

# Sismicidad inducida en sistemas geotérmicos estimulados: modelización numérica de la influencia del modelo de fricción

61ª Sesión científica de la Sociedad Geológica de España. Zaragoza, Spain. November 2016.  
(Oral presentation).

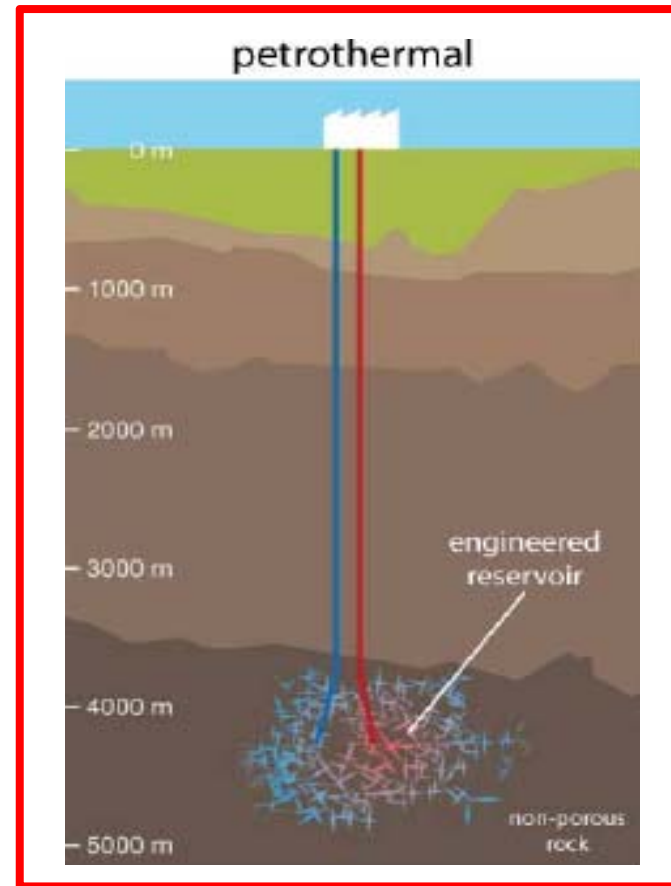
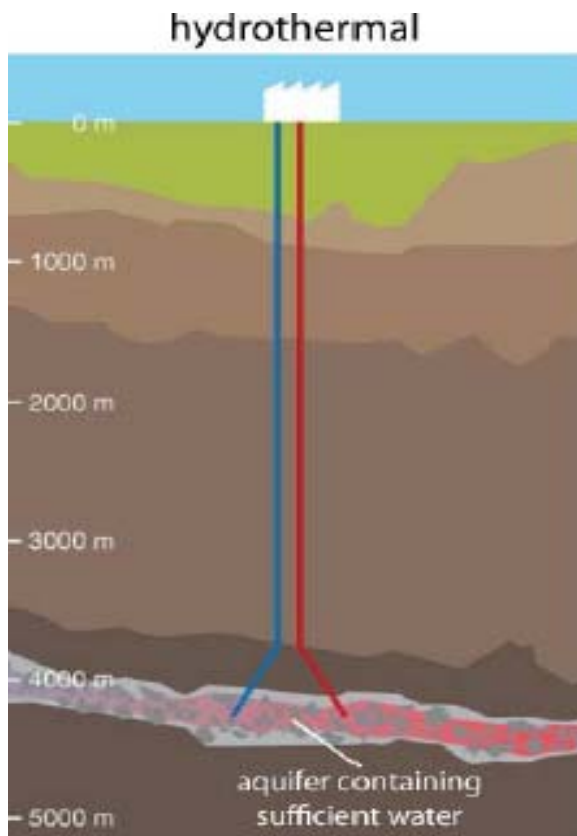
**G. Piris<sup>1</sup>, A. Griera<sup>2</sup>, E. Gomez-Rivas<sup>3</sup> I. Herms<sup>1</sup> y X. Goula<sup>1</sup>**

- 1) Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)
- 2) Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona
- 3) School of Geosciences, King's College, University of Aberdeen (UK)



# Introducción

**Reservorios geotermales alta profundidad: hidrotermales y petrotermales (o EGS).**



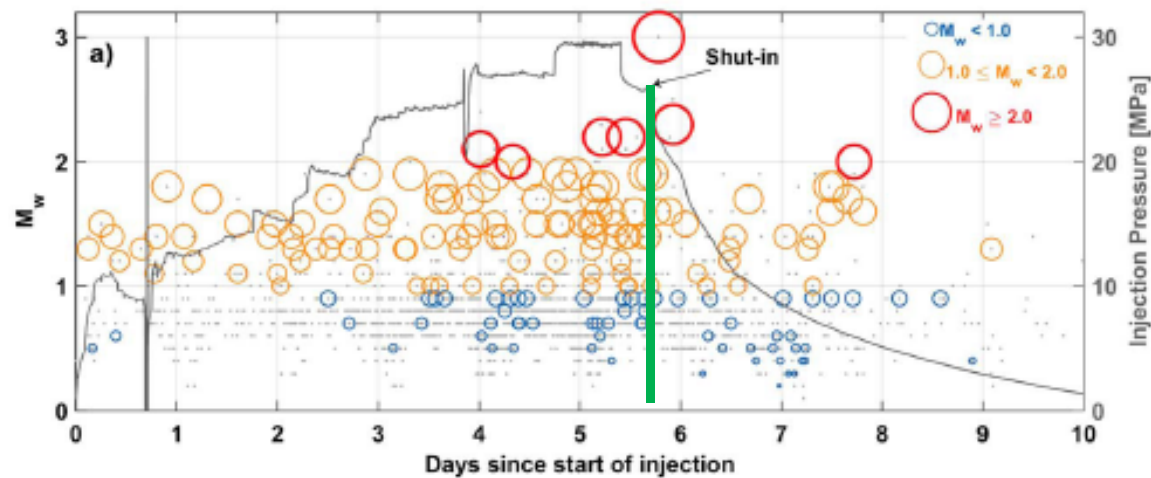
# Introducción

Problema: estimulación hidráulica produce una sismicidad inducida. En general baja magnitud, pero..

