

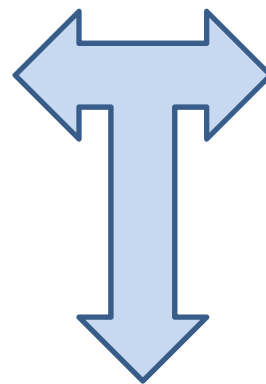
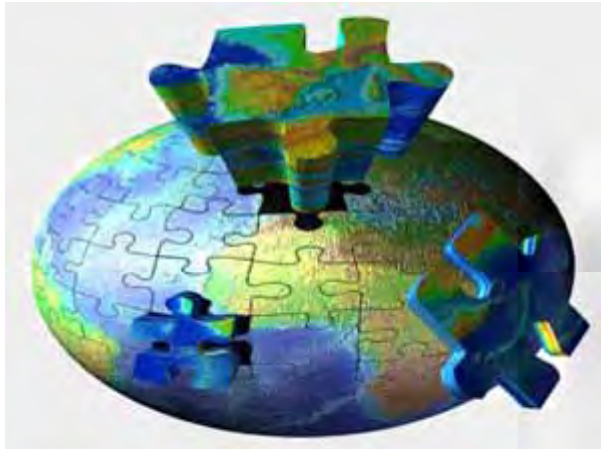
Les tècniques  
DInSAR en el camp  
de la geologia

Jordi Marturià



## Les tècniques DInSAR en el camp de la geologia

La geologia és la ciència que té per objecte l'estudi de la composició, l'estructura, la morfologia i l'edat de la Terra, particularment de les seves parts accessibles o pròximament accessibles a l'observació, i que elabora les hipòtesis que permeten de reconstruir-ne la història i l'evolució (IEC).



La interferometria SAR es una tècnica de teledetecció emprada per a la monitorització de deformacions del terreny.  
(DEM)

**MOVIMENTS DEL TERRENY**



**RISCOS GEOLÒGICS**



# Moviments del terreny

Ground motions can be anthropogenically induced or occur naturally as is seen in the tables below.

Event	Cause of motion	Motion magnitude
Removal of the ground or sub-surface (mining)	Subsidence and collapse of old workings, entrances (shafts and adits), fault reactivation	Millimetres to 10s metres
Waste disposal	Differential or excessive settlement of fill	Millimetres to metres
Changing the ground-engineering	Differential or excessive settlement of foundations, surface excavation, settlement above underground excavations, e.g. tunnels	Millimetres to centimetres

Anthropogenic causes of ground motion hazards

The table below shows the main natural geohazards experienced in Europe.

Hazard	Motion magnitude
Swelling and shrinking soils	Millimetres to centimetres
Mass movements (slides, flows, falls, topples and cambers)	Centimetres to 100s metres
Dissolution	Centimetres to 10s metres
Compressible and collapsible soils	Millimetres to centimetres
Running conditions	Millimetres to metres
Earthquakes	Centimetres to 100s metres

Natural geohazards that cause ground motions

Font [http://www.terrafirma.eu.com/about\\_ground\\_motion.htm](http://www.terrafirma.eu.com/about_ground_motion.htm)

# Moviments del terreny

## Construcció d'infraestructures subterrànies

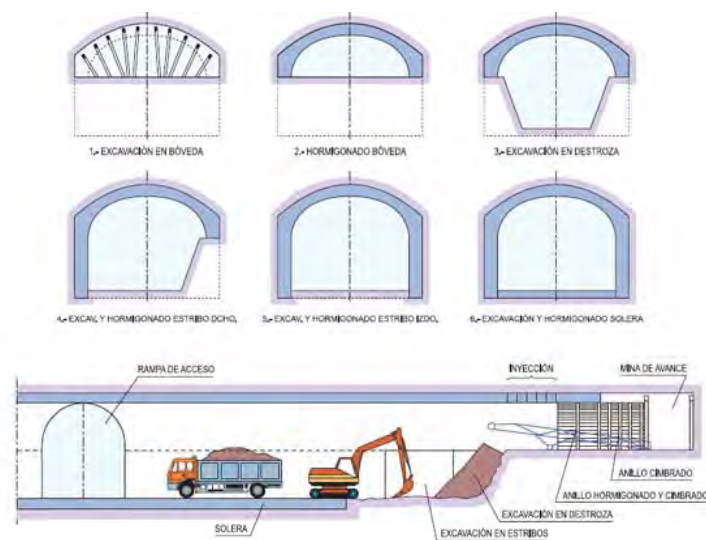
Extracció de fluids o sòlids

Injecció de fluids

Rebliments ...



## Origen antròpic





# Moviments del terreny

## Origen antròpic

Const  
Extrac  
Injecc  
Reblin

**Illustrated Effects of Mine Subsidence**

Environment of Pennsylvania  
Department of Environmental Protection  
Mine Subsidence Resource Fund  
[www.paMSI.org](http://www.paMSI.org)

**Mine Drainage**  
Mine drainage occurs when old underground mine workings gradually fill up with water, and the water breaks out onto the ground surface in small seeps near a coal outcropping or in near a shaft. Sometimes heavy rains or working mines can raise the water level in a roadway trigger a more water breakout.

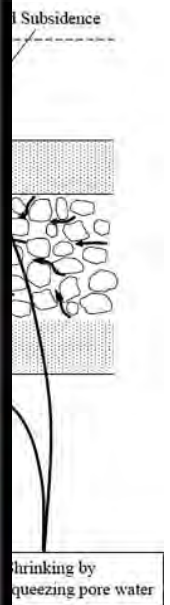
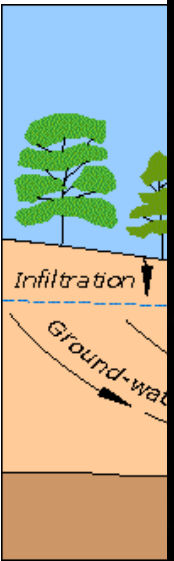
If such a breakout occurs suddenly and unexpectedly near a building, substantial damage can occur. Although this is not considered mine subsidence, under certain circumstances, building damage from such a mine water breakout would be covered by Mine Subsidence Insurance.

**Sinkhole Subsidence**  
Sinkhole subsidence occurs in small, conical, unconsolidated mines which are relatively close to the ground surface. This type of subsidence is fairly localized in extent and is usually recognized by an abrupt depression visible at low ground surface to reveal the mine's collapse into the mine shaft. Sinkhole subsidence is perhaps the most common type of mine subsidence and has been responsible for extensive damage to many structures throughout the years.

**Trough Subsidence**  
Subsidence troughs are elongated mine workings that occur near the outcrop edge. Downward dip at the bottom of unroofed mine shafts or by partitioning the shafts into a soft mine road or drift. The resulting surface effect is a large, shallow pit broad in extent in the ground which is usually elliptical or circular in plan.

Subsidence is usually greatest at the center of the trough and it progressively decreases until the level of the ground surface near is reached. Inconsolidated movements also occur within a subsidence trough. Structures near the center of the trough can experience damage caused by the compression of the ground surface, and structures near the edges can be damaged by tension or stretching of the surface. Ground movement within a subsidence trough can result in damage to buildings, roadways, bridges, roads, underground pipelines and ditches, and possibly any other structures or surface features that may be present. In addition, the flow of streams may be altered or disrupted, and surface cracks may occur, particularly near the edges of the trough.

The illustration depicts the typical surface effects of mine subsidence. It is important to note that mine subsidence can occur as a result of mining at any depth. As a general rule, the total surface area affected by subsidence increases as the depth of mining increases. This means a structure can be damaged by subsidence even if it is located directly above a pillar or solid block of coal.



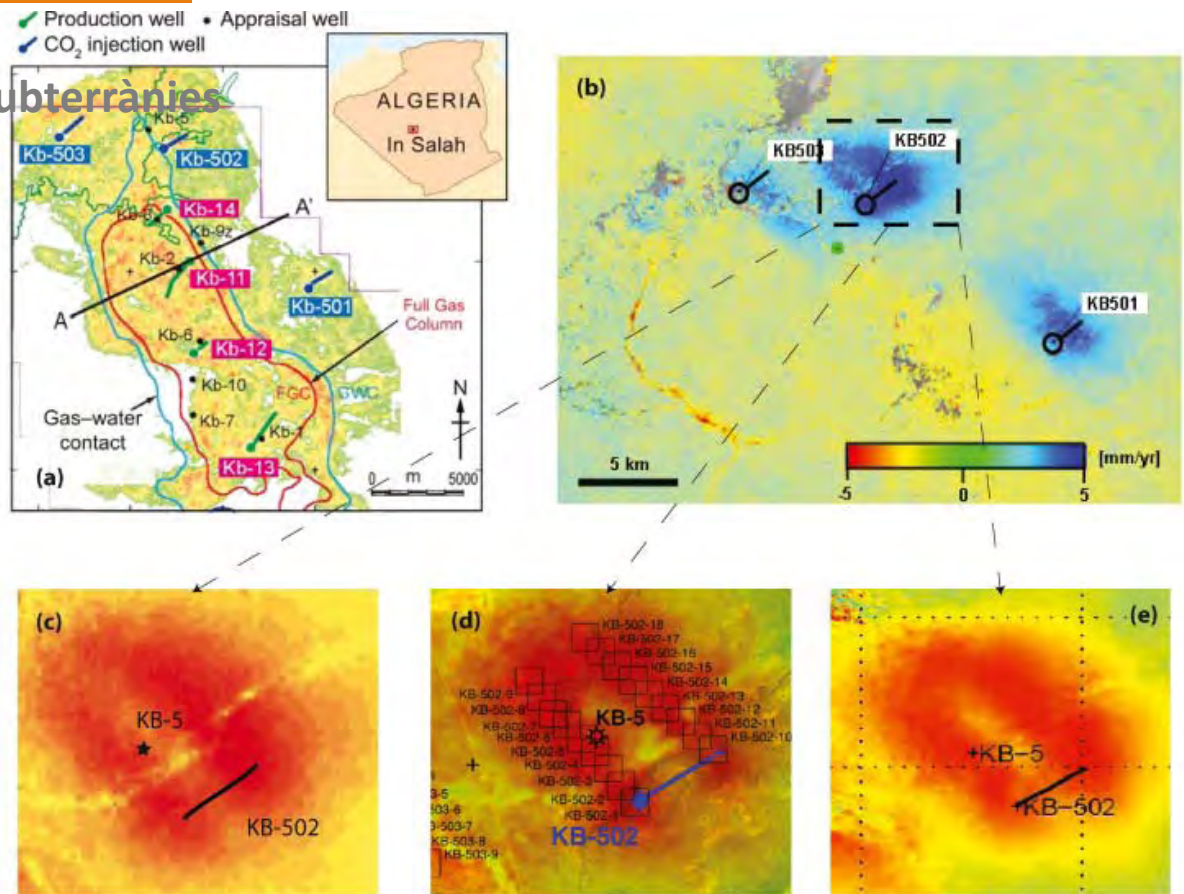
# Moviments del terreny

# Origen antròpic

Construcció d'infraestructures subterrànies  
Extracció de fluids o sòlids  
Injecció de fluids  
Rebliments ...

Krechba gas field at In Salah, Algeria. The figure highlights position of the production and injection wells; (b)

InSAR data of range change evaluated by TeleRivelamento Europa (TRE); (c–e) three independent InSAR analyses of KB502 double-lobe uplift: TRE, JGI, and MDA/Pinnacle, respectively



TRE and Vasco et al., (2010)

Onuma, JGI (2009)

MDA, Pinnacle, Davis (2011)

Font: [Antonio P. Rinaldi](#), [Jonny Rutqvist](#)

Modeling of deep fracture zone opening and transient ground surface uplift at KB-502 CO<sub>2</sub> injection well, In Salah, Algeria

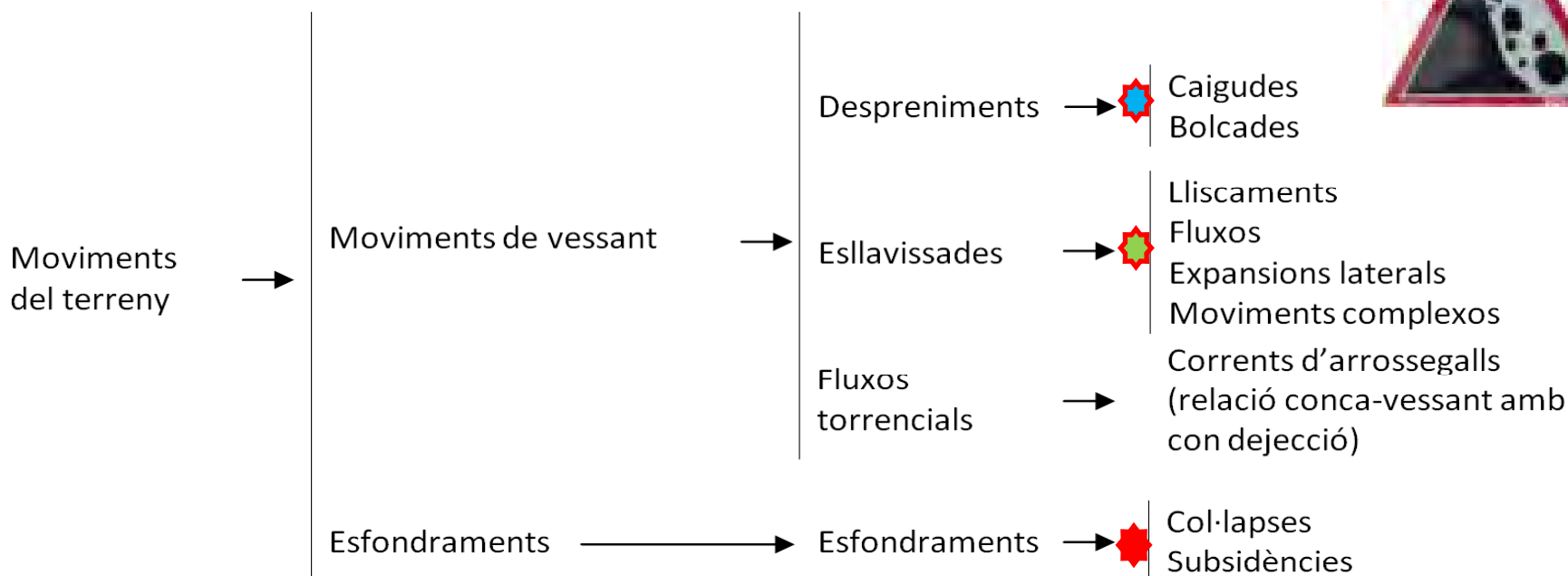
[International Journal of Greenhouse Gas Control Volume 12](#), January 2013, Pages 155–167

