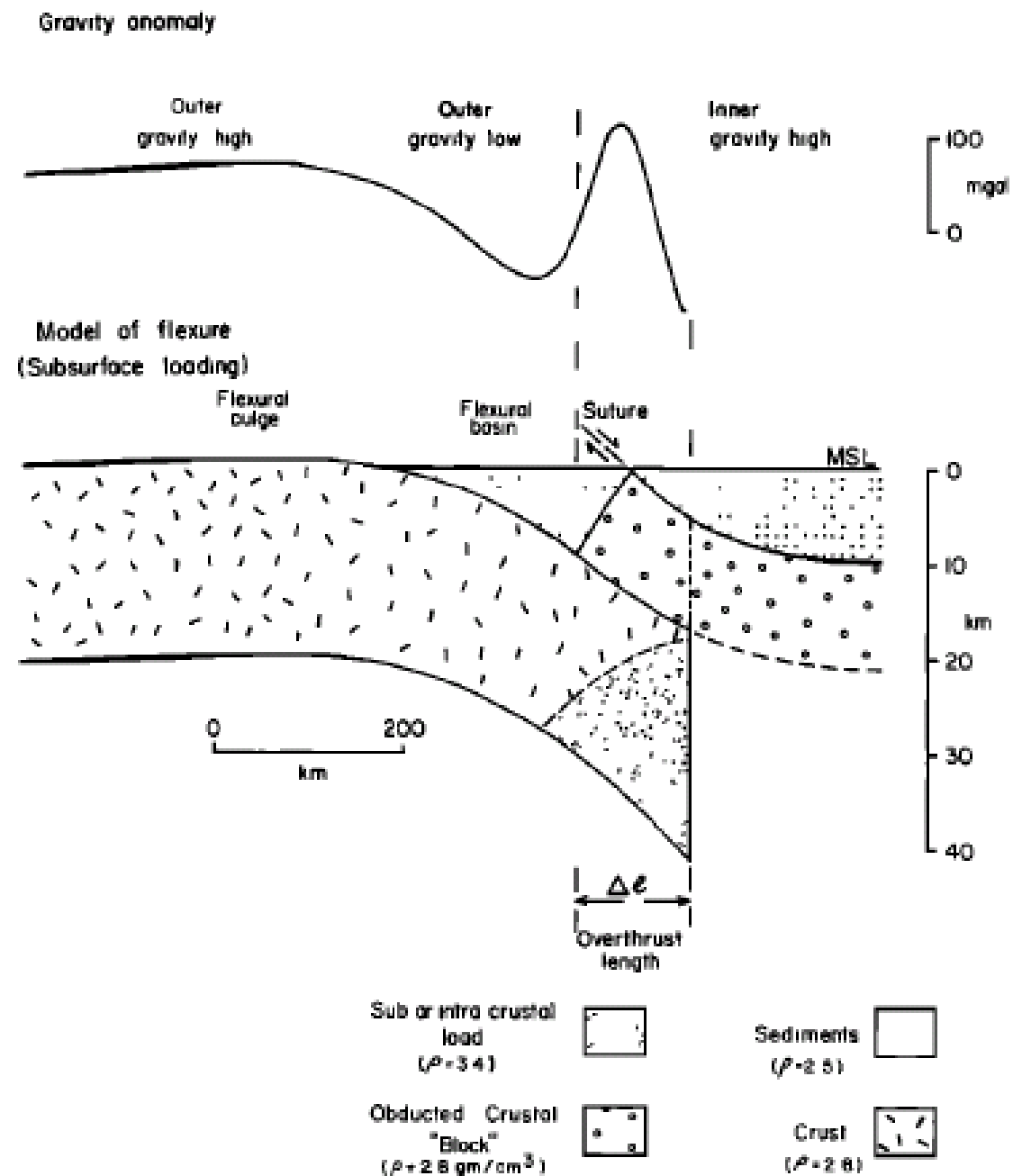
Himalaias



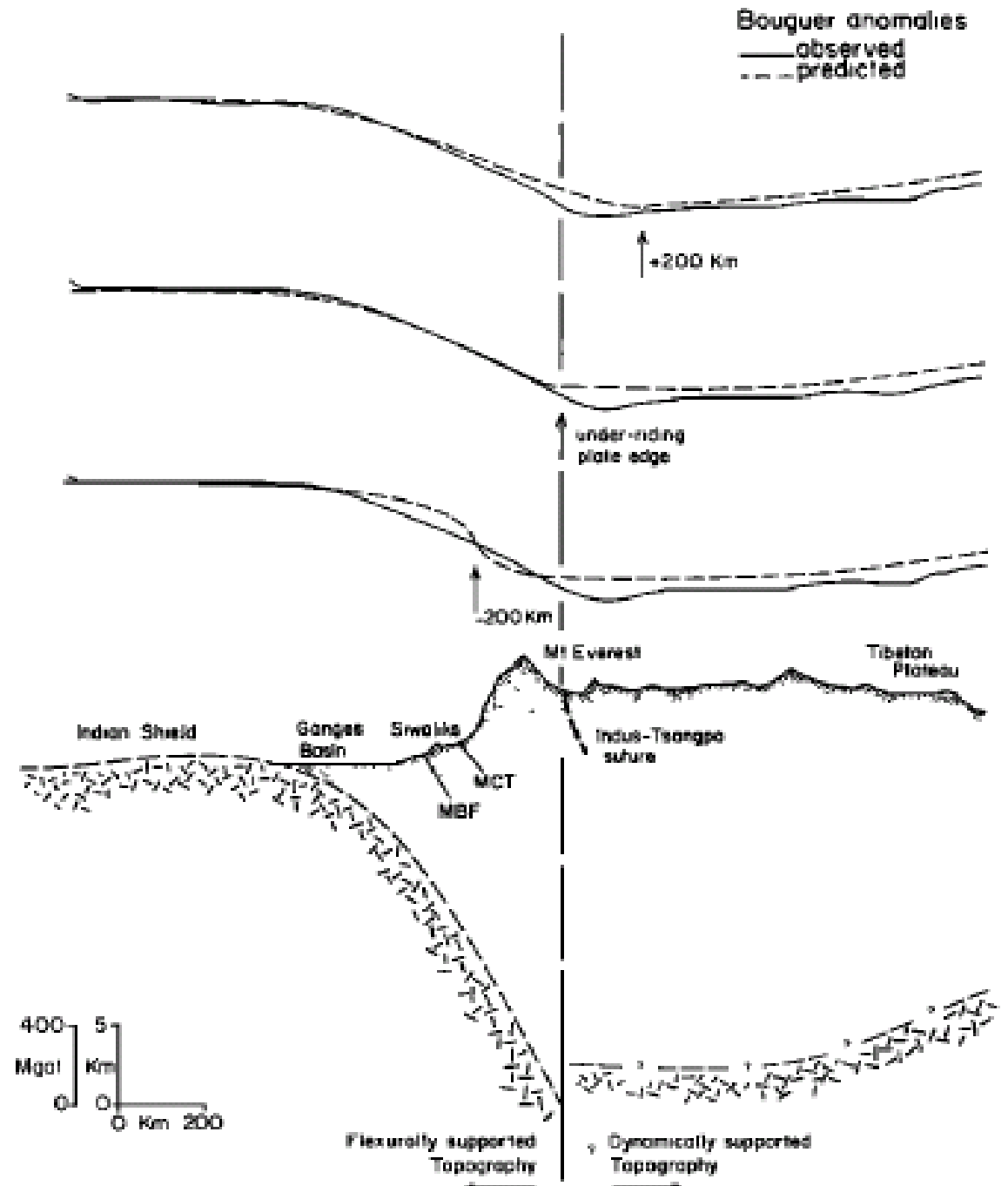
Alpes & Apalaches



Geologia X Anomalia gravimétrica “bipolar”