Location	Mmax	References
<b>Basel, Switzerland</b>	<b>3.4</b>	<b>Häring et al. (2008), Bachmann et al. (2012)</b>
Soultz, France (GPK3)	2.9	Baisch et al. (2010), Dorbath et al. (2009)
Cooper Basin, Australia	2.9	Baisch et al. (2009), Baisch, pers. comm.
Paralana, Australia	2.5	Albaric et al. (2014)
Newberry Volcano, Oregon	2.3	Petty et al. (2013), Cladouhos et al. (2013), Templeton et al. (2014)

# Introducción

Problemática de Basilea (12/2006)  
Mw 3.4



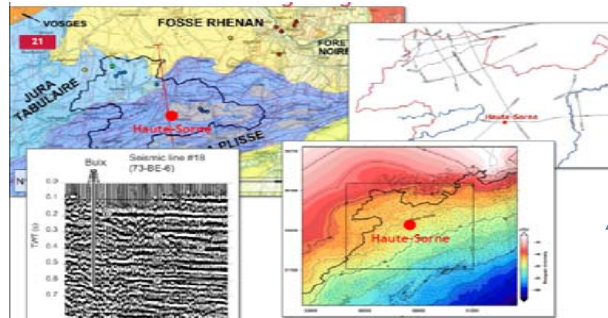
.. estudio grupo SERIANEX (SEismic Risk ANalysis  
EXpert) sobre viabilidad



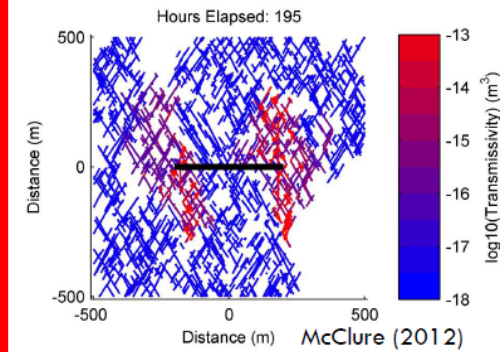
# Introducción

Estudio Multidisciplinar ..

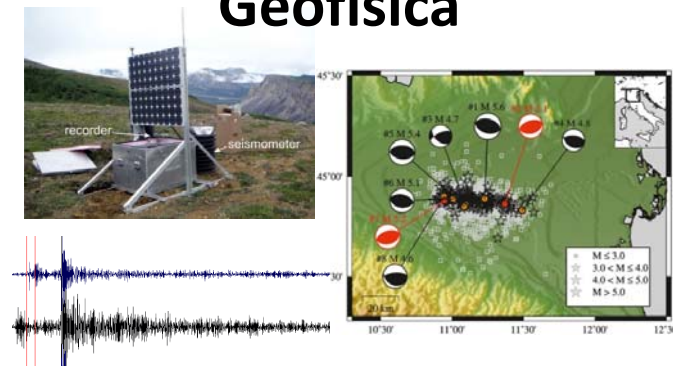
## Geología Reservorios



## Geomecánica



## Geofísica



**Análisis de  
peligrosidad  
+ impacto  
social**



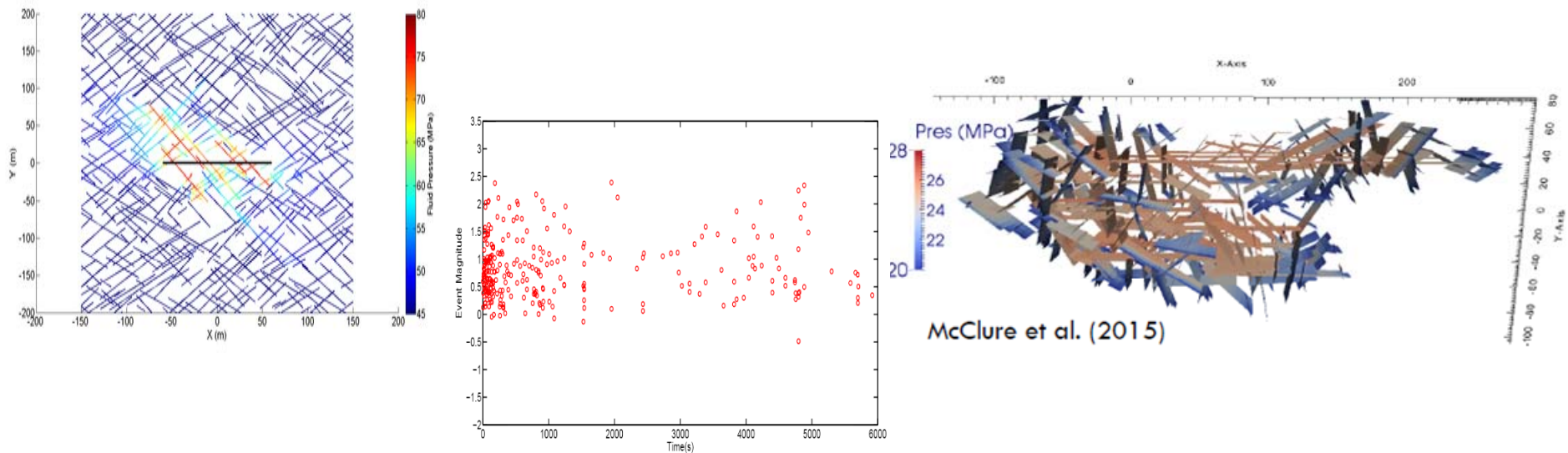
BCOGC  
>M 4  
M 2-4  
<M 2



# Metodología

Modelos numéricos a partir del código de elementos discontinuos CFRAC (**Complex Fracturing ReseArch Code** V.1.3.) . Desarrollado por Mark W. McClure y Prof. Roland Horne (Universidad de Stanford, USA).

El problema termo-hidro-mecánico asociado a la inyección fluido en un medio fracturado es resuelto de forma acoplada . Incluido rutinas para calcular la sismicidad inducida.



# Metodología: Ecuaciones Constitutivas

## 1. Balance de Masa

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} = \nabla \cdot (q_{flux} e) + s_a, \quad q_{flux,i} = \frac{k\rho}{\mu_l} \frac{\partial P}{\partial x_i},$$

## 2. Criterio fractura Coulomb con un termino de amortiguación de radiación $\eta v$ (Rice 1993; Segall 2010)

$$|\tau - \eta v| = \mu_f \sigma'_n + S_0,$$

## 3. Transmisividad fractura ( $T$ ) y apertura/cierre fracturas ( $e$ )

$$T = \frac{e^3}{12}$$

Witherspoon et al. (1980)

$$e = \frac{e_0}{1 + \frac{9(\sigma_n - P)}{\sigma_n}} + D * \tan\left(\frac{\phi_{dil}}{1 + \frac{9(\sigma_n - P)}{\sigma_n}}\right)$$