# Moviments del terreny

## Origen natural

**Geodinàmica interna:** deformacions de l'escorça associades a terratrèmols i vulcanisme

**Geodinàmica externa:**

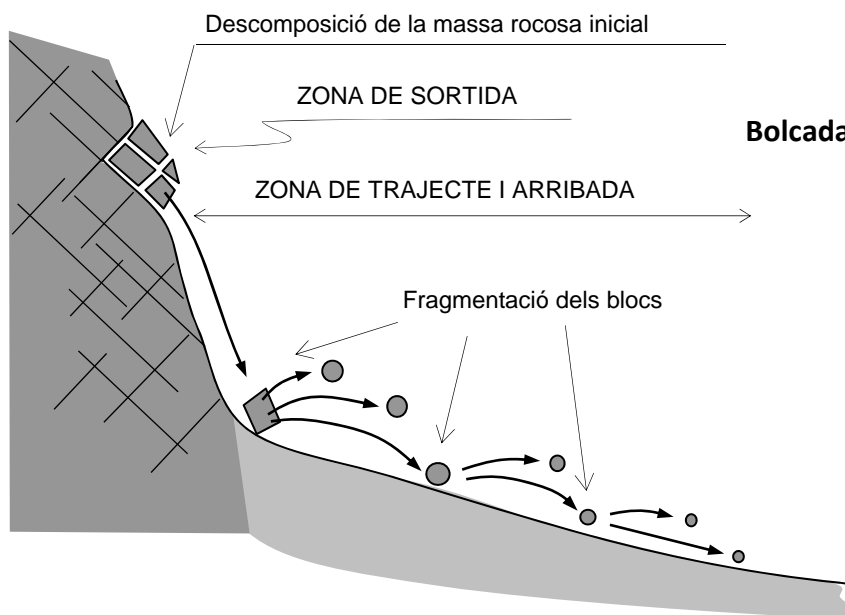
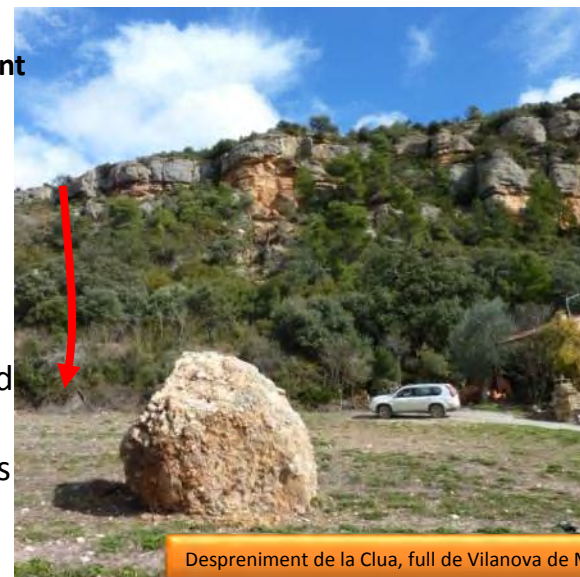




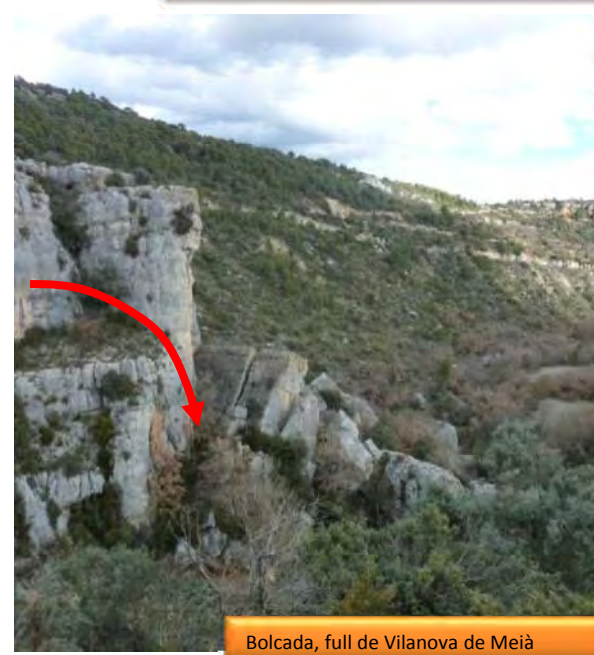
# Despreniments i bolcades

Un **despreniment** és la caiguda d'una roca o sòl, principalment per efecte de determinades discontinuïtats. Aquests fenòmens es consideren tant en vessants naturals com en talussos

## Despreniment

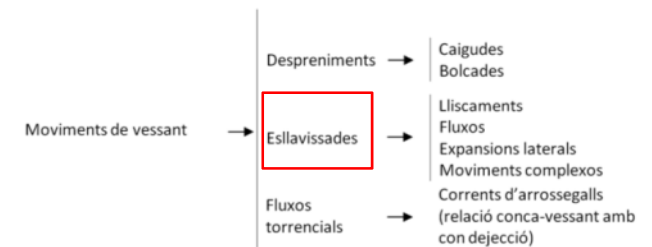


## Bolcada

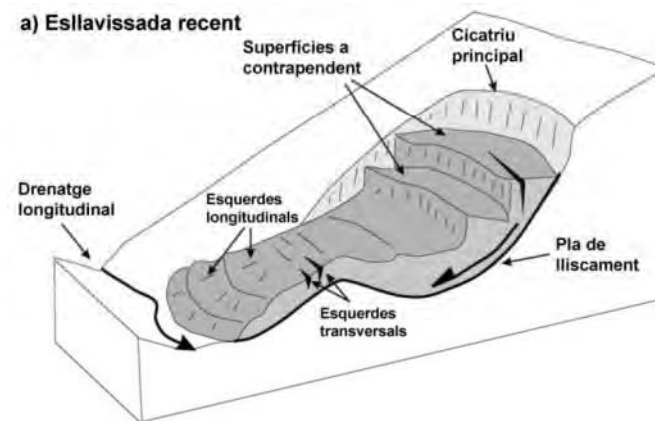




# Esllavissades



Una **esllavissada** és un moviment massiu de sòl o de roques, en un vessant o en un desmunt, per l'acció de la gravetat. Sovint s'utilitza com a terme genèric per a referir-se a una varietat de mecanismes com ara els despreniments, les bolcades, els lliscaments, els fluxos o colades i els moviments complexos.



## Esfondraments



Bòfia, Súria

L'**esfondrament** és el moviment vertical d'una massa rocosa, de dimensions variables, que baixa respecte el seu nivell anterior o al de les masses circumdants. Els esfondraments van sovint lligats a l'existència o formació de cavitats subterrànies.

Subsidència quan la velocitat del fenomen es lenta.

Col·lapse quan la velocitat del fenomen es ràpida



# Moviments del terreny

Geodinàmica interna:



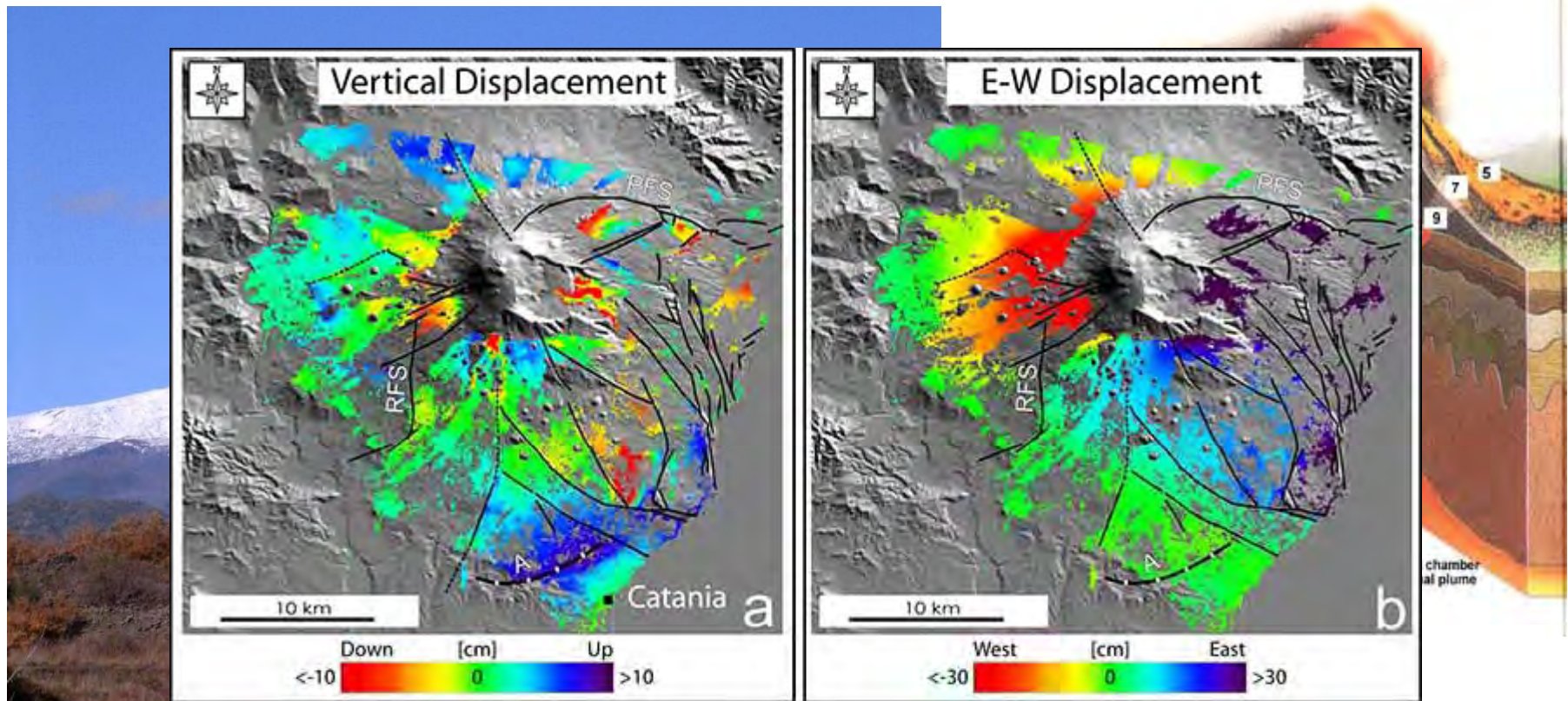
Origen natural

## Darfield Earthquake Fault Trace





# Moviments del terreny



Cumulative (a) vertical and (b) east–west deformation maps retrieved by applying the SBAS-InSAR technique to an ERS-Envisat Synthetic Aperture Radar (SAR) dataset relevant to the 1992-2006 time interval, with superimposed main fault systems (black lines) and the anticline structure (A) at the base of Mt. Etna; the results are spatially referenced to the highlighted pixel located in the town of Catania (black box in the lower right corner of Figure (a)).

Font: [http://gdsc.nlr.nl/gdsc/en/news/years\\_satellite\\_data\\_over\\_mt\\_etna](http://gdsc.nlr.nl/gdsc/en/news/years_satellite_data_over_mt_etna)

# Aplicabilitat

## Factors condicionants

Característiques a considerar aplicabilitat de la tècnica

**Table 1** Radar systems employed in the reported subsidence studies in Spain

Satellite- and ground-based SAR systems	Agency/ institution	Start–end	Band	Wavelength (cm)	Revisiting period (days)	Resolution (azimuth × range)
ERS 1-SAR	ESA	1991–2000	C	5.6	35	4 m × 20 m
ERS 2-SAR	ESA	1995–2010	C	5.6	35	4 m × 20 m
ENVISAT-ASAR	ESA	2002–2011	C	5.6	35	4 m × 20 m
TerraSAR-X	DLR	2007–2012	X	3.1	11	2 m × 3 m
ALOS-PALSAR	JAXA	2005–present	L	23.6	46	10 m × 10 m
GBSAR	UPC	2007	X	3.1	User-defined	0.5 m × 0.5 m
	IG	2008–present	Ku	1.8	User-defined	0.5 m × 0.0044 rad
Cosmo-Skymed-1	ASI	2007–present	X	3.1	<24 h	<1 m × 1 m

ESA European Space Agency, DLR German Aerospace Center, JAXA Japan Aerospace Exploration Agency, UPC Universidad Politècnica de Catalunya, IG Institut de Geomàtica, ASI Italian Space Agency

Font: Tomas et al. (2013) *Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain*. Environmental Earth Sciences.

També considerar: la **extensió** i l'**angle d'incidència**



## Aplicabilitat

L'ús d'imatges satèl·lits SAR permet monitoritzar gairebé qualsevol regió del món, però no permet el control del temps adquisicions.

Alternativa:

- Sensor Aerotransportat.. Aquest sol ser més car, però ofereix la avantatges de proporcionar una major resolució espacial i la capacitat per controlar el temps de les dades adquisicions
- GB- SAR Terrestre: monitorització de fenòmens locals a alta resolució





## Aplicabilitat

## Limitacions

### Decorrelació temporal

És el factor limitant més important per l'aplicació de InSAR . Es produeix per canvis en la reflectivitat del terreny entre les adquisicions de les imatges. Depèn de la banda utilitzada i dels temps de revisió:

Els canvis són generalment a causa de :

Modificació de la morfologia del terreny.