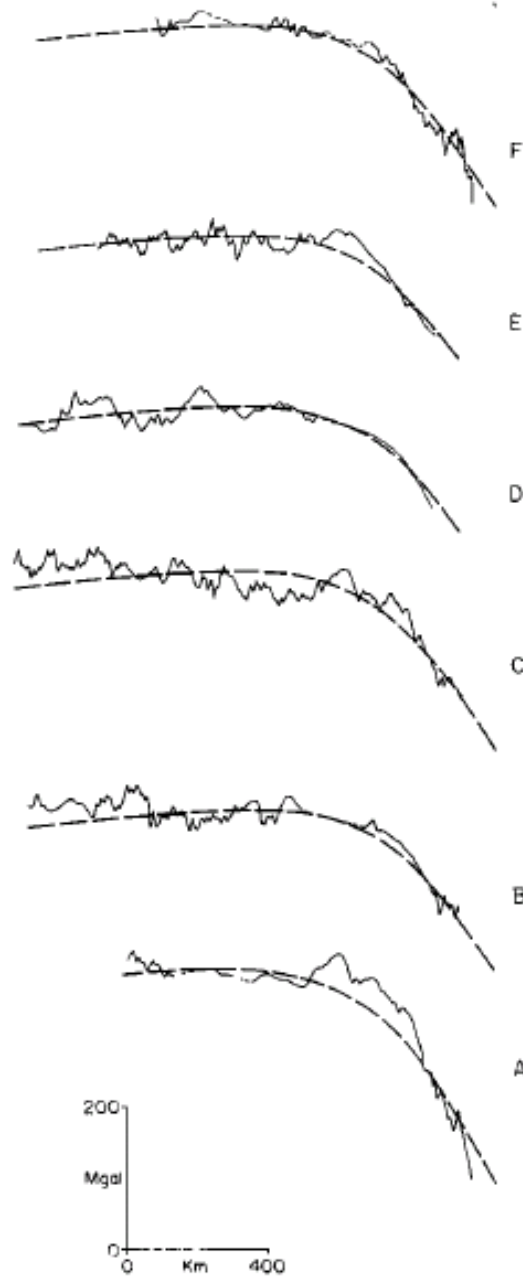


Flexura e Anomalia Bouguer Himalaiias

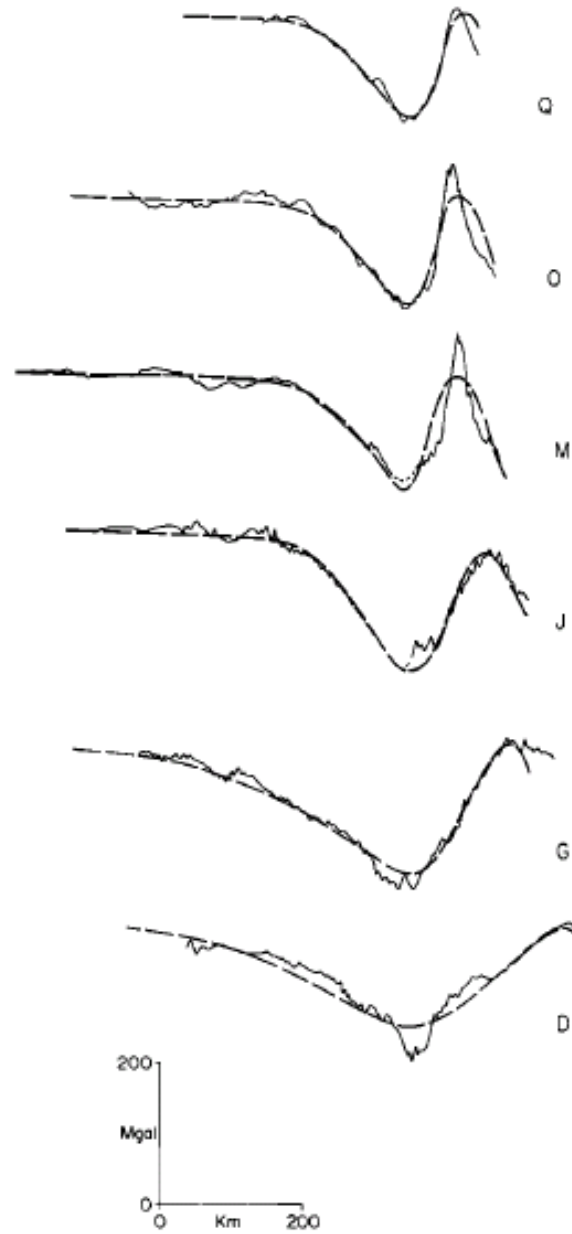


Comparação Sinal Gravimétrico

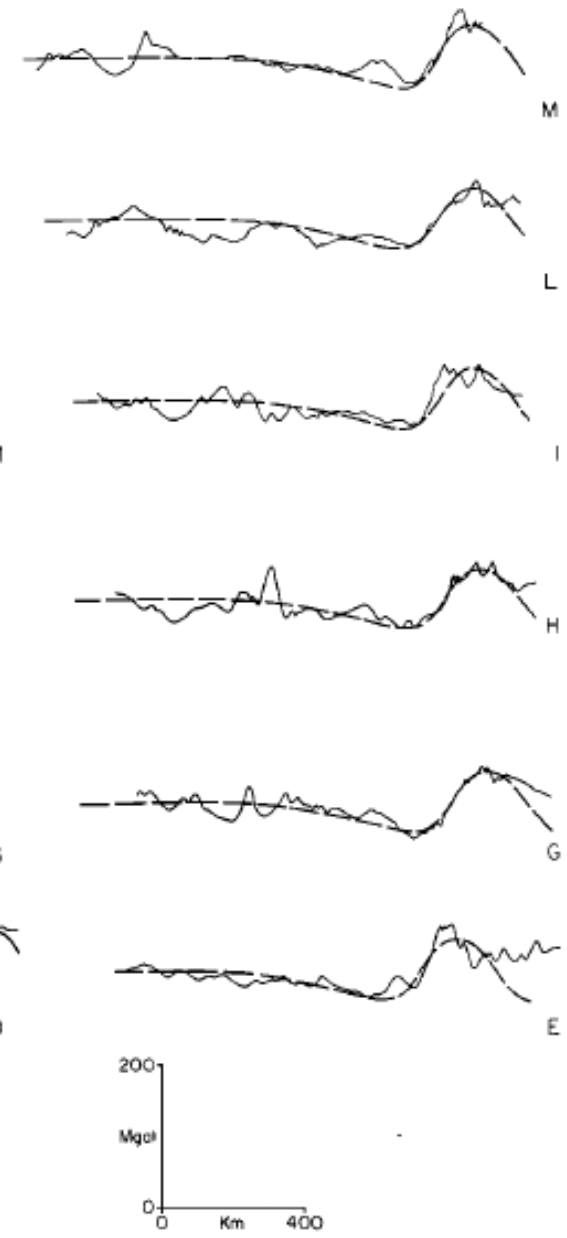
Himalayas



European Alps

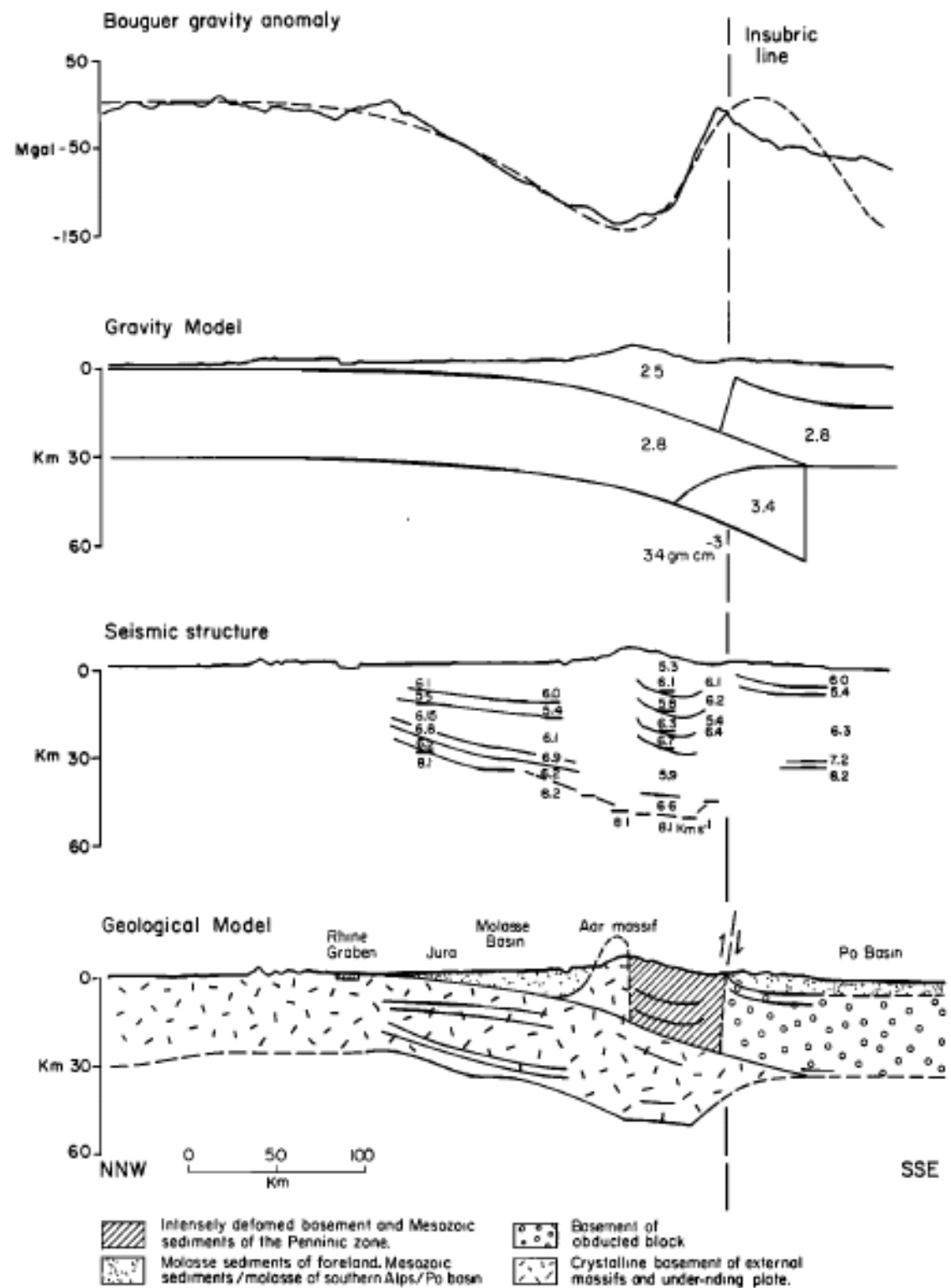


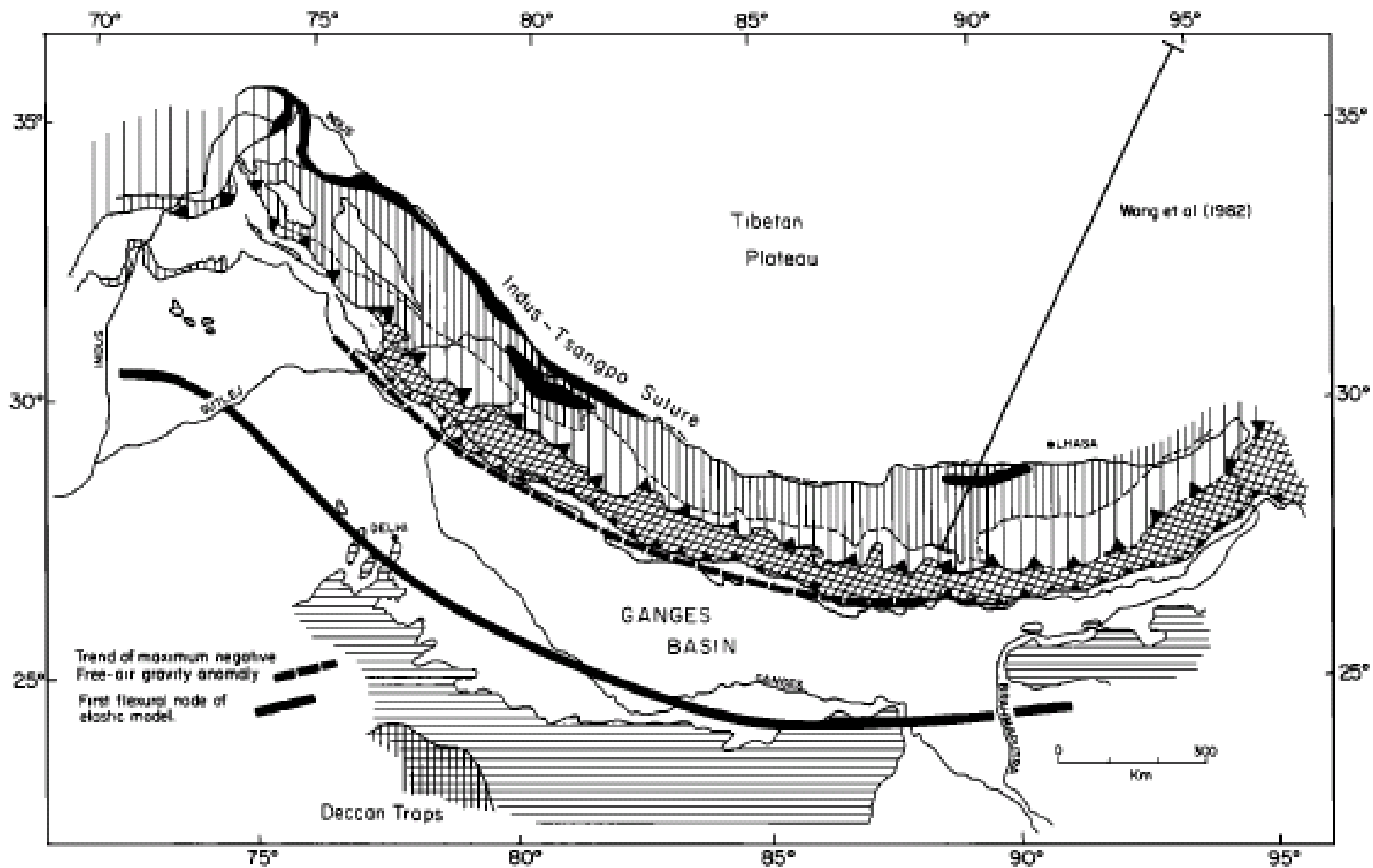
Appalachians

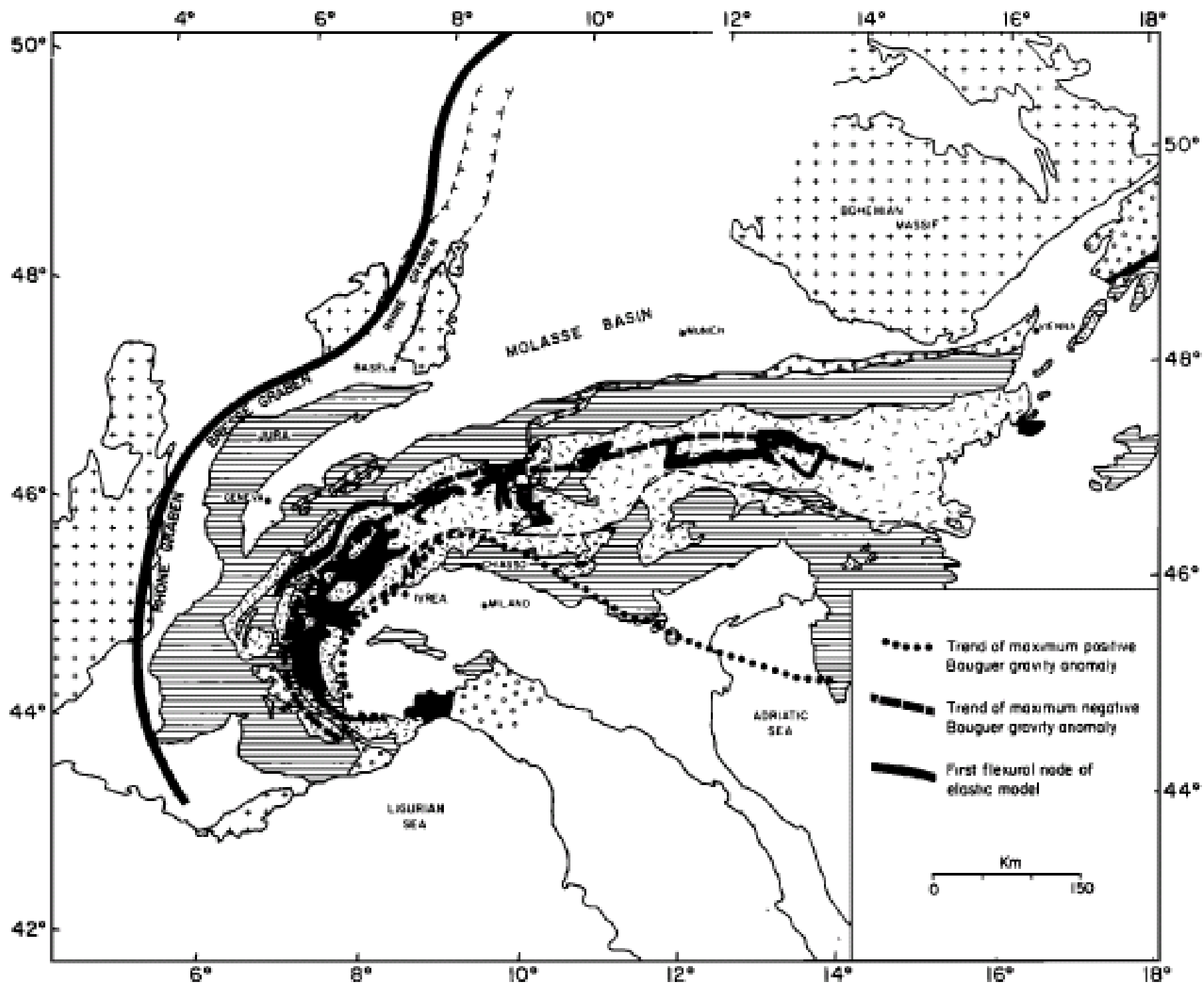


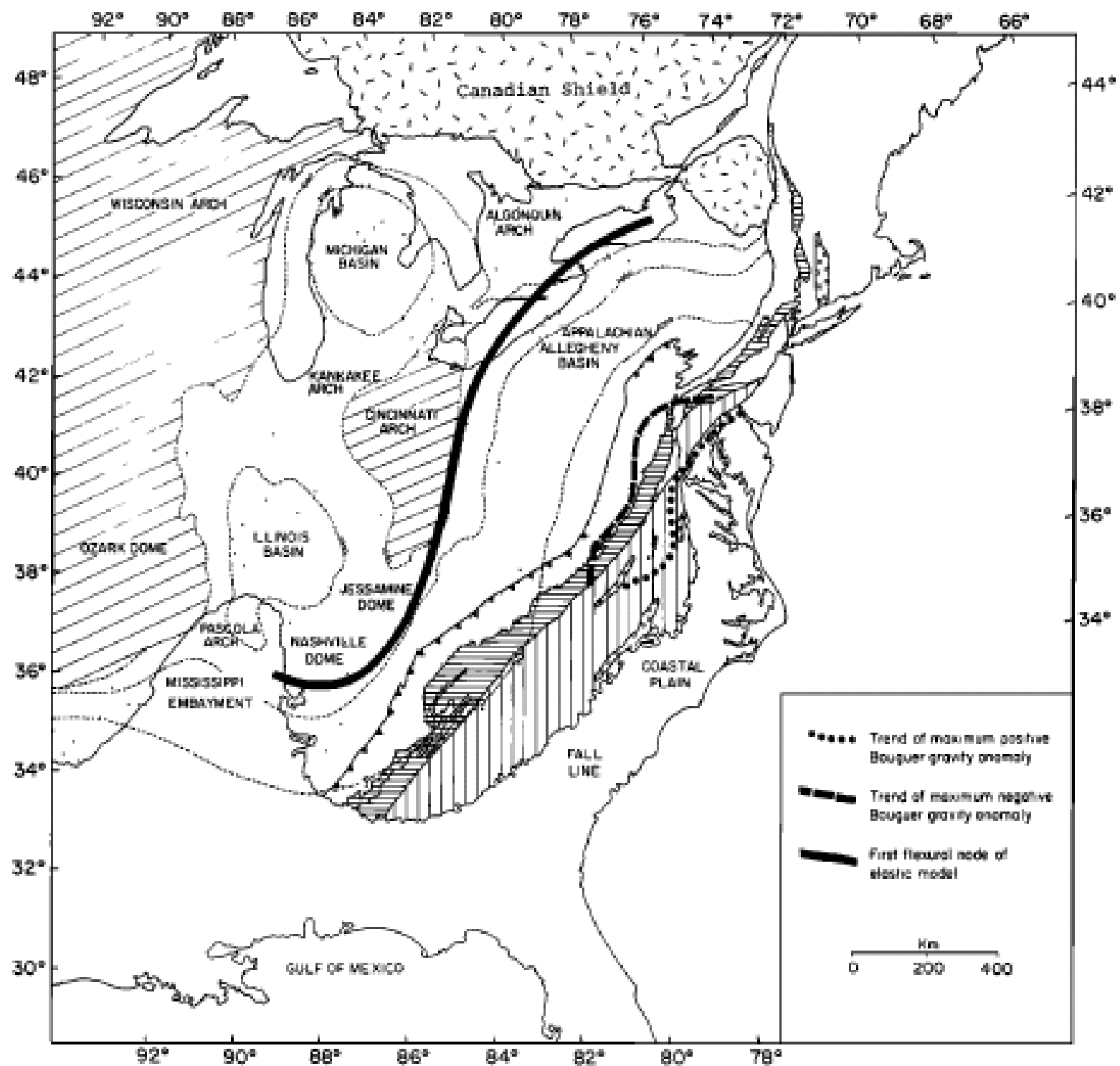
Alpes

Modelo flexural e gravimétrico





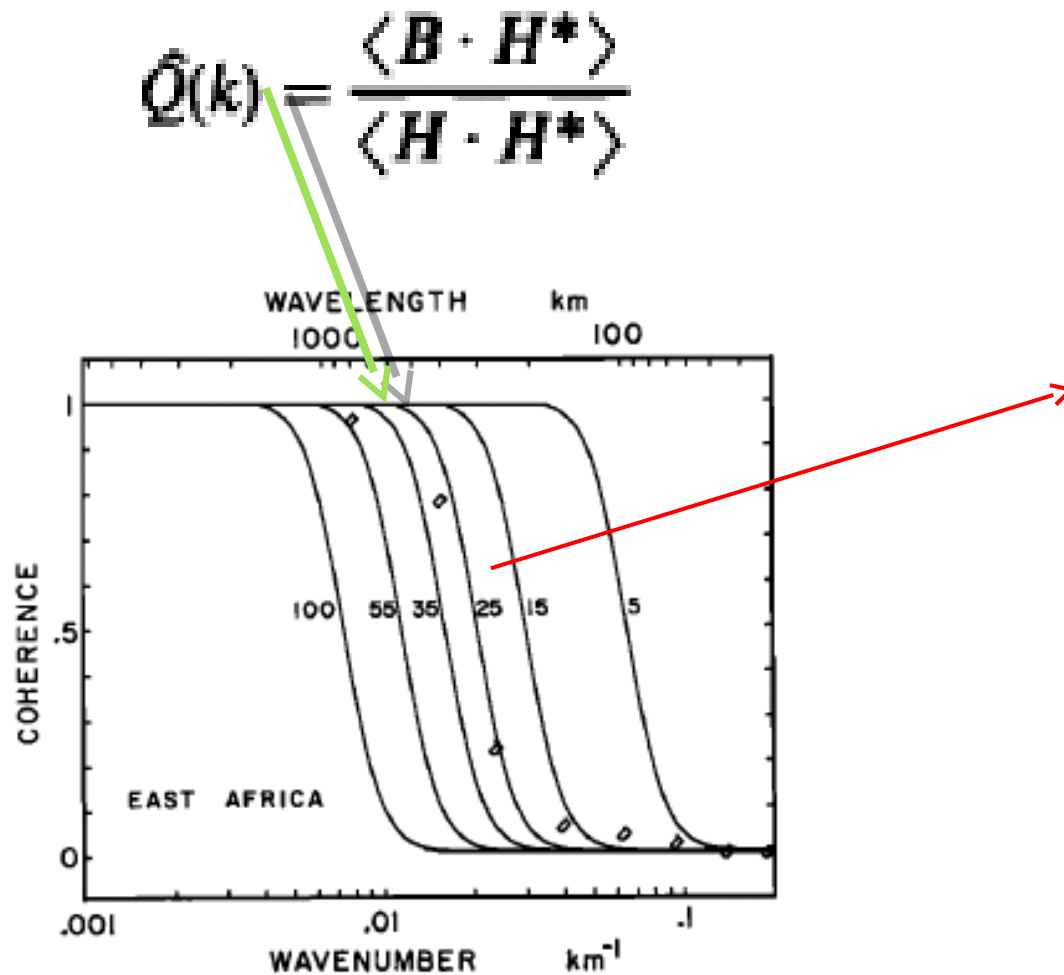




Como estimar T_e ?

- Modelagem flexural em vários contextos tectônicos (bacias, montanhas, etc), resolvendo a equação diferencial da deformação de uma placa elástica fina.
- Correlação entre topografia e anomalias de gravidade (Bouguer ou Airy) ou geóide.
- T_e é uma fração da espessura da litosfera definida sismologicamente (Burov & Diament, 1995).
- Parâmetro importante para qualificar estado térmico da placa no momento do carregamento
- Utilizado em modelagem de bacias do tipo ante-país e evolução de margens continentais extensionais (erosão e retração escarpas)

Análise Espectral: Coerência Bouguer x Topografia



Coerência teórica obtida resolvendo a equação de flexura da placa elástica fina, com diferentes T_e .

Forsyth, 1985

Mapas de Te

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Utilidade e aplicações;

Correlacionar Te e provincias tectonicas, estado térmico
de placas litosféricas  Reologia da
litosfera

Modelagem direta de deformação em diversos contextos
tectônicos

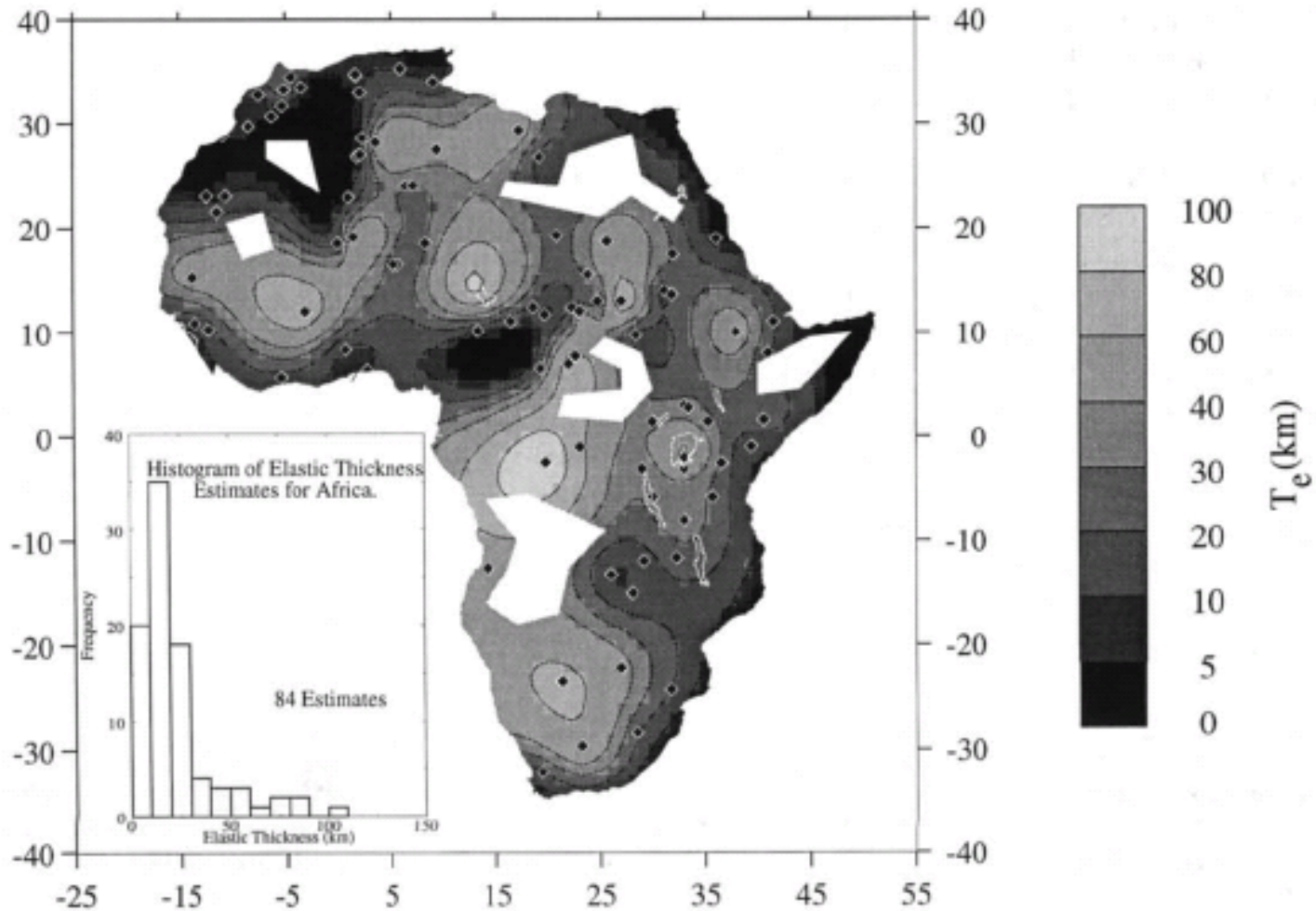
Abordagem 3-D ou 4-D de deformação de placas,
equação flexura de placas elásticas utilizando diferenças
ou elementos finitos. Simulação mais complexa e realista
do ponto de vista geológico.

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

Estimativas de T_e para a África



Hartley et al., 1996

Áreas em branco, faltam dados gravimétricos

Elasticidade
e flexura

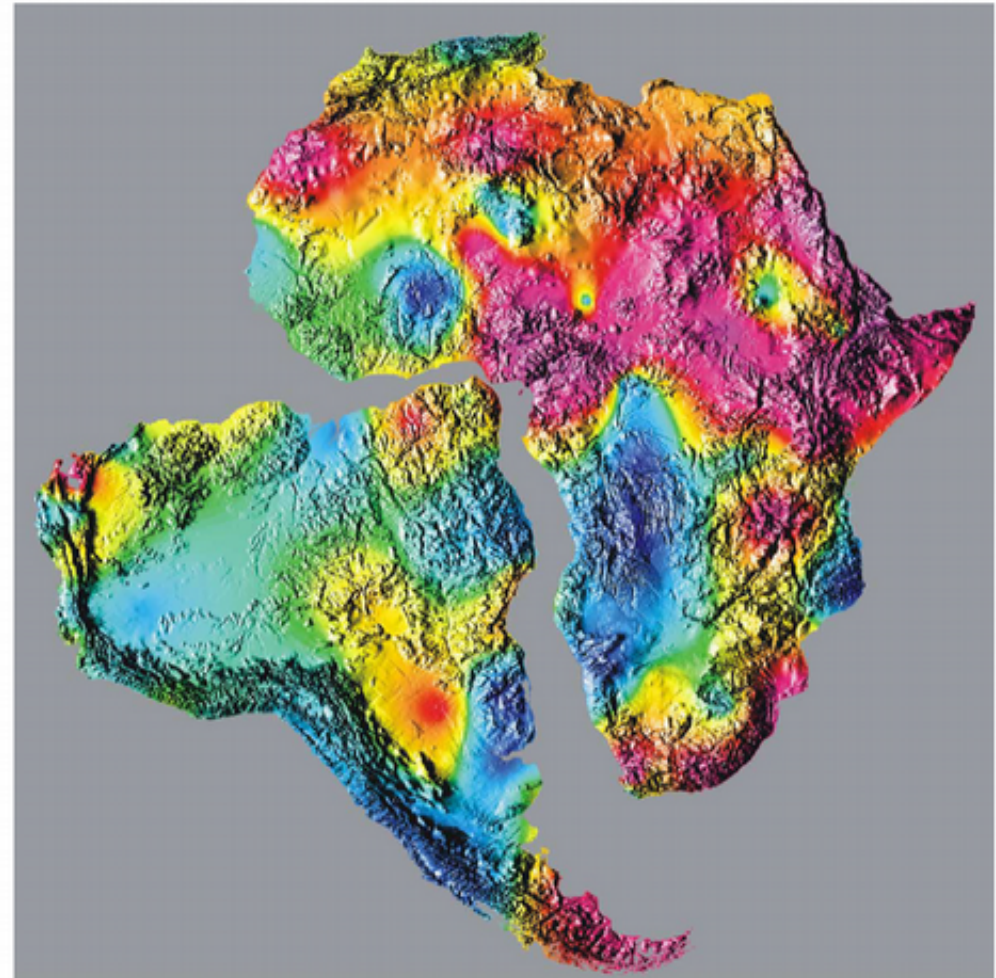
Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

Te a partir de marés terrestres



Mantovani et al., 2005

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

Conclusão e Perspectivas

A reologia elástica linear permite que uma gama ampla de aplicações desde modelagem de deformação de vários contextos geológicos bem como conhecer a reologia da litosfera;

Extensão da modelagem para casos 3-D e 4-D, permitirá reproduzir e estudar deformações mais próximas da realidade geológica. Diferenças e elementos finitos podem incorporar variação lateral de T_e e geometria das cargas de qualquer tipo e distribuição espacial;

Novos dados geofísicos da parte mais profunda da litosfera fornecem vínculos importantes nas modelagens, diminuindo a ambiguidade de soluções;

Novos modelos do geopotencial da Terra, permitirá que de forma independente da modelagem, T_e sejam estimados, para posterior utilização em modelagem direta.

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

**Bacias de
Antepaís**

Evolução

Exemplos

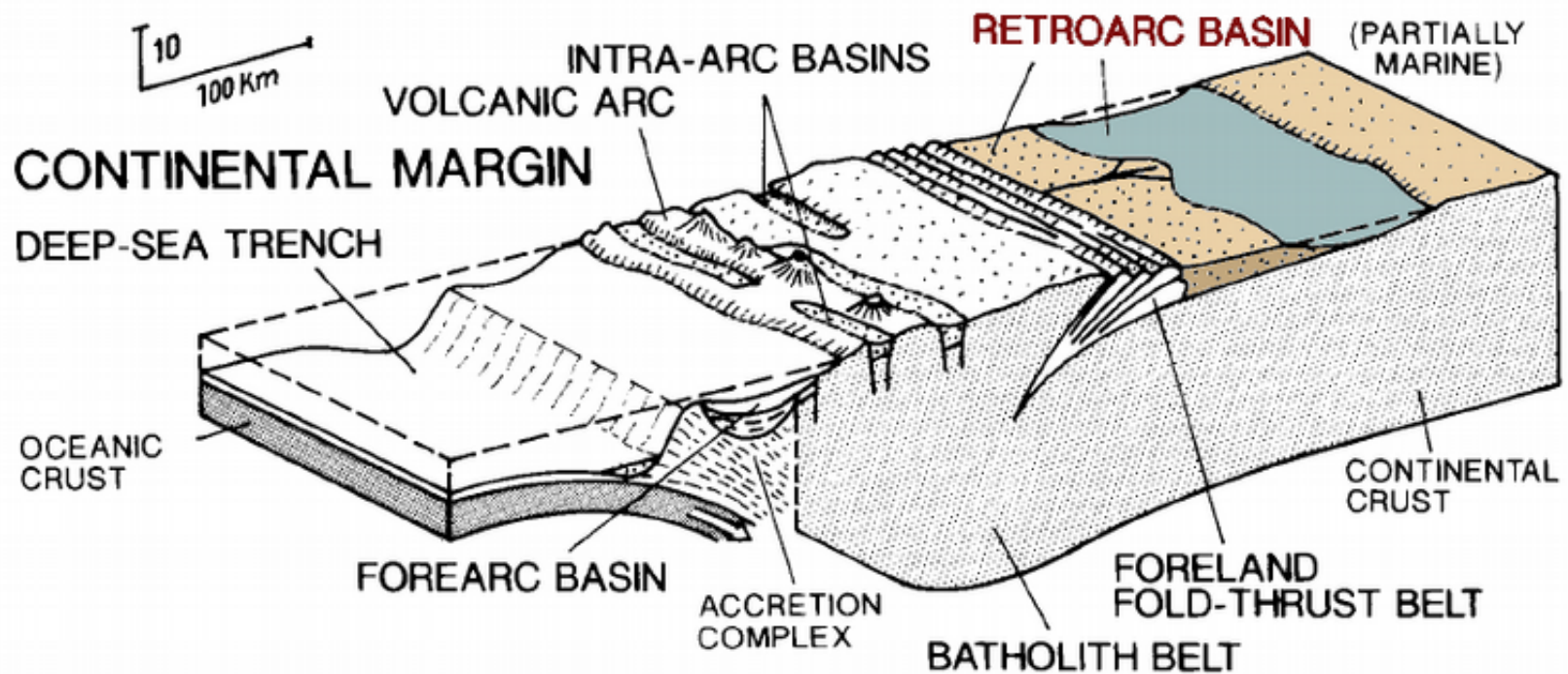
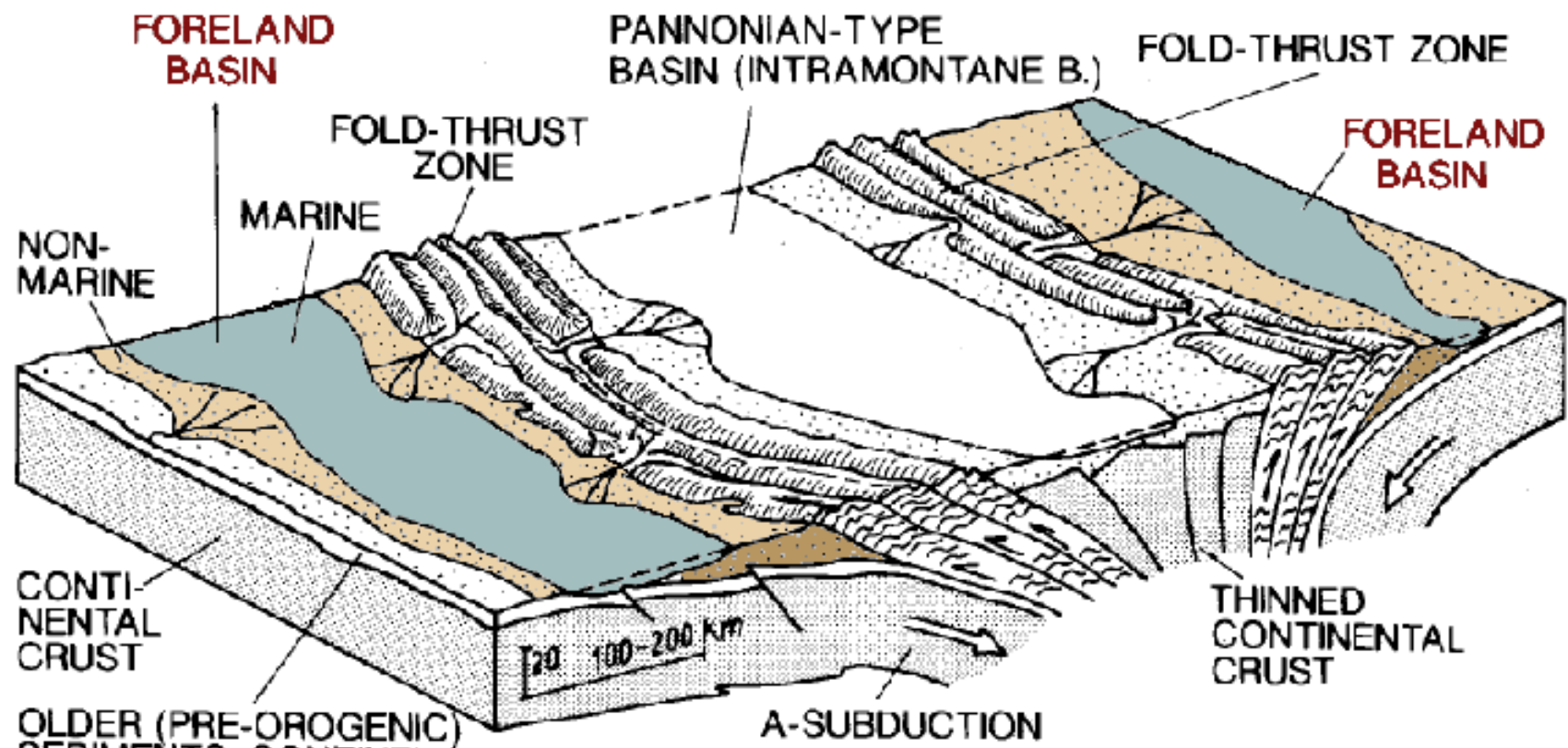
Bacias de Antepaís