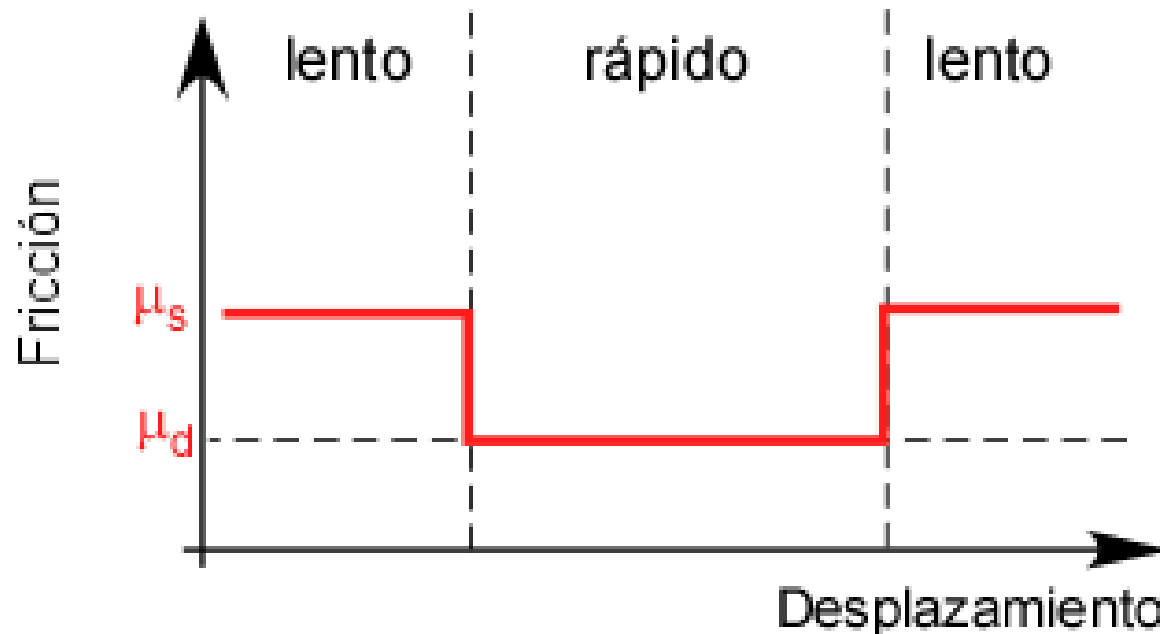
Willis-Richards et al. (1996)

## 4. Modelo friccional

# Metodología: Modelo Friccional

## A) Velocity Weakening V-W (e.g. Scholz, 2002)

Si elemento fractura excede criterio rotura, coeficiente de fricción es reducido de forma instantánea al coeficiente dinámico ( $\mu_d$ ). Recupera cuando  $v < v_{crit}$

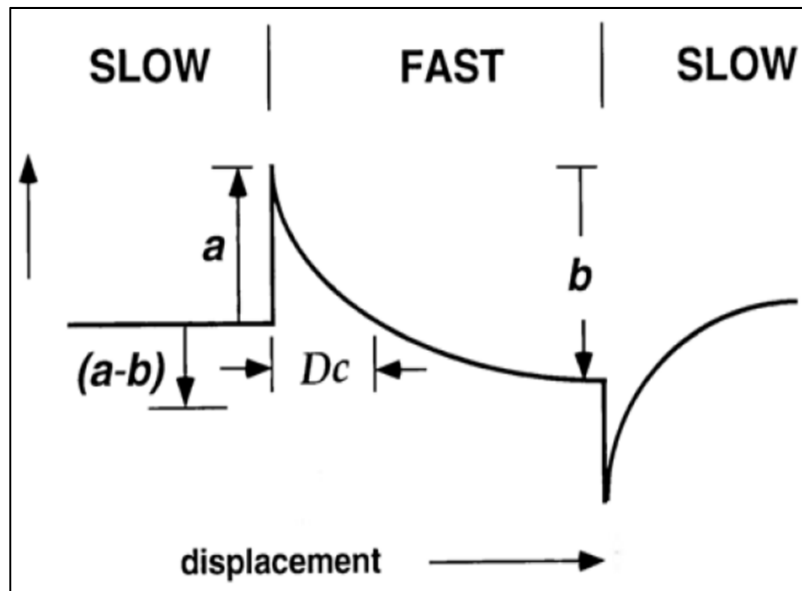




# Metodología: Modelo Friccional

## B) Rate and State R-S (e.g. Scholz, 2002)

$$\mu_f(v, \theta) = f_0 + a \cdot \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) + b \cdot \ln\left(\frac{\theta v_0}{d_c}\right)$$



Scholz (2002)

- $a$  = Velocity effect coefficient
- $b$  = State effect coefficient
- $f_0$  = Nominal friction coefficient
- $v$  = Sliding Velocity**
- $v_0$  = Reference velocity
- $d_c$  = Characteristic displacement scale
- $\theta$  = State**

# Metodología: Criterio Microsismicidad

Un evento microsísmico empieza cuando la velocidad de deslizamiento excede el **valor crítico de 5 mm/s**, y que finaliza cuando la **máxima velocidad** de deslizamiento en la fractura se **encuentra por debajo de 2.5 mm/s** (McClure y Horne, 2011). Los hipocentros se localizan en el elemento que primero excede la velocidad crítica.

Momento sísmico ( $M_0$ ,  $N \cdot m$ )

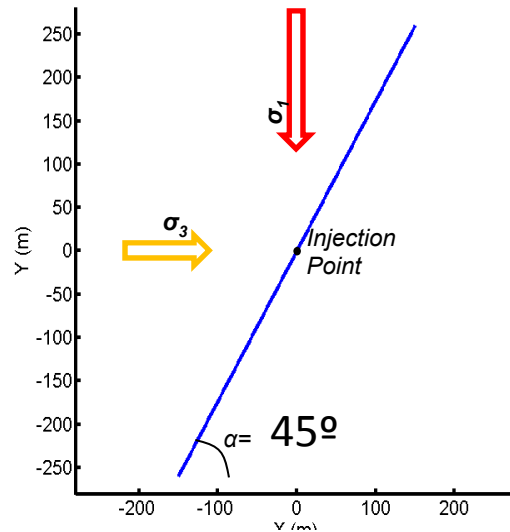
$$M_0 = G \int D \cdot dA$$

y la magnitud momento ( $M_w$ ) se ha definido a partir de Hanks and Kanamori (1979) como:

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 6.06$$

Mc Clure (2012)