#### MOVIMENTS QUE ALTERIN SUBSTANCIALMENT EL TERRENY

La presencia de cobertura vegetal: la penetració depèn de la banda utilitzada ( banda L millor C)

#### MAJOR DENSITAT DE VEGETACIO MAJOR PERDUA

La variació en la humitat de la vegetació / sol .

#### CLIMATOLOGIA HUMIDA/VARIADA DIFICULTA LA CORRELACIO TEMPORAL

### ALTERNATIVES

Identificació de blancs estables en el temps com afloraments rocosos, edificacions, infraestructures o reflectors artificials.

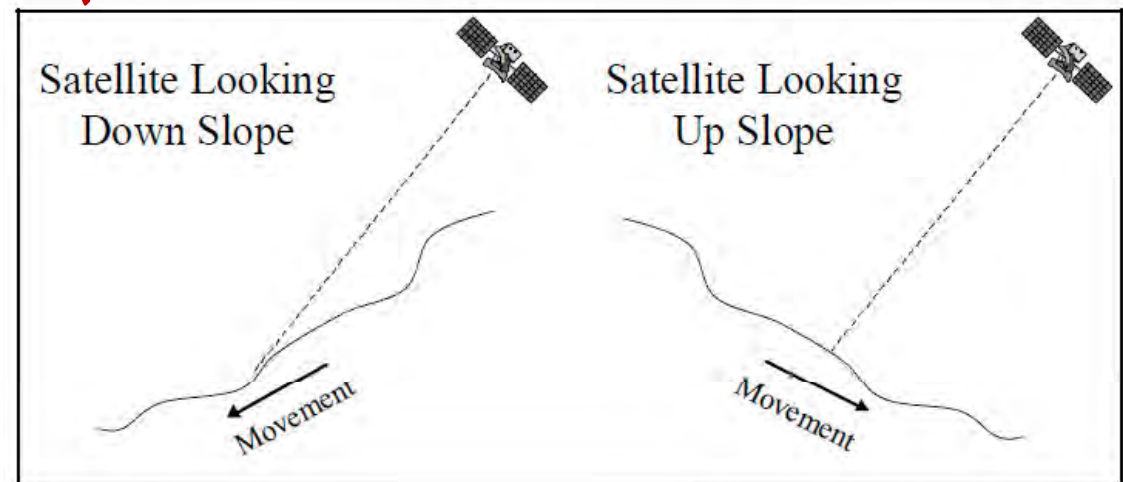
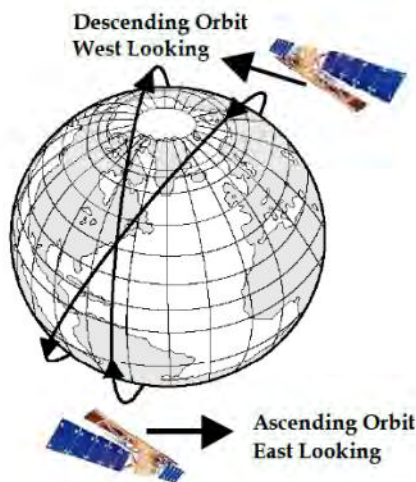
## Aplicabilitat

## Limitacions en moviments de vessant

L'ús d'InSAR per mesurar moviments de vessants no és tan comú com amb d'altres aplicacions (deformació de l'escorça, esfondraments ...). Hi ha *limitacions* que s'accentuen al aplicar-ho a moviments de vessants per qüestió de la orientació del sensor.

**SAR direcció d'observació per orbites polars:** direcció d'observació és generalment Est/Oest.

- SAR sensibles a moviments en vessants orientats a l'est o a l'oest.
- Insensible als moviments en direcció nord o sud
- Insensible als moviments si direcció d'observació SAR és contrapendent. Aquest efecte empitjora quan la inclinació del pendent és igual a l'angle d'incidència SAR.
- En general zones amb gran relleus presenten problemes de ombrejat, layover i foreshooting (afecten a la resolució )



ALTERNATIVA: GB-SAR

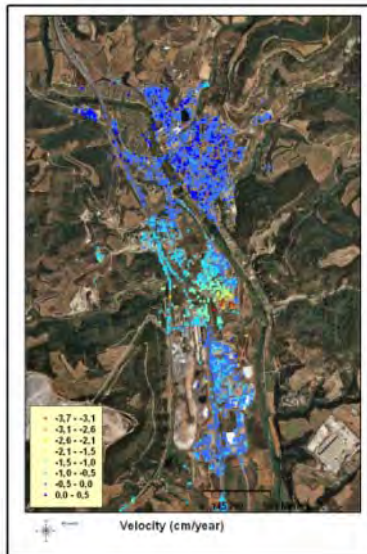
## Integració del DInSAR en la investigació geològica

- Caracterització del fenomen:
  - ajuda a definir límits de l'àrea afectada
  - Mesurant la deformació superficial: magnitud, velocitat, variabilitat espacial i temporal
- Integració amb d'altres tècniques de mesura: permet validar i contrastar resultats
- Integració amb informació geològica, hidrogeologia i geotècnia: identificació de l'origen i comportament determinació dels mecanismes de desencadenament i evolutius.
- Modelització: integració en models numèrics per establir l'evolució i perillositat del fenomen
- Proposar e implementar mesures mitigadores si s'escau
- Monitorització de les mesures establertes