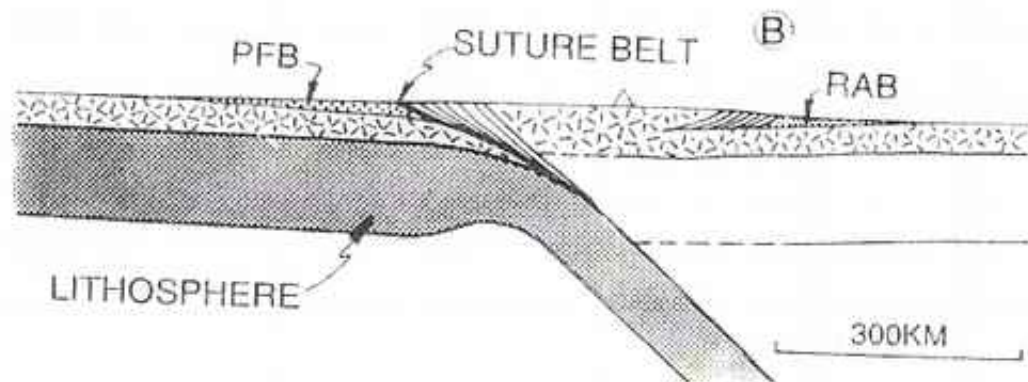
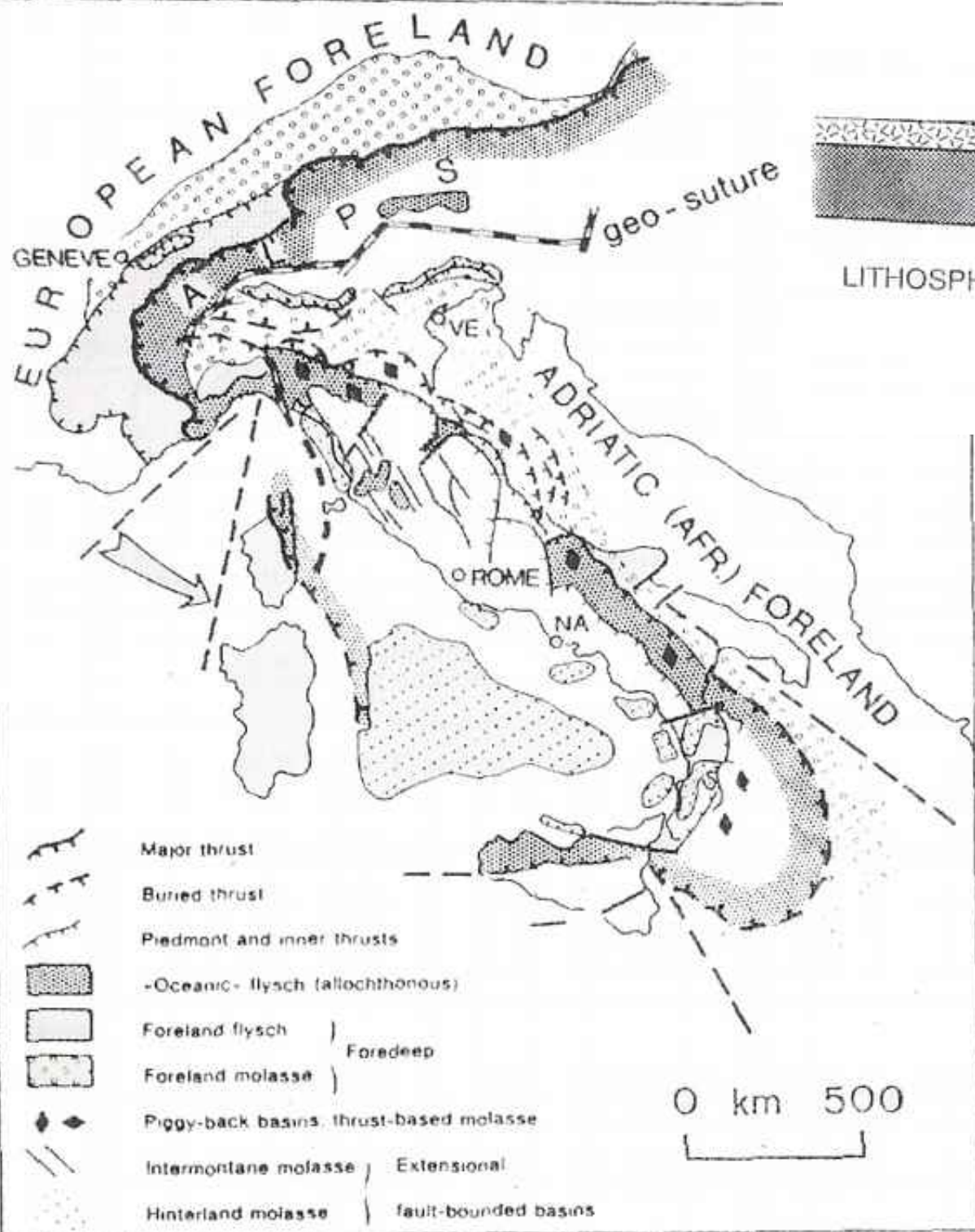
- Contexto tectônico
- Mecanismos de subsidência
- Estrutura
- Evolução
- Estilos de preenchimento
- Exemplos e geologia do petróleo

Antepaís- área estável, adjacente a um cinturão orogênico, em direção à qual ocorre transporte tectônico por cavalgamentos e dobras assimétricas. Geralmente é uma parte da crosta continental, na borda de um cráton ou plataforma.

Contexto tectônico – Bacias de antepaís ocorrem em áreas adjacentes a zonas de espessamento crustal, principalmente por flexura causada pela sobrecarga de grandes cavalgamentos.

- **Bacias de retroarco de antepaís** (*retroarc foreland basins*)
- **Bacias colisionais de antepaís** (*collisional foreland basins*)
 - Bacias periféricas de antepaís (*peripheral foreland basins*)
 - Bacias colisionais de retroarco (*collisional retroarc basins*)





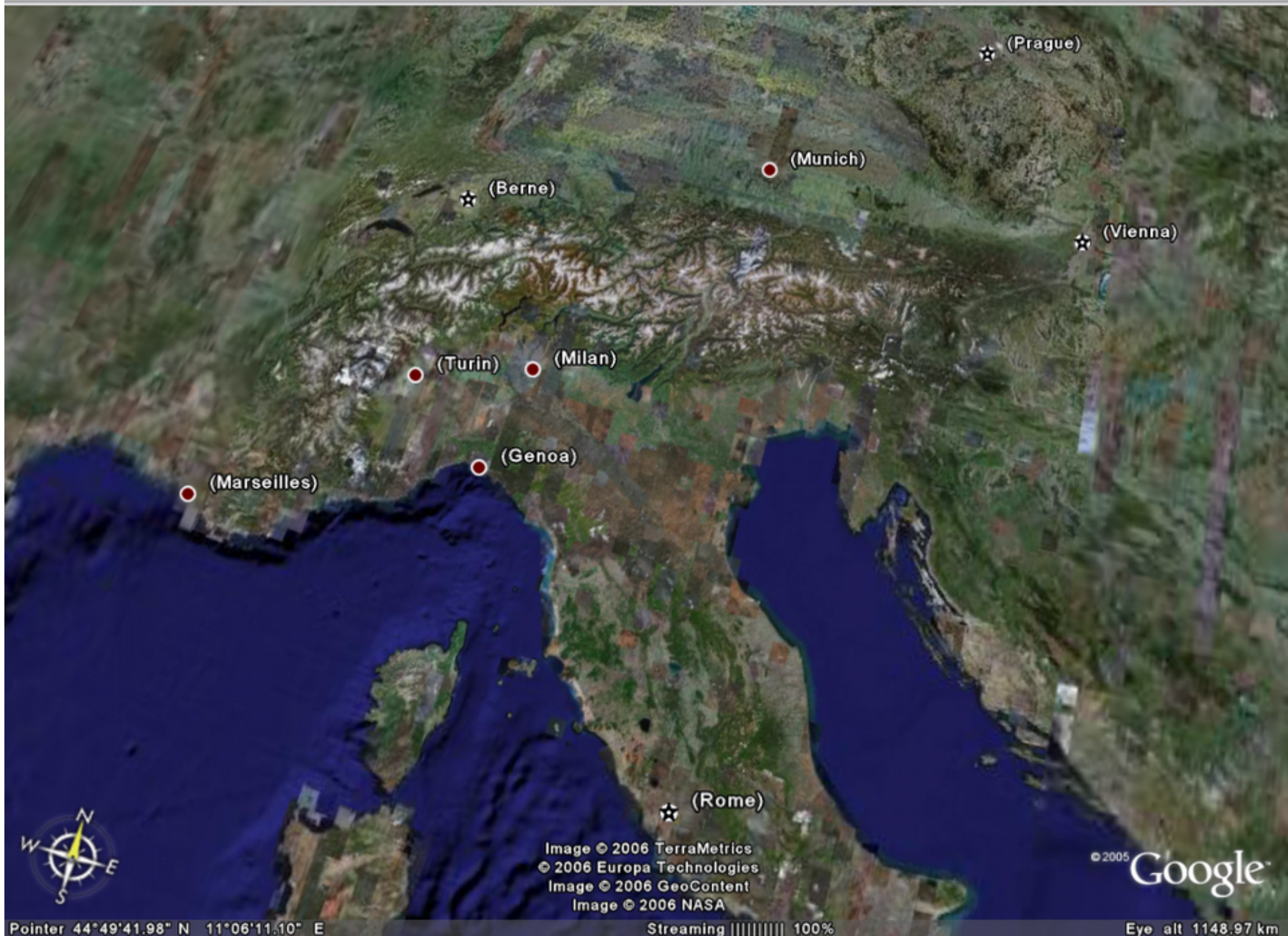


Image © 2006 TerraMetrics
Image © 2006 Europa Technologies
Image © 2006 GeoContent
Image © 2006 NASA

© 2005 Google

Pointer 44°49'41.98" N 11°06'11.10" E

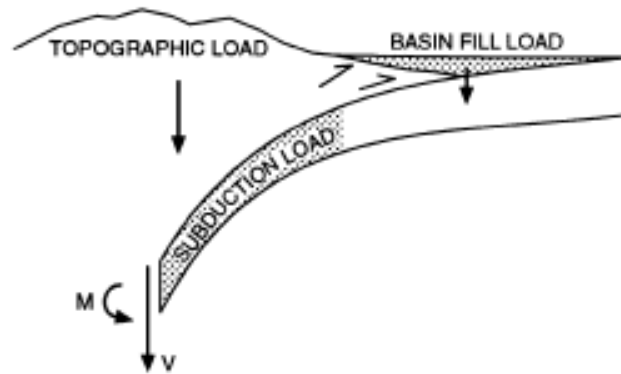
Streaming ||||| 100%

Eye alt 1148.97 km

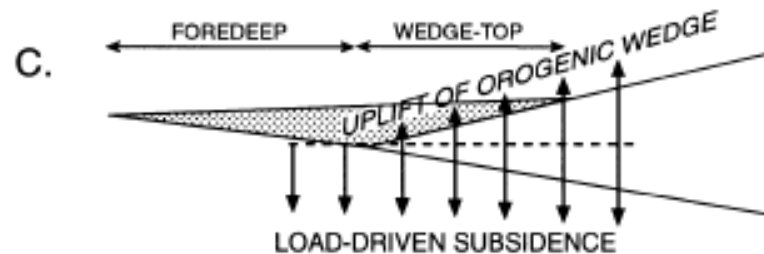
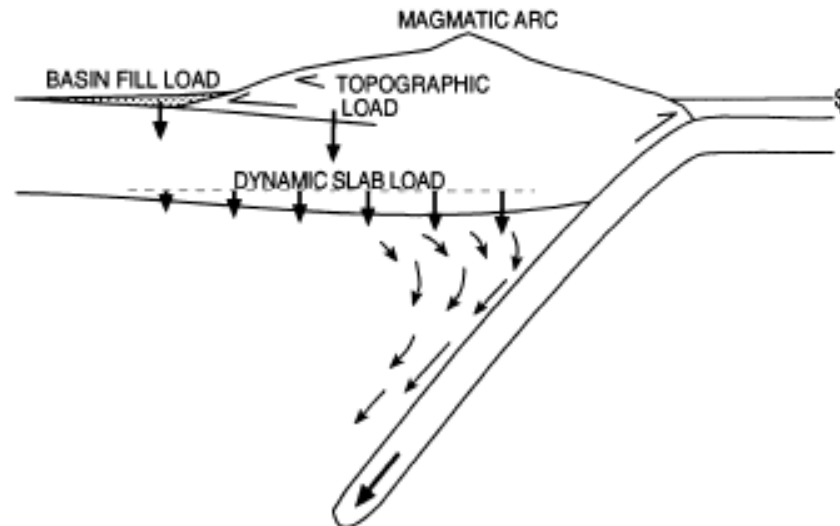
Mecanismos de subsidência:

- Flexura adjacente a alto topográfico (sobrecarga do orógeno)
- Sobrecarga do sedimento
- Efeitos da subducção tipo A
- Efeitos da topografia dinâmica (em retroarco)

A. **PERIPHERAL SETTINGS**



B. **RETROARC SETTINGS**



Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

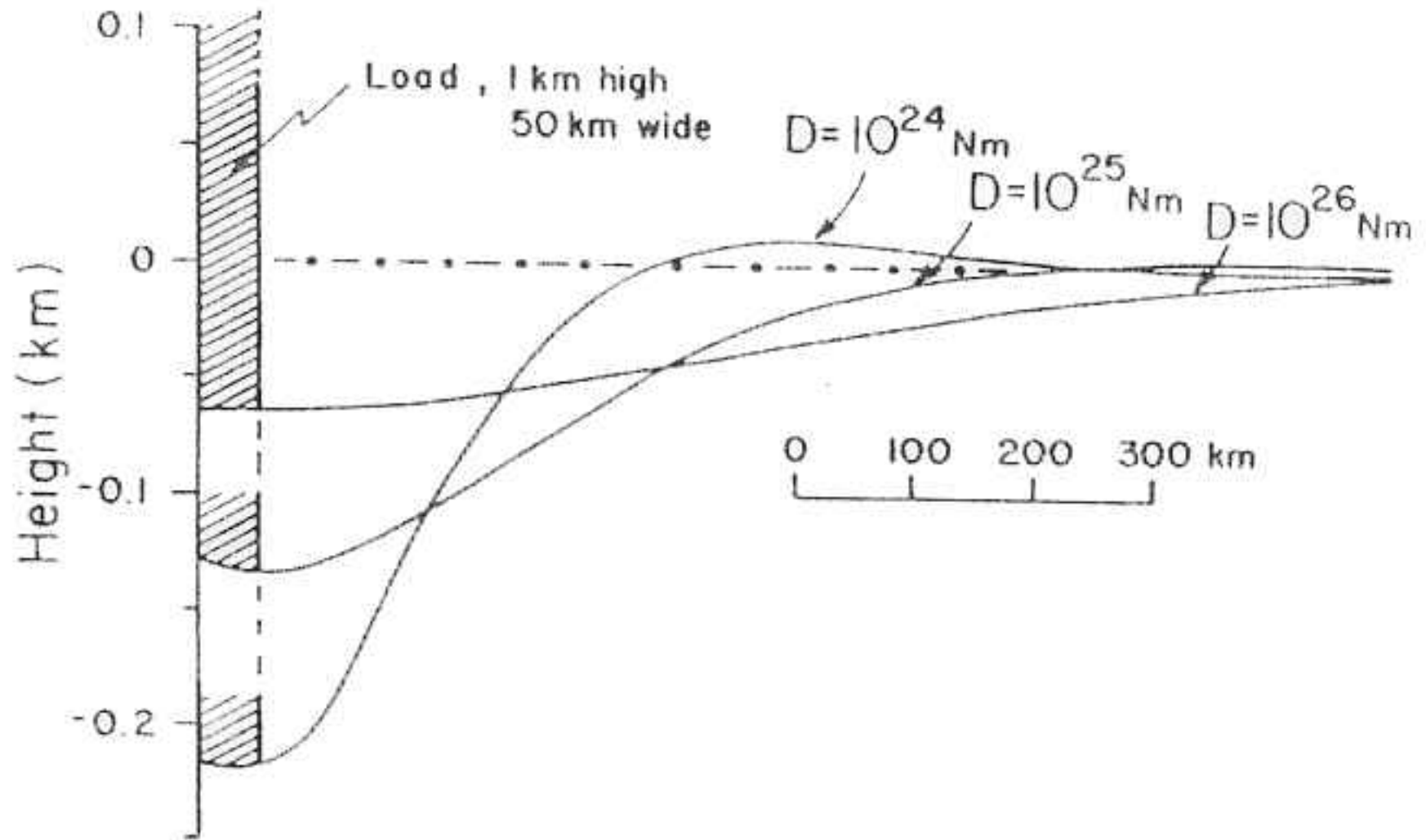


Table 4.1 Equivalent elastic thickness (T_e) compiled by Watts (2001) for the continental lithosphere at sites of foreland basins. Particular foreland basins may appear more than once if estimates have been made by different authors. Sources given in Watts (2001, Table 6.2, pp.251–3).

Site	Age of plate (Ma)	Plate age error (Myr)	Age of load (ka)	Load age error (kyr)	T_e (km)	T_e error (km)
Idaho–Wyoming	2650	50	125	25	22.0	0.0
Alps East	350	50	110	0	50.0	10.0
Alps West	275	25	110	0	25.0	10.0
Appalachians	1050	50	375	75	105.0	25.0
Himalaya East	1200	500	52	2	90.0	10.0
Ganges	1500	500	52	2	86.5	25.0
Kunlun–Tarim	800	200	52	2	40.0	5.0
Apennines	300	50	5	0	11.5	6.5
Carpathians Southeast	1600	200	110	0	30.0	10.0
Bolivian Andes	950	350	60	0	45.0	20.0
Transverse Ranges S	100	0	50	0	10.0	10.0
Transverse Ranges N	100	0	50	0	50.0	0.0
Zagros	700	200	35	10	50.0	25.0
Ebro	275	25	40	5	18.6	6.9
Aquitaine	275	25	40	5	25.5	5.0
Colville	1900	100	140	20	65.0	5.0
Carpathians	1600	200	110	0	22.0	0.0
Calabria	300	50	2	2	18.7	4.7
Urals	1500	100	325	50	75.0	25.0
Apennines	300	50	5	0	20.0	5.0
Oman	700	200	85	10	13.0	3.0
Urals	1500	100	325	50	75.0	25.0
Verkhoyansk	1950	150	230	40	50.0	10.0
Pamir	300	100	52	2	15.0	5.0
Tien Shan Tarim	800	200	52	2	40.0	20.0
Sicily	275	25	25	0	6.0	4.0
Himalaya West	1200	500	52	2	34.0	6.0
Greater Caucasus	1600	200	100	0	45.0	5.0
Kilohigok	2575	75	1965	45	12.0	4.0
Thelon front	2575	75	2000	0	58.0	0.0
Grenville front	2700	100	1050	50	126.0	0.0
Labrador Trough	2575	75	1585	50	120.0	0.0
Cape Smith	2575	75	1800	50	74.0	0.0
New Guinea East	700	100	25	0	10.0	0.0
New Guinea West	700	100	25	0	75.0	25.0
Tarim	1800	50	900	50	55.0	5.0
Ebro	275	25	40	0	20.0	0.0
Dzhungarian	1800	50	900	50	12.5	12.5
Alps West	275	25	17	0	10.0	5.0
Po Basin	275	25	30	0	5.0	0.0
Apennines	300	50	5	0	6.3	2.2
Guadalquivir Betics	275	25	25	0	10.0	5.0
Apennines	300	50	5	0	20.0	0.0
Carpathians	1600	200	110	0	40.0	0.0
Hellenides	300	50	2	2	70.0	0.0
Himalayas	1200	500	52	2	80.0	0.0
East Alps	350	50	110	0	40.0	0.0
South Alps	300	50	110	0	20.0	0.0

Table 4.1 *Continued*

Site	Age of plate (Ma)	Plate age error (Myr)	Age of load (ka)	Load age error (kyr)	<i>T_e</i> (km)	<i>T_e</i> error (km)
West Alps	275	25	110	0	50.0	0.0
South Alps	300	50	110	0	15.0	0.0
Apennines	300	50	5	0	15.0	0.0
Oman	700	200	85	10	35.0	13.0
Apennines–Dinarides	300	50	2	2	12.5	2.5
Plio–Quaternary						
Apennines–Dinarides	300	50	40	5	7.5	2.5
Eocene–Oligocene						
Kopet Dag	1600	200	52	2	25.0	5.0
Karakorum India	1200	500	52	2	90.0	10.0
Karakorum Asia	1200	500	52	2	110.0	10.0
Andes Peru	950	350	60	0	39.0	16.0
Himalaya East	1200	500	52	2	90.0	0.0
Tarim	1800	50	900	50	40.0	0.0
Atlas East	300	50	25	0	20.0	1.0
Atlas West	300	50	25	0	9.0	1.0
Appalachians	1050	50	375	75	70.0	20.0
Alps East	350	50	110	0	25.0	10.0
Alps West	275	25	110	0	10.0	5.0
Carpathians Southeast	1600	200	110	0	12.0	8.0
Andes Colombia	950	350	80	0	45.0	40.0
Andes Ecuador	950	350	80	0	25.0	20.0
Andes North Peru	950	350	60	0	35.0	35.0
Andes Peru	950	350	60	0	25.0	20.0
Andes Peru–N. Chile	950	350	60	0	45.0	40.0
Andes Argentina	950	350	60	0	30.0	20.0
Ouachita	1050	50	375	75	50.0	10.0
E. Papua New Guinea	97	32	30	5	20.0	10.0
W. Papua New Guinea	387	132	30	5	75.0	5.0

A rigidez flexural (ou espessura elástica equivalente) varia com a temperatura:

T_e coincide com isoterma de 450° ou varia de 900 a 300?

Aumento da temperatura reduz muito T_e .

Descolamento da crosta em relação ao manto é outro processo possível de redução de T_e :

Para grandes curvaturas de inflexão, o esforço pode superar o envelope de deformação, causando descolamento e flexura independente das porções rúpteis de crosta e manto.

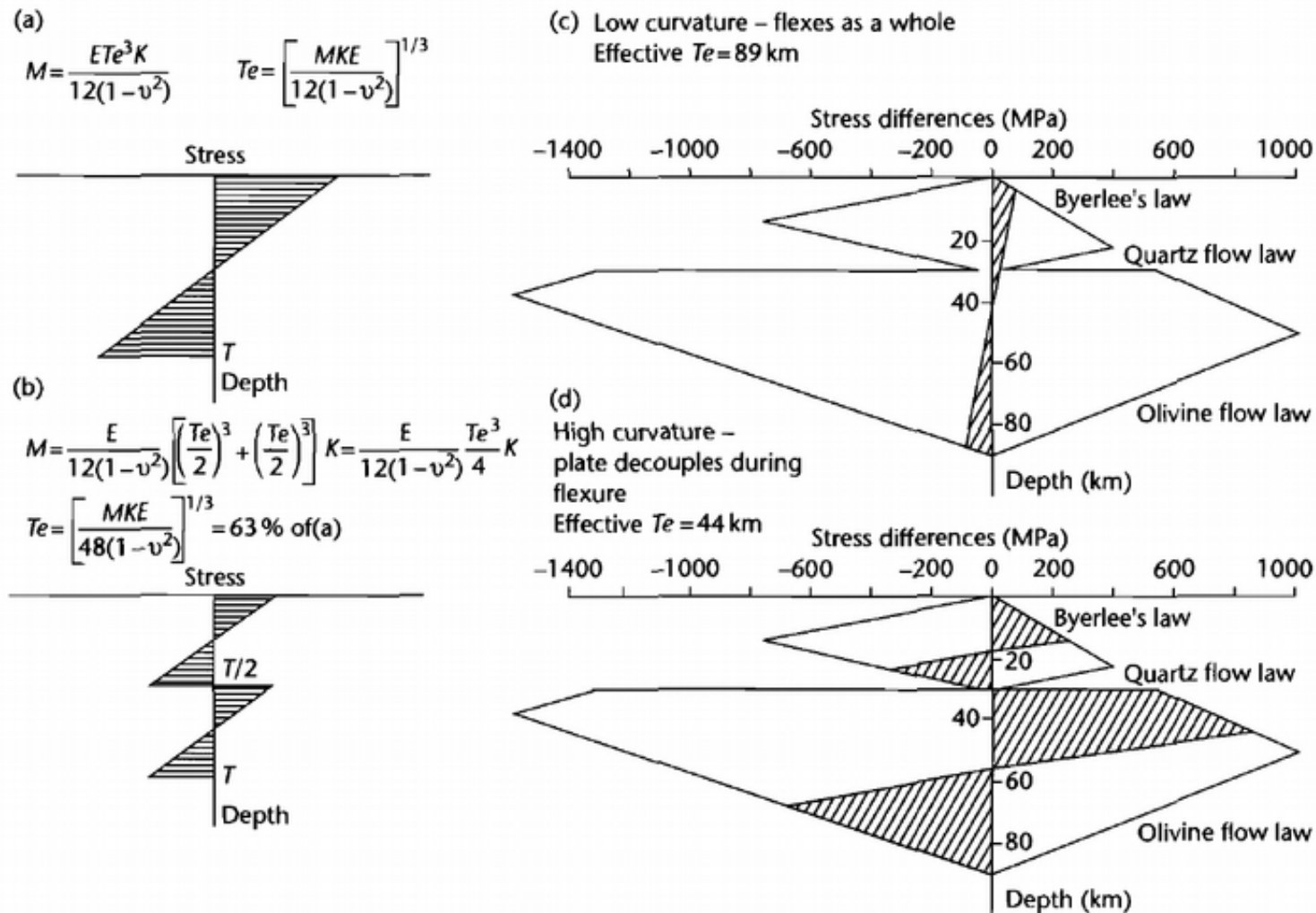


Fig. 4.15 The effects of decoupling at high curvatures illustrated by cross-sections of stress in the flexed lithosphere (after McNutt et al. 1988). (a) Distribution of fiber stresses in an elastic plate of thickness T showing extension in the upper half of the plate and compression in the lower half; (b) A purely elastic plate that is decoupled at $T/2$ so that the upper and lower portions flex independently with the same radius of curvature as in (a). The equivalent elastic thickness is 63% of that in (a). M is the bending moment, K the radius of curvature, E Young's modulus, ν Poisson's ratio; (c) and (d) Rheologically layered continental lithosphere showing the failure envelope under extension (positive stress) and compression (negative stress). The strength is limited by frictional sliding (Byerlee's law) in the upper crust and uppermost mantle and by ductile flow in the lower crust and lower lithosphere. The hatched areas represent the stress resulting from flexure superimposed on the failure envelope. In (c) the plate is flexed at a very low curvature. The fiber stresses rarely exceed the failure criterion of the plate (there is a small amount of yielding at the top and bottom) and the equivalent elastic thickness (89 km) is almost exactly the same as the thickness of the elastic plate. In (d) the plate is flexed to a high curvature. This leads to the failure criterion being exceeded and a decoupling zone forms in the lower crust. The equivalent elastic thickness calculated for the total bending moment sustained in both the crust and the mantle is just 44 km. Decoupling therefore has strong potential mechanical implications for flexure.