# Geometría y Parámetros



600 m longitud

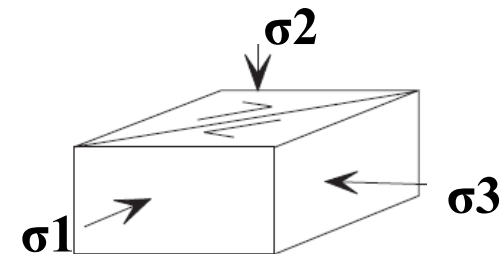
$\sigma_1 = 185 \text{ Mpa}$

$\sigma_2 = 112.5 \text{ Mpa}$  (Overburden Materials)

$\sigma_3 = 76 \text{ Mpa}$

$P_o = 45 \text{ Mpa}$  (Hydrostatic Gradient)

- Fractura vertical y aislada de longitud 600m. Orientada  $45^\circ$  respecto  $\sigma_1$
- Campo de esfuerzo (strike-slip), parametros friccionales y propiedades de la fractura a partir de los datos mecánicos del reservorio de Basilea (a partir de Gischig, 2015)



# Geometría y Parámetros

Comunes

$E_0$	Apertura mecánica	1200 $\mu\text{m}$
$\sigma_{Enref}$	Tensión normal de referencia	25 MPa
$E_{res}$	Apertura mecánica residual	2 $\mu\text{m}$
$\phi_{Edil}$	Ángulo de dilatación (apertura mecánica)	0°
$e_0$	Apertura hidráulica	120 $\mu\text{m}$
$\sigma_{Enref}$	Tensión normal de referencia	25 MPa
$e_{res}$	Apertura hidráulica residual	0.2 $\mu\text{m}$
$\phi_{edil}$	Ángulo de dilatación (apertura hidráulica)	2.5°
$\rho$	Densidad del fluido	1000 kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	Viscosidad del fluido	0.001 Pa s
$h$	Anchura de la fractura	100 m
$\eta$	Coefficiente de amortiguación	3 MPa/(m/s)
$S_0$	Cohesión	0 MPa
$G$	Módulo de cizalla	15 GPa
$\nu$	Coefficiente de Poisson	0.25

Rate-and-state (R-S)

$f_0$	Coefficiente de fricción nominal	0.85
$d_c$	Distancia crítica	100 $\mu\text{m}$
$a$	Parámetro del rate-and-state	0.01
$b$	Parámetro del rate-and-state	0.02
$v_0$	Velocidad de referencia	10 <sup>-6</sup> m/s
$\theta$	Estado	2.6 · 10 <sup>6</sup> s

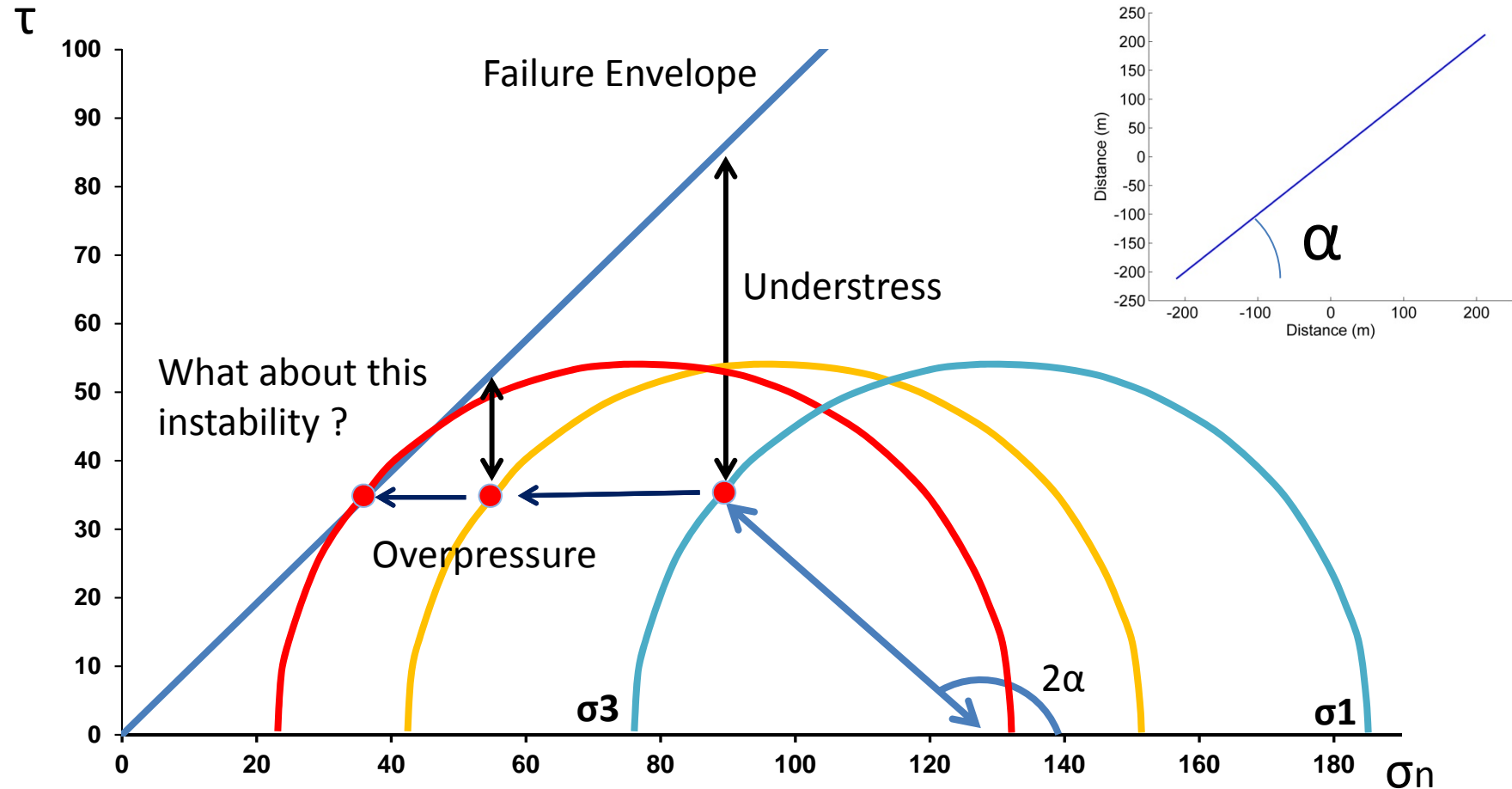
Velocity weakening (V-W)

$\mu_s$	Coefficiente de fricción estático	0.85
$\mu_d$	Coefficiente de fricción dinámico	0.7

Dos modelos:

- (1) Rate-and-state (R-S)
- (2) velocity weakening

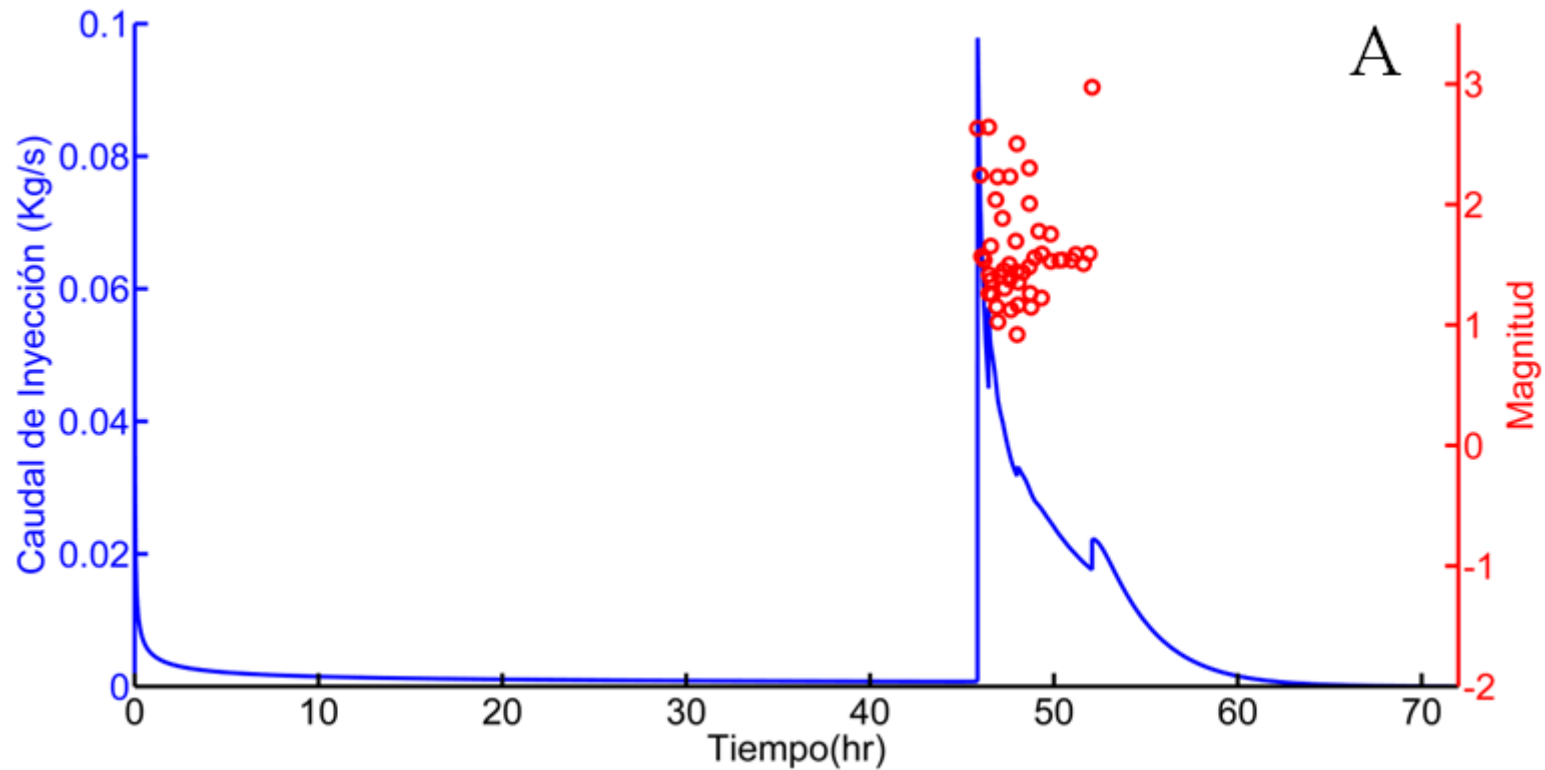
# Conceptualmente...