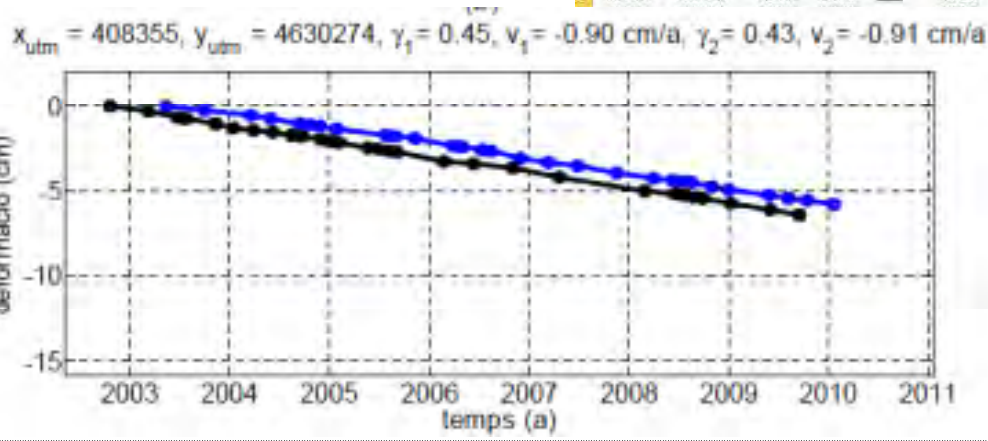


# Aplicabilitat

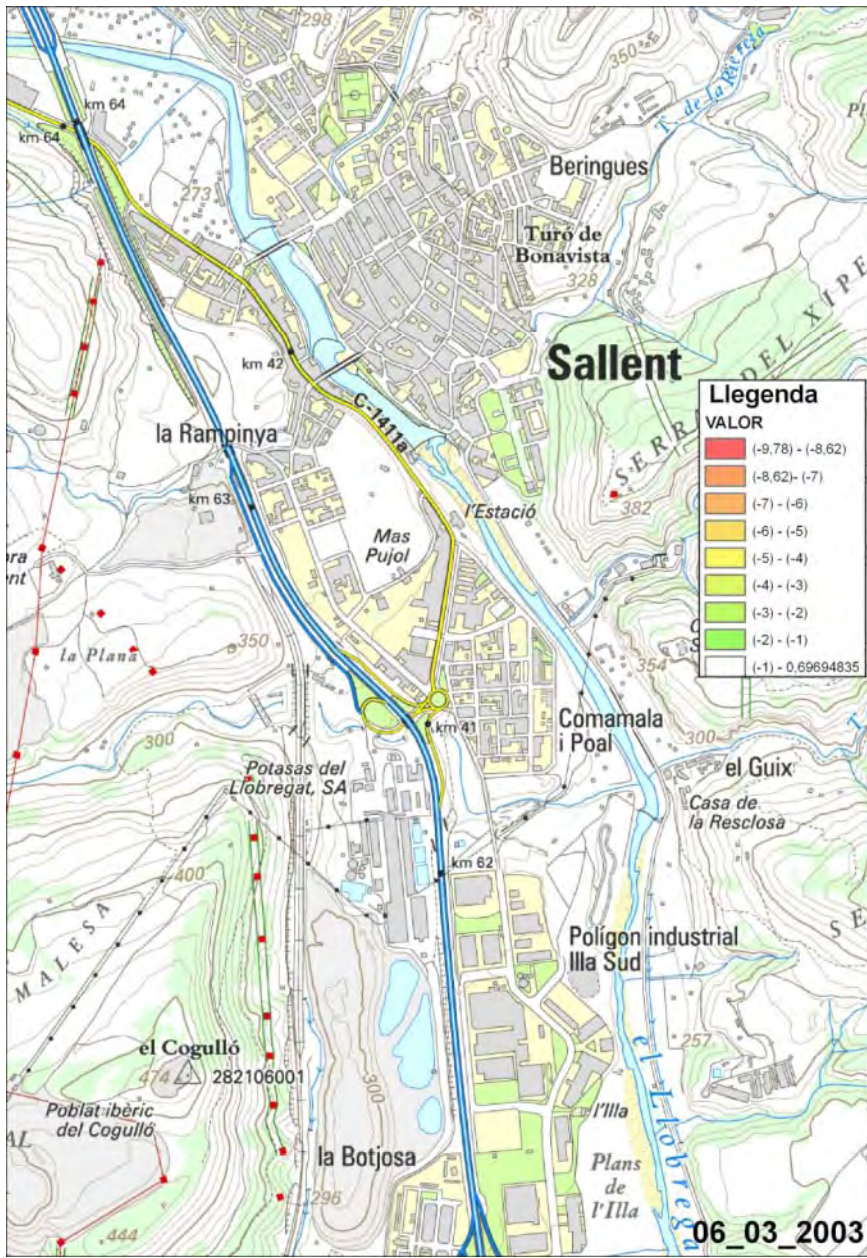
# Integració

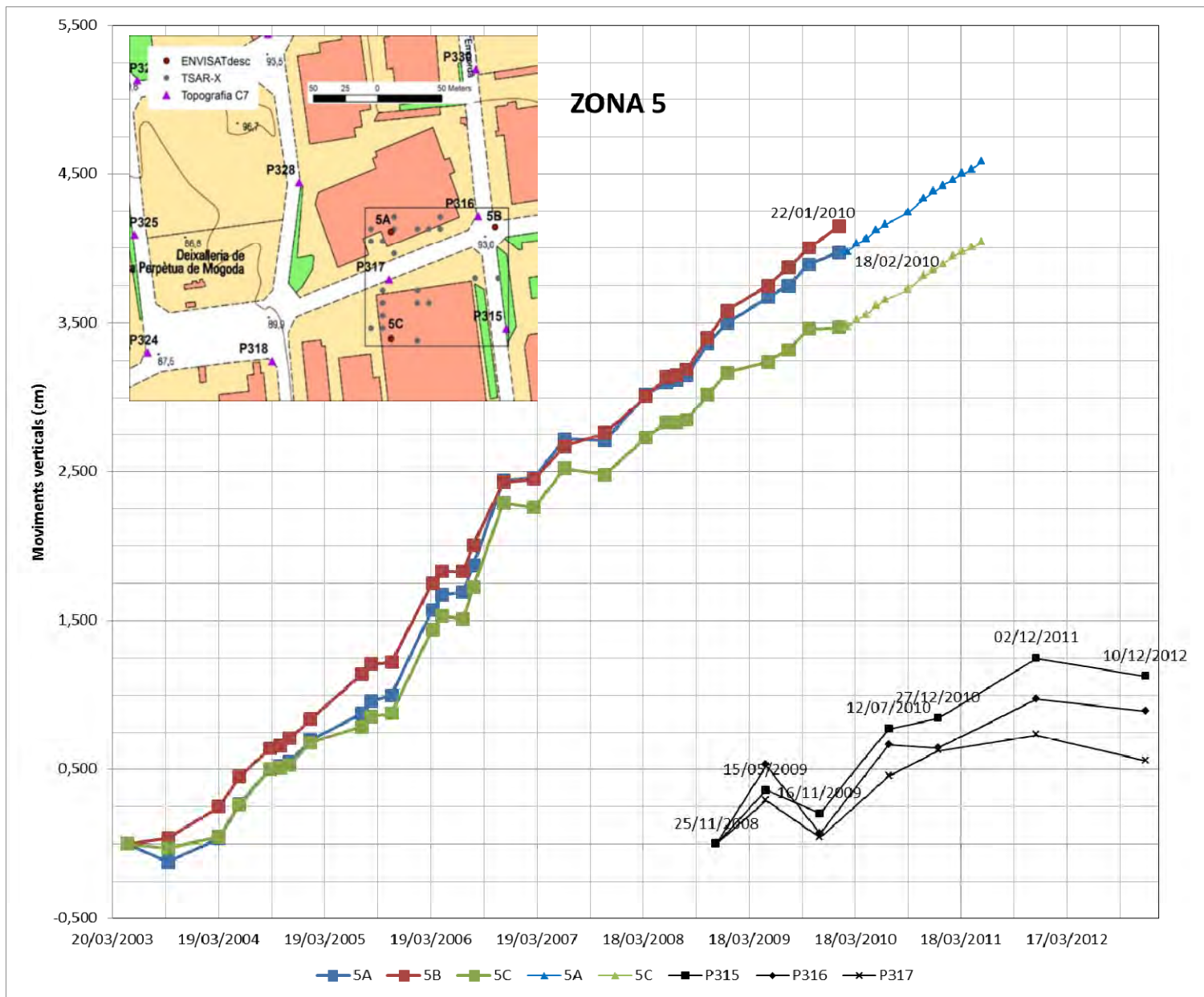


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Serra de Tramuntana		M	N	O	P
	X	Y													V	C
1	396526.5	4633145.5	0.00000	-0.53000	---	06/06/2008	11/07/2008	15/08/2008	24/10/2008	02/01/2009	12/05/2009	31/07/2009	09/10/2009	22/01/2010	-0.41000	0.45
2	396526.5	4633164.5	0.00000	-0.35000	---	-1.38000	-2.44000	-2.46000	-2.54000	-1.65000	-2.76000	-2.83000	-2.87000	-3.09000	-0.39000	0.44
3	396445.5	4633085.5	0.00000	-0.13000	---	-1.16000	-2.22000	-2.21000	-2.33000	-3.40000	-2.54000	-2.60000	-2.62000	-2.90000	-0.46000	0.44
4	396526.5	4633088.5	0.00000	-0.35000	---	-1.65000	-1.96000	-1.88000	-1.70000	-1.74000	-1.96000	-2.00000	-2.04000	-2.27000	-0.36000	0.38
5	396526.5	4633002.5	0.00000	-0.48000	---	-2.28000	-2.33000	-2.34000	-2.38000	-2.42000	-2.60000	-2.67000	-2.71000	-2.91000	-0.58000	0.39
6	398065.5	4633002.5	0.00000	-0.35000	---	-4.54000	-4.62000	-4.69000	-4.79000	-4.91000	-5.14000	-5.22000	-5.40000	-5.49000	-0.82000	0.38
7	395320.5	4632921.5	0.00000	-0.17000	---	-1.70000	-1.72000	-1.70000	-1.92000	-1.98000	-2.00000	-2.04000	-2.04000	-2.20000	-0.34000	0.50
8	395311.5	4632921.5	0.00000	-0.26000	---	-1.32000	-1.37000	-1.36000	-1.48000	-1.50000	-1.61000	-1.61000	-1.62000	-1.73000	-0.25000	0.36
9	396121.5	4632921.5	0.00000	-0.18000	---	-1.89000	-1.92000	-1.90000	-2.01000	-2.09000	-2.13000	-2.17000	-2.18000	-2.40000	-0.35000	0.38
10	398148.5	4632921.5	0.00000	-0.35000	---	-4.54000	-4.62000	-4.69000	-4.79000	-4.91000	-5.14000	-5.22000	-5.40000	-5.49000	-0.82000	0.38
11	395230.5	4632840.5	0.00000	-0.19000	---	-1.64000	-1.69000	-1.70000	-1.81000	-1.83000	-1.94000	-1.94000	-1.96000	-2.10000	-0.54000	0.56
12	395392.5	4632840.5	0.00000	-0.17000	---	-2.36000	-2.41000	-2.40000	-2.61000	-2.68000	-2.82000	-2.88000	-2.91000	-3.11000	-0.47000	0.39
13	395473.5	4632840.5	0.00000	-0.17000	---	-3.36000	-2.41000	-2.40000	-2.61000	-2.68000	-2.82000	-2.88000	-2.91000	-3.11000	-0.47000	0.39
14	396384.5	4632759.5	0.00000	-0.19000	---	-1.17000	-1.30000	-1.30000	-1.30000	-1.30000	-1.30000	-1.30000	-1.30000	-1.30000	-1.28000	---
15	397903.5	4632759.5	0.00000	-0.14000	---	-2.04000	-2.08000	-2.14000	-2.20000	-2.20000	-2.20000	-2.20000	-2.20000	-2.20000	-2.20000	---
16	397894.5	4632759.5	0.00000	-0.04000	---	-1.07000	-1.08000	-1.11000	-1.11000	-1.11000	-1.11000	-1.11000	-1.11000	-1.11000	-1.11000	---
17	398065.5	4632759.5	0.00000	-0.08000	---	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	---
18	396526.5	4632678.5	0.00000	-0.03000	---	-1.09000	-1.11000	-1.12000	-1.12000	-1.12000	-1.12000	-1.12000	-1.12000	-1.12000	-1.12000	---
19	396040.5	4632597.5	0.00000	-0.35000	---	-2.39000	-2.43000	-2.42000	-2.42000	-2.42000	-2.42000	-2.42000	-2.42000	-2.42000	-2.42000	---
20	396121.5	4632597.5	0.00000	-0.27000	---	-2.04000	-2.08000	-2.07000	-2.14000	-2.14000	-2.14000	-2.14000	-2.14000	-2.14000	-2.14000	---
21	396283.5	4632597.5	0.00000	-0.09000	---	-1.20000	-1.23000	-1.22000	-1.22000	-1.22000	-1.22000	-1.22000	-1.22000	-1.22000	-1.22000	---
22	396445.5	4632597.5	0.00000	-0.03000	---	-1.64000	-1.66000	-1.66000	-1.65000	-1.65000	-1.65000	-1.65000	-1.65000	-1.65000	-1.65000	---
23	396526.5	4632597.5	0.00000	-0.01000	---	-1.08000	-1.10000	-1.09000	-1.09000	-1.09000	-1.09000	-1.09000	-1.09000	-1.09000	-1.09000	---
24	396850.5	4632597.5	0.00000	-0.13000	---	-2.44000	-2.50000	-2.55000	-2.67000	-2.67000	-2.67000	-2.67000	-2.67000	-2.67000	-2.67000	---
25	395959.5	4632516.5	0.00000	-0.37000	---	-2.80000	-2.85000	-2.85000	-2.85000	-2.85000	-2.85000	-2.85000	-2.85000	-2.85000	-2.85000	---
26	396040.5	4632516.5	0.00000	-0.91000	---	-3.49000	-3.57000	-3.57000	-3.57000	-3.57000	-3.57000	-3.57000	-3.57000	-3.57000	-3.57000	---
27	396283.5	4632516.5	0.00000	0.01000	---	-1.24000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	-1.26000	---
28	396364.5	4632516.5	0.00000	0.01000	---	-0.75000	-0.77000	-0.76000	-0.73000	-0.73000	-0.73000	-0.73000	-0.73000	-0.73000	-0.73000	---
29	396445.5	4632516.5	0.00000	-0.06000	---	-0.79000	-0.79000	-0.80000	-0.87000	-0.87000	-0.87000	-0.87000	-0.87000	-0.87000	-0.87000	---
30	396607.5	4632516.5	0.00000	0.08000	---	-0.67000	-0.69000	-0.71000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	---
31	396769.5	4632516.5	0.00000	0.17000	---	-0.95000	-0.97000	-1.00000	-0.98000	-0.98000	-0.98000	-0.98000	-0.98000	-0.98000	-0.98000	---
32	394463.5	4632435.5	0.00000	-0.07000	---	0.14000	0.18000	0.21000	0.23000	0.23000	0.23000	0.23000	0.23000	0.23000	0.23000	---
33	394744.5	4632435.5	0.00000	-0.07000	---	0.18000	0.18000	0.21000	0.23000	0.23000	0.23000	0.23000	0.23000	0.23000	0.23000	---
34	395959.5	4632435.5	0.00000	-0.08000	---	-0.02000	-0.08000	-2.10000	-2.24000	-2.24000	-2.24000	-2.24000	-2.24000	-2.24000	-2.24000	---
35	396121.5	4632435.5	0.00000	-0.09000	---	-1.98000	-2.02000	-2.01000	-2.18000	-2.18000	-2.18000	-2.18000	-2.18000	-2.18000	-2.18000	---
36	396202.5	4632435.5	0.00000	-0.07000	---	-1.74000	-1.77000	-1.76000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	---
37	396364.5	4632435.5	0.00000	0.12000	---	-1.01000	-1.03000	-1.03000	-1.15000	-1.15000	-1.15000	-1.15000	-1.15000	-1.15000	-1.15000	---
38	396607.5	4632435.5	0.00000	0.08000	---	-0.69000	-0.71000	-0.71000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	-0.74000	---
39						0.83000	0.83000	0.83000	0.83000	0.83000	0.83000	0.83000	0.83000	0.83000	0.83000	---
40						0.94000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	0.95000	---
41						0.96000	0.99000	0.99000	0.99000	0.99000	0.99000	0.99000	0.99000	0.99000	0.99000	---
42						3.35000	-3.36000	-3.61000	-3.61000	-3.61000	-3.61000	-3.61000	-3.61000	-3.61000	-3.61000	---
43						2.92000	-2.94000	-3.15000	-3.15000	-3.15000	-3.15000	-3.15000	-3.15000	-3.15000	-3.15000	---
44						1.78000	-1.78000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	-1.95000	---











1. el cost, en general el condicionat més rellevant
2. la precisió i resolució requerida
3. Distribució i freqüència de mesura (adquisicions)
4. cobertura del sòl (afloraments rocosos, boscos, zones urbanes, etc), i condicions meteorològiques;
5. la flexibilitat del mètode, en relació amb la possibilitat de la selecció de l'hora i el lloc del mesurament adquisició, la disponibilitat de les dades (la facilitat d'accés a la dades), així com el temps d'adquisició (el temps requerit per realitzar una campanya de mesura).
6. geometria i la cinemàtica del fenomen

# Aplicabilitat

## Críteris selecció tècniques monitoratge

**Table 4** Comparison of methods for measuring ground subsidence

Methods	Precision	Displacement component	Survey scale	Conditions and operating environment						Degree of automation		Usual sample frequency	
				Rural (woody)	Rural (scrub)	Urban	Hilly	Adverse weather conditions	Nocturnal	Data acquisition	Post-processing		
Trigonometric levelling	cm	Vertical	Line network	MD-P	MD-P	G-MD	G	P		P	MN	SA	Monthly-annual
Geometric levelling	mm	Vertical	Line network	MD-P	MD-P	G-MD	P	P		P	MN	SA	Monthly-annual
Settlement cell	mm	Vertical	Point	G	G	G	G	MD-G		MD-G	MN-A	MN-SA	Monthly-continuous
Borehole extensometer	mm	Vertical	Point	G	G	G	G	MD-G		MD-G	MN-A	MN-SA	Monthly-continuous
Differential GPS	mm	Vertical and horizontal	Point	MD-P	G-MD	MD-P	G	G-P		G	MN-A	MN-A	Monthly-annual (or continuous)
Conventional DInSAR	mm	Range	Map pixel	P	MD-P	G	G-MD	G		G	A	SA-A	Monthly-weekly (variable)
Advanced DInSAR	mm	Range	Map pixel	MD-P	MD-P	G	G-MD	G		G	A	SA-A	Monthly-weekly (variable)
GBSAR	mm	Range	Map pixel	MD-P	MD-P	G	G	G		G	A	SA-A	Hourly-daily
LIDAR/ALS/ALTM	Dm	Range	Map pixel	MD	MD	G	G	MD-P		G-MD	A	SA-A	Monthly-annual

G good, MD medium, P poor, MN manually, A automatic, SA semiautomatic

Font: Tomas et al. (2013) *Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain*. Environmental Earth Sciences.

# Aplicabilitat

## Comparativa costos tècniques

Taula a. Freqüència de mesura

Taula b. Punts per km<sup>2</sup>

Taula c. Cost anual per punt

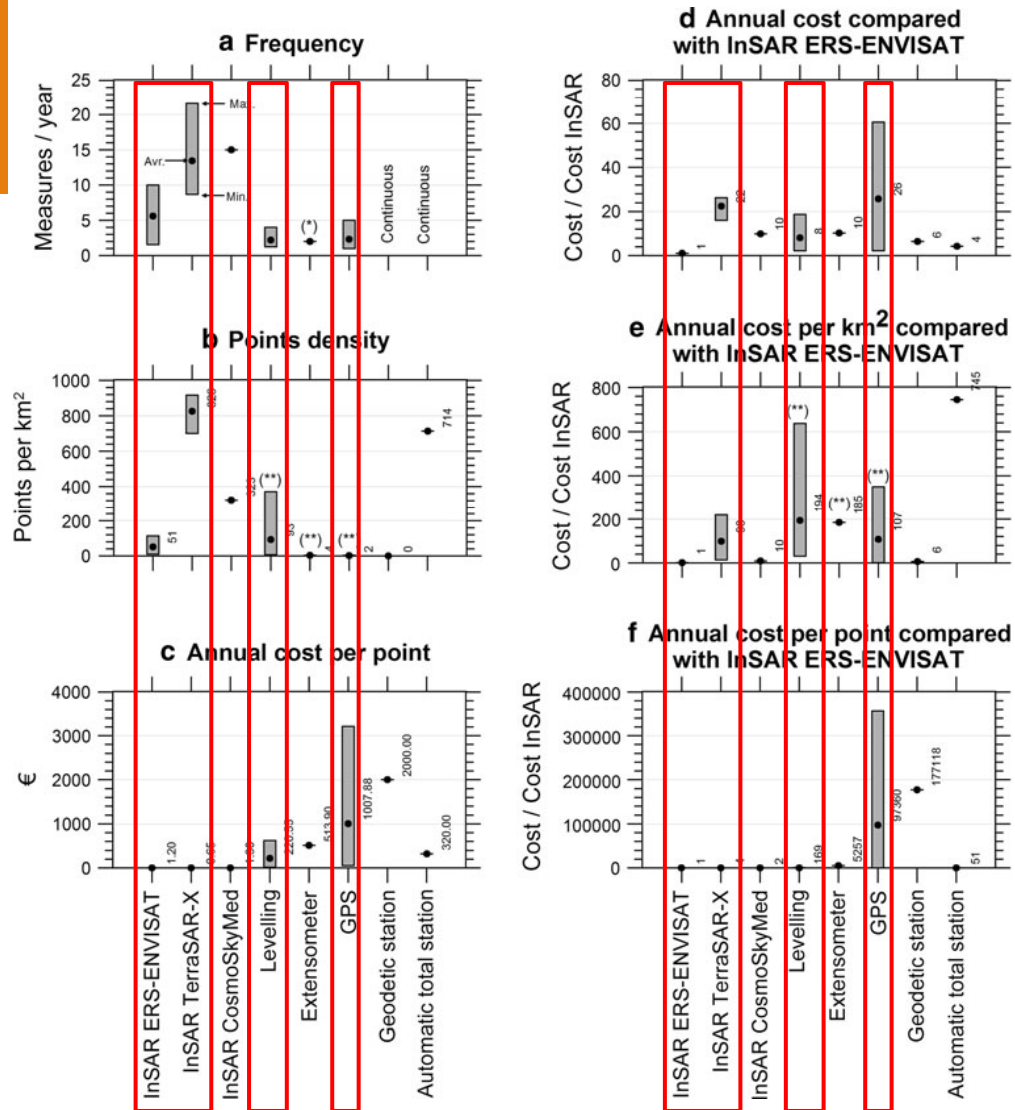
Taula d. Cost anual comparat respecte InSAR ERS-ENVISAT

Taula e. Cost anual per km<sup>2</sup> respecte InSAR ERS-ENVISAT

Taula f. Cost anual per punt respecte InSAR ERS-ENVISAT

Considerem TSX, ERS\_ENVISAT, Anivellació topogràfica i campanyes GPS.

