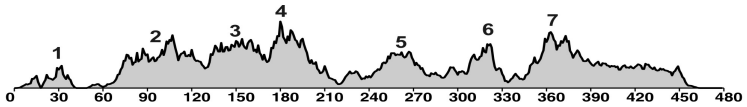
RESULTADOS PRELIMINARES DO PROJECTO SISMOD

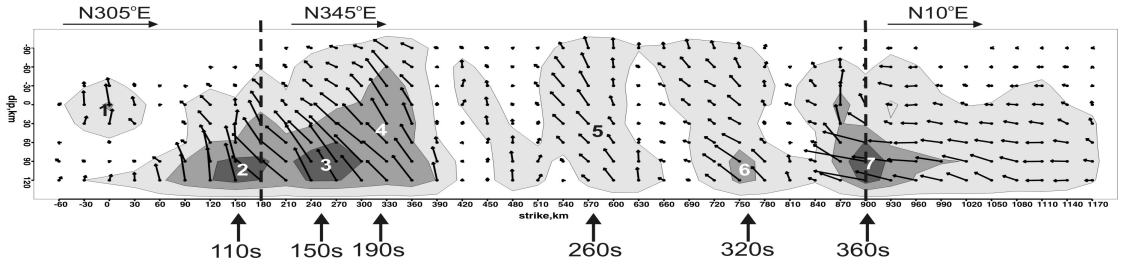
Equipa:
Bento Caldeira; José Borges; Mourad Bezzeghoud; Vladimir Bushenkov; Guorgi Smirnov

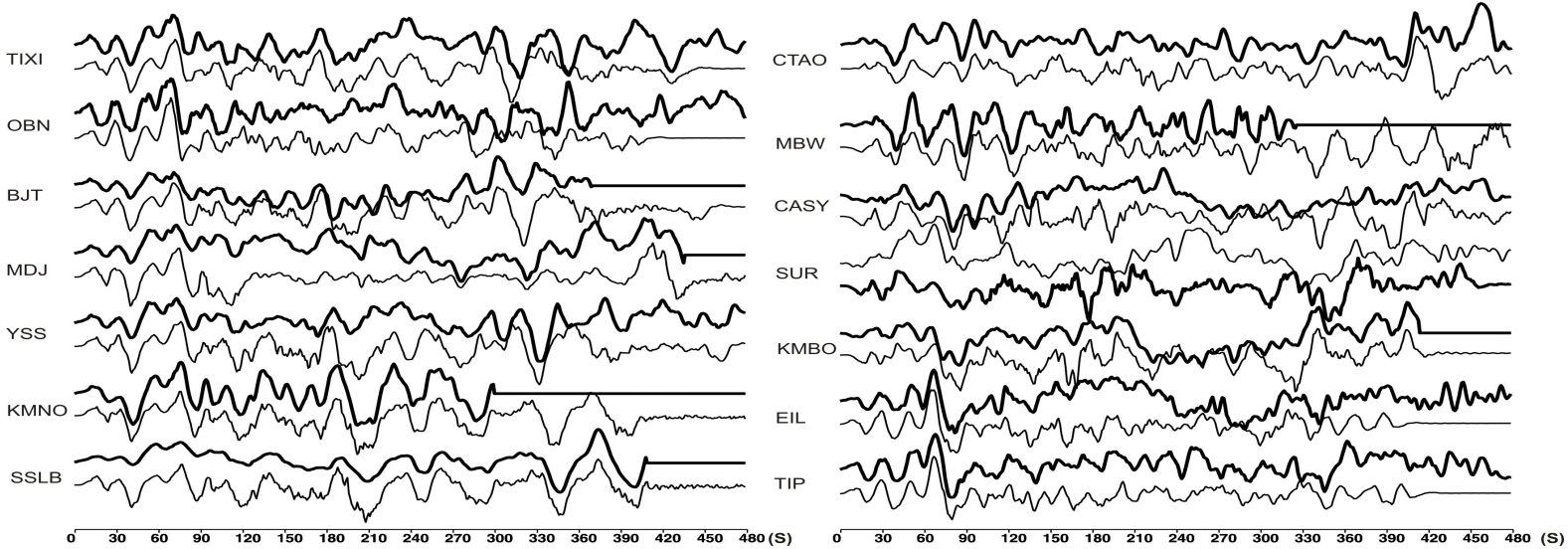
2 de Julho de 2011

Workshop: Tectónica recente e Perigosidade Sísmica em Portugal

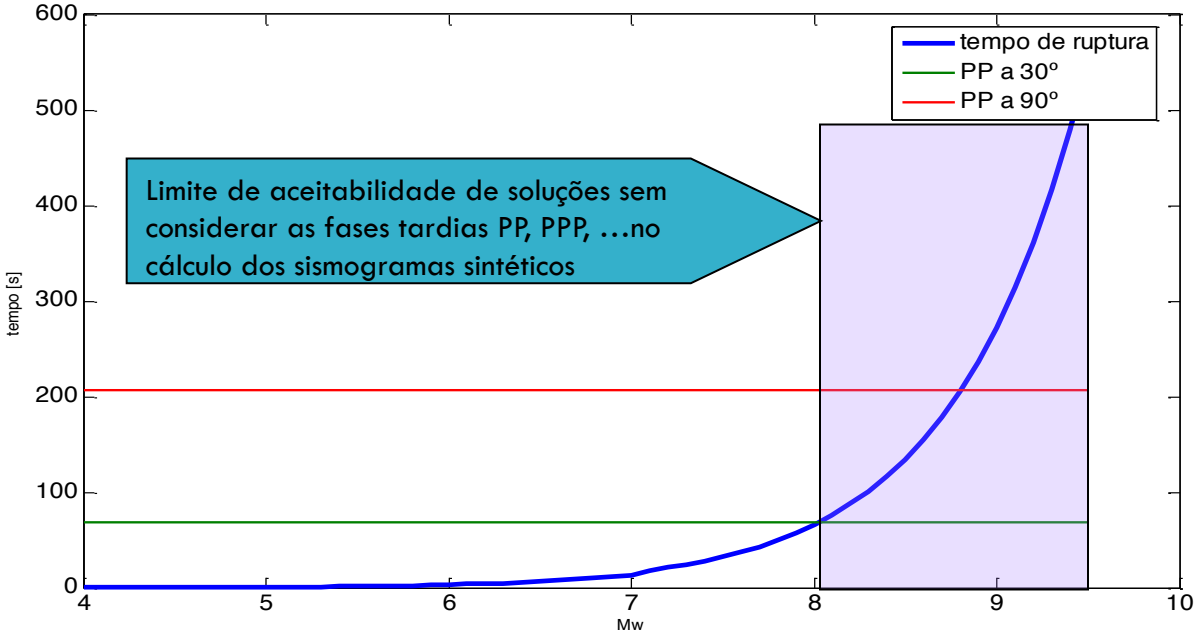
Motivação


1
2
3
4
5
6
7
0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360 390 420 450 480