Estrutura geral - o sistema de bacias de antepaís

Bacias de antepaís são fortemente assimétricas, com fundo inclinado em direção ao orógeno e subsidência diferencial (em gangorra), com as maiores taxas nas proximidades da sobrecarga.

A subsidência e deposição não ocorrem apenas na depressão periférica (antefossa – *foredeep*), mas também:

- Sobre a cunha orogênica cavalgante (*wedge-top*)
- Sobre a área soerguida da porção distal da bacia (*forebulge*)
- Atrás do *forebulge* (*back-bulge*)

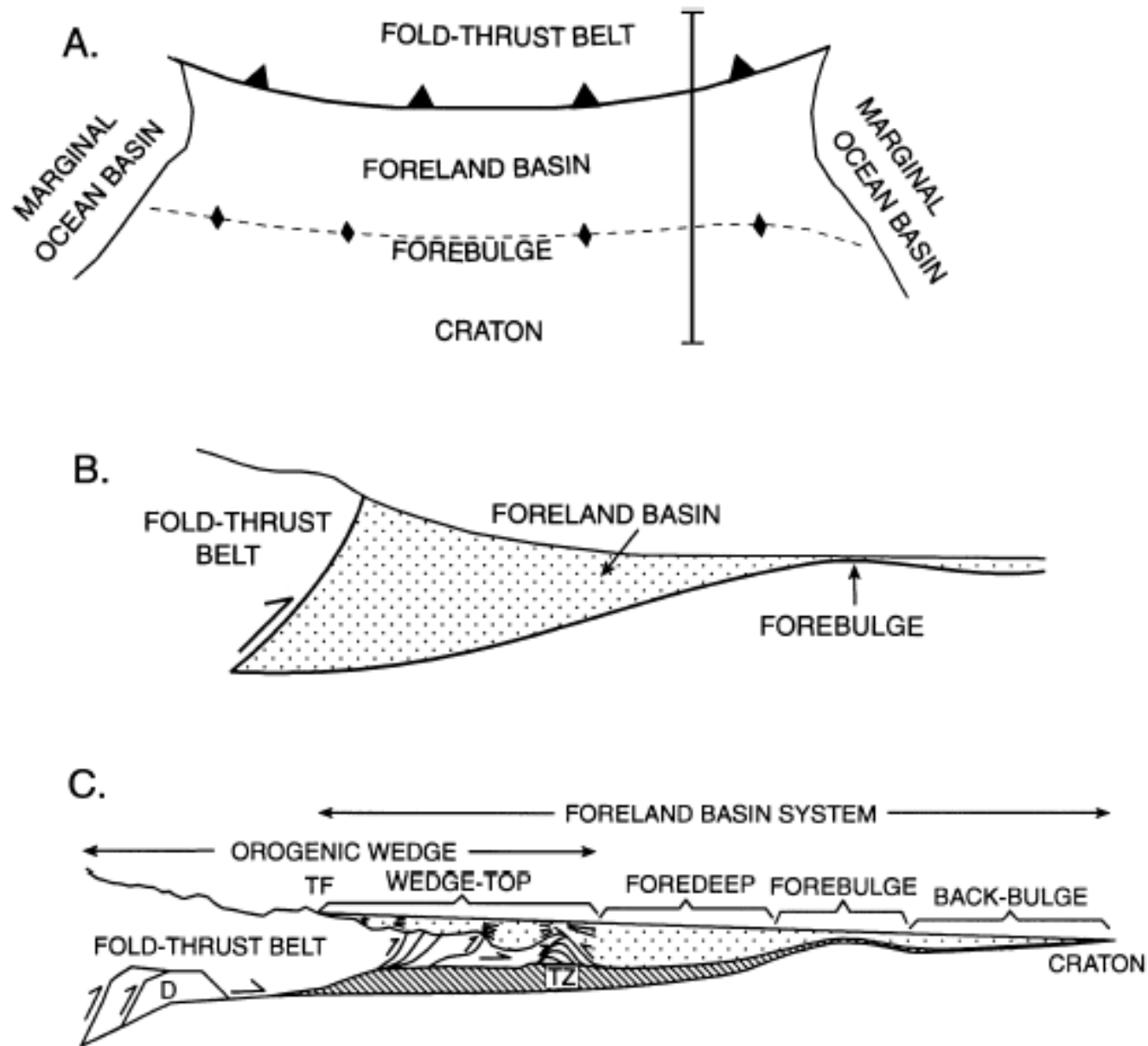
Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

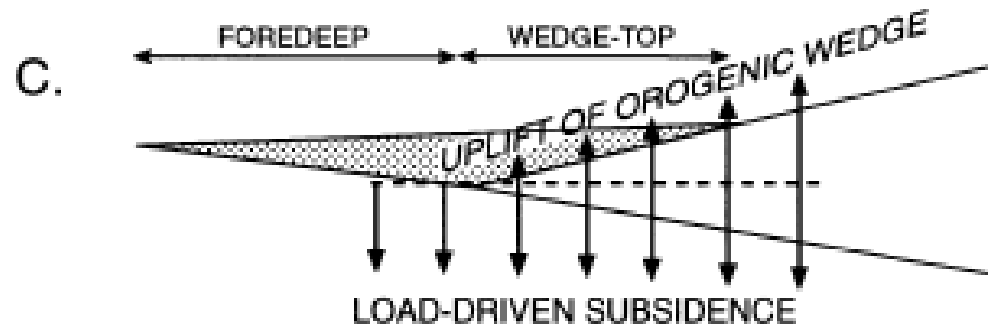
Exemplos



Principais características de cada zona

Wedge-top: Em muitas zonas de colisão a elevação topográfica não coincide com a falha frontal de cavalgamento, havendo deposição significativa sobre a frente da cunha cavalgante.

Essa zona deposicional é uma área proximal, com granulação mais grossa, deformação progressiva, abundantes discordâncias e preservação como bacias isoladas sobre blocos cavalgantes (bacias tipo *piggy-back* ou *thrust-top*)



Antefossa (*foredeep*): Área principal de subsidência, com maior potencial de preservação.

O aporte sedimentar principal vem do orógeno, formando cunhas clásticas com grande espessamento em direção à borda ativa e rápida diminuição da granulação para a porção distal.

A deformação compressiva sin-sedimentar também diminui para a porção distal, com cavalgamento do orógeno na borda, importante deformação por falhas inversas e dobras assimétricas na porção proximal e dobramentos progressivamente mais suaves na porção distal.

Sucessivos eventos de reativação podem causar discordâncias angulares na bacia.

Forebulge: Normalmente, a subsidência flexural adjacente ao orógeno tem como consequência a elevação de uma área na outra borda da bacia (*forebulge*).

Essa área pode ter apenas subsidência diminuída, com menores taxas de geração de espaço de acomodação e maior recorrência de discordâncias por tectonismo ou queda eustática, ou pode ser área de soerguimento, com erosão de depósitos anteriores e potencial como área-fonte.

No caso de soerguimento, pode ocorrer distensão decorrente do arqueamento, com potencial para desenvolvimento de pequenas bacias distensionais de subsidência mecânica.

Back-bulge: A área além do *forebulge* pode estar sujeita a uma subsidência flexural secundária, com a formação de bacias rasas sobre a área cratônica.

Evolução

O momento anterior:

- Bacias colisionais de retroarco – ocorrem sobre a área de retroarco, onde haviam bacias vulcano-sedimentares distensionais ou bacias de retroarco compressivo (*retroarc foreland basins*).

- Bacias periféricas de antepaís – ocorrem sobre margens continentais passivas da placa que sofre subducção (a placa cavalgada).

Evolução

Etapas:

- 1- Fechamento de oceano – bacia oceânica remanescente – importante sedimentação de água profunda – "*flysch*".
- 2- Início do cavalgamento – aumento da declividade do talude – turbiditos e olistrólitos – reativação das falhas normais pré-existentes – "*flysch*".
- 3- Fase de águas profundas – reversão das estruturas herdadas (falhas lítricas normais passam a cavalgamentos) – subsidência flexural acentuada – muita geração de espaço e pouco aporte – sedimentação de águas profundas com fonte no orógeno – "*flysch*" sin-orogênico.
- 4- Fase continental e de águas rasas – grande elevação da área-fonte – grande aporte sedimentar – colmatação da bacia – *molassa* orogênica.
- 5- Inversão da bacia – deformação, erosão de sedimentos previamente depositados – formação de discordâncias.

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

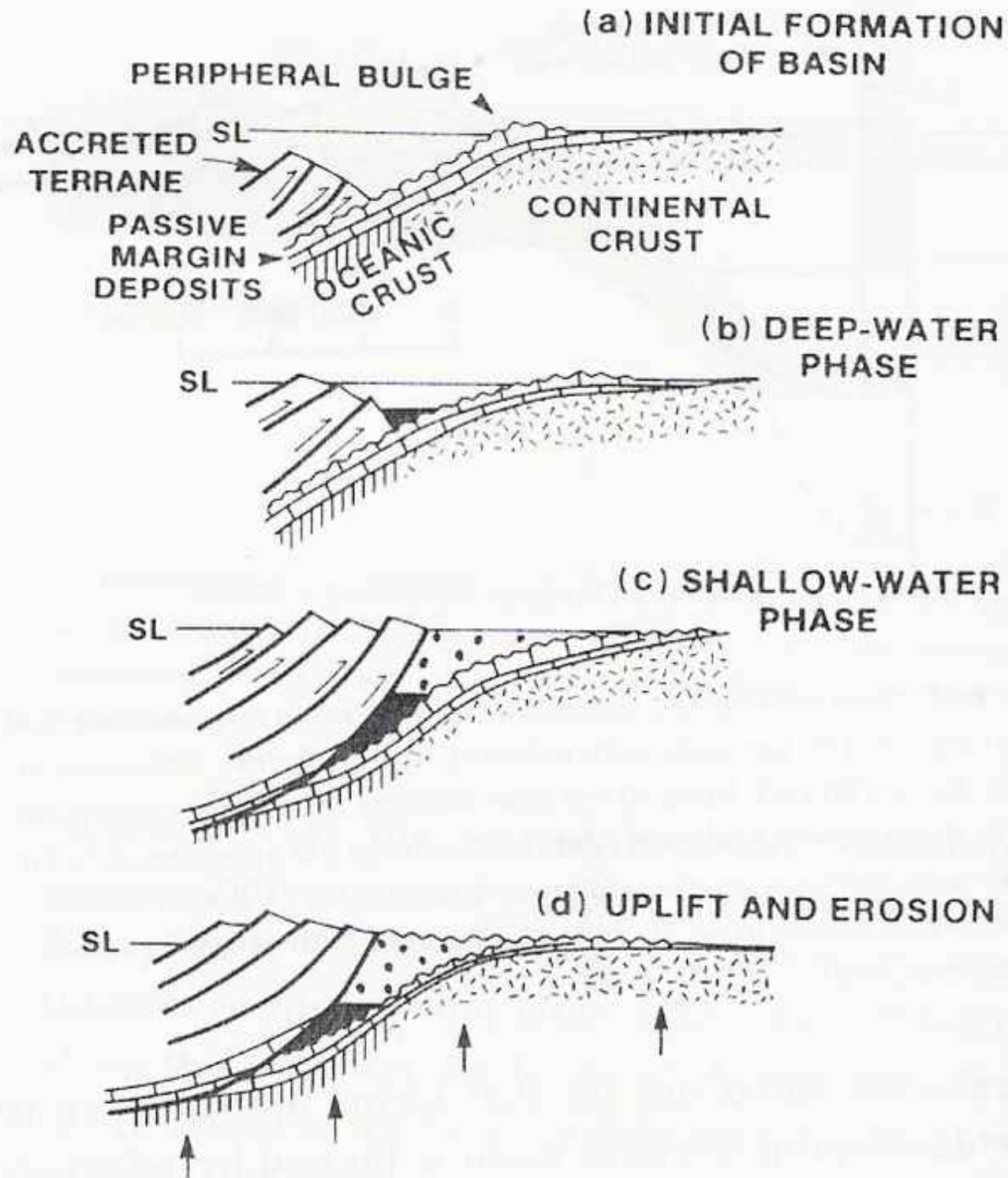
Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos



Evolução

A cada evento de reativação repetem-se as fases 3 a 5, com deformação das unidades anteriores, formação de discordância e avanço do depocentro em direção ao cráton.

As discordâncias são mais marcantes no *forebulge*, que também migra em direção ao cráton em eventos sucessivos.

A preservação de bacias de antepaís no registro geológico antigo depende da evolução geológica posterior. O potencial de preservação é pequeno, pois quando a área soerguida é erodida, a sobrecarga deixa de existir e a bacia soergue.

A parte preservada é aquela mantida pela deformação visco-elástica da litosfera (parte da deformação é permanente), e pela carga do sedimento da bacia.

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

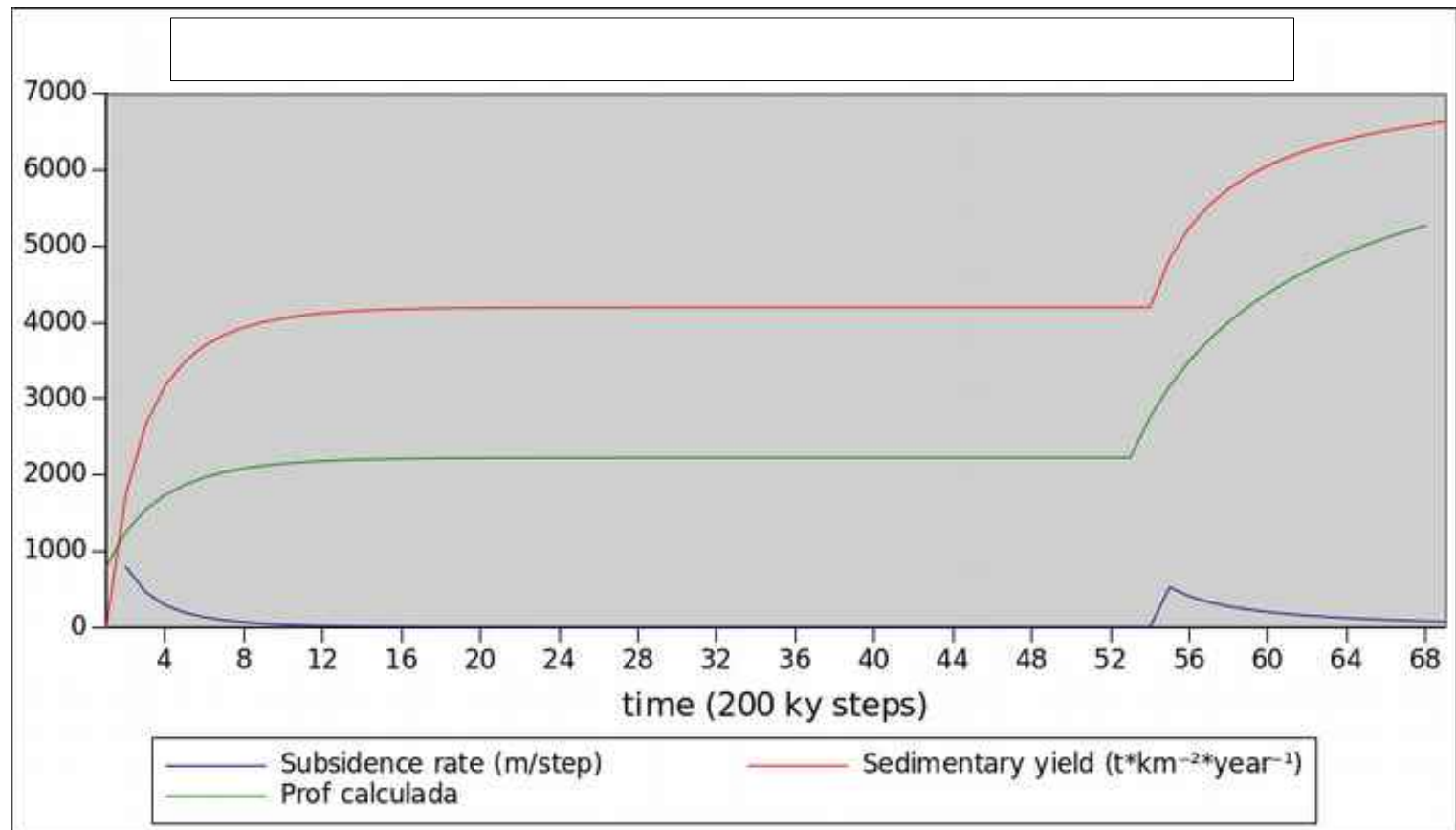
Exemplos

Termos antigos

Pesquise o significado e flysch e molassa.

Discuta seu significado em termos de espaço e aporte sedimentar.

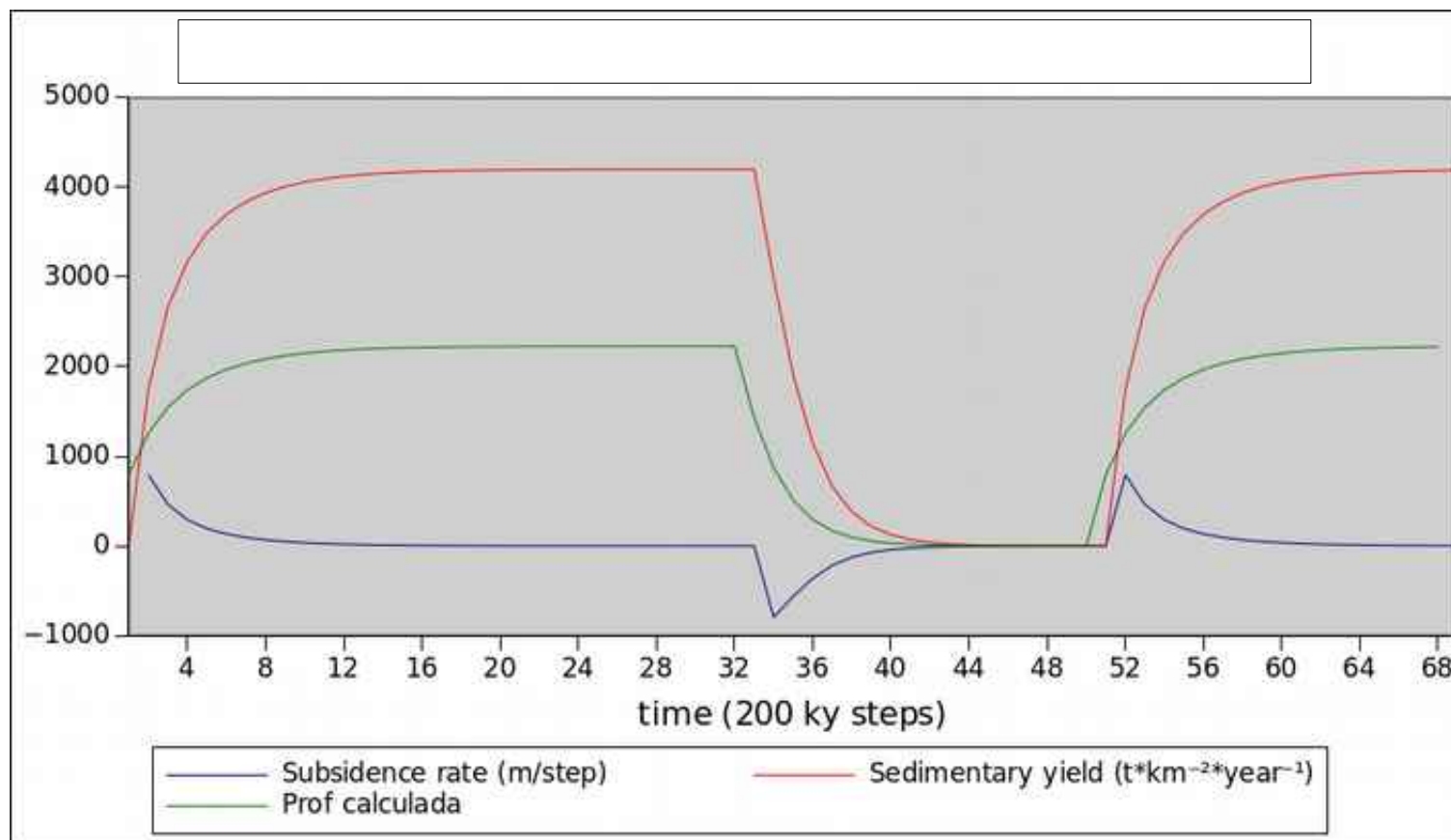
Pulso tectônico



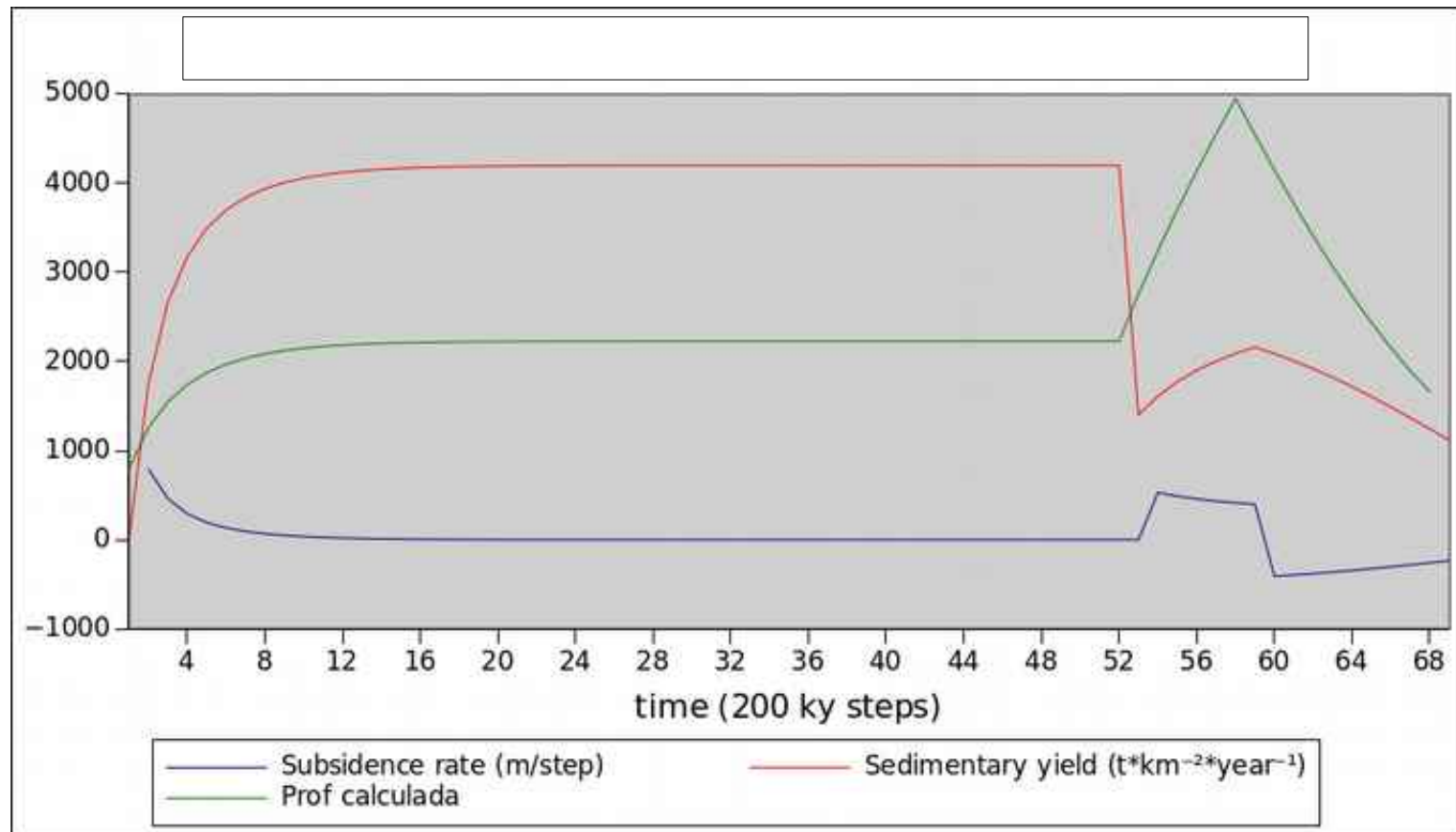
Evolução

Exemplos

Pulso tectônico, quiescência e novo pulso



Clima simula pulso tectônico

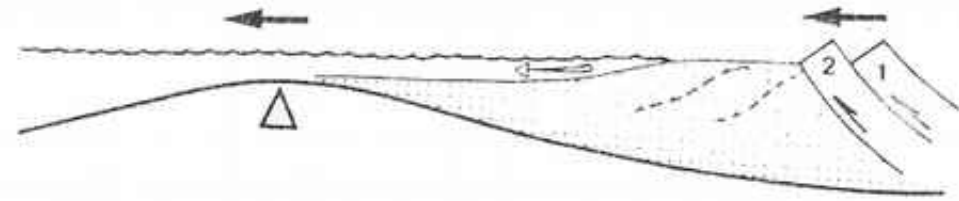


O aquecimento da litosfera pelo espessamento crustal pode causar uma relaxamento térmico, resultando em deformação viscoelástica após a deformação elástica inicial.