- TSX menor cost per punt
- TSX mes densitat per km<sup>2</sup>
- ERS-ENVISAT mes barat per Km<sup>2</sup>



Font: Tomas et al. (2013) *Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain*. Environmental Earth Sciences.



# Conclusions

## Trets principals:

- Alta precisió mesurant deformacions verticals
- Període relativament curt de revisió
- Gran extensió territorial per imatge
- Operativitat dia/nit i condicions adverses
- Revisió de dades històriques des de l'any 1992
- Pèrdua de coherència entre imatges per decorrelació temporal (principalment per vegetació i/o agricultura)
- Artefactes atmosfèrics provoquen problemes en estimació de deformació
- Limitacions en el mesurament de deformacions horitzontals
- Integrable amb d'altres tècniques

## Avantatges respecte d'altres tècniques per mesurar deformacions del terreny

1. Alta freqüència d'adquisició de dades i gran cobertura espacial
2. Baix cost anual per punt mesurat i per km<sup>2</sup>
3. Elevada resposta en zones urbanes
4. Revisió històrica

# Deformacions del terreny per causes sísmiques

## Cas d'estudi: Terratrèmol de Lorca

Terratrèmol de Lorca 11/05/2011  
 Falla Alhama-Murcia  
 Magnitud 5.1  
 1 km de profunditat  
 9 morts + 300 ferits  
 80 % edificacions afectats



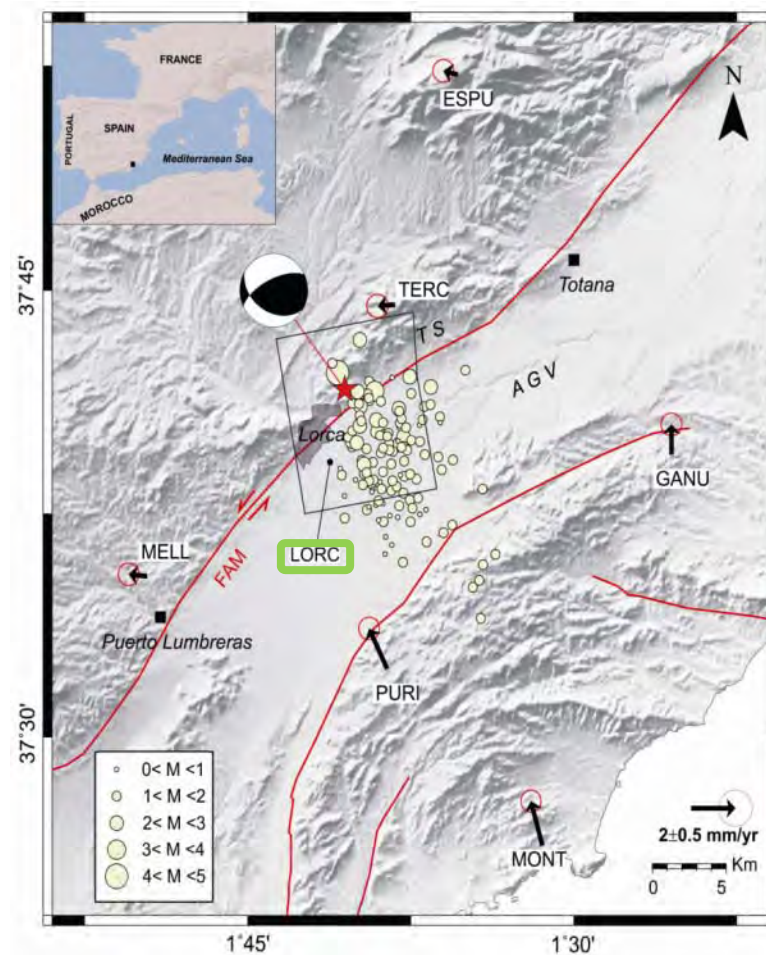
## GPS

Red Meristemum

LORC

Red Cuateneo:

ESPU, TERC, MELL, PURI,  
 GANU, MONT





### DInSAR (ICC)

TerraSAR-X

25/07/2008-14/05/2011

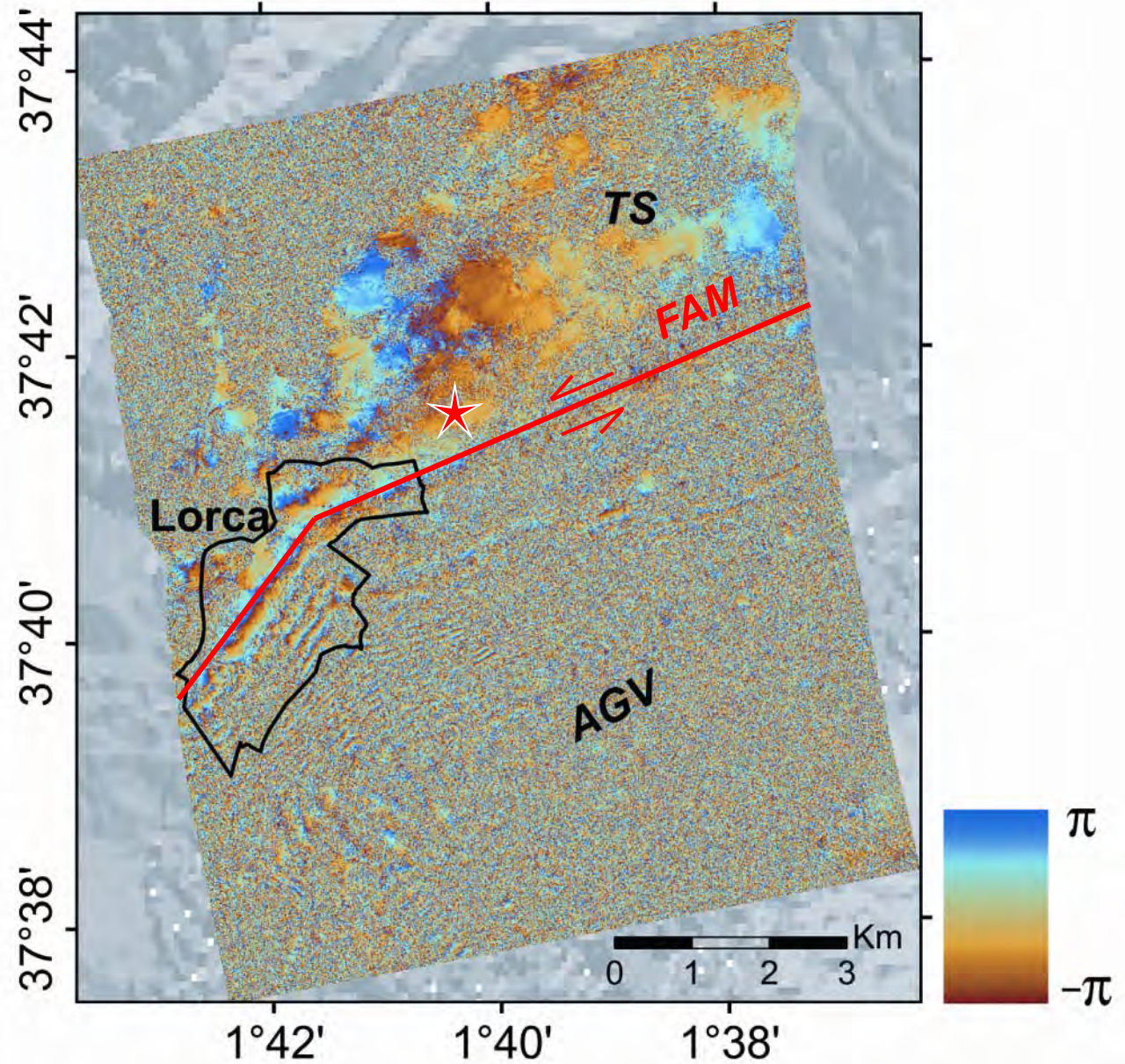
1 cycle=1.55 cm

Moviment sobre LOS

EPICENTRE ★

3 anys separació de las imatges en el temps (¿Quin percentatge

Tot el moviment és cosímic?

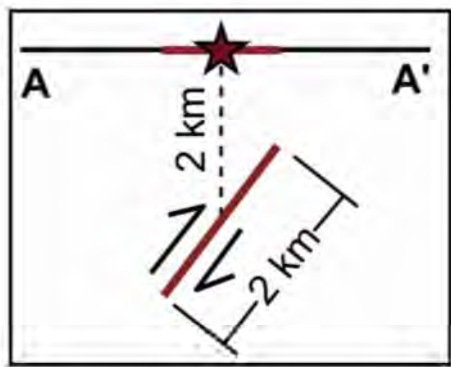


# Model numéric (IGC)

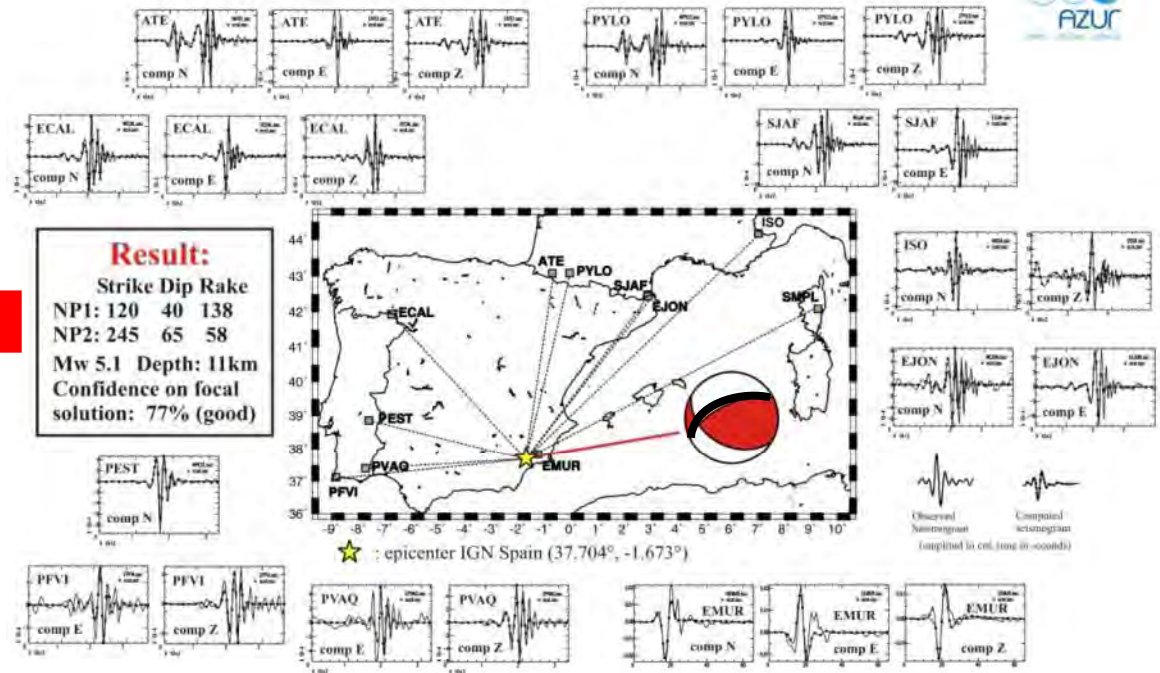
Orientació del pla de ruptura i vector de moviment

Strike	Dip	Rake
245	65	58

Dimensions del pla de ruptura



## Lorca earthquake (Spain) May 11, 2011 16h47 UTC



May 12, 2011 B. Delouis Data retrieved from Orfeus Data Center

Slip (cm)	L (km)	W (km)
15	4	2

Valors mitjans (Wells & Coppersmith, 1994)





DInSAR (2008-2011)