N305°E
N345°E
N10°E
dip,km
strike,km
110s
150s
190s
260s
320s
360s

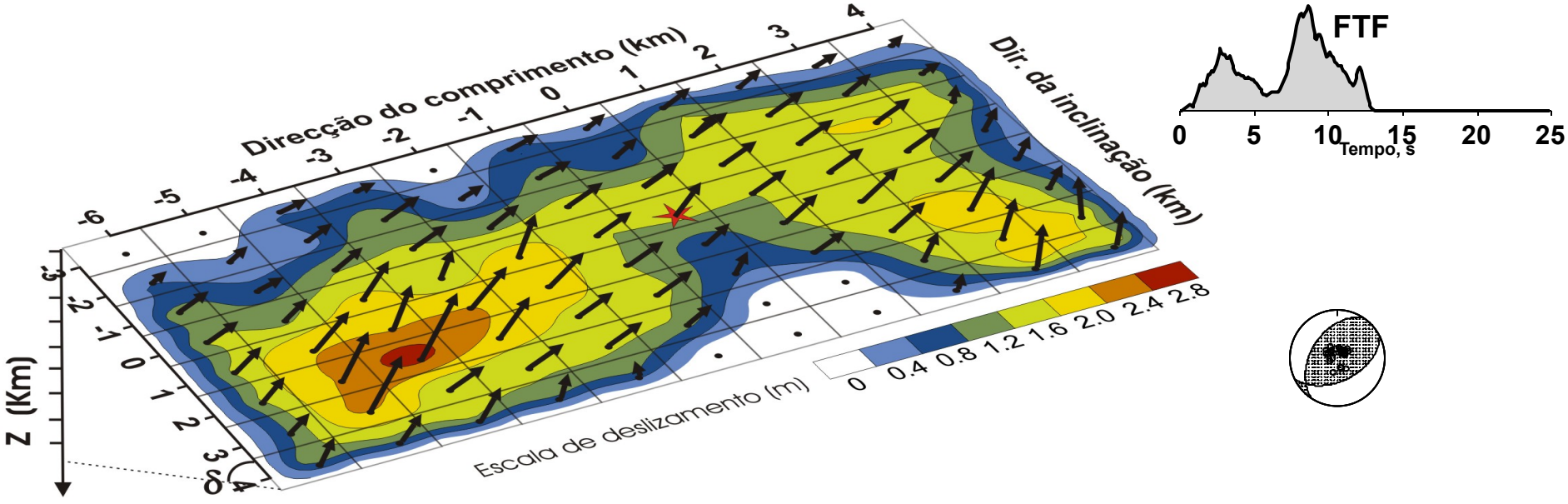

TIXI
OBN
BJT
MDJ
YSS
KMNO
SSLB
CTAO
MBW
CASY
SUR
KMBO
EIL
TIP
0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360 390 420 450 480 (S)

Motivação



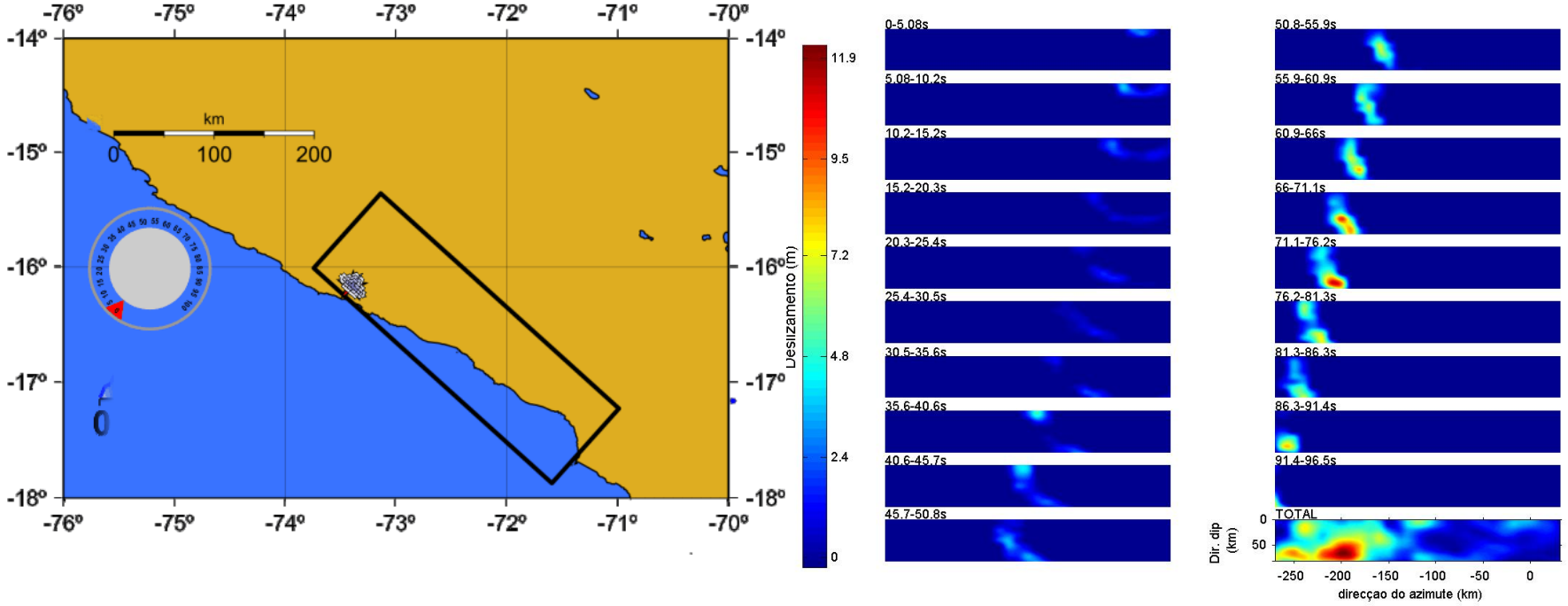
Tempos de ruptura obtidos com dados de Tanioka & Ruff (1997)

Soluções pretendidas



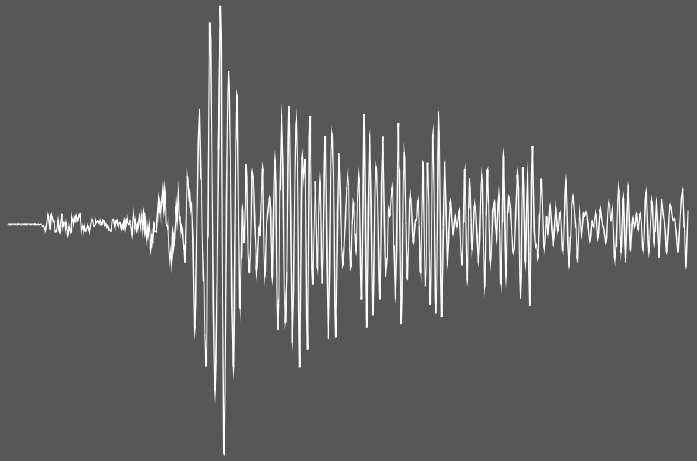
FONTE SÍSMICA

Modelo cinemático de distribuição de slip



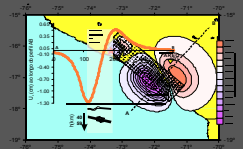
DADOS

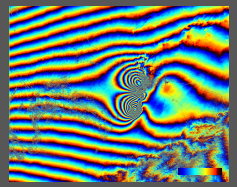
Sismológicos



- Telesísmicos
- Campo próximo

Geodésicos





Bam (Irão) 2003

- GPS
- InSAR

SOLUÇÕES EM FUNÇÃO DOS DADOS

Movimentos elásticos em campo próximo

Visão global da ruptura;	Escassez de dados

Movimentos elásticos em campo longínquo

Abundância de dados	Falta de definição da ruptura

Deformação Cosísmica

Visão global e detalhada da ruptura	Sem definição temporal

Proposta de trabalho

- Desenvolver algoritmo para a caracterização espaço-temporal de deslizamentos, que permitisse a inversão a partir de dados
  - Sísmicos campo próximo
  - Sísmicos distâncias telesísmicas✔
  - Geodésicos
- Problema directo com:
  - Capacidade de sintetizar sismogramas para qualquer dimensão da fonte, isto é, considerar fases tardias;
  - Permitir o uso funções de Green em campo próximo calculadas a partir estruturas 3D, isto é, considerando anisotropias horizontais;
- Problema inverso:
  - Aplicar um método de inversão global ou semi-global que permita estabilidade em problemas não lineares