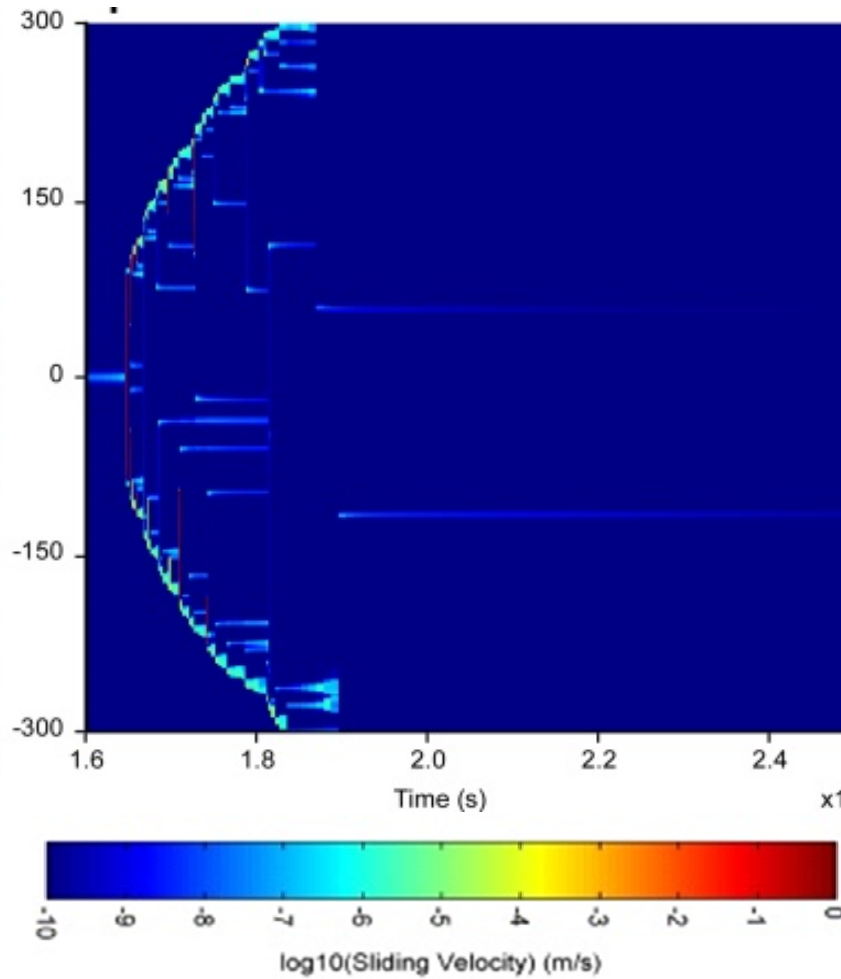
# Resultados modelo R-S

Evolución caudal inyección y **frecuencia-magnitud** microsismicidad

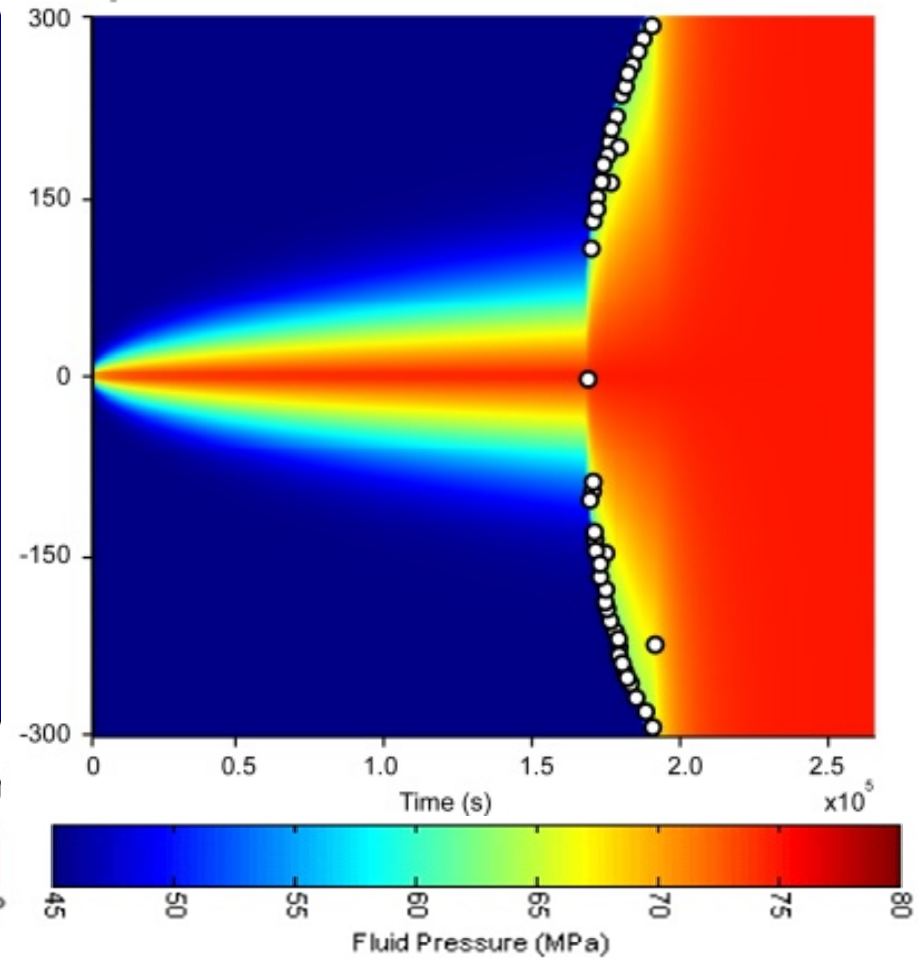


# Resultados modelo R-S

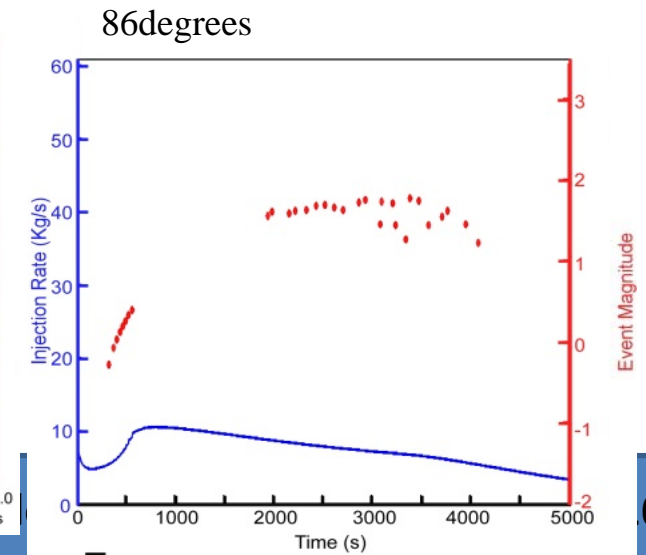