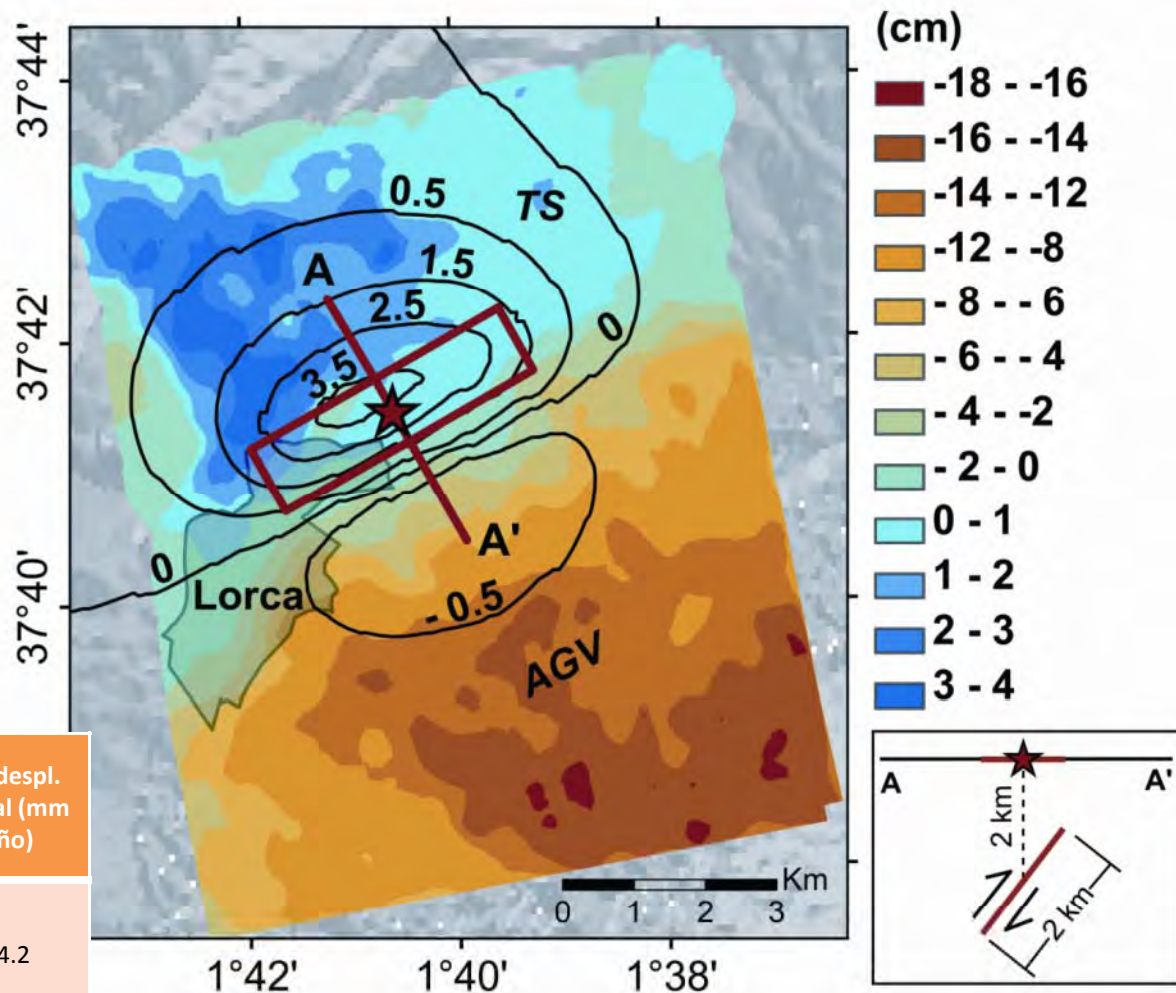
+

Model numéric

Model numéric (IGC)

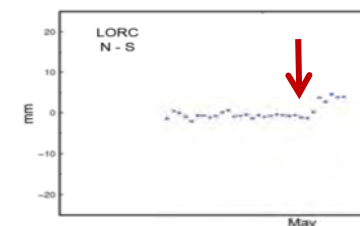
Desplaçament vertical  
superficial

**EPICENTRE** ★



Técnica	Máx. depl. vertical bloque N (mm)	Máx. depl. vertical bloque S (mm)	Tasa despl. vertical (mm / año)
DInSAR (2008-2011) (este estudio)	+ 30	-180	- 64.2
Modelo numérico (este estudio)	+ 40	- 10	-
DInSAR (1992-2011) (González y Fernández, 2011)	-	-	- 100 *

\* Mesures realitzades abans del terreremol de Lorca (11/05/2011)

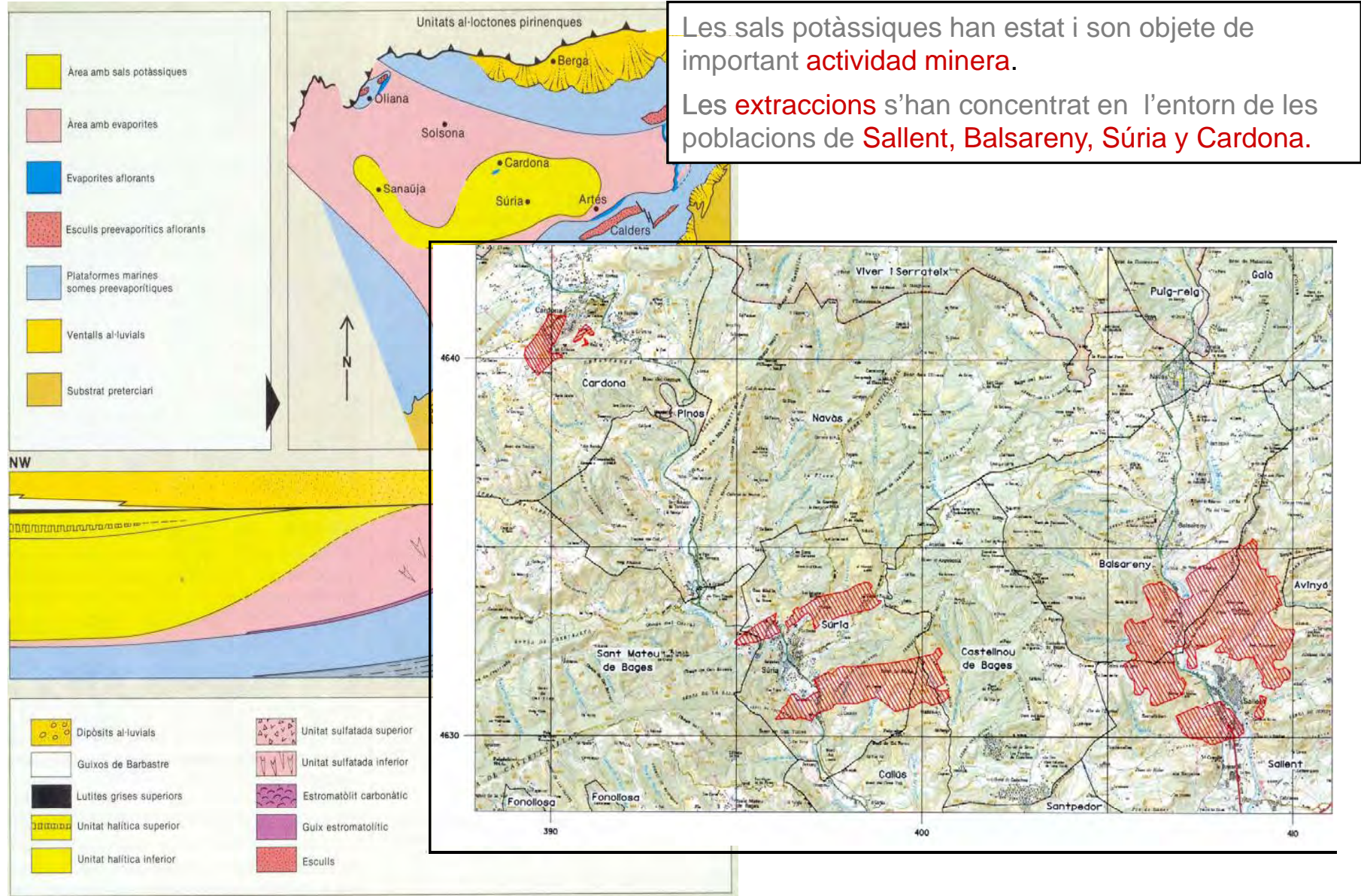




## Conclusions

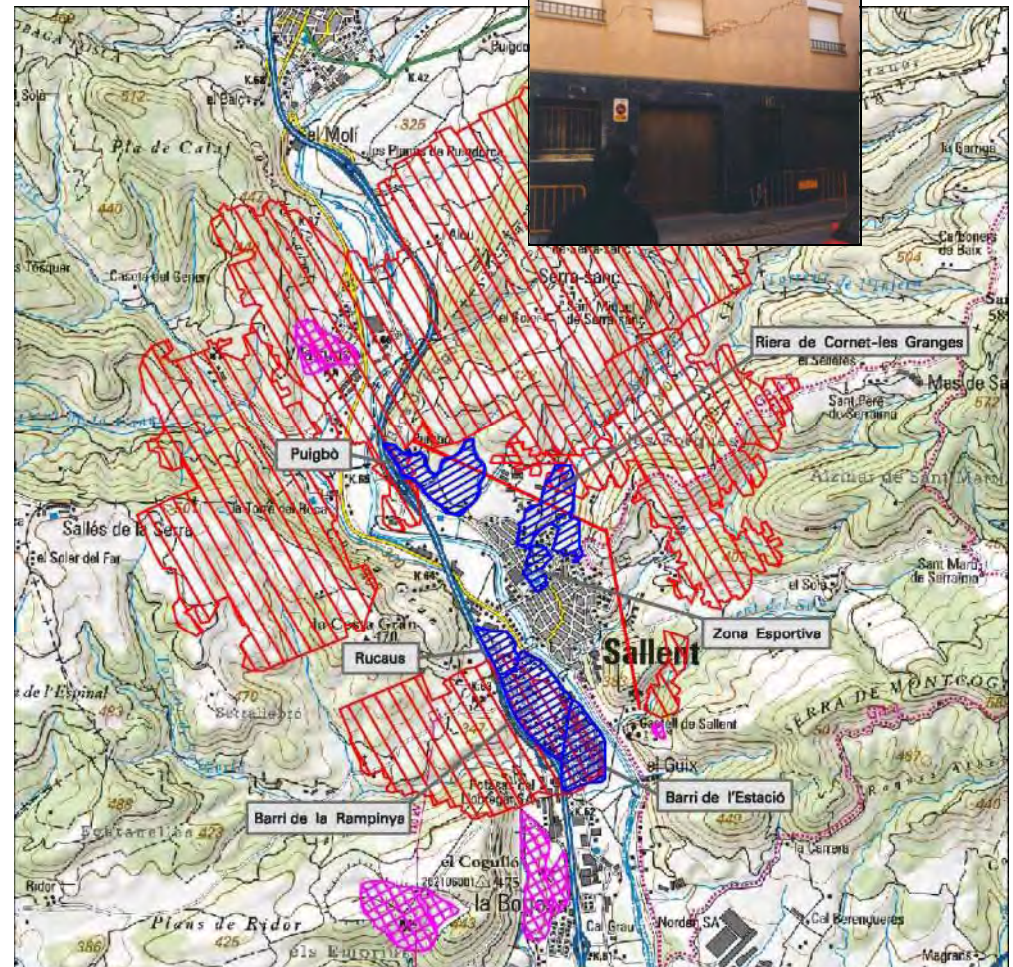
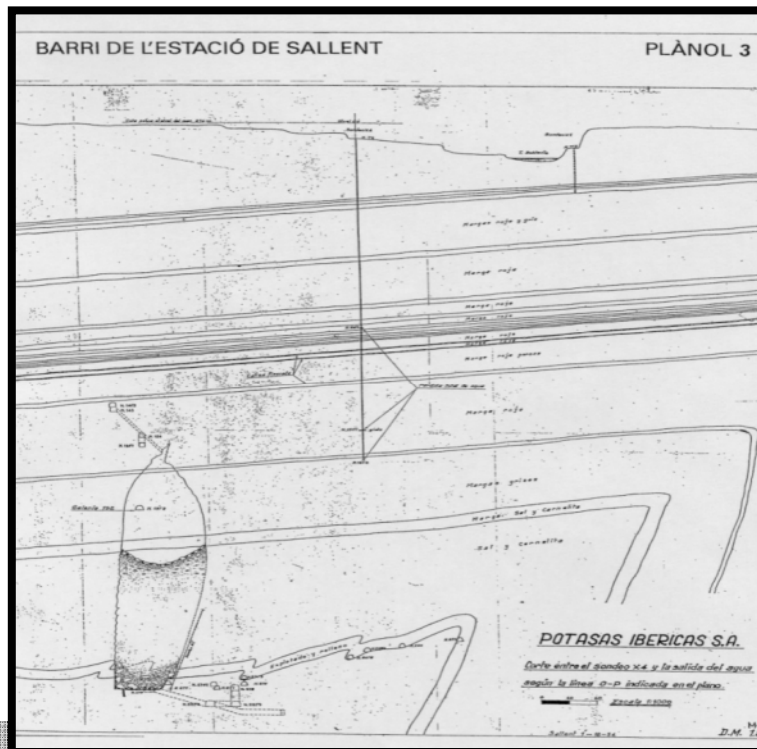
- La tècnica DinSAR representa una eina d'ús ràpid i cost baix que permet avaluar els moviments del terreny en grans extensions
- L'existència de xarxes de monitoreig GPS permeten una caracterització detallada i precisa dels moviments del terreny.
- L'estudi multidisciplinar combina tècniques geodèsiques de monitoreig amb models numèrics de ruptura que permeten avaluar i verificar els moviments cosísmics e identificar i separar-los d'altres possibles fenòmens que generen moviments verticals del terreny
- En el caso de Lorca, es va poder separar la component de moviments cosísmics (sobtats) dels ocasionats per subsidència en el bloc sud de la falla (constants i fins i tot mes grans que els cosísmics)

**Deformació per cavitats mineres-  
càrstiques  
en zones urbanes  
Cas d'estudi: Sallent, barri L'Estació**





- **Explotació** “Mina Enrique” 1932 – 1974 (260 m. profunditat)
- **Avingudes d'aigua** dins de la mina des de 1934.
- Es localiza una **gran cavitat** (1954).
- Continuen les aportacions d'aigua.
- Es decideix tancament **de la mina**.
- **Rebliment** de la mina (1976-1977).