Resultados Intermédios

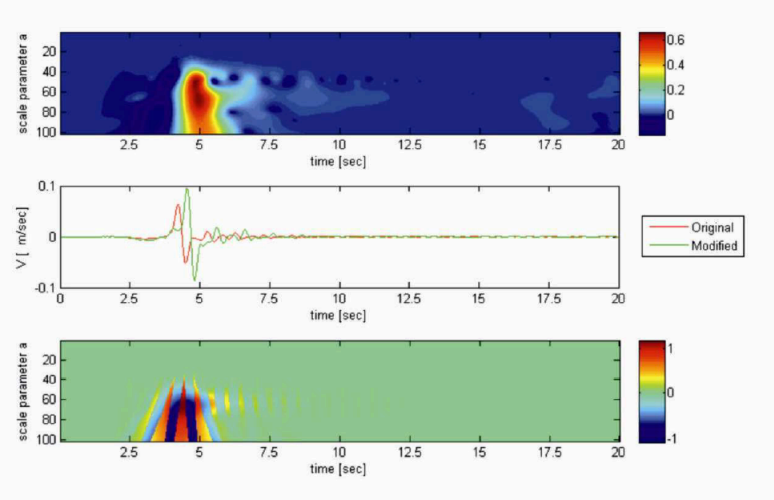
Sismogramas em campo próximo

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

STRONG-GROUND MOTION SIMULATIONS AND ASSESMENT OF INFLUENCE OF MODEL PARAMETERS ON WAVEFORMS

Ekaterina Zadonina

Thesis submitted to University of Évora for the degree of Masters in Earth, Atmosphere and Space Sciences

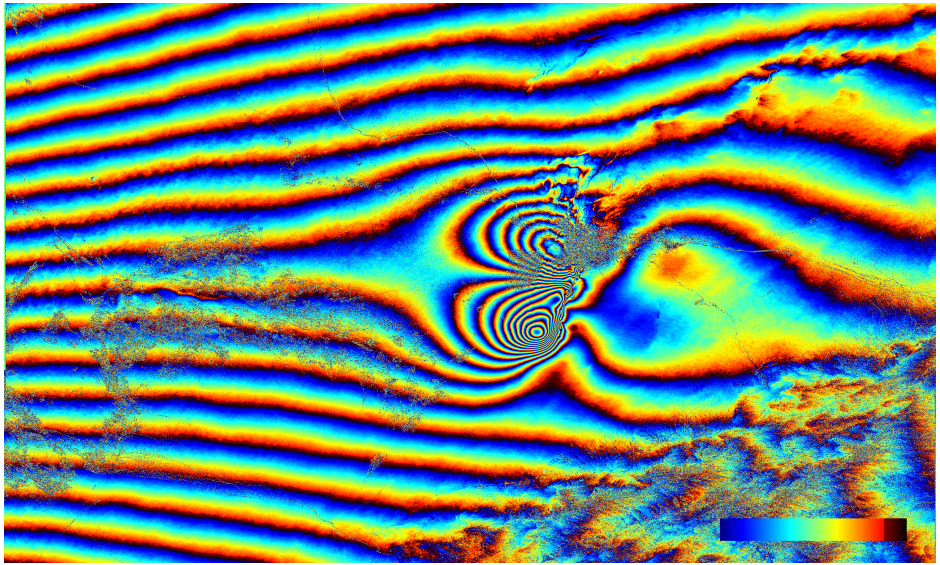


(Aplicação desenvolvida de acordo com Kristeková et al, 2006).

Resultados Intermédios

Resultado no âmbito da tese de Doutoramento de Ruben Chaves:

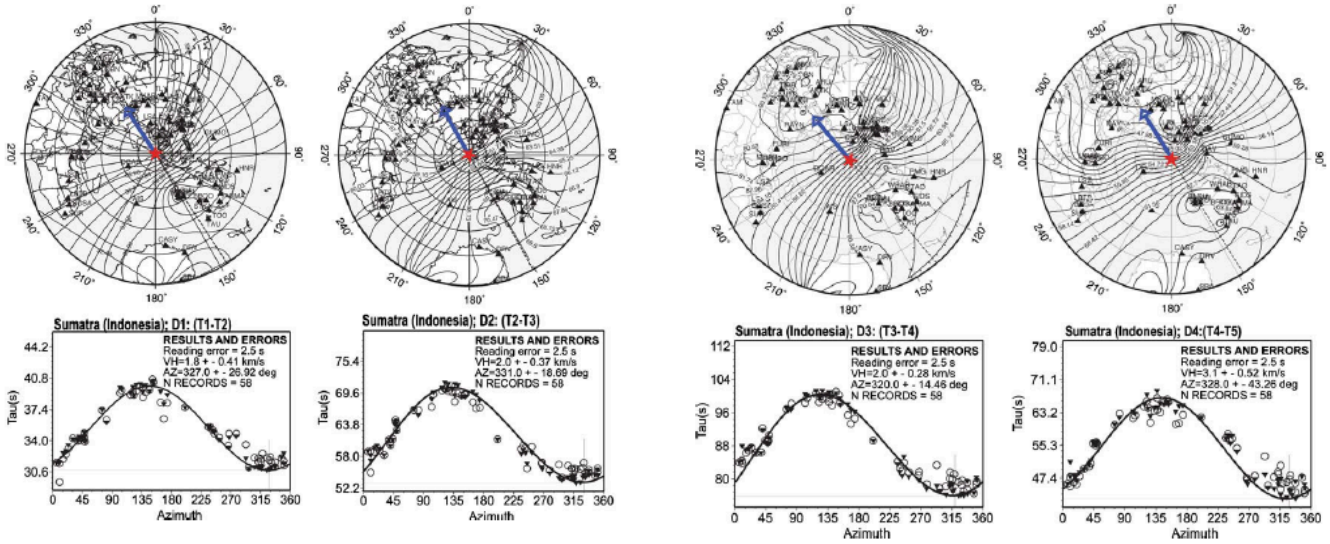
Modelação de processos internos activos através de dados de observação geodésica de deformação da superfícial

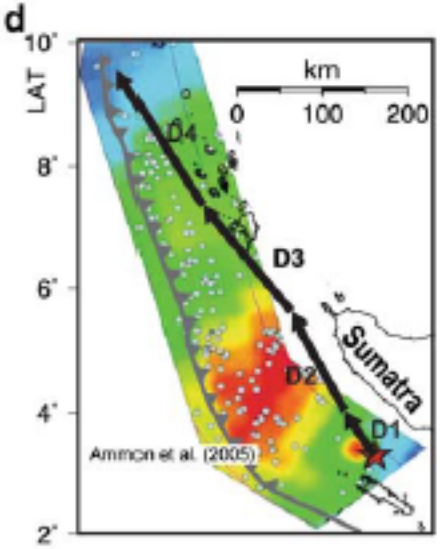


(Interferograma de fase abrangendo o sismo de Bam (Irão), 2003.