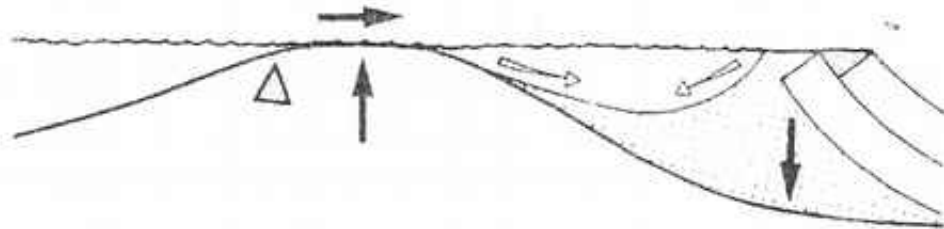
A diminuição da rigidez flexural causa aumento da taxa de subsidência, diminuição da área e aproximação do *forebulge*.

Sucessivas reativações podem causar repetição do processo.

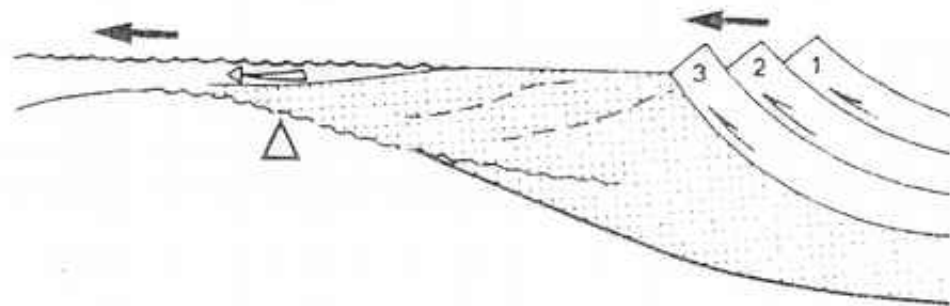
1. OVERTHRUST LOADING - Flexural deformation



2. RELAXATION PHASE - Viscoelastic response



3. RENEWED OVERTHRUST LOADING - Flexural deformation



ACTIVE OVERTHRUSTING
OVERTHRUST - FOREBULGE
MIGRATION

SEDIMENT DISPERSAL
REFERENCE POINT
FOR FOREBULGE
BEHAVIOUR

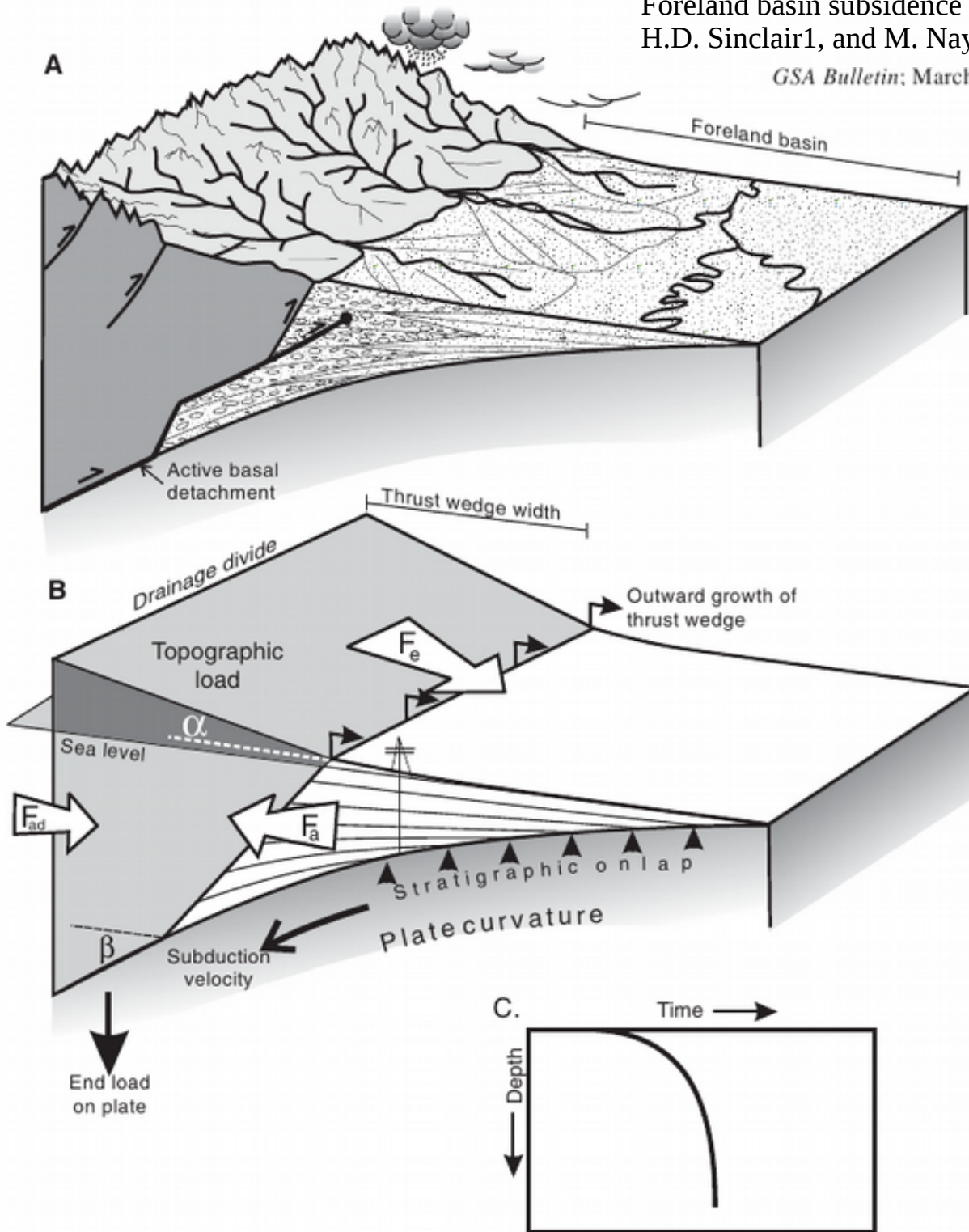
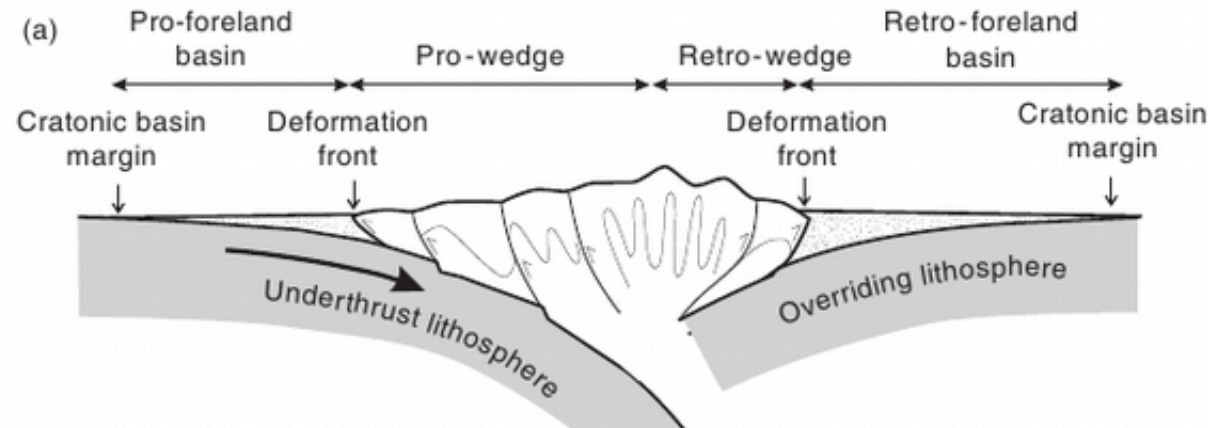


Figure 1. Thrust wedge–foreland basin systems showing the primary controls on basin subsidence. (A) The geological processes involved in the growth of mountain topography and the subsidence and infilling of foreland basins. (B) Primary quantifiable components of thrust wedge–foreland basin systems. Three primary fluxes determine the development of the foreland basin (F_e —erosional flux) and the thrust wedge (F_a —frontal accretion, F_{ad} —advection into rear of thrust wedge). The topographic load can be approximated by a thrust wedge (Davis et al., 1983), and it grows by the outward propagation of the deformation front, which is continually countered by the process of internal shortening. (C) The present paradigm for the signal of accelerating subsidence of foreland basins (Allen and Allen, 2005; Angevine et al., 1990; DeCelles and Giles, 1996; Miall, 1995; Xiangyang and Heller, 2009).

Pro- vs. retro-foreland basins

M. Naylor and H. D. Sinclair



Basin Research (2008) doi: 10.1111/j.1365-2117.2008.00366.x

Basin Research (2008) doi: 10.1111/j.1365-2117.2008.00366.x

Pro- vs. retro-foreland basins

M. Naylor and H. D. Sinclair

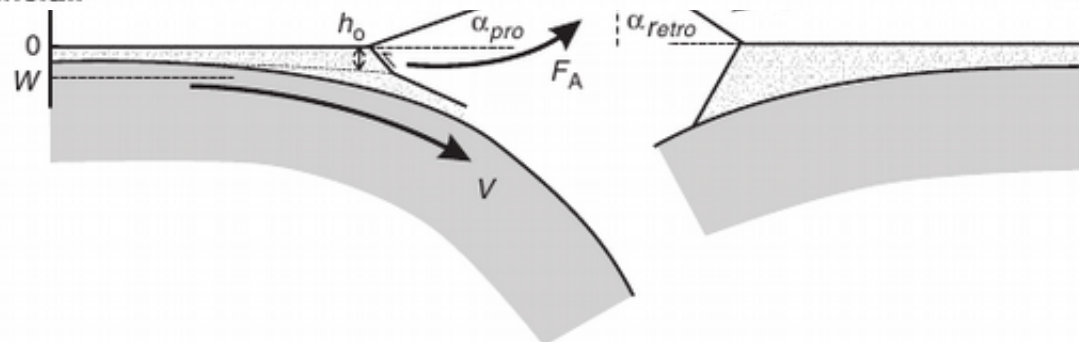


Fig. 1. Cartoon of a steady-state doubly vergent orogen. (a) The pro-foreland basin lies in the flexural depression over the subducting slab which advances towards the orogen at the regional convergence rate, v . The retro-foreland basin lies in the flexural depression above the over-riding slab which is predominantly stationary with respect to the orogen. (b) The mass budget of the wedge system is controlled by the relative rate of the accretionary and erosive fluxes (F_A and F_E , respectively). The rate of accretion of new material from the downgoing plate is a function of the convergence rate and the thickness of material that is accreted from that plate, h_0 . The cross-sectional area of the mountain's topography is described by two triangles of height H and surface taper angles α_{pro} and α_{retro} that abut at the load divider.

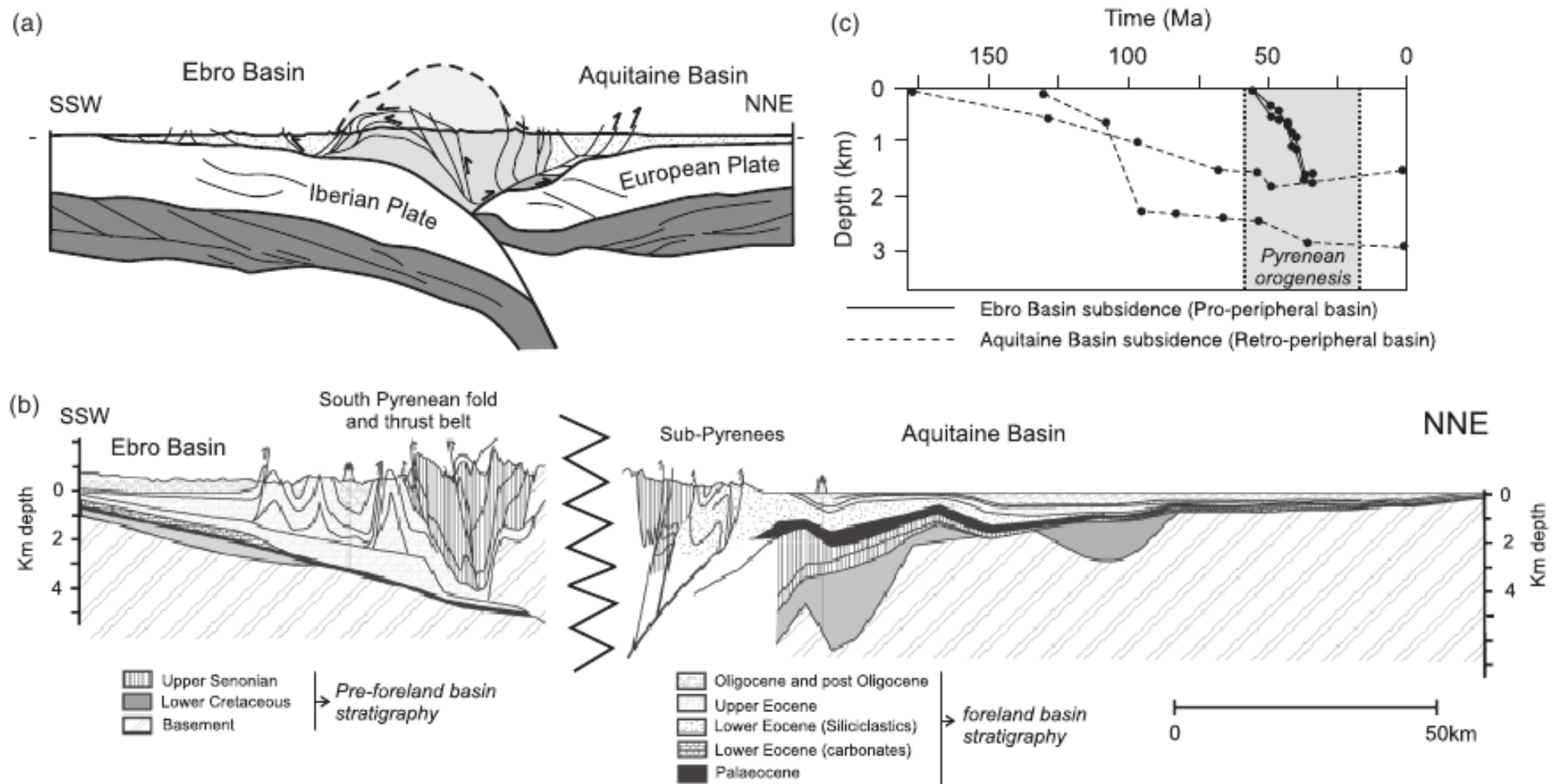
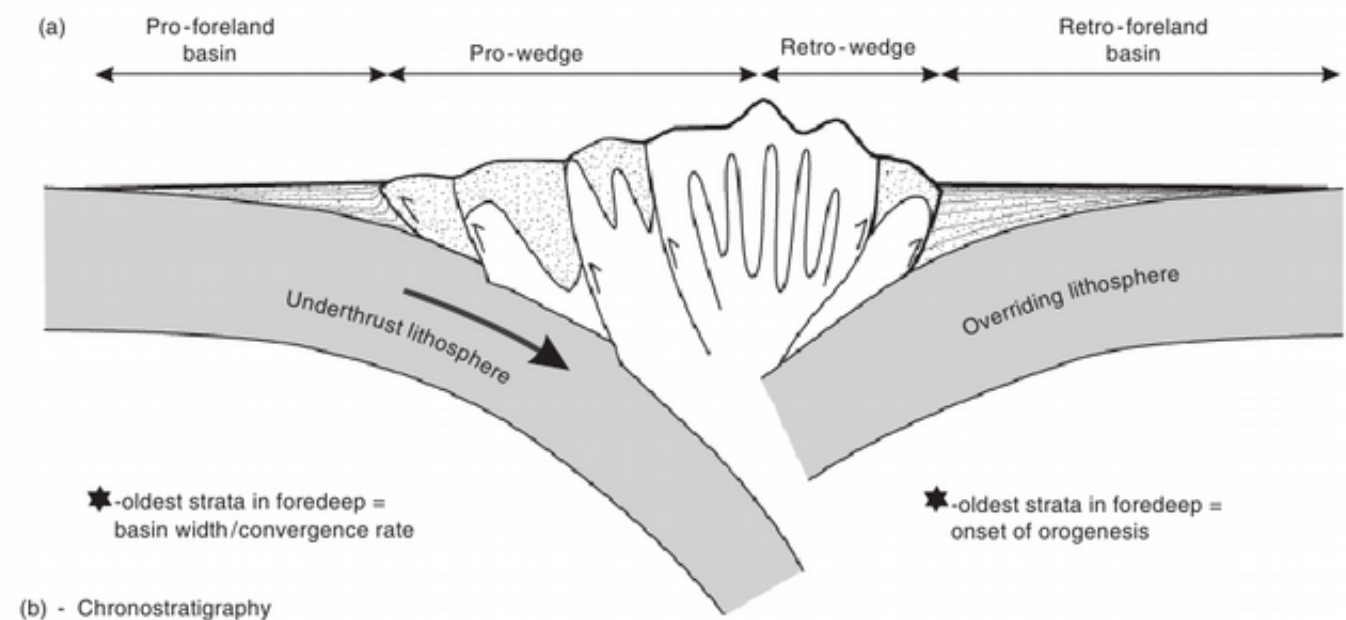
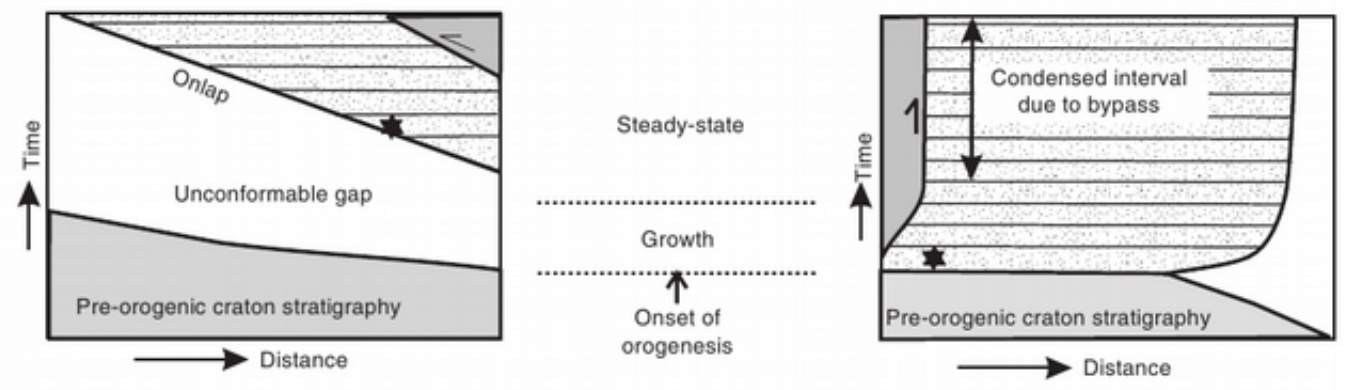


Fig. 8. The Pyrenees mountain belt as a type example of a system with a pro-foreland (Ebro Basin) and retro-foreland (Aquitaine Basin) foreland basin that can be compared in terms of their stratigraphic infill and tectonic subsidence histories. (a) Summary cross-section of the Pyrenean mountain belt formed by the Iberian plate of Spain subducting beneath the European Plate of south-western France. This section is constrained by the ECORS deep seismic section (Choukroune, 1989), other geophysical measurements (Pous *et al.*, 1995) and surface geology (Muñoz, 1992). (b) Close-up of the stratigraphy of the Ebro (Vergés, 1999) and Aquitaine Basins (Desegaulx *et al.*, 1991). (c) Subsidence plots from two wells located near to the deformation front in the Aquitaine Basin (Desegaulx & Brunet, 1990) and from structurally restored stratigraphic profiles from the central South Pyrenean fold and thrust belt (Vergés, 1999). Note that the Ebro Basin contains a limited section of stratigraphy dominated by Upper Eocene strata; the subsidence plots through this record a rapid phase of accelerating subsidence at this time. In contrast, the Aquitaine Basin contains a much broader chronostratigraphic range, and shows only minor tectonic subsidence during the early stages of orogenesis, but this decreases to zero. These contrasts match predictions made for pro-foreland vs. retro-foreland foreland basin development, respectively.



(b) - Chronostratigraphy



(c) - Tectonic subsidence



Fig. 9. Summary figure contrasting the basin characteristics of Pro -foreland (left-hand side) and Retro-foreland (right-hand side) foreland basins. (a) The Pro -foreland foreland basin exhibits dramatic basin onlap of the cratonic margin, at a rate greater or equal to the plate convergence rate dependent upon whether the thrust wedge is in a growth or steady- state phase, respectively; in contrast the Retro -foreland basin records little onlap except in the early stage of growth. This contrasting onlap pattern is clearly seen in the chronostratigraphic equivalent, (b) which also illustrates the relatively limited chronostratigraphic interval preserved in the pro- foreland basin relative to the retro -foreland basin. Note that the reference frame for both chronostratigraphic figures are their respective cratonic plates (cf. Appendix B and Fig. 10), and not an absolute frame. The degree to which foreland basin deposits are accreted and preserved in the thrust wedges also contrasts markedly due to the ongoing advection of the pro -foreland basin's succession into the pro -wedge, in contrast to the retro -foreland basin succession which will only be accreted during growth of the mountain belt. Hence, the oldest deposits preserved in the foredeep of the pro -foreland basin equal the width of the basin divided by the convergence rate. In contrast, the oldest strata preserved in the foredeep of the retro -foreland basin record the initiation of orogenesis. The tectonically driven subsidence of the two basins also contrasts, (c) The pro -foreland basin records accelerated subsidence over a relatively short interval of orogenesis. In contrast, the retro -foreland basin records the full history of the basin with initial uniform subsidence during growth of the mountain belt, and hence of the retro -thrust wedge, followed by zero subsidence during steady-state when the retro -wedge no longer accretes new material. During this latter stage, the retro -foreland basin record a condensed stratigraphic succession which is likely to be dominated by bypass of the sediment generated in the mountain belt and exported farther afield.

Preenchimento

Bacias de antepaís têm proveniência do alto soerguido (orógeno colisional), com abundantes litoclastos metamórficos e assembléias de pesados ricos em minerais metamórficos.

Outros fatores, como o clima e o padrão de drenagens podem influenciar muito o tipo de preenchimento – grande diferença entre os depósitos das bacias Alpinas, Himalaianas e do Golfo Pérsico.

A proveniência metamórfica não é exclusiva de bacias de antepaís. A idade do metamorfismo tem que ser próxima da idade da bacia.