## ESTUDI SALLENT

Contempla :

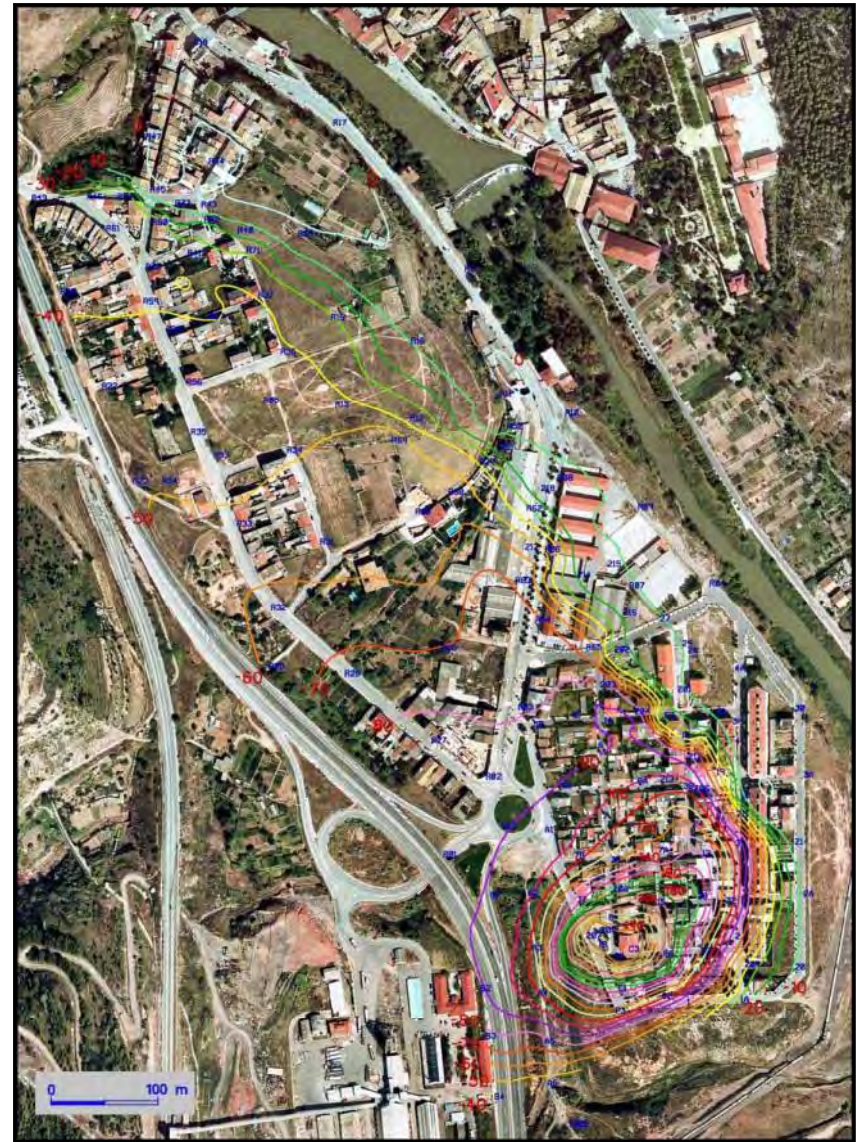
- **Caracterització geològica** del subsòl: geologia / geofísica
- **Auscultació**: *Mesura i control dels moviments*
- **Caracterització geotècnica** del subsòl
- **Modelització Geomecànica**: moviment previsible del terreny



## AUSCULTACIÓ DEL TERRENY

### Xarxes d'anivellació de precisió

Barris de l'Estació i Rampinya  
Sectors de Rucaus, Zona  
Esportiva, riera de Cornet, les  
Granges y Puigbò

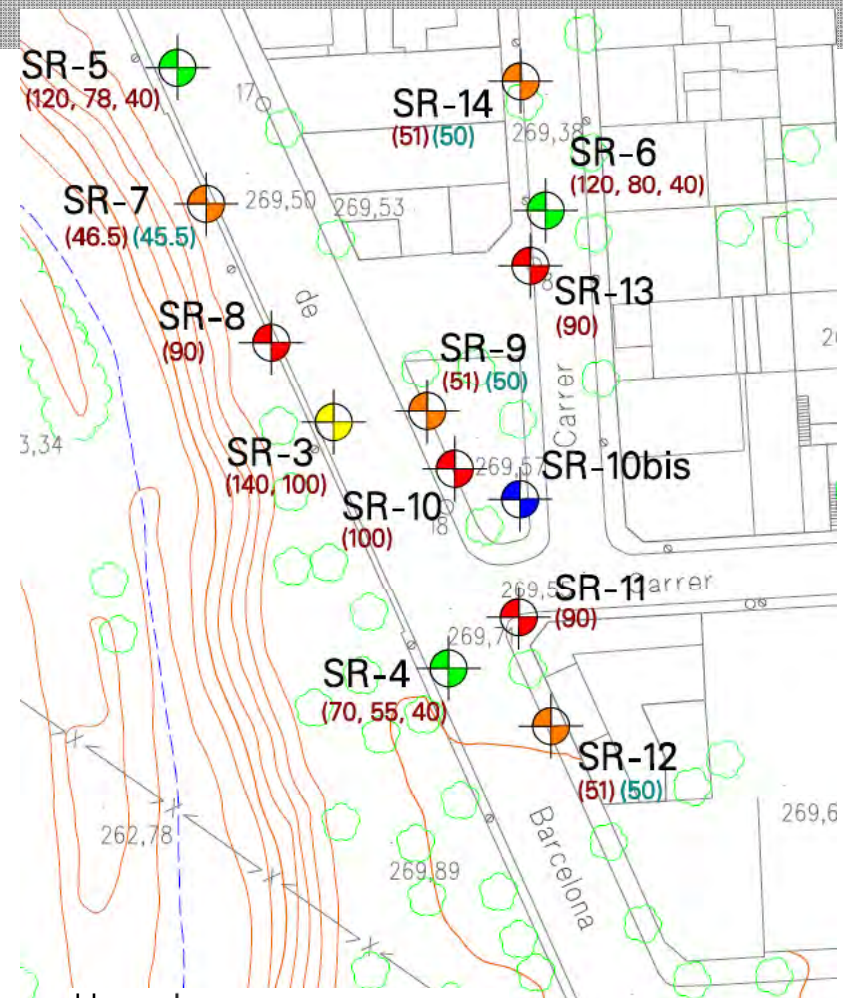
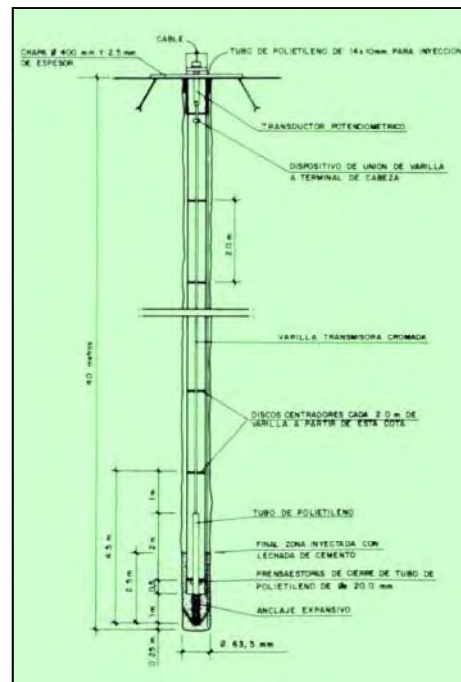









## AUSCULTACIÓ DEL TERRENY

### Extensometría

Instal·lació de 20 extensòmetres a profunditats entre 40 m y 230 m

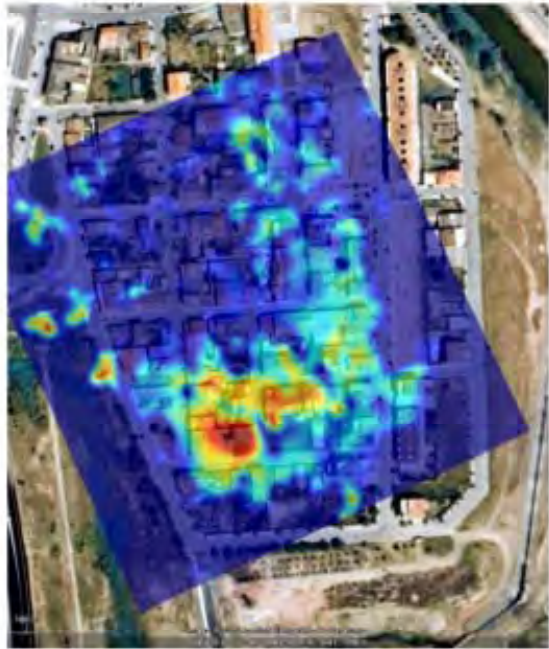


#### Llegenda

-  Piezòmetre de corda vibrant 2007-2008
-  Extensòmetre i inclinòmetre 2007-2008
-  Extensòmetre 2007-2008
-  Extensòmetre triple 2004
-  Extensòmetre doble 2000
- (51)** Profunditats extensòmetres
- (50)** Longitud tub inclinomètric

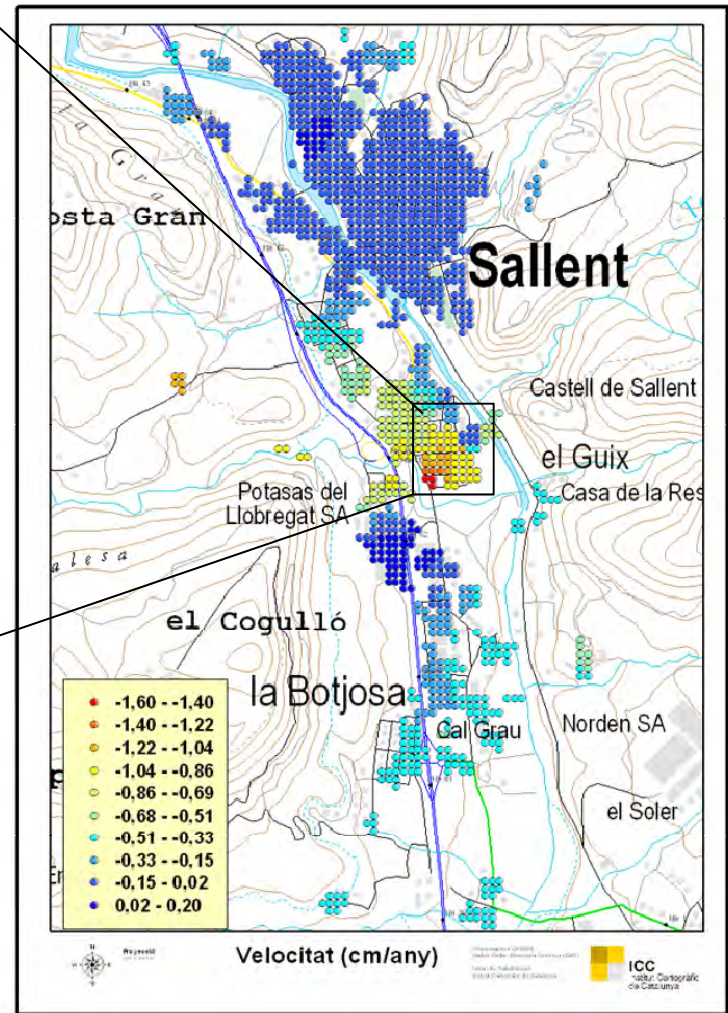


## AUSCULTACIÓ DEL TERRENY GB-SAR i DInSAR



**Legend**

Sallent 1992-2006	○ -0.550554 - -0.214186	— mina_ern_polyline
Velocity (cm/year)	○ -0.214185 - -0.077284	
	● -1.771637 - -1.101845	● -0.077283 - 0.022386
	○ -1.101844 - -0.550555	

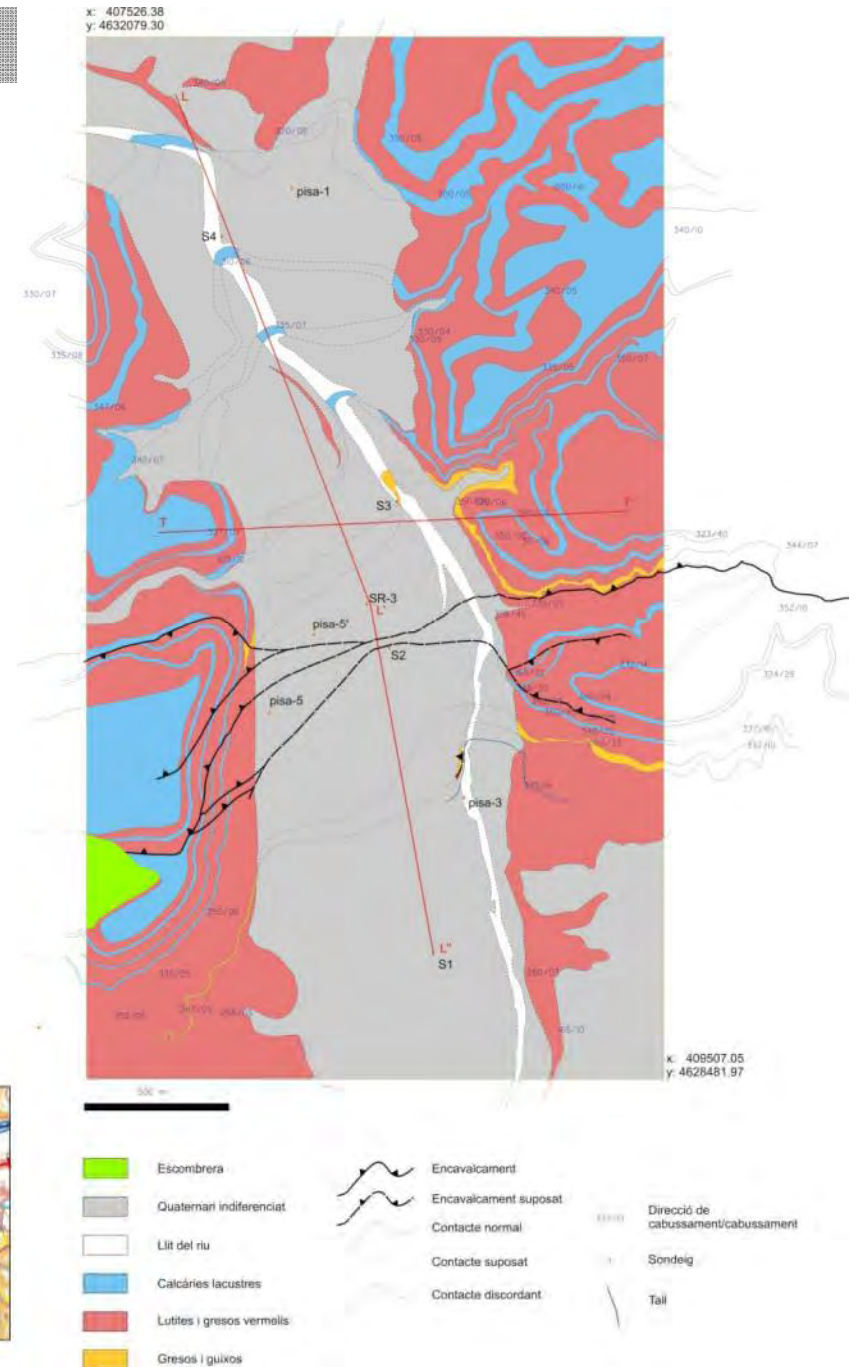
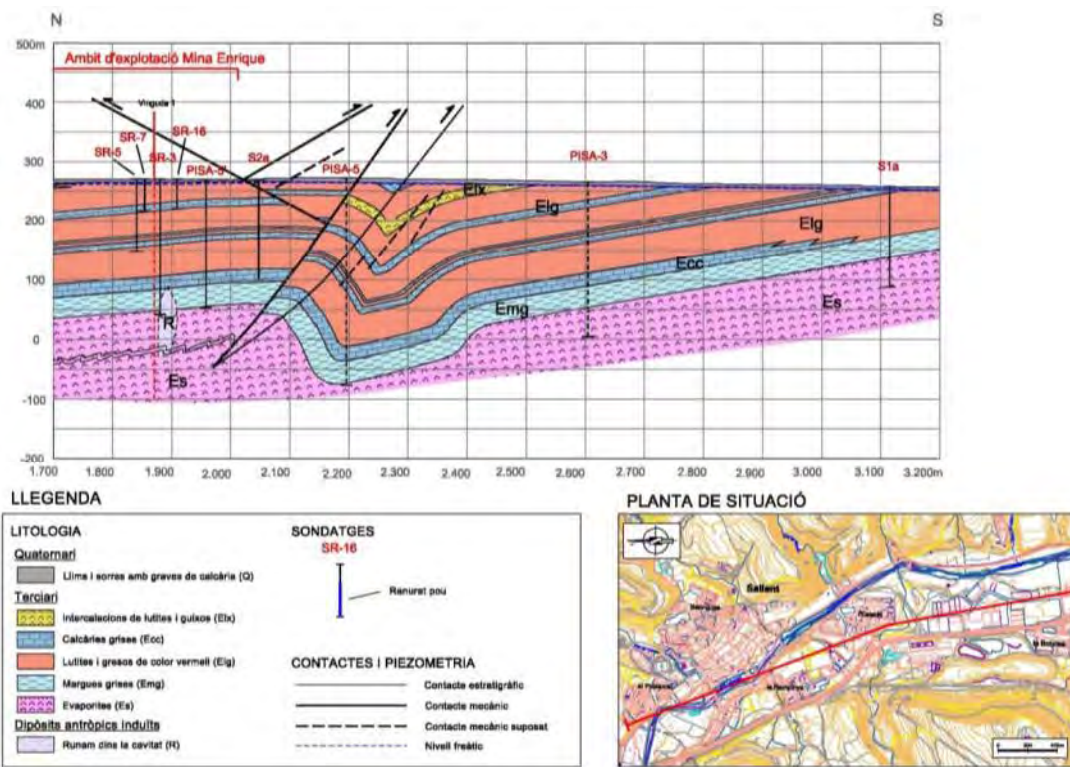




## ESTUDI GEOLÒGIC

### Cartografia geològica 1/5000

### Distribució de las Unitats y Estructures Geològiques









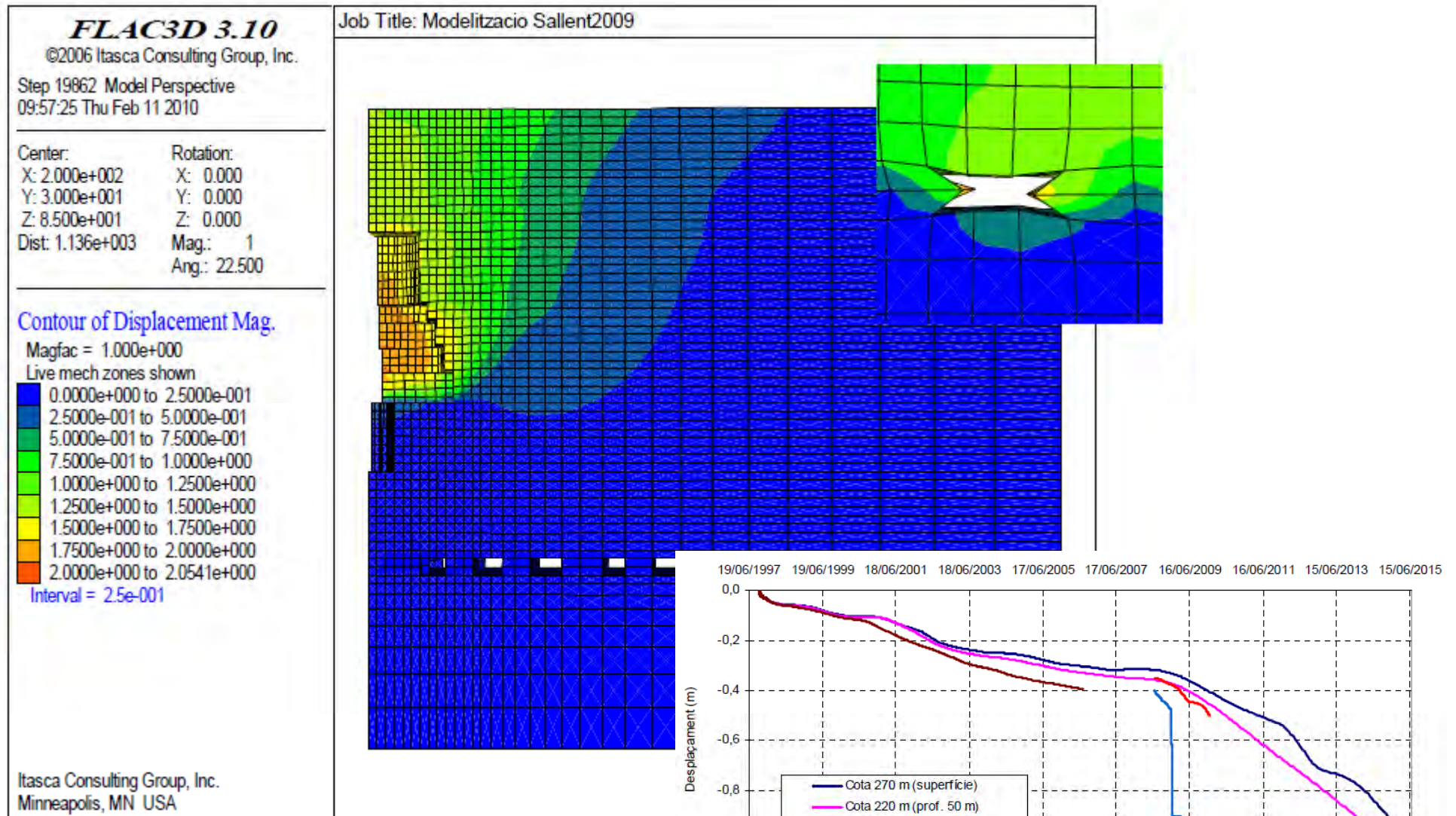


Figura 63. Contorn de desplaçaments final

Figura 51. Comparació de l'evolució de la deformació mesurada en profunditat en els extensòmetres SR-11 i SR-12 i els mateixos punts del model.

## Conclusions

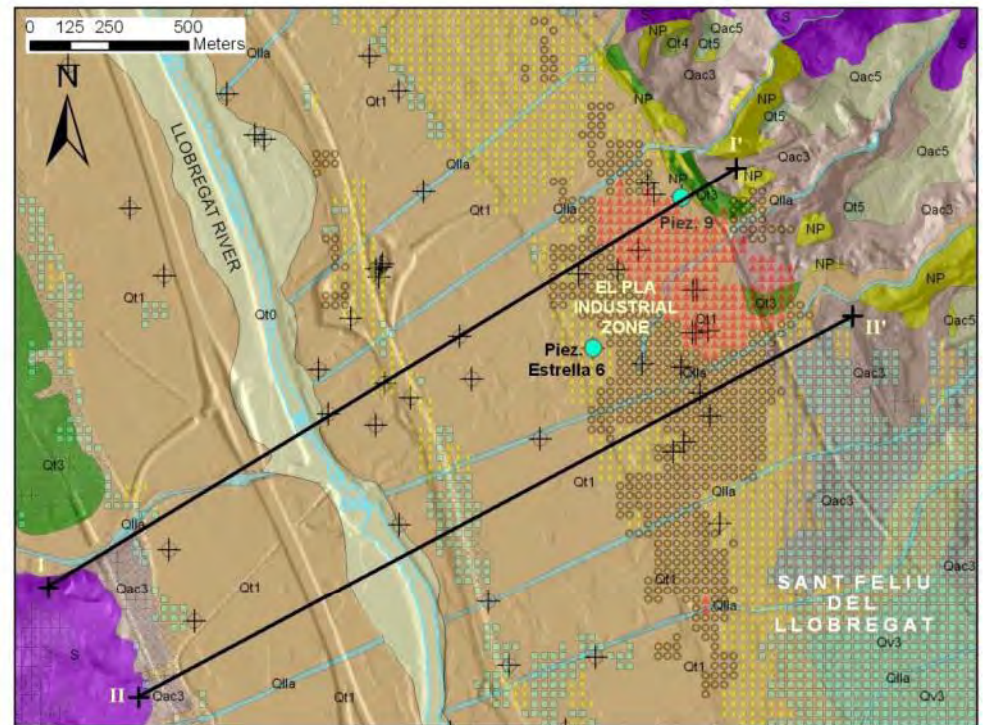
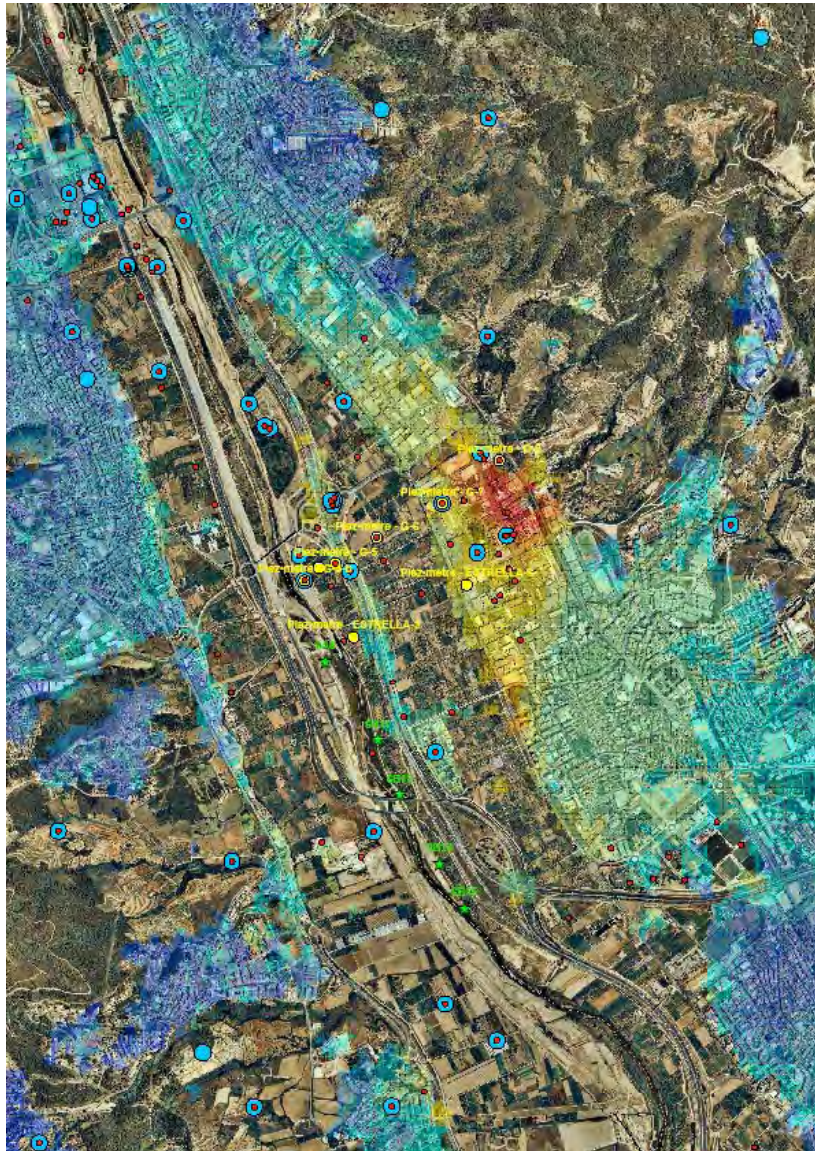
- La tècnica DInSAR ha permès delimitar la zona de deformació més enllà de les xarxes de control clàssiques.
- El catàleg imatges històriques ERS-ENVISAT (des del 1992 ) ha permès identificar l'existència de deformacions prèvies a la implementació de la xarxa de d'anivellació (1997).
- S'ha pogut constatar una bona correlació entre les mesures obtingudes per les tècniques DInSAR i GBSAR. i xarxes d'anivellació d'alta precisió
- La combinació del coneixement geològic del subsòl i les mesures de deformació en models numèrics permeten avaluar possibles escenaris evolutius del fenomen que generen els moviments verticals del terreny



# Deformació per extracció d'aigua en zones urbanes