DIRDOP

Determinação da direcção e velocidade de ruptura do sismo de Sumatra

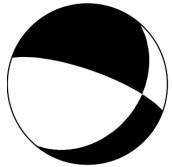


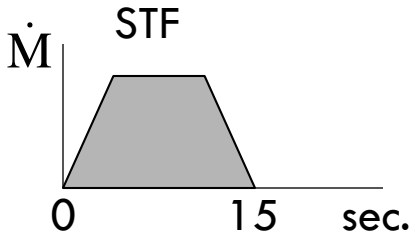


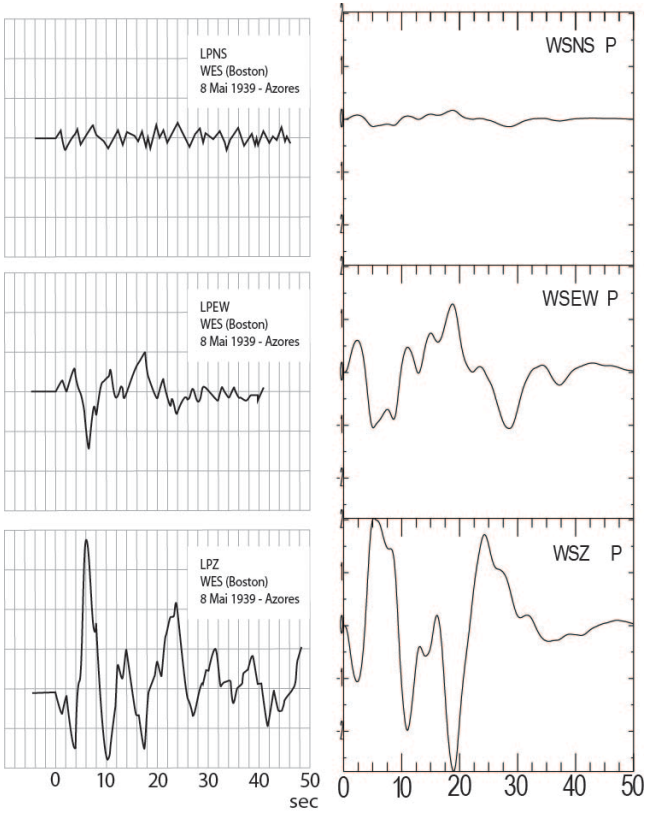
figuras de Caldeira et al, 2010

Sismo de 8 de Maio de1939 - Açores

Str.=41.0
Dip=35.0
Rake= -154.0







O PROBLEMA DE INVERSÃO

Resolvido por Programação Linear (LP)

$$\mathbf{Ax} \approx \mathbf{u}$$

denote $\mathbf{u - Ax = r}$

minimize $f = \sum |r_j| = \sum r_j^+ + r_j^-, \quad r = r_j^+ + r_j^-$

LINEAR PROGRAMMING PROBLEM

Minimize $f = \sum r_j^+ + r_j^-$

subject to

$$\mathbf{Ax + r^+ + r^- = u}$$

$$\sum c_i x_i = M_0$$

$$x_i \geq 0, \; r_j^+ \geq 0, \quad r_j^- \geq 0$$

Das & Kostrov (1990, 1994)

PROGRAMAÇÃO LINEAR
No espaço DUAL

Prova-se que:

PRIMAL

$\mathbf{cx} \rightarrow \min$

subject to:

$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$

$x_i \geq 0$

$x \in R^n$

DUAL

$\mathbf{bx} \rightarrow \max$

subject to:

$\mathbf{A}^T\mathbf{y} \leq \mathbf{c}$

$y \in R^m$

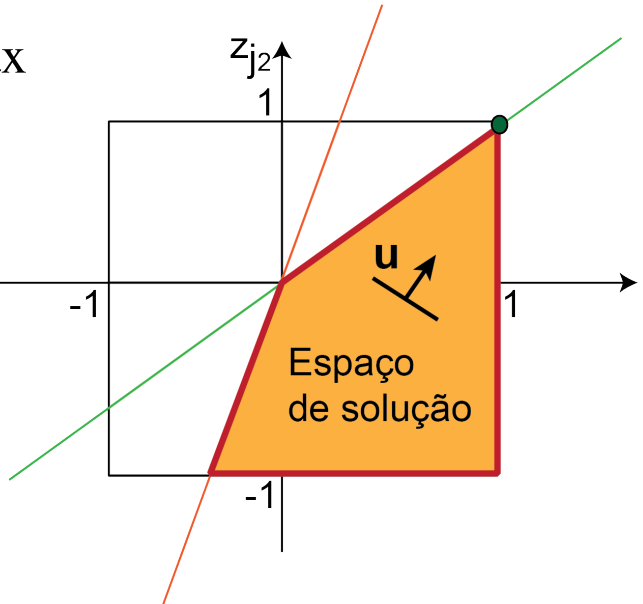
No problema em causa:

$-1 \leq z_j \leq 1$

$uz \rightarrow \max$

$\mathbf{A}_1^T z \leq 0$

$\mathbf{A}_2^T z \leq 0$



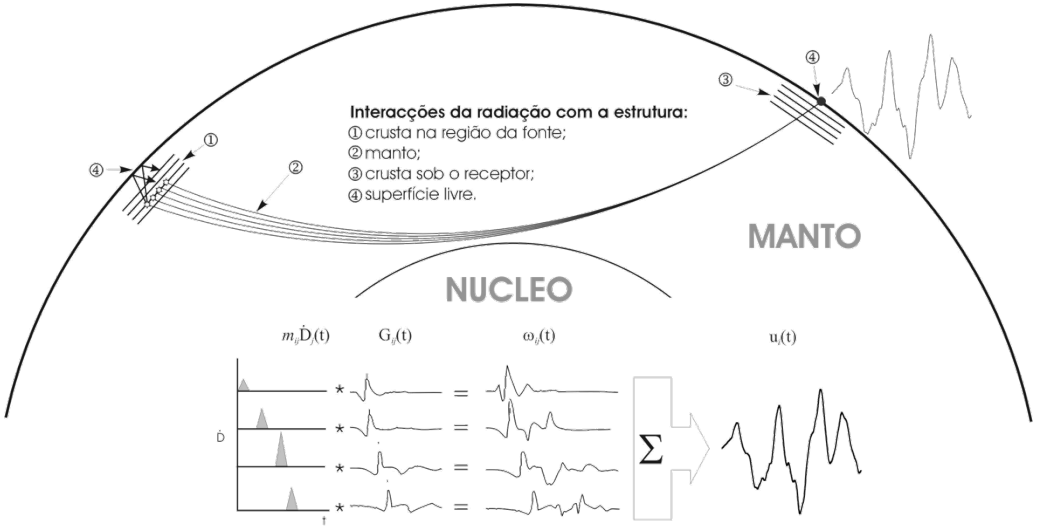
Das & Kostrov

A nossa proposta

EQUACIONAR O PROBLEMA

Problema directo

$$u_n(x,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \int_{\Sigma} D_i(\xi,\tau) C_{ijkl} \nu_j \frac{\partial}{\partial \xi_l} G_{kn}(x, t-\tau; \xi, 0) d\Sigma$$



O PROBLEMA DIRECTO

$$u_i^j(t) = \sum_{k=1}^{Nt} \sum_{l=1}^{NFt} \sum_{m=1}^{2} \left(S_{k,l}(t) * G_{i,j,k,l,m}(t) \right) x_{k,l,m}$$

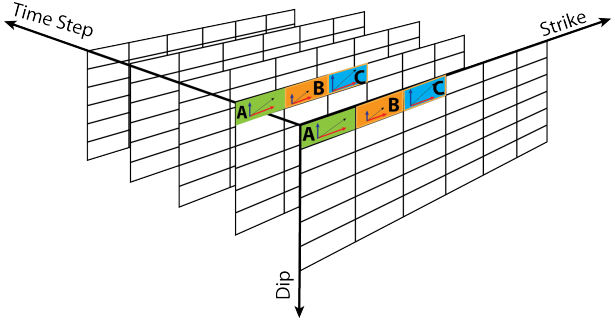
$i = x, y, z$ (direcção do movimento); j= ponto de observação;

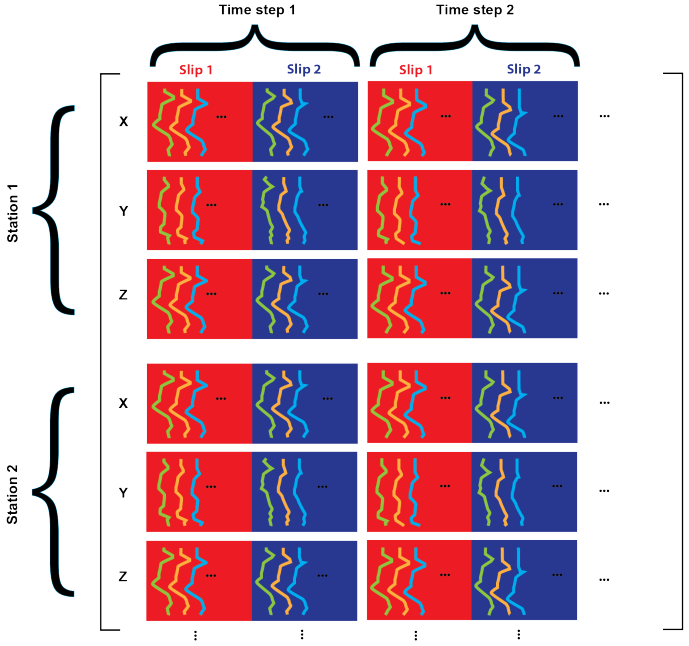
k = instantes de discretização temporal da ruptura

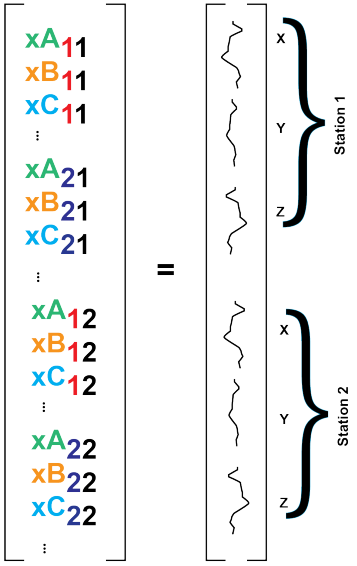
l=cada uma das fontes pontuais; m= cada uma das direcções do slip

$$\mathbf{u = Ax}$$

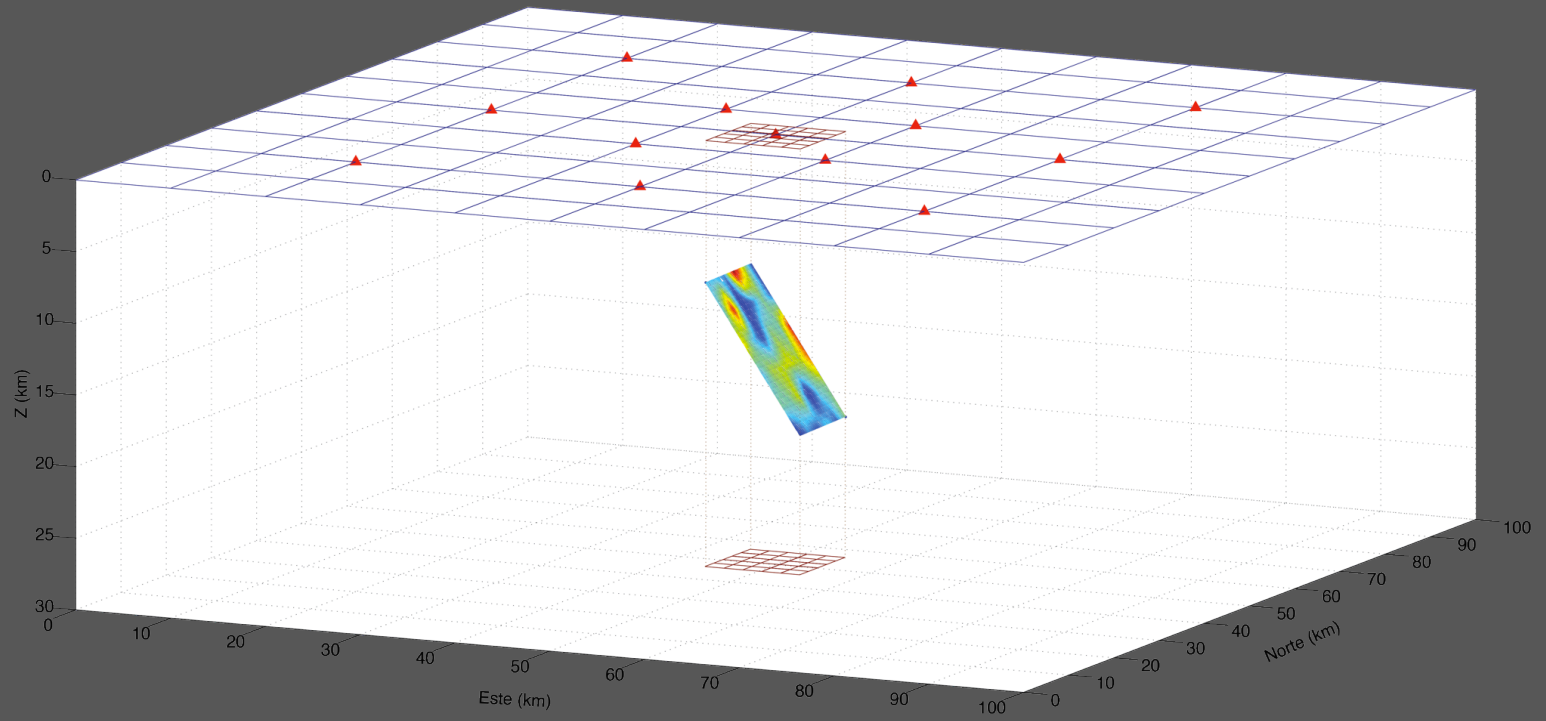
ESQUEMA FORMULAÇÃO MATRICIAL





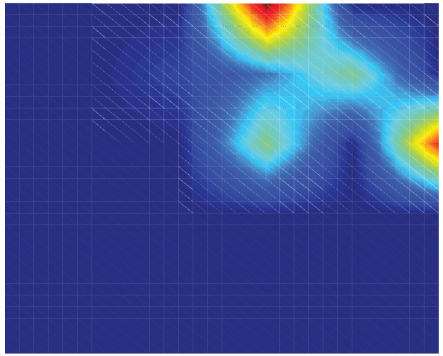


SITUAÇÃO ENSAIADA

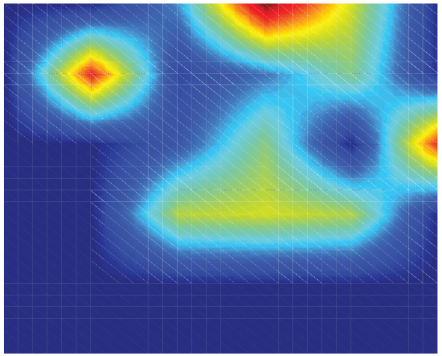


A FONTE USADA

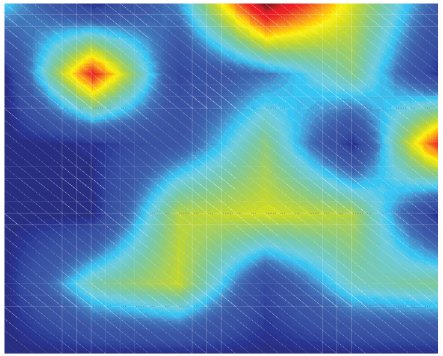
0–0.78s



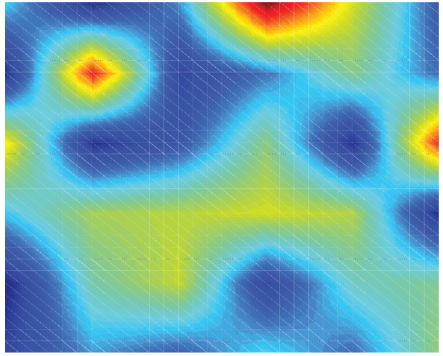
0.78–1.56s



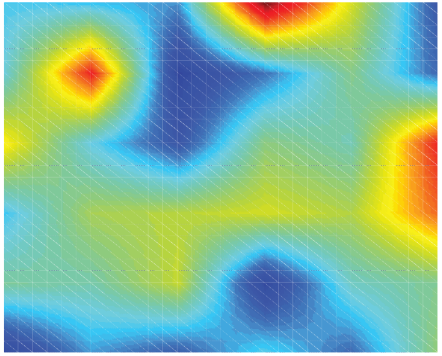
1.56–2.34s

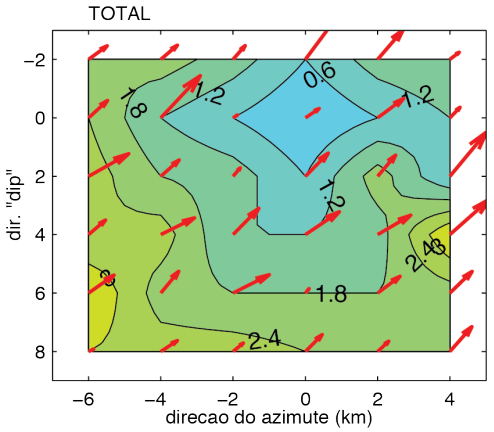


2.34–3.12s



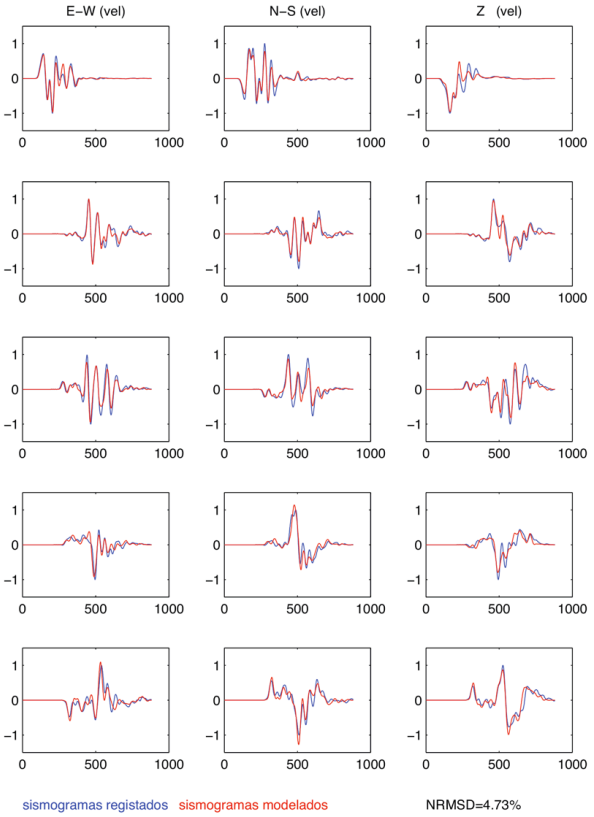
3.12–3.9s



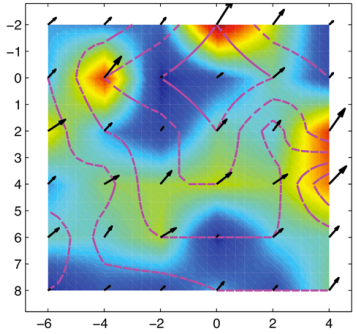


INVERSÃO LINEAR

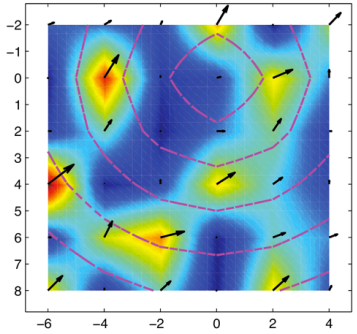
Método NNLS



Modelo de fonte usado

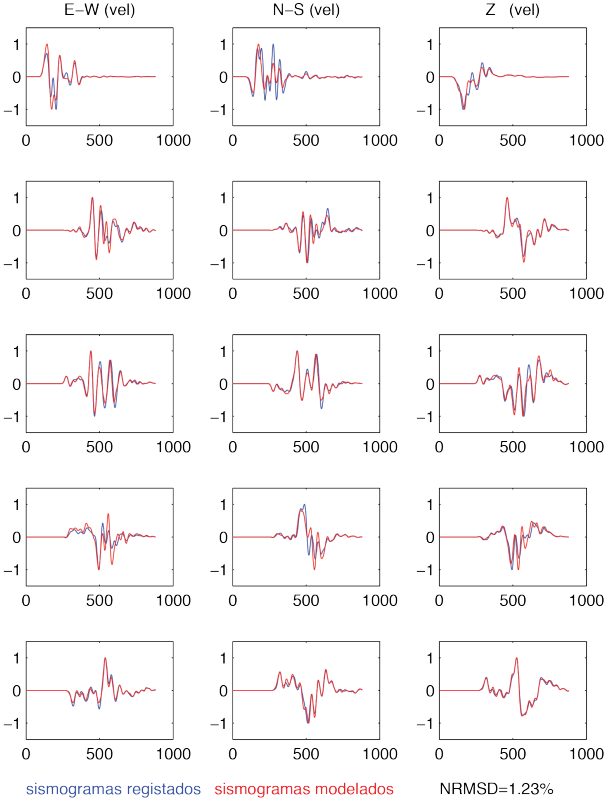


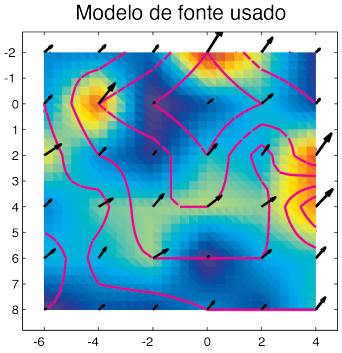
Modelo Invertido

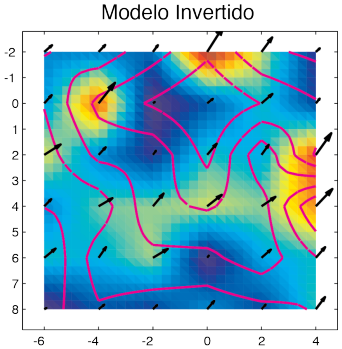


INVERSÃO NÃO LINEAR

Método simplex DUAL

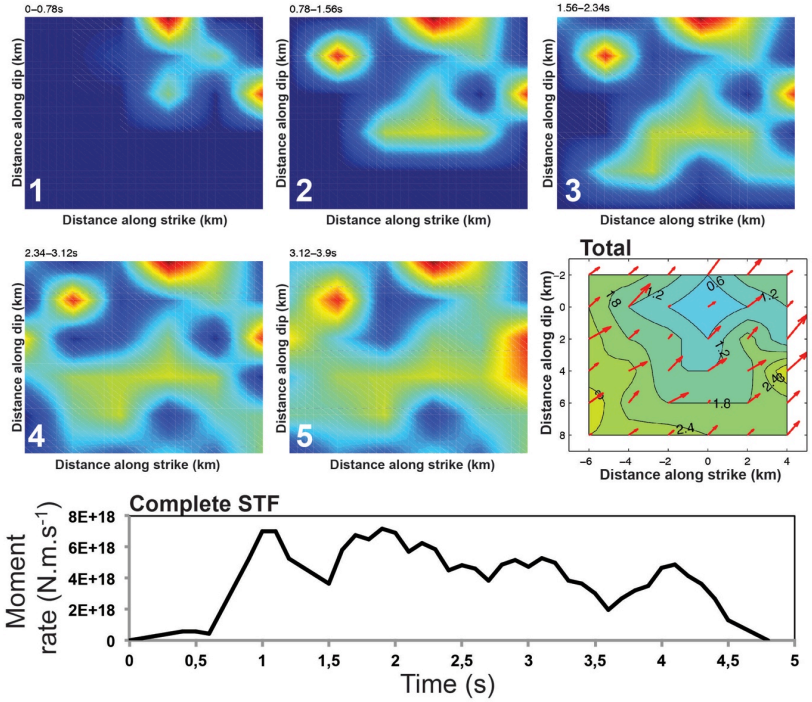




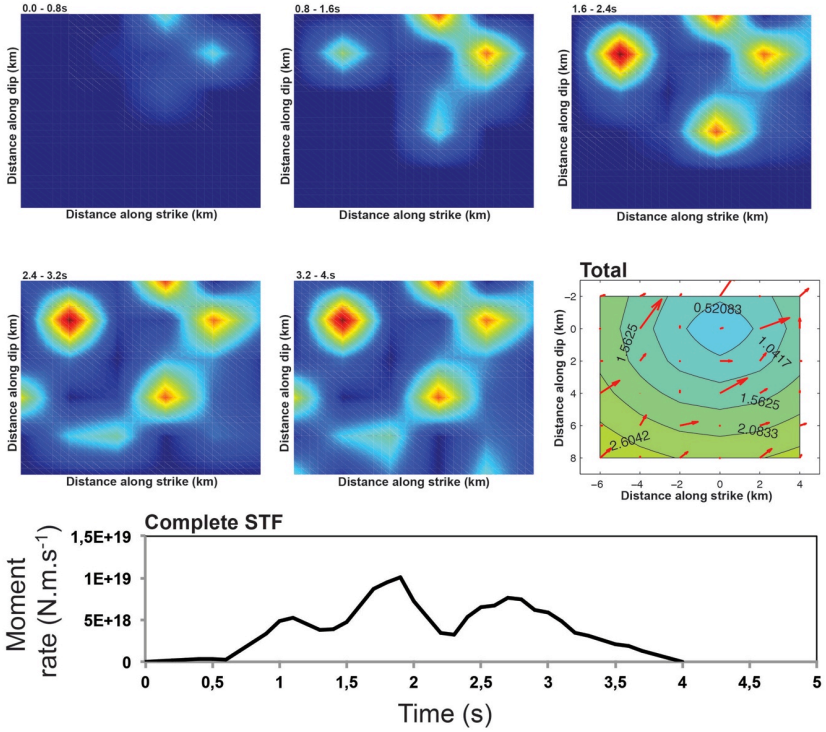


COMPARAÇÃO DE MODELOS

Modelo Original

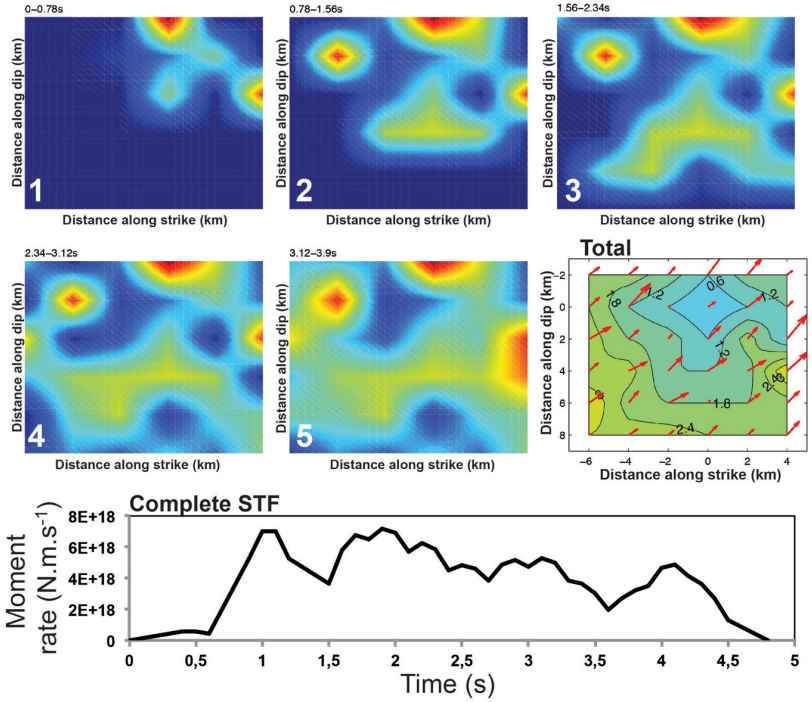


Modelo reconstruído por NNLS

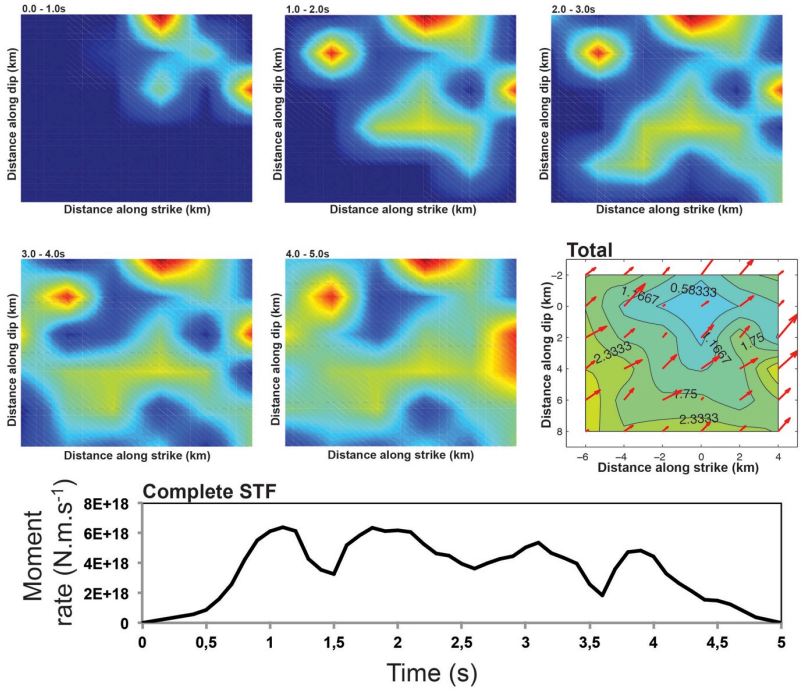


COMPARAÇÃO DE MODELOS

Modelo Original

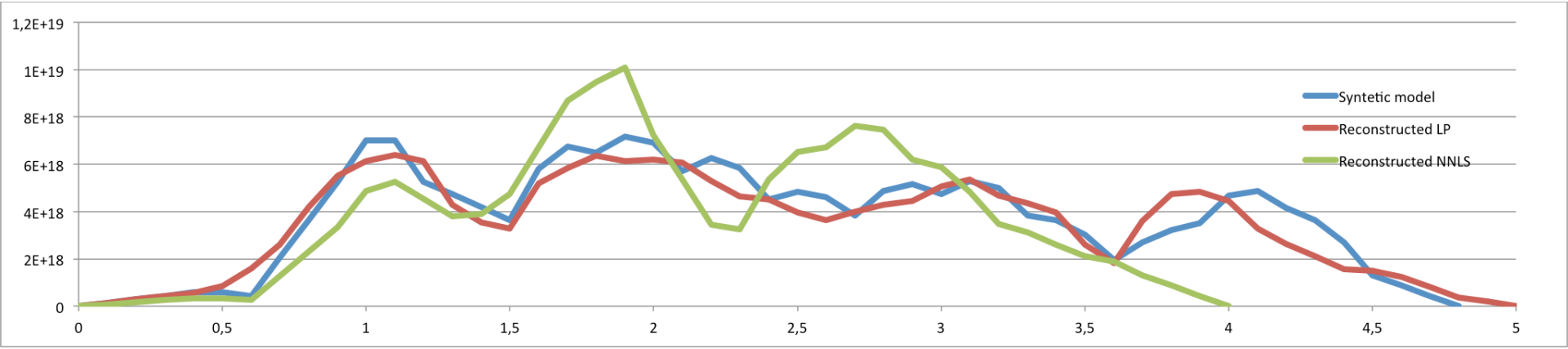


Modelo reconstruído por Simplex DUAL



LIBERTAÇÃO DE MOMENTO

Evolução Temporal



CONVERGÊNCIA

```
GM: min|aij| =  8.649e-03  max|aij| =  1.156e+02  ratio =  1.337e+04
EQ: min|aij| =  7.535e-05  max|aij| =  1.000e+00  ratio =  1.327e+04
File <sim.bas0> was opened
warm=200
Solve LP GLPK
      0: obj =  -2.221038237e+00  infeas =  5.895e+02 (601)
    200: obj =  -9.744952401e-01  infeas =  3.898e+02 (601)
    400: obj =   4.254704444e-01  infeas =  1.905e+02 (598)
    600: obj =   1.006824132e+00  infeas =  7.538e+01 (598)
    800: obj =   1.032684893e+00  infeas =  3.699e+01 (598)
   1000: obj =   9.785540606e-01  infeas =  2.065e+01 (598)
   1200: obj =   4.858525707e-01  infeas =  8.751e+00 (598)
   1400: obj =   1.501829178e-01  infeas =  2.341e+00 (598)
   1600: obj =   7.104297413e-02  infeas =  9.555e-01 (597)
   1800: obj =   4.783206606e-02  infeas =  5.178e-01 (597)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   1930: obj =   3.911139958e-02  infeas =  3.632e-01 (593)
   2000: obj =   3.499556980e-02  infeas =  2.993e-01 (592)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   2089: obj =   3.108938728e-02  infeas =  2.516e-01 (592)
   2200: obj =   2.440461554e-02  infeas =  1.770e-01 (592)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   2302: obj =   2.161768091e-02  infeas =  1.432e-01 (592)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   2356: obj =   2.086206987e-02  infeas =  1.347e-01 (592)
   2400: obj =   2.021174758e-02  infeas =  1.270e-01 (592)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   2459: obj =   1.921024343e-02  infeas =  1.124e-01 (591)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   2513: obj =   1.862906946e-02  infeas =  1.045e-01 (591)
   2600: obj =   1.748749576e-02  infeas =  8.813e-02 (591)
   2800: obj =   1.583738142e-02  infeas =  6.340e-02 (591)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   2828: obj =   1.574701523e-02  infeas =  6.130e-02 (591)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   2934: obj =   1.548820015e-02  infeas =  5.441e-02 (591)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   2987: obj =   1.545239211e-02  infeas =  5.133e-02 (591)
   3000: obj =   1.542953508e-02  infeas =  5.057e-02 (591)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   3097: obj =   1.516005630e-02  infeas =  4.709e-02 (591)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   3149: obj =   1.505567392e-02  infeas =  4.509e-02 (591)
   3200: obj =   1.499398369e-02  infeas =  4.329e-02 (591)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   3202: obj =   1.499364307e-02  infeas =  4.316e-02 (591)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   3255: obj =   1.504383731e-02  infeas =  4.164e-02 (591)
Warning: numerical instability (primal simplex, phase I)
   3306: obj =   1.501287275e-02  infeas =  3.967e-02 (591)
```

```
Scaling...
 A: min|aij| =  1.002e-04  max|aij| =  2.000e+00  ratio =  1.995e+04
GM: min|aij| =  8.649e-03  max|aij| =  1.156e+02  ratio =  1.337e+04
EQ: min|aij| =  7.535e-05  max|aij| =  1.000e+00  ratio =  1.327e+04
File <sim.bas0> was opened
warm=200
Solve LP GLPK
      0: obj =  -2.221038237e+00  infeas =  0.000e+00 (601)
    200: obj =  -4.593836872e-01  infeas =  0.000e+00 (601)
    400: obj =  -1.528233070e-01  infeas =  0.000e+00 (601)
    600: obj =   4.375323154e-03  infeas =  0.000e+00 (601)
    800: obj =   5.532693092e-03  infeas =  0.000e+00 (601)
   1000: obj =   6.200986927e-03  infeas =  0.000e+00 (601)
   1200: obj =   6.988566449e-03  infeas =  0.000e+00 (601)
   1400: obj =   7.827702633e-03  infeas =  0.000e+00 (601)
   1600: obj =   8.469953970e-03  infeas =  0.000e+00 (601)
   1800: obj =   9.056194727e-03  infeas =  0.000e+00 (601)
   2000: obj =   9.674608510e-03  infeas =  0.000e+00 (601)
   2200: obj =   1.011616179e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   2400: obj =   1.060276388e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   2600: obj =   1.106101046e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   2800: obj =   1.142821705e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   3000: obj =   1.168359770e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   3200: obj =   1.190522018e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   3400: obj =   1.212700063e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   3600: obj =   1.229663165e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   3800: obj =   1.247734580e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   4000: obj =   1.260350193e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   4200: obj =   1.272382903e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   4400: obj =   1.284613848e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   4600: obj =   1.296611310e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   4800: obj =   1.310340062e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   5000: obj =   1.319317949e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   5200: obj =   1.326151210e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   5400: obj =   1.333301654e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   5600: obj =   1.339482242e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   5800: obj =   1.345653955e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   6000: obj =   1.350948829e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   6200: obj =   1.354633170e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
   6400: obj =   1.358221710e-02  infeas =  0.000e+00 (601)
```

TRABALHOS

Publicações:

-F. Medina, I. Bensaid, T. Cherkaoui, B. Caldeira, E. Buforn, A. Emran, Y. Hahou, The 1992 Tafilalt seismic crisis (Anti-Atlas, Morocco), Journal of Seismology, (Submitted)

-Bezeghoud M., Borges J. F., Caldeira B., Ground Motion Simulations of the SW Iberia Margin: Rupture Directivity and Earth Structure Effects. 31p, Natural Hazards (Submitted)

-E. Zadonina, 2010, Strong-Ground Motion Simulations and Assessment of Influence of model parameters on waveforms, Master thesis, 140p

-Bezeghoud M., Borges J. F., Caldeira B., 2010, Seismicity and Ground Motion Simulations of the SW Iberia Margin, 291-310, in Silva A. M., Reis A. H., Fitas A., Figueiredo J., Caldeira B. Bezzeghoud M., Jornadas de Física por ocasião da jubilação do Professor Rui Namorado Rosa, University of Évora, ISBN: 978-989-95091-2-2, 360p

-Caldeira B., Bezzeghoud M, Borges JF, 2010; DIRDOP: a directivity approach to determining the seismic rupture velocity vector. J Seismology, 14:565–600, DOI 10.1007/s10950-009-9183-x

-Vânia Lopes Lourenço, 2009, Utilização do Radar de Penetração nos Solos (GPR) na detecção de estruturas no âmbito nas Ciências Forenses, Relatório de Projecto de fim de curso da Licenciatura em Física, de bolsa BII no âmbito deste projecto.

TRABALHOS

Teses de Doutoramento em curso:

Rúben Santos

Modelação de processos internos activos através de dados de observação geodésica de deformação da superfícial;

Ekaterina Zadonina

Prediction of seismic ground motions in broadband frequencies for highly populated areas of the Western part of Ibero-Maghrebian zone.

CONCLUSÕES

Método que actua no espaço completo de soluções;

A facilidade de convergência e o tempo de cálculo são vantagens relativamente ao simplex primal usado por outros autores;

Permite introduzir com facilidade qualquer outros constrangimentos;

Os resultados obtidos com a situação sintética mostra a capacidade para reconstiruir o modelo usado.

PROXIMOS DESENVOLVIMENTOS

Aplicar a situações reais;

Prepar o codigo de forma a poder ser usado a partir de dados dados geodésicos;

Paralelizar o código de forma a poder ser utilizado no cluster;

Estudar a possibilidade de compactar definição da matriz de inversão (matriz A)

Agradecimentos:

Projecto SISMOD/LISMOT - FCT, PTDC/CTE-GIN/82704/2006;
CGE/SEISMOLITOS.