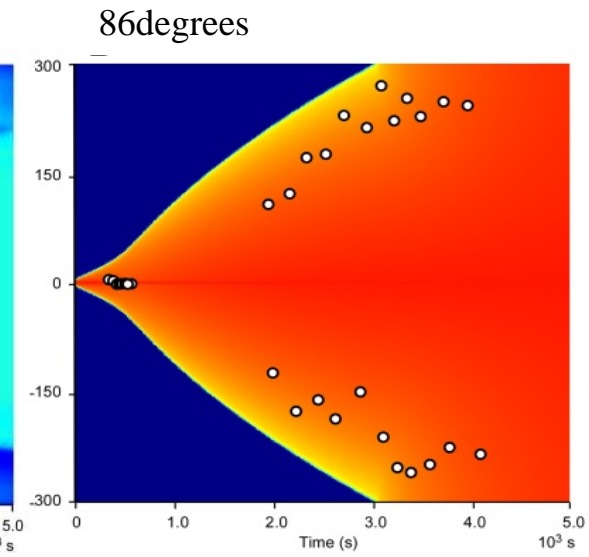
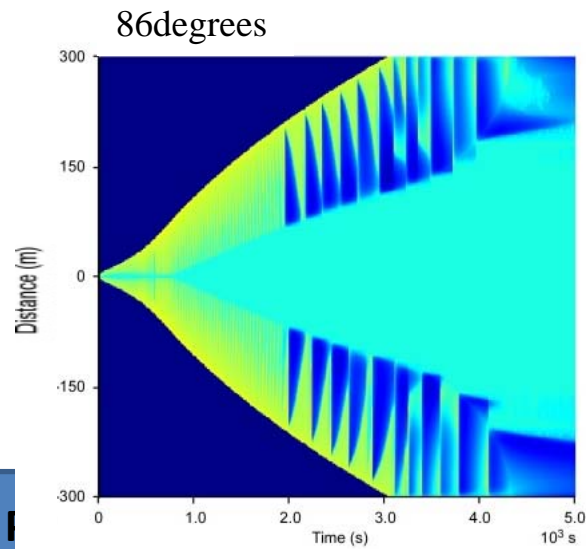
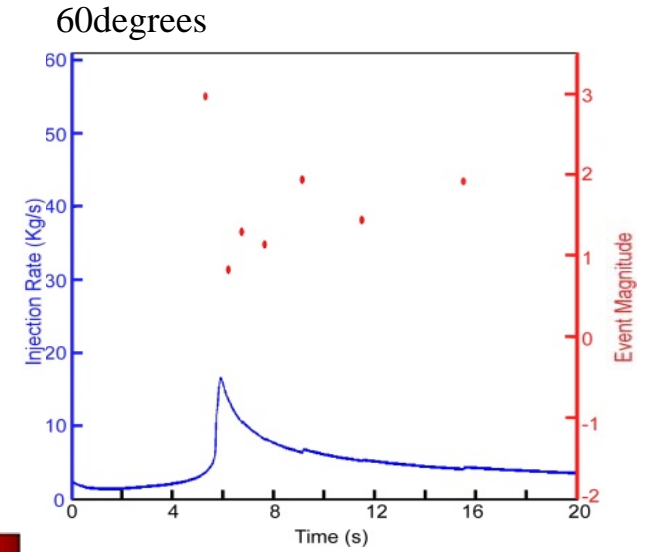
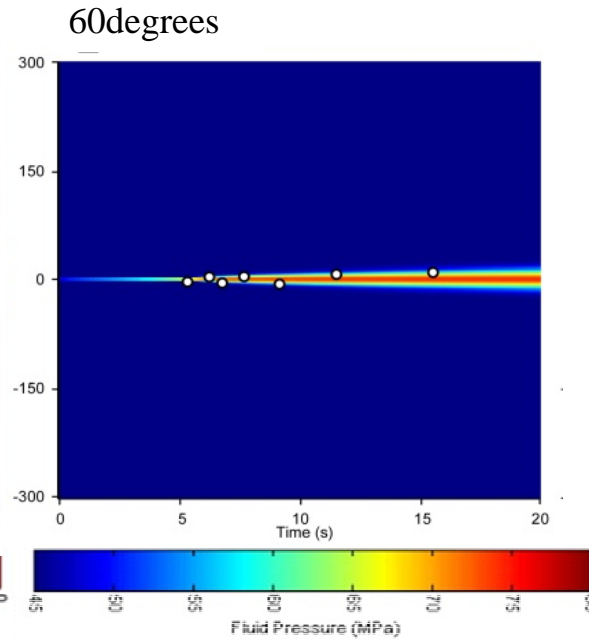
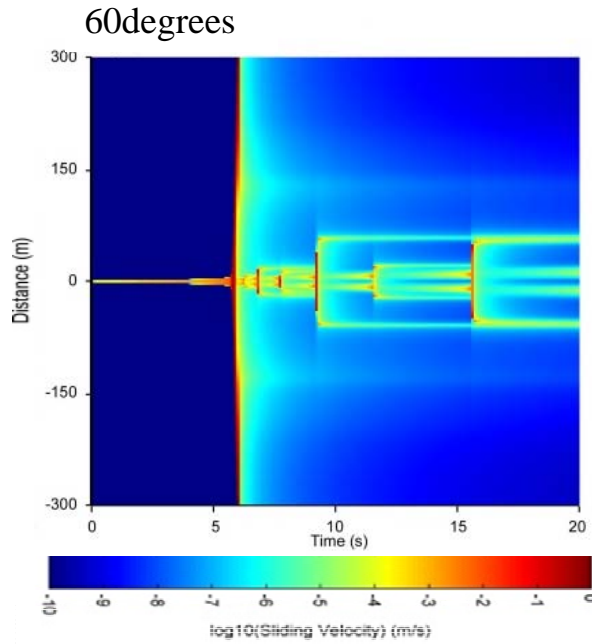
Velocidad deslizamiento