Exemplos de diagramas discriminantes de proveniência

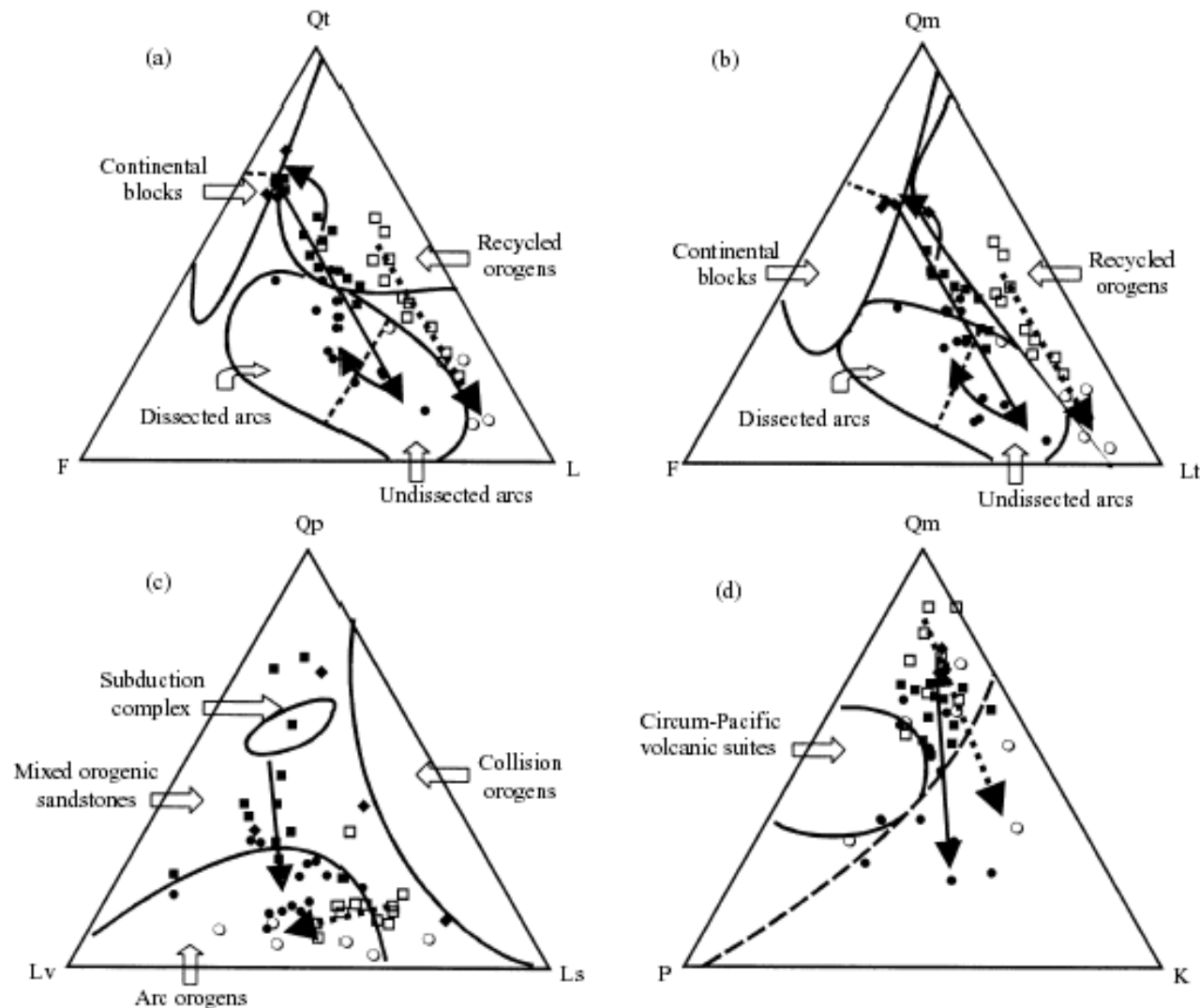


Fig. 3 Sandstone framework detrital compositions and their provenance types. Framework mode diagrams according to Dickinson and Suczek (1979), and data from Table 1. (a) Qt-F-L; (b) Qm-F-Lt; (c) Qp-Lv-Ls; and (d) Qm-P-K. Jurassic provenance evolution of the Feixi and the Huoshan sections are indicated by solid arrows and dotted arrows, respectively. The component codes of the triangular plots are the same as those in Table 1. ○, Fenghuangtai Formation; □, Sanjianpu Formation; ●, Zhonggongshan Formation; ◆, Yuanlongshan Formation; ■, Fanghushan Formation.

Preenchimento

Bacias de antepaís são assimétricas, com maior subsidência próximo à sobrecarga.

A assimetria é contrária àquela de bacias de margem passiva, pois o aporte sedimentar principal vem diretamente para a área de maior subsidência.

A ciclicidade é controlada principalmente pela variação das taxas de subsidência e de aporte sedimentar, que obedecem a ciclos de reativação tectônica. A eustasia é mascarada pelas altas taxas de subsidência durante os cavalgamentos e por eventos de soerguimento que simulam queda eustática.

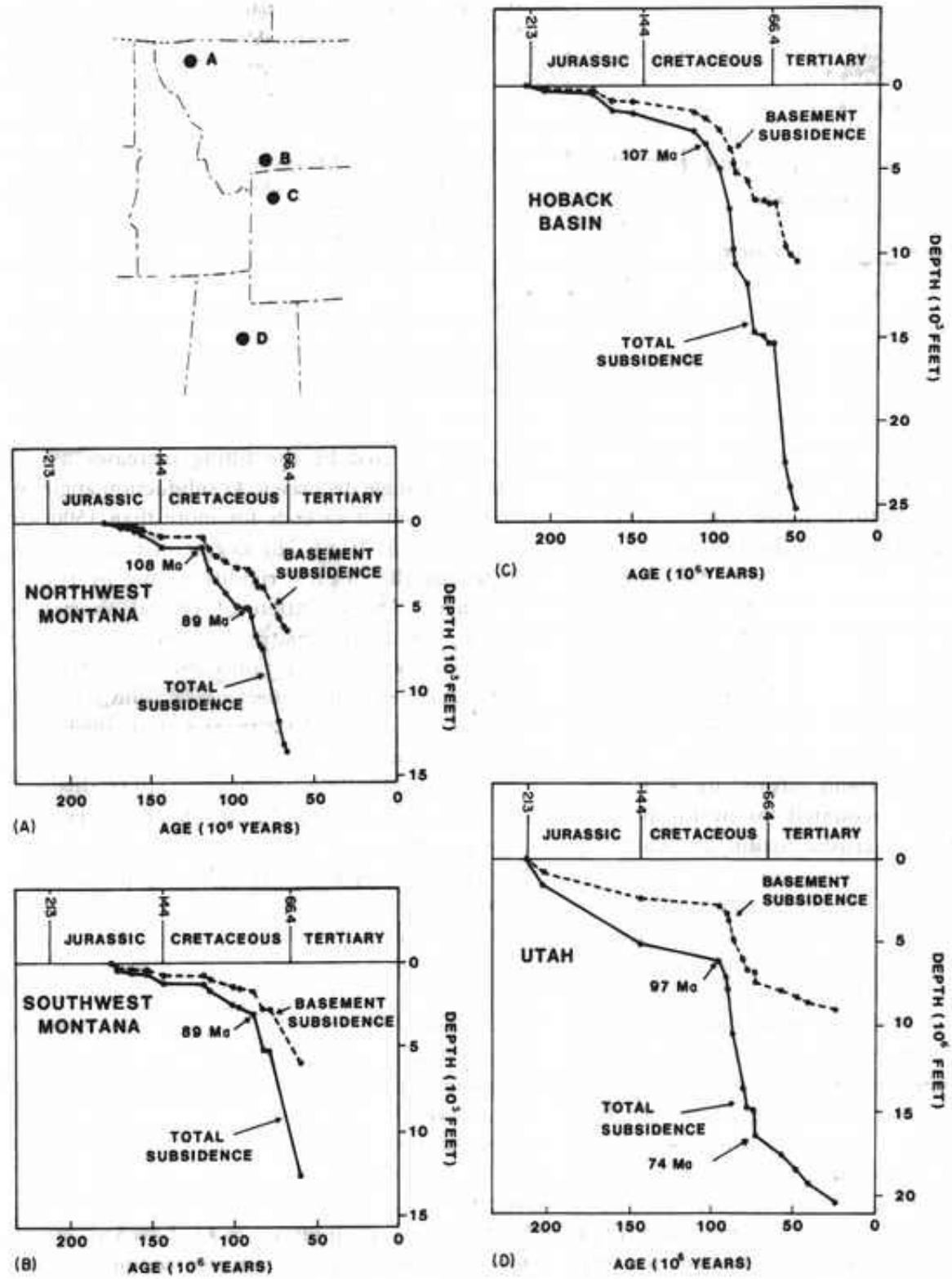
Elasticidade e flexura

Gravimetria

Bacias de Antepaís

Evolução

Exemplos



Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

- Himalaia
- Bacias Alpinas
- Golfo Pérsico

Exemplos

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

O sistema de bacias dos Orógenos da Eurásia.

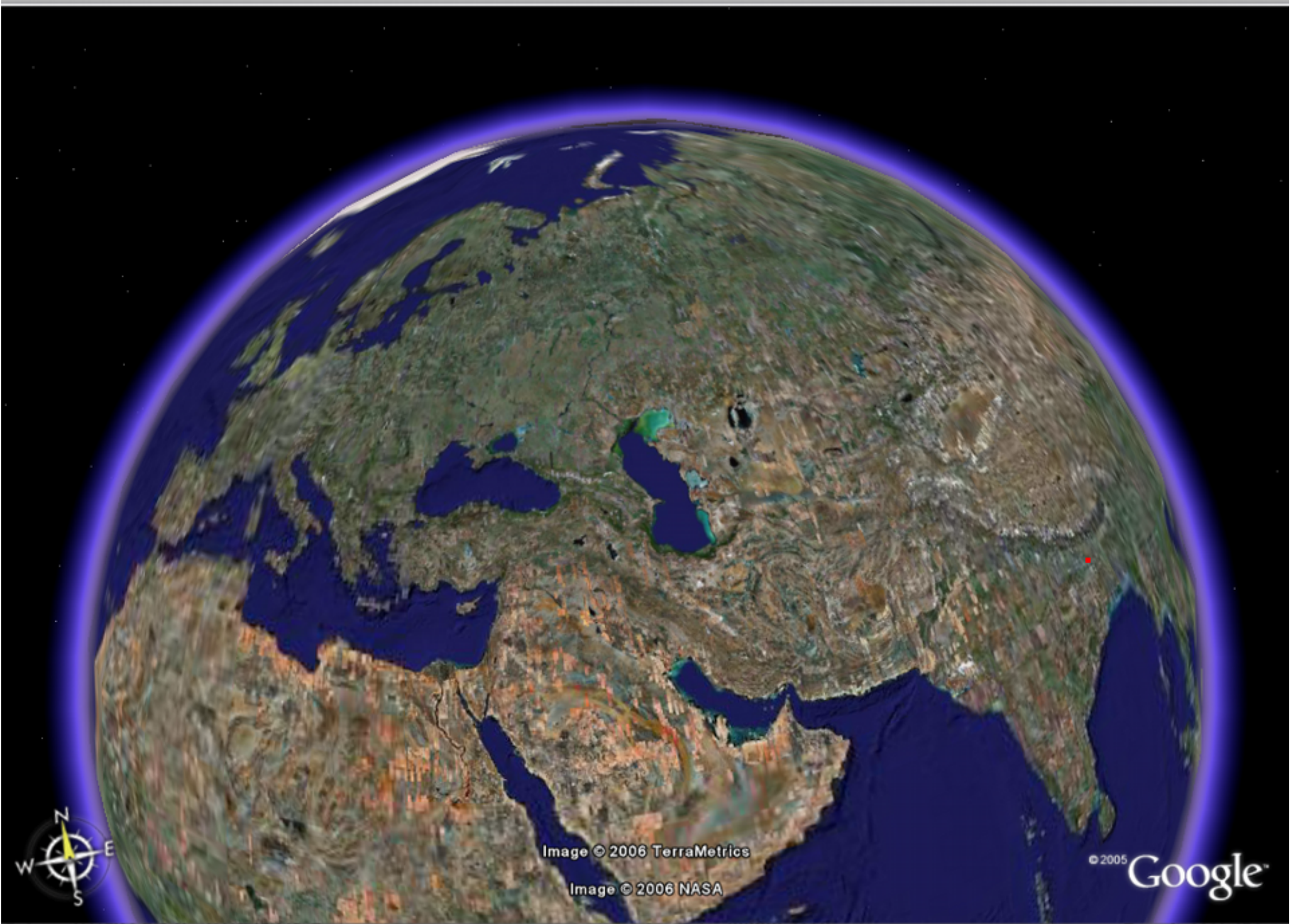


Image © 2006 TerraMetrics

Image © 2006 NASA

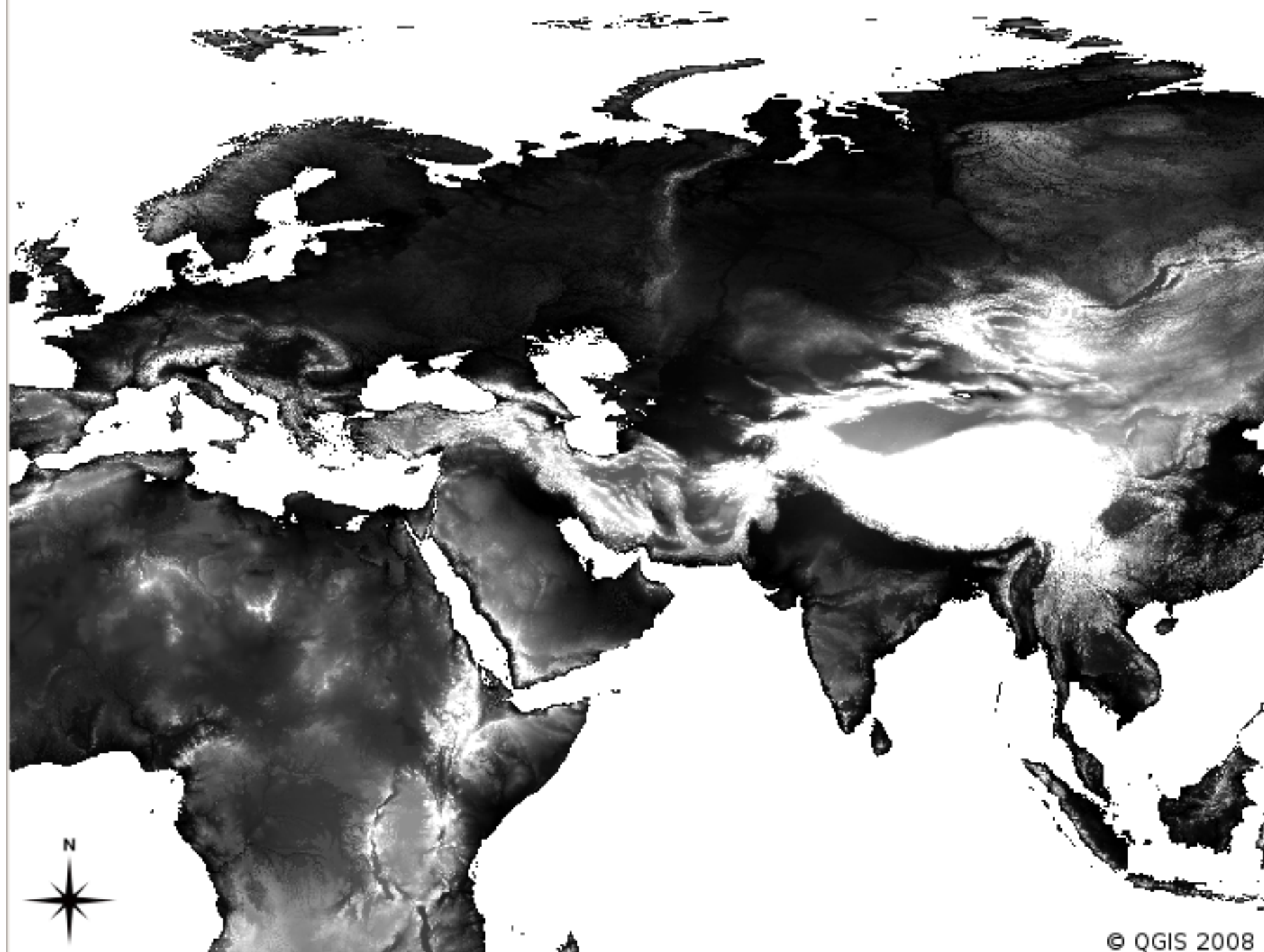
© 2005 Google™

Pointer 42°25'38.72" N 49°27'15.99" E

Streaming ||||| 100%

Eye alt 8002.45 km

0 30 degrees



Elasticidade
e flexura

Gravimetria

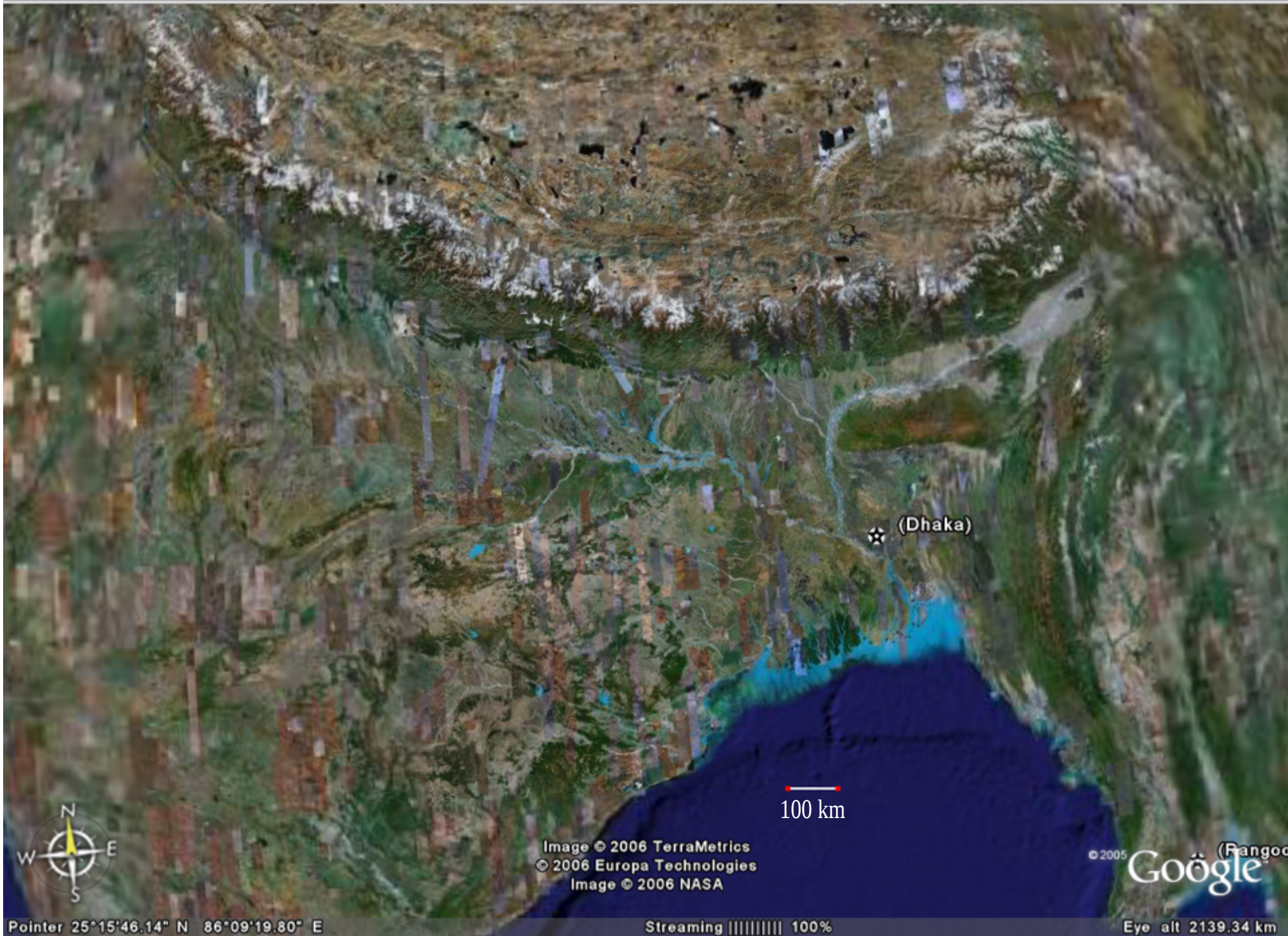
A Bacia do Ganges

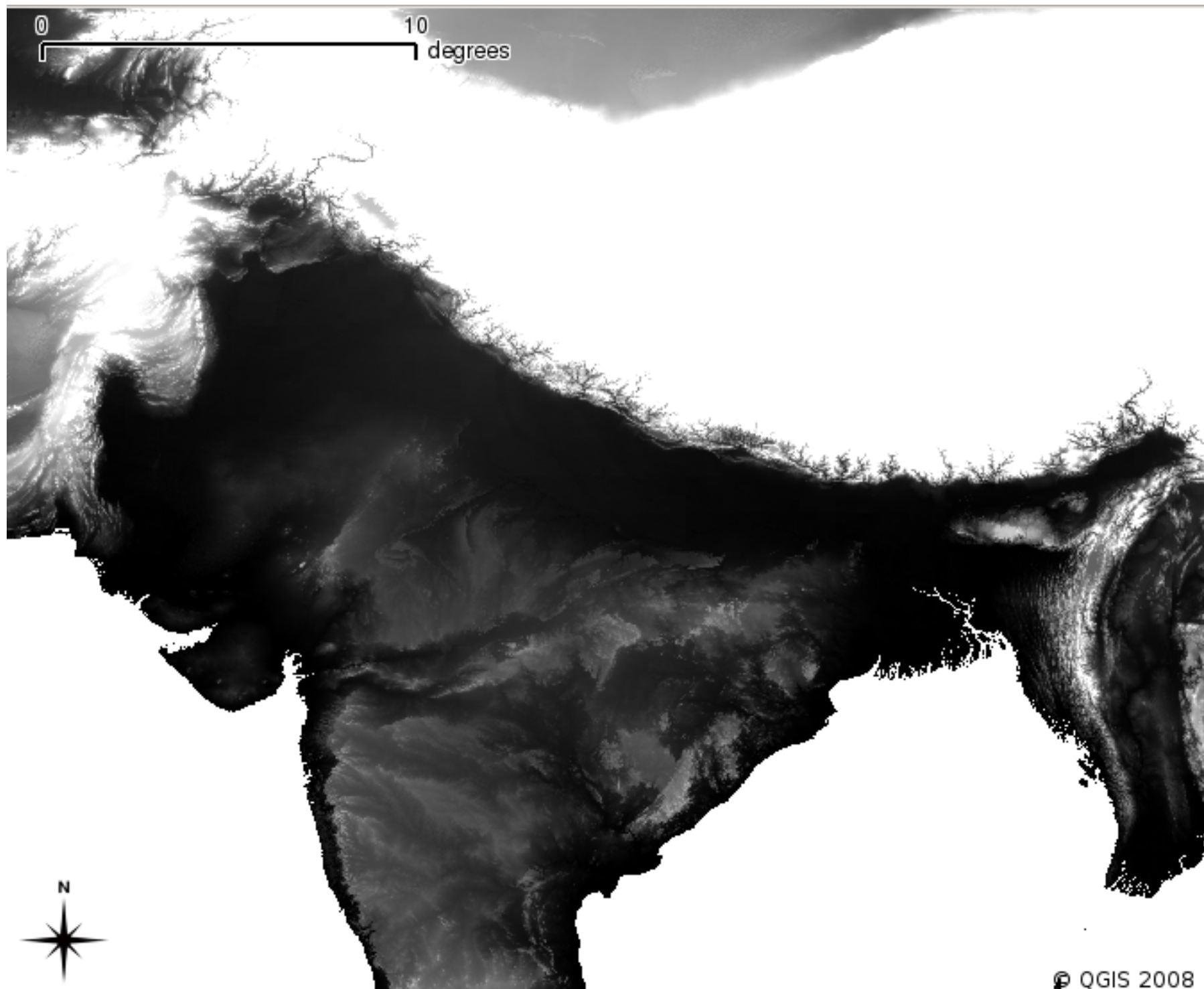
- Resposta a cavalgamento da Ásia sobre a Índia
- Grande T_e (~90 km)
- Flexura menor que a prevista pelo modelo (força contrária à flexura?)
- Preenchimento aluvial tropical

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos





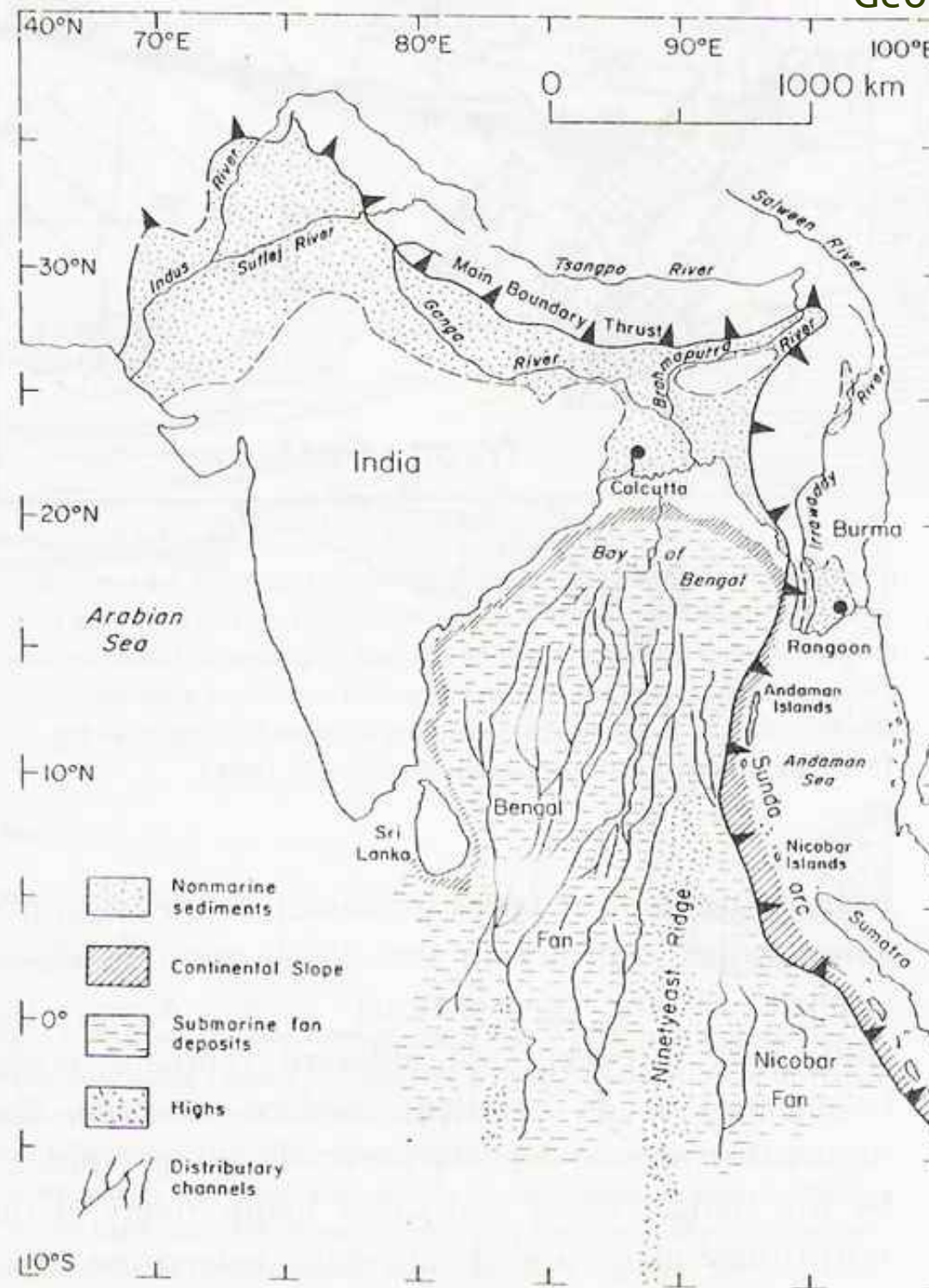
Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos



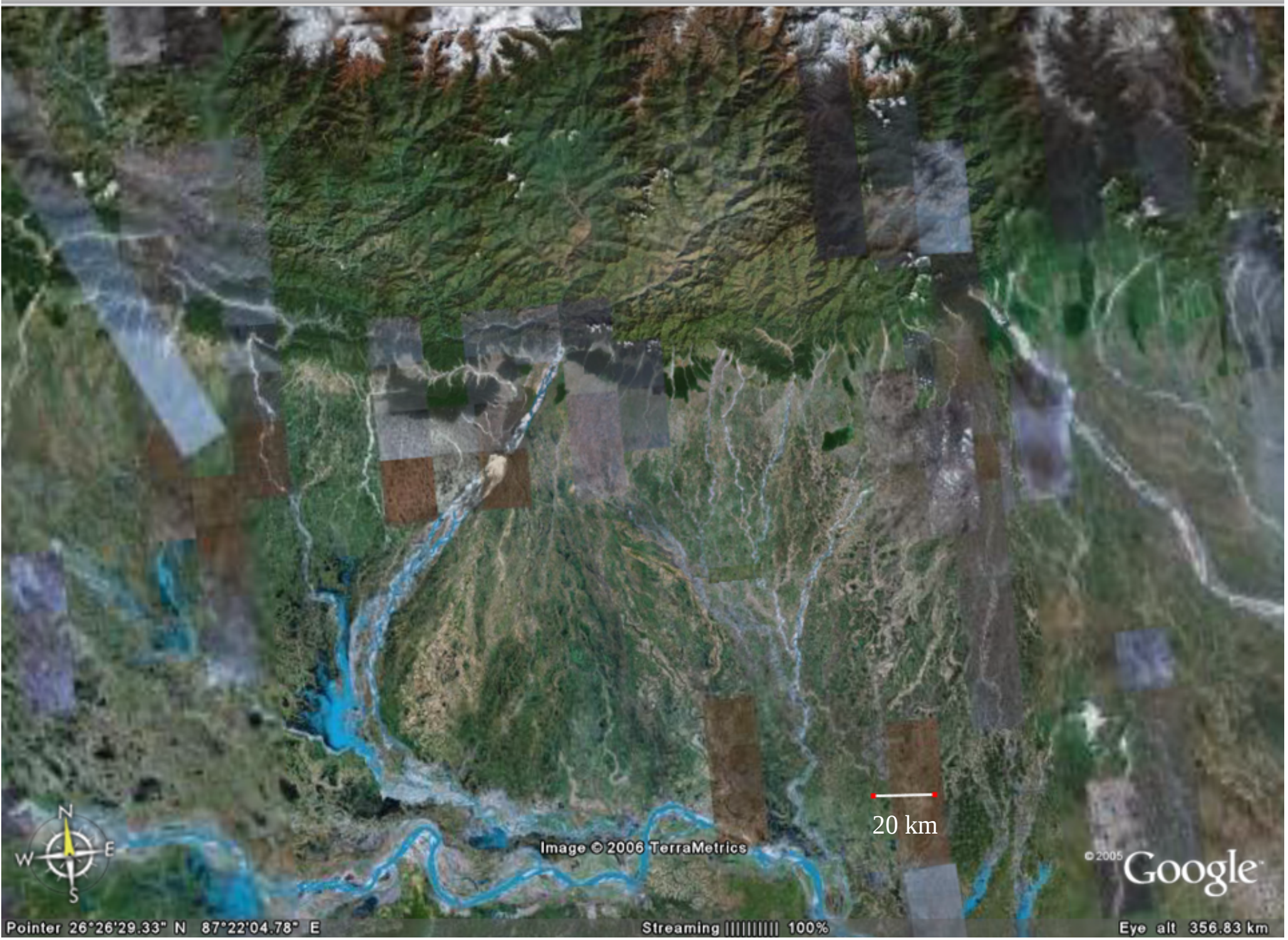


Image © 2006 TerraMetrics

20 km

© 2005 Google

Pointer 26°26'29.33" N 87°22'04.78" E

Streaming ||||| 100%

Eye alt 356.83 km



20 km

Image © 2006 TerraMetrics

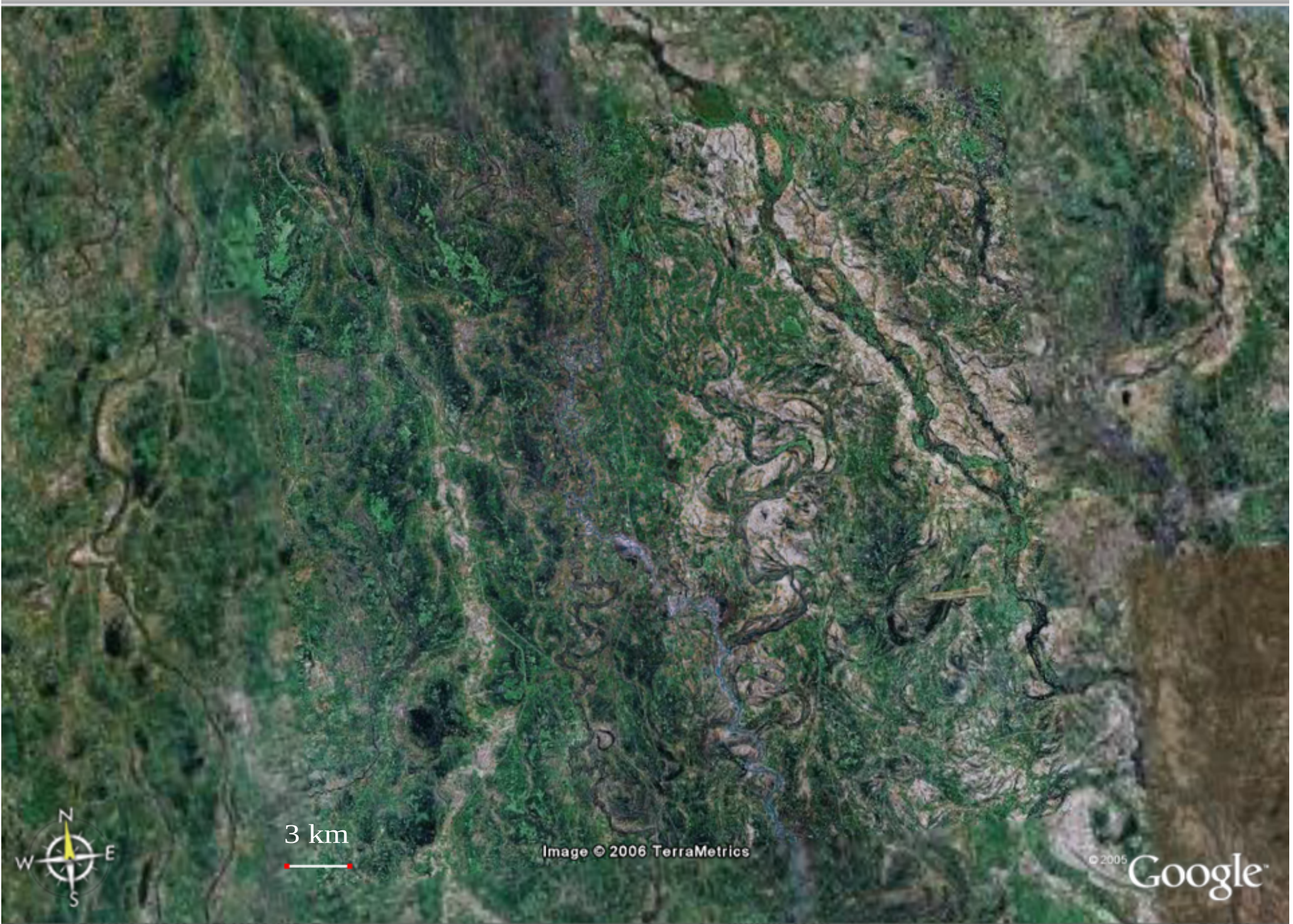
© 2005 Google



Pointer 25°59'37.24" N 87°16'54.80" E

Streaming ||||| 100%

Eye alt 177.57 km



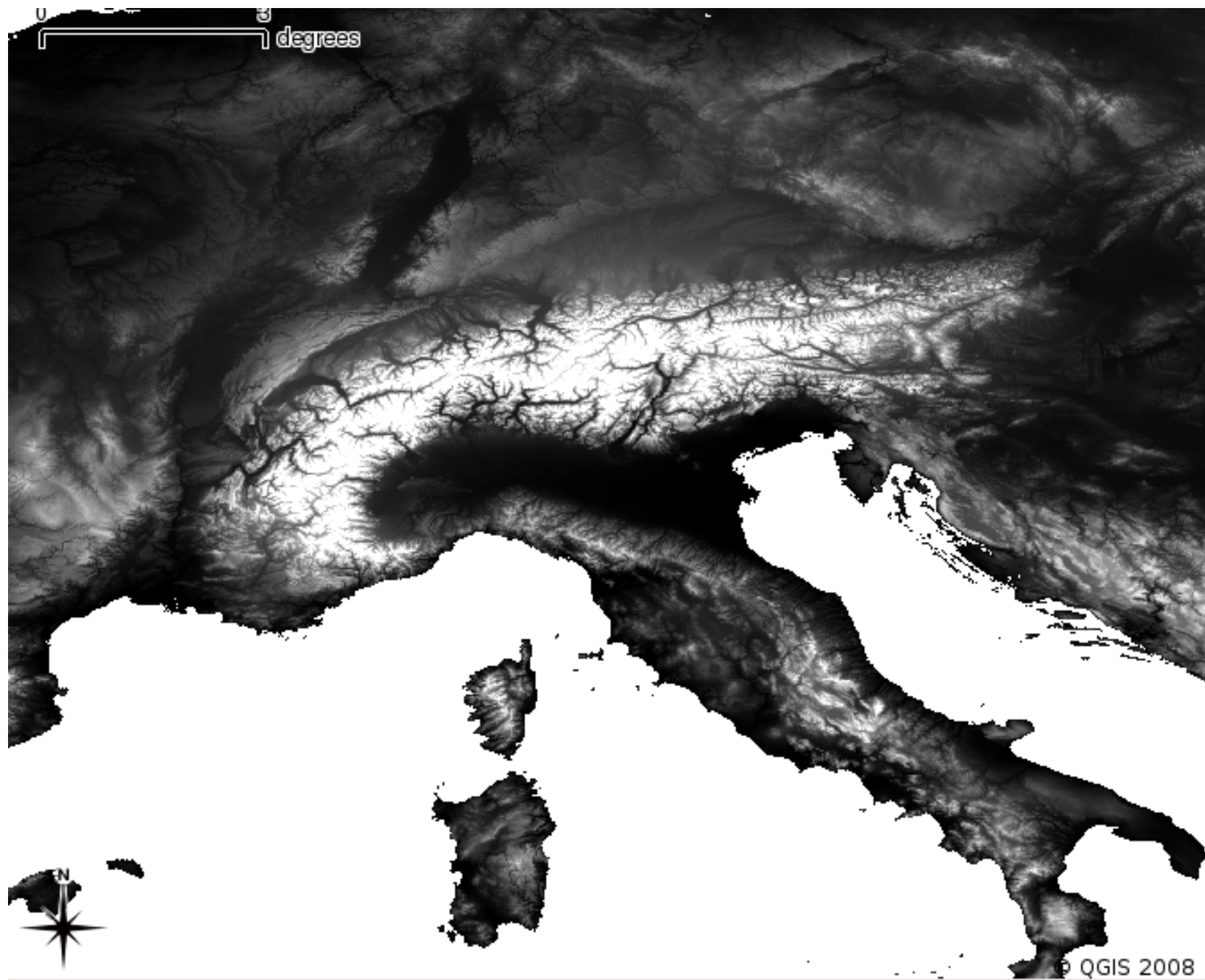
3 km

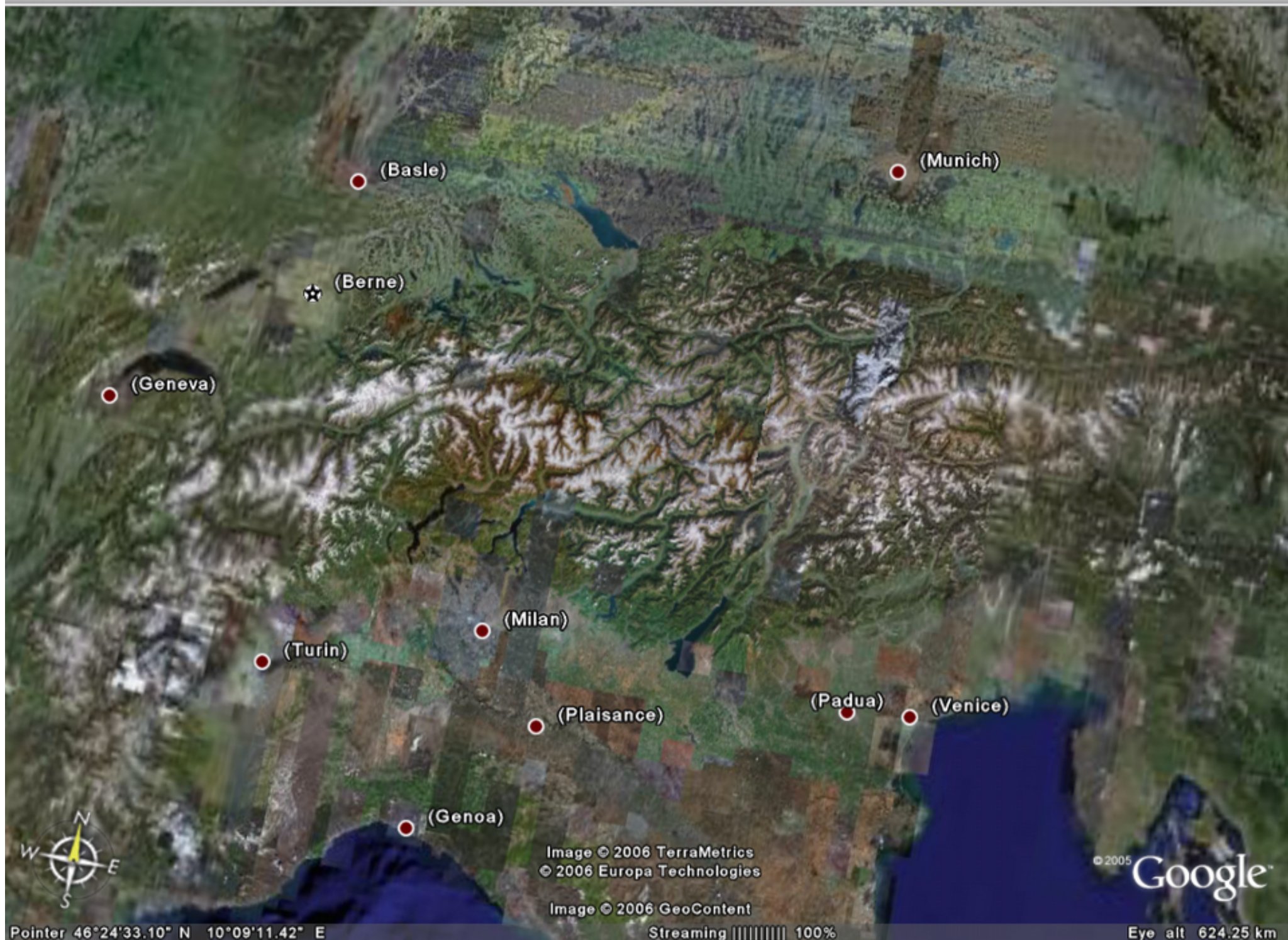
Image © 2006 TerraMetrics

© 2005 Google

A Bacia do Pó

- Resposta a cavalgamento dos Alpes e interação com subducção do Mediterrâneo.
- Te muito pequeno (<10 ou ~ 5 km!)
- Preenchimento aluvial e marinho.





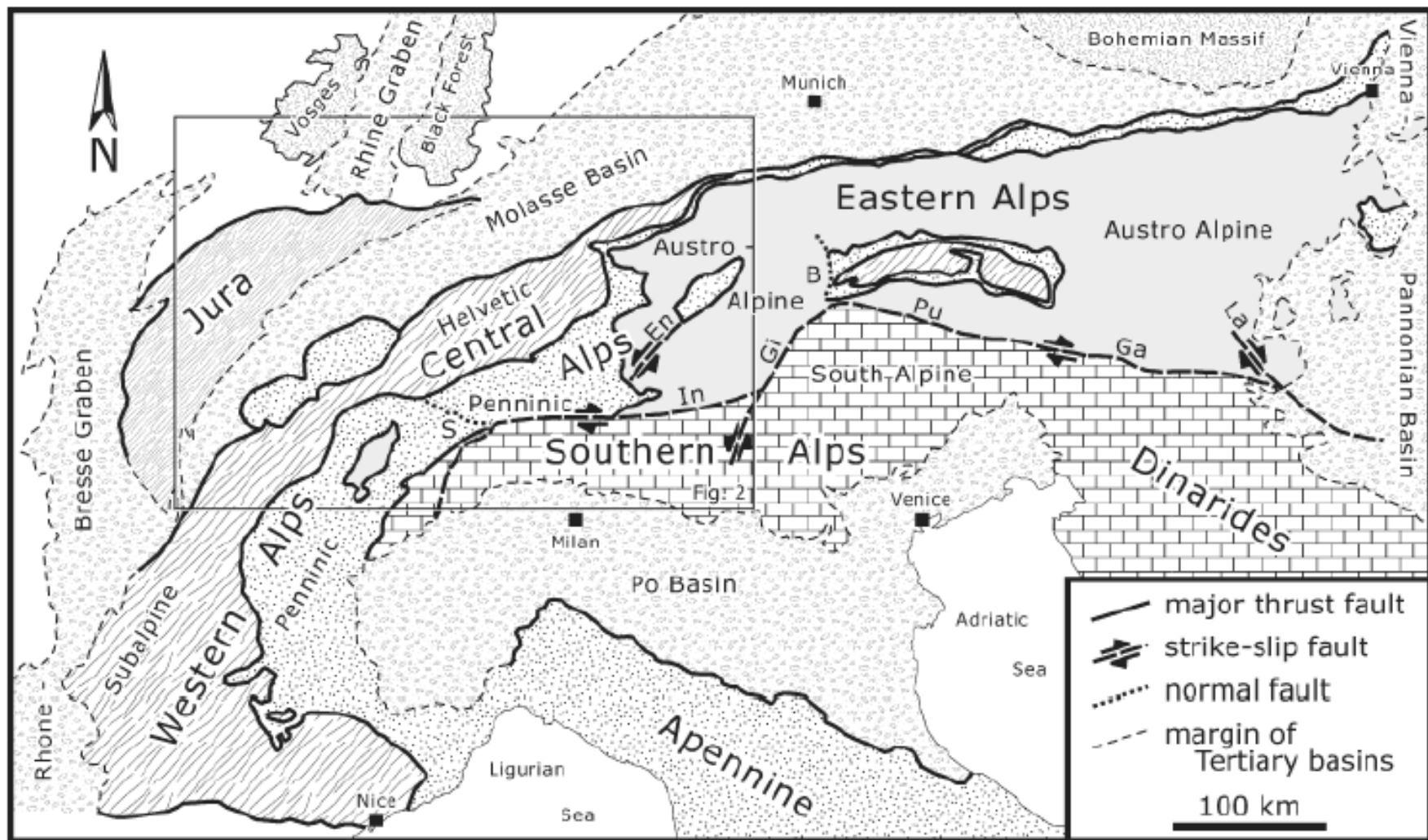


Fig. 1. Structural map of the Alps showing major tectonic units and fault systems, as well as the associated foreland basins. The study area (Fig. 2) is outlined.

USP

SL

Crystalline Basement and
Sedimentary Cover

2 Carbonate Ramp Development

SL

Autochthonous Limestone

Globigerina Marl

3 Arrival of Clastic Wedges from Orogen

Inner Basin

Outer Basin

Mud Deposition

Matthengrat &
Sardona Flysch

SL

Right-lateral Thrust

Future Position of
Out-of-Sequence Thrust

4 Emplacement of Surface Mud Sheets

SL

Globigerina
Marls

Laveyanaaz
Sandstones

Autochthonous Limestones

Out of sequence thrust

Blind Right-lateral Thrust

5 South Helvetic/North Penninic Sheets Thrust over Basin Fill

SL

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

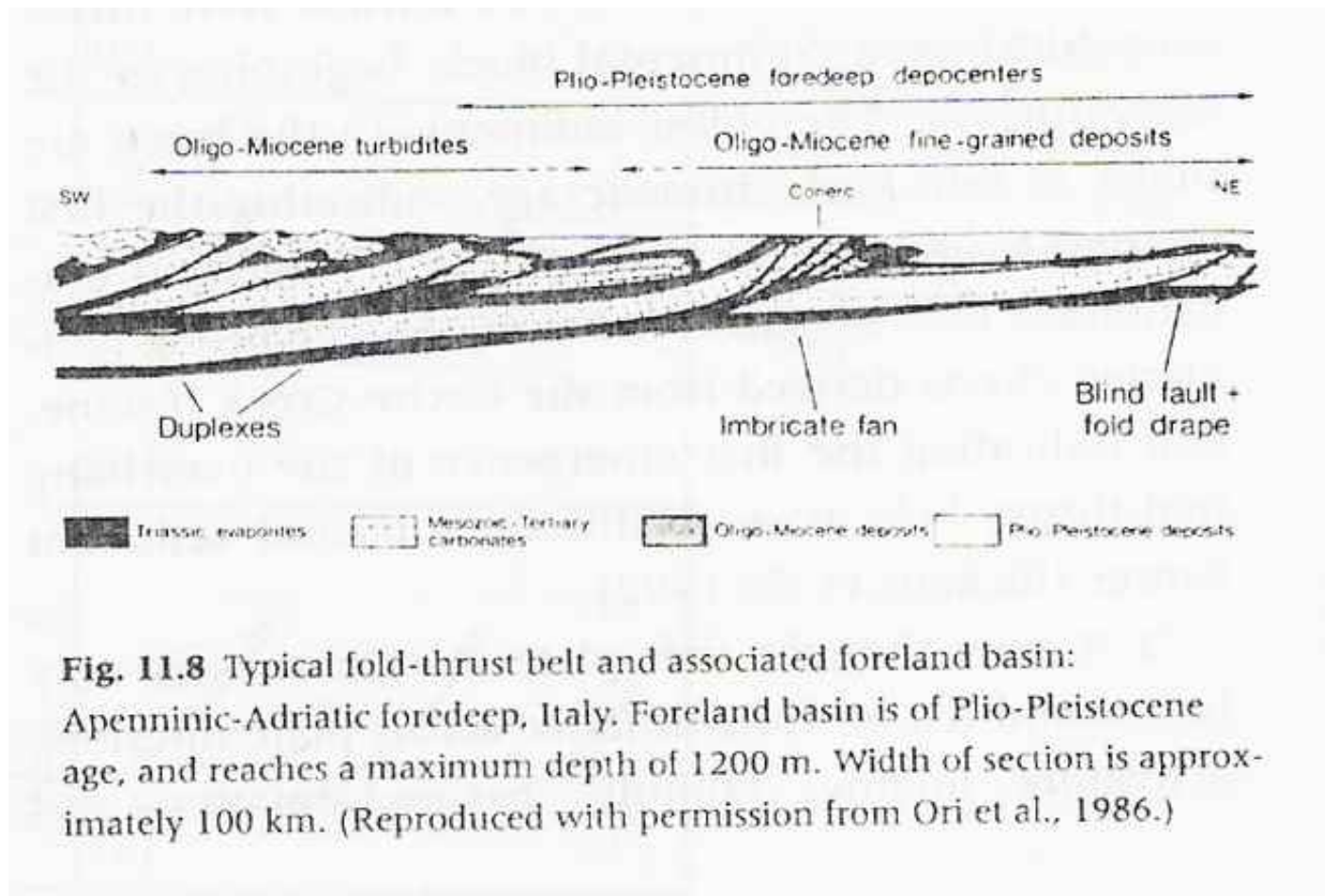
Evolução

Exemplos

Elasticidade
e flexura

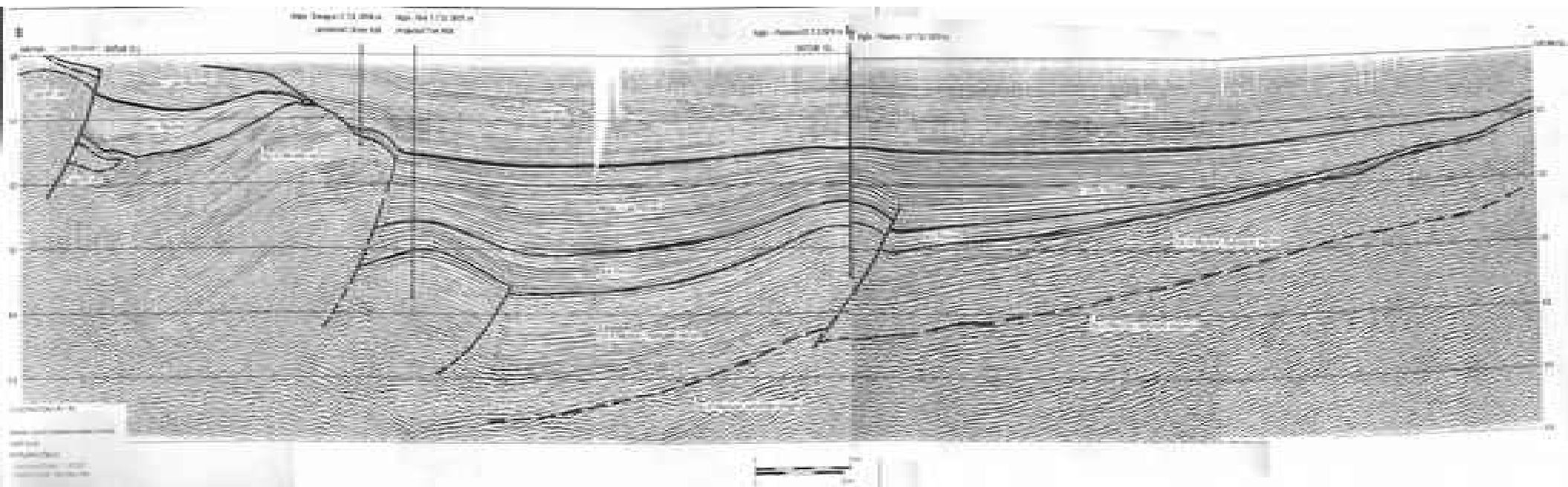
Gravimetria

Bacias de
Antepaís



Evolução

Exemplos



Elasticidade
e flexura

Gravimetria

A Bacia do Golfo Pérsico

- Resposta a cavalgamento dos Zagros sobre a Placa da Arábia
- Te 50 km
- Preenchimento marinho, costeiro e aluvial árido
- Flexura maior que a esperada (força adicional de subsidência?)

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos



(Kuwait)

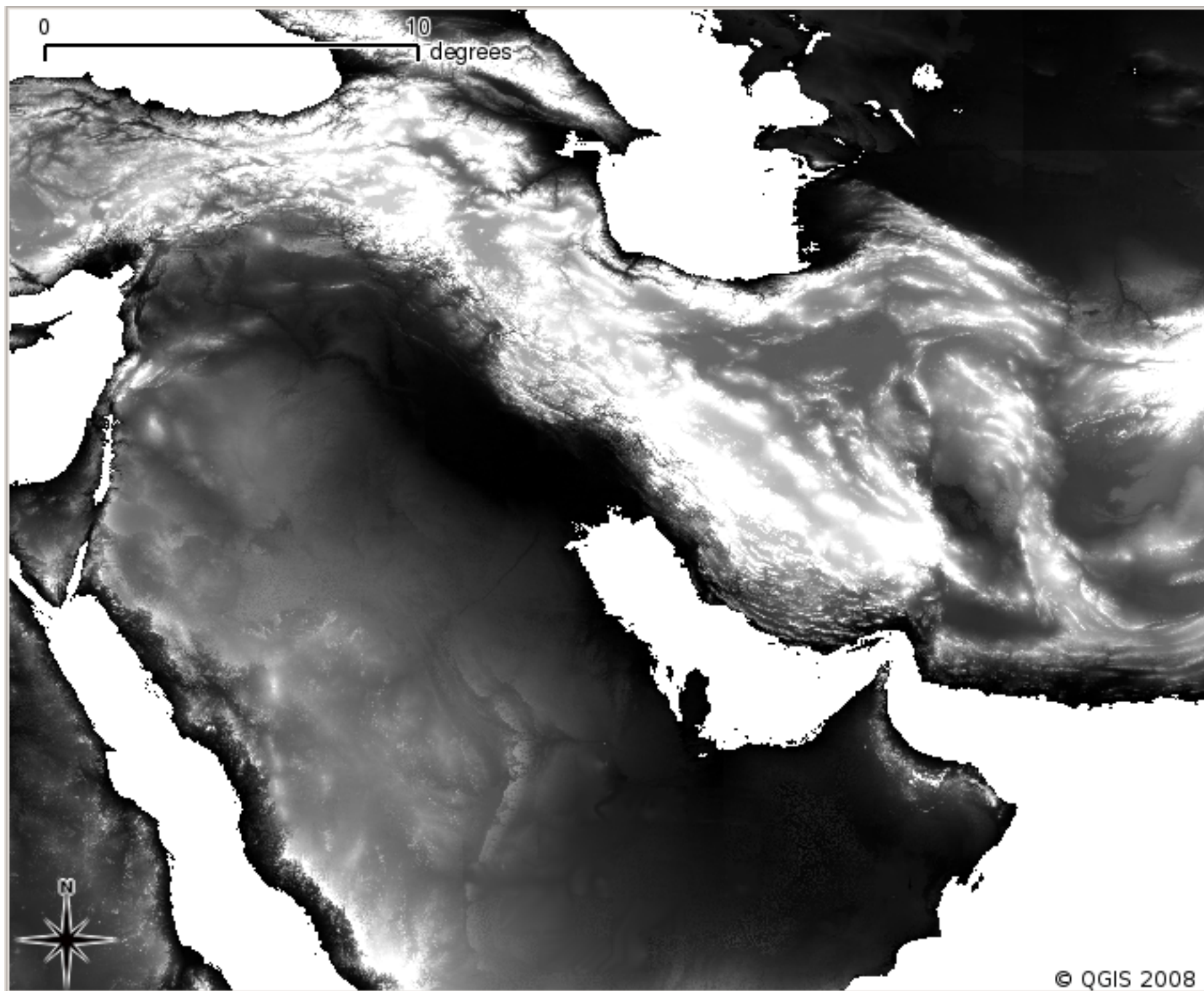
(Doha)

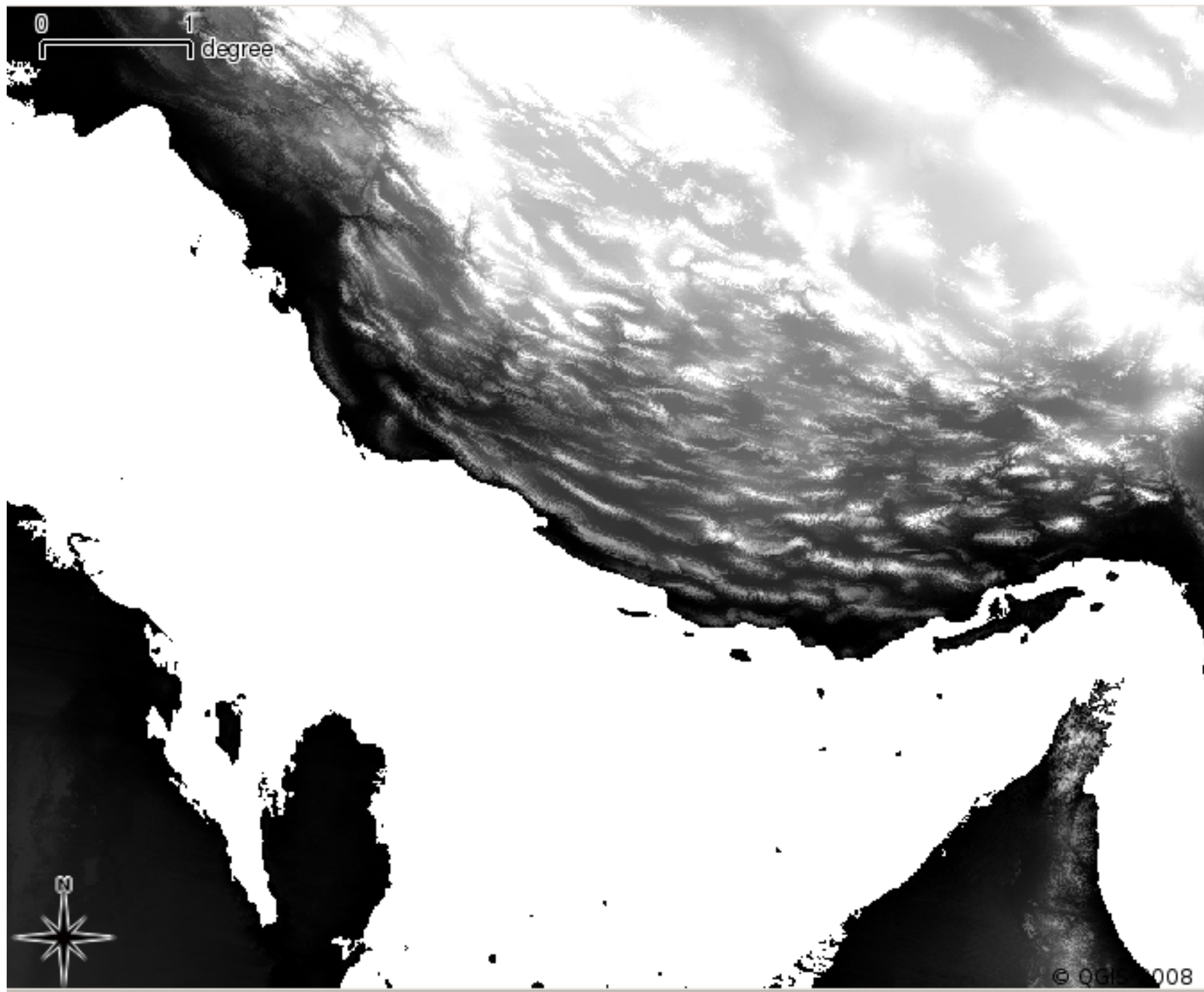
(Riyadh)

100 km

Image © 2006 TerraMetrics
© 2006 Europa Technologies

© 2005 Google







20 km



Image © 2006 TerraMetrics
© 2006 Europa Technologies

© 2005 Google

Pointer 27°31'12.67" N 53°21'26.81" E

Streaming ||||| 100%

Eye alt 198.80 km

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

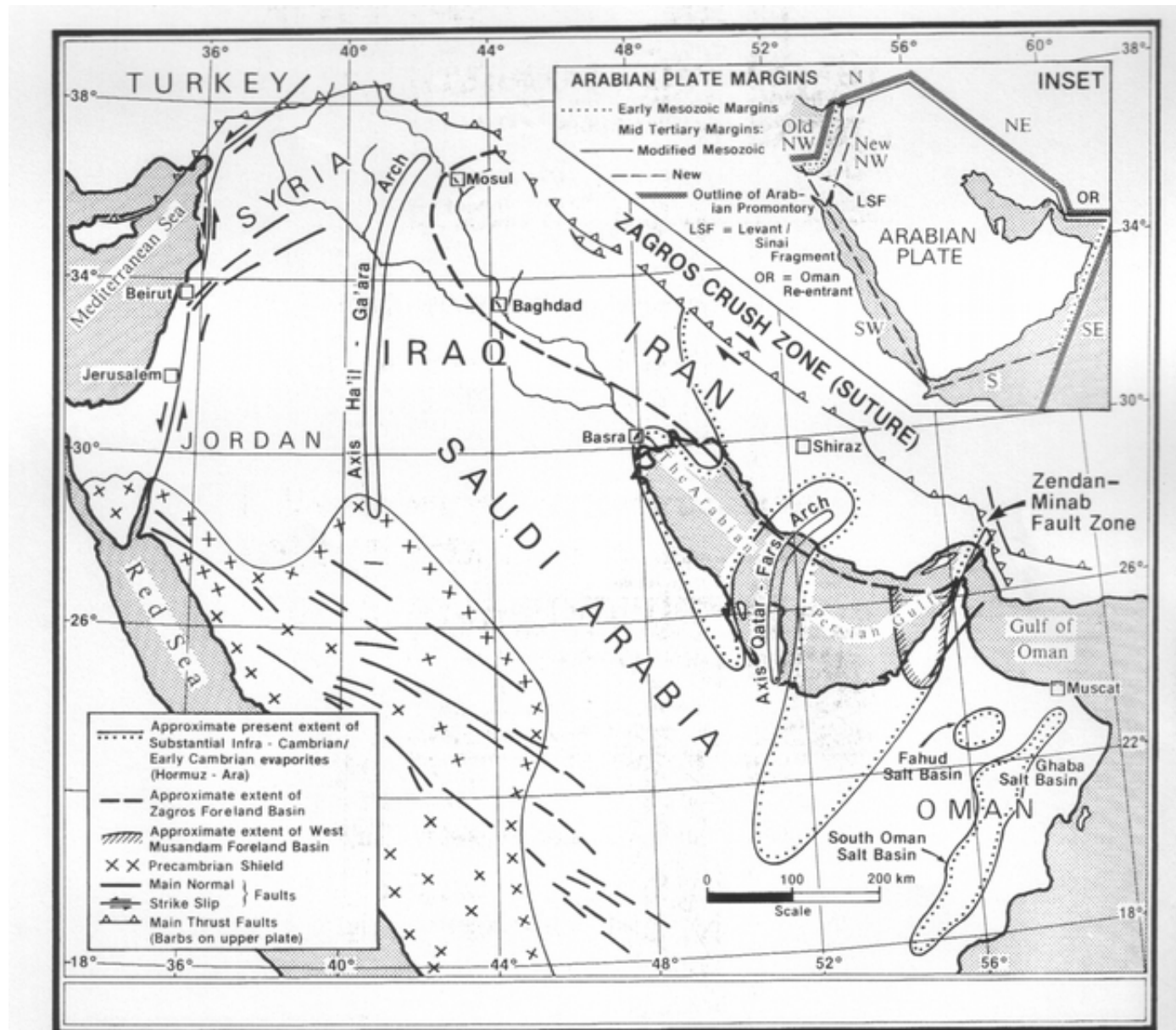


FIGURE 1. Orogenic setting of the Zagros foreland basin.

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

Exemplos

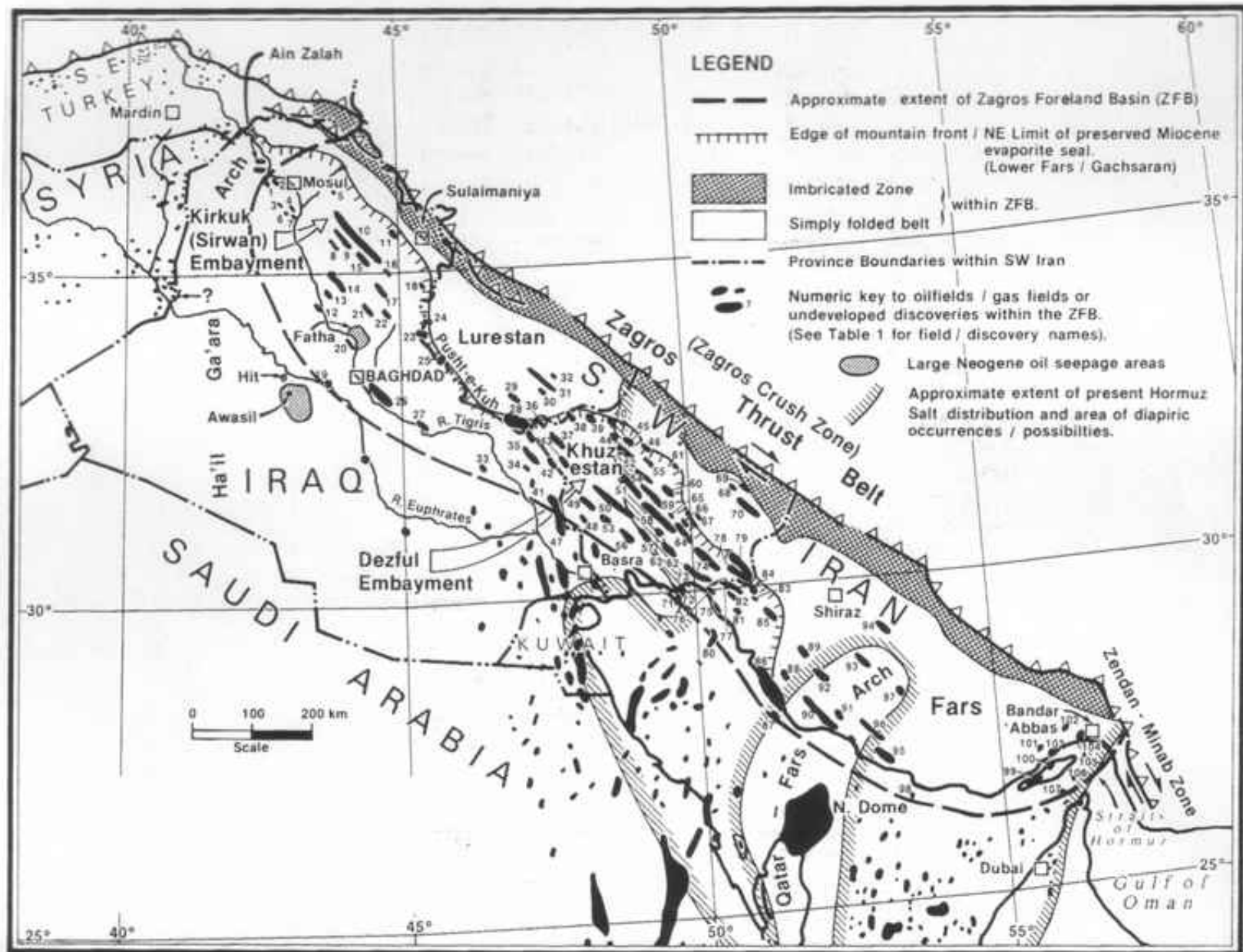


FIGURE 2. Regional oil and gas map showing locations, provinces, and key structural elements in the Zagros foreland basin.

Elasticidade
e flexura

Gravimetria

Bacias de
Antepaís

Evolução

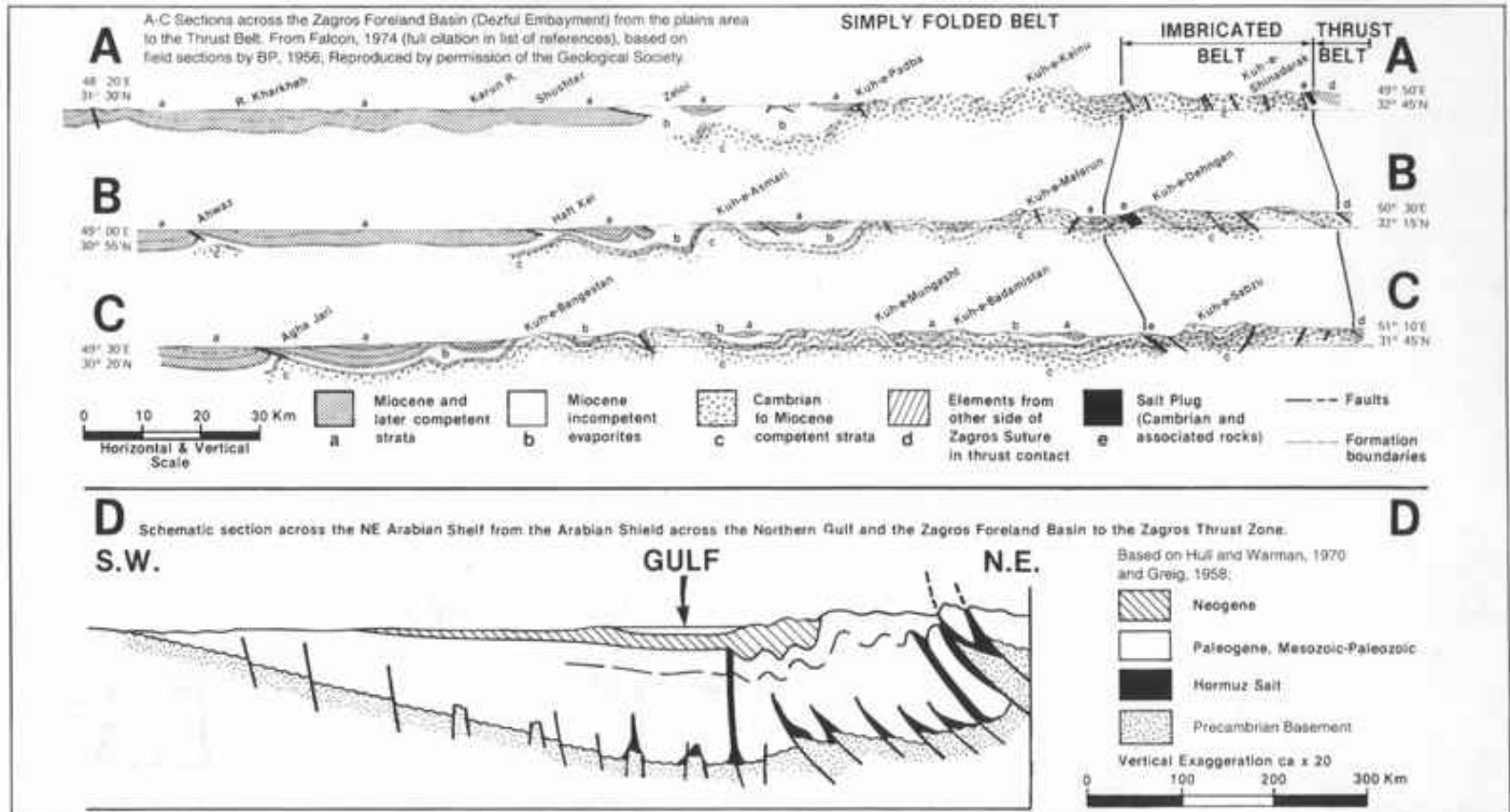


FIGURE 8. Zagros structural cross sections. Sections A to C are sections across the Zagros foreland basin (Dezful embayment) from the plains area to the thrust belt. Section D is a schematic section across the northeastern Arabian shelf from the Arabian shield across the northern Gulf and the Zagros foreland basin to the Zagros thrust zone. Sections A to C from Falcon (1974), based on field sections by BP (1956). Reproduced by permission of The Geological Society (London). Section D is based on Hull and Warman (1970) and Greig (1958).

Exemplos