Presión fluido

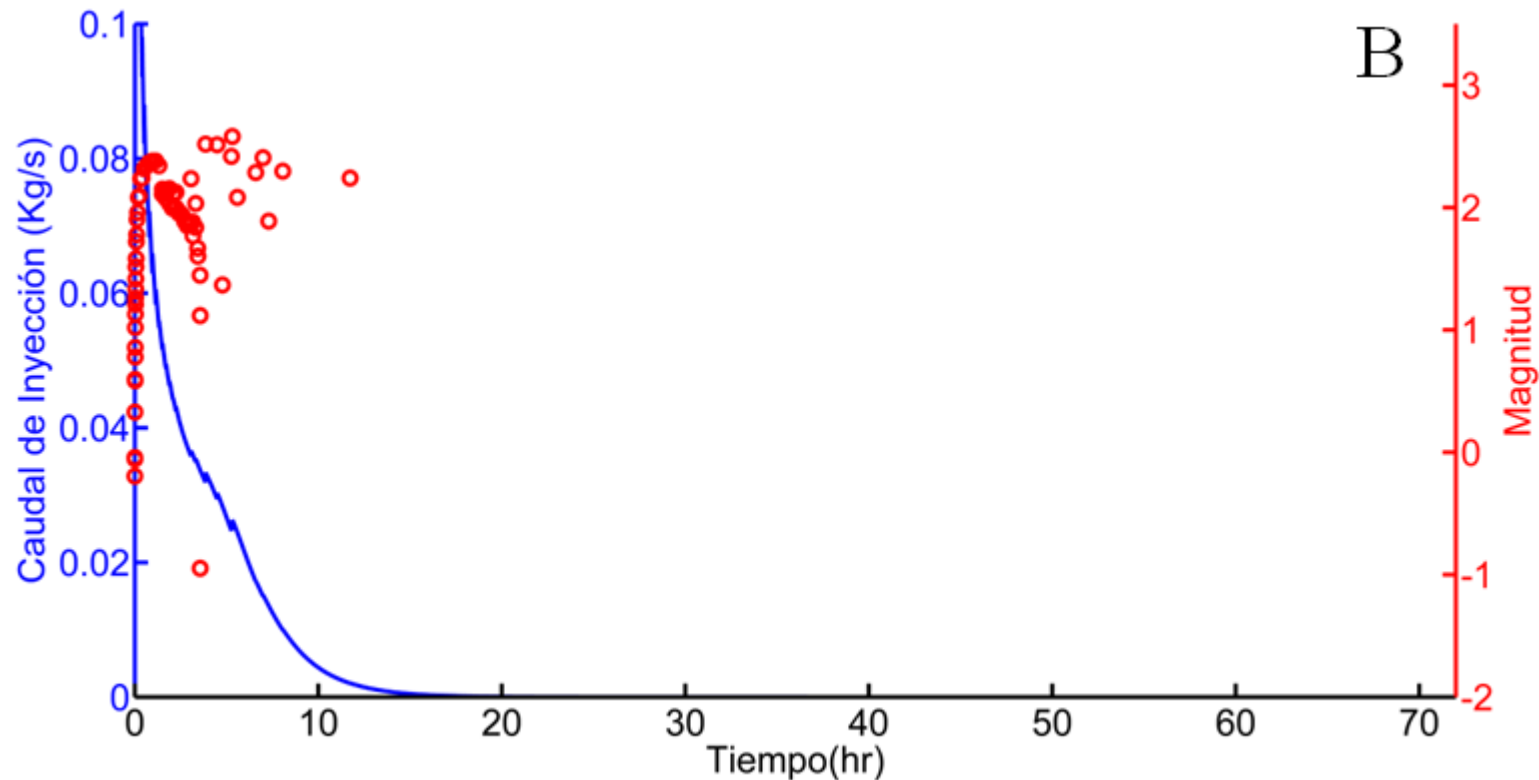


# Resultados modelo R-S



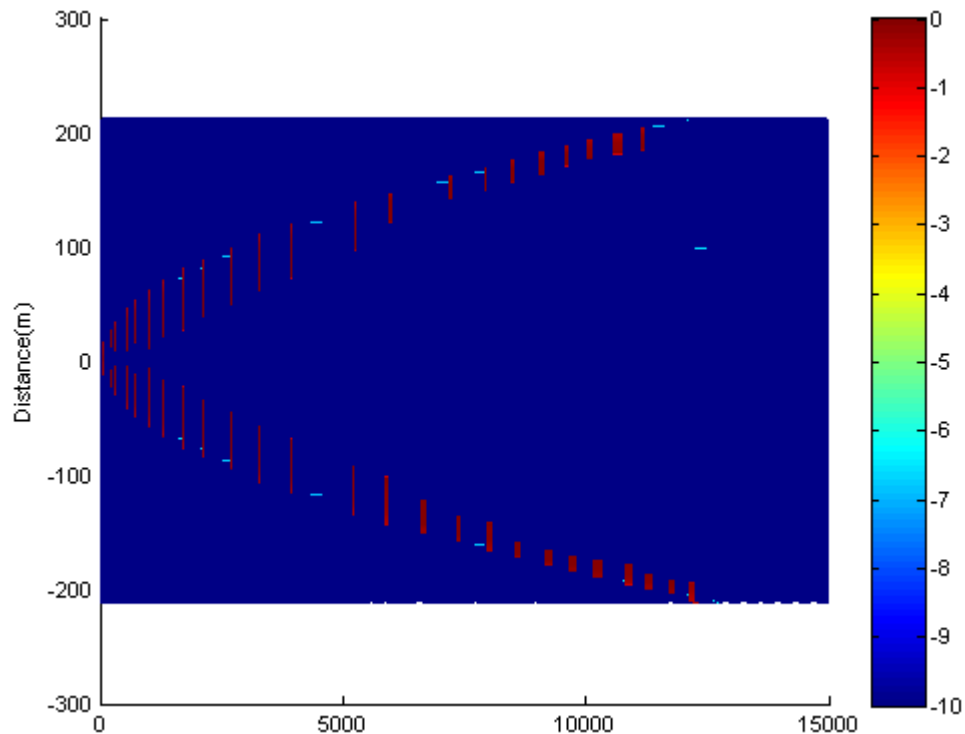
# Resultados modelo V-W

Evolución caudal inyección y **frecuencia-magnitud** microsismicidad

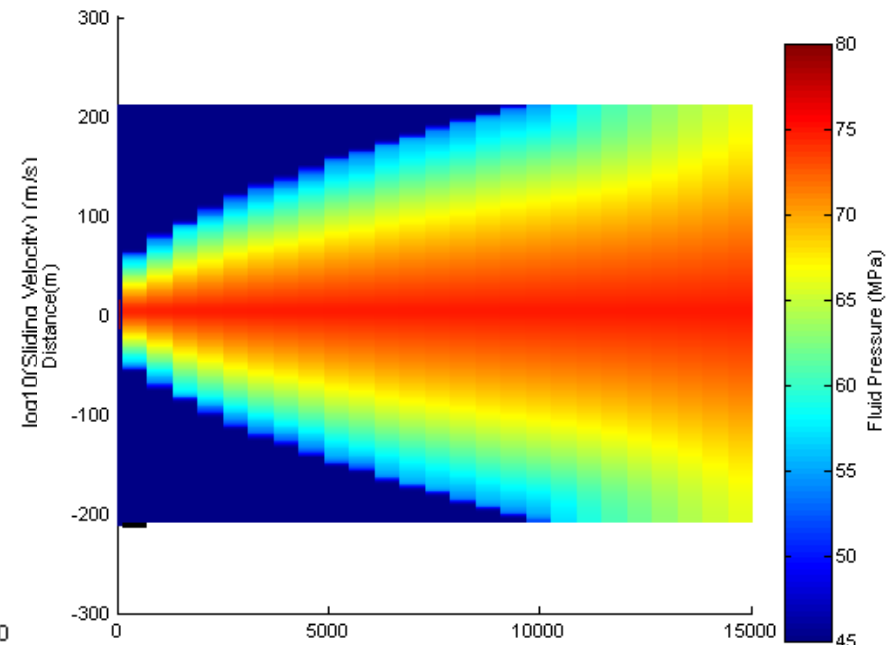


# Resultados modelo V-W

Velocidad deslizamiento



Presión fluido





# Resultados: R-S vs V-W

Parámetro	Modelo R-S	Modelo V-W
$V_{max}$ (m/s)	6.72	4.15
$M_{max}$	2.97	2.58
Nº Eventos	48	71
$M_0$ Total (N·m)	$8.8 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^8$

TABLA II. Resumen de resultados característicos.  $V_{max}$  es la velocidad máxima de deslizamiento,  $M_{max}$  es la magnitud máxima y  $M_0$  Total es el momento sísmico acumulado.

# Sumario

- 1) En general ambos modelos friccionales generan respuestas parecidas, aunque la escala temporal en el que se producen los deslizamientos y la cantidad de eventos son diferentes en ambos modelos.
- 2) Los modelos V-W, la generación de microsismicidad se produce en los estadios iniciales, ya que el debilitamiento instantáneo del modelo facilita la propagación de la fractura y el aumento total del deslizamiento. Ambos factores favorecen una mayor producción de eventos sísmicos que en el observado en el método R-S.
- 3) Método R-S tiene un coeficiente de endurecimiento con el incremento de la velocidad (*i.e.*, término  $a$  de la ecuación 5), un parámetro que tiene en cuenta el tiempo que la fractura lleva inactiva ( $\vartheta$ ) y que la disminución del coeficiente de fricción se produce de forma gradual.
- 4) **Se recomienda el método R-S respecto al V-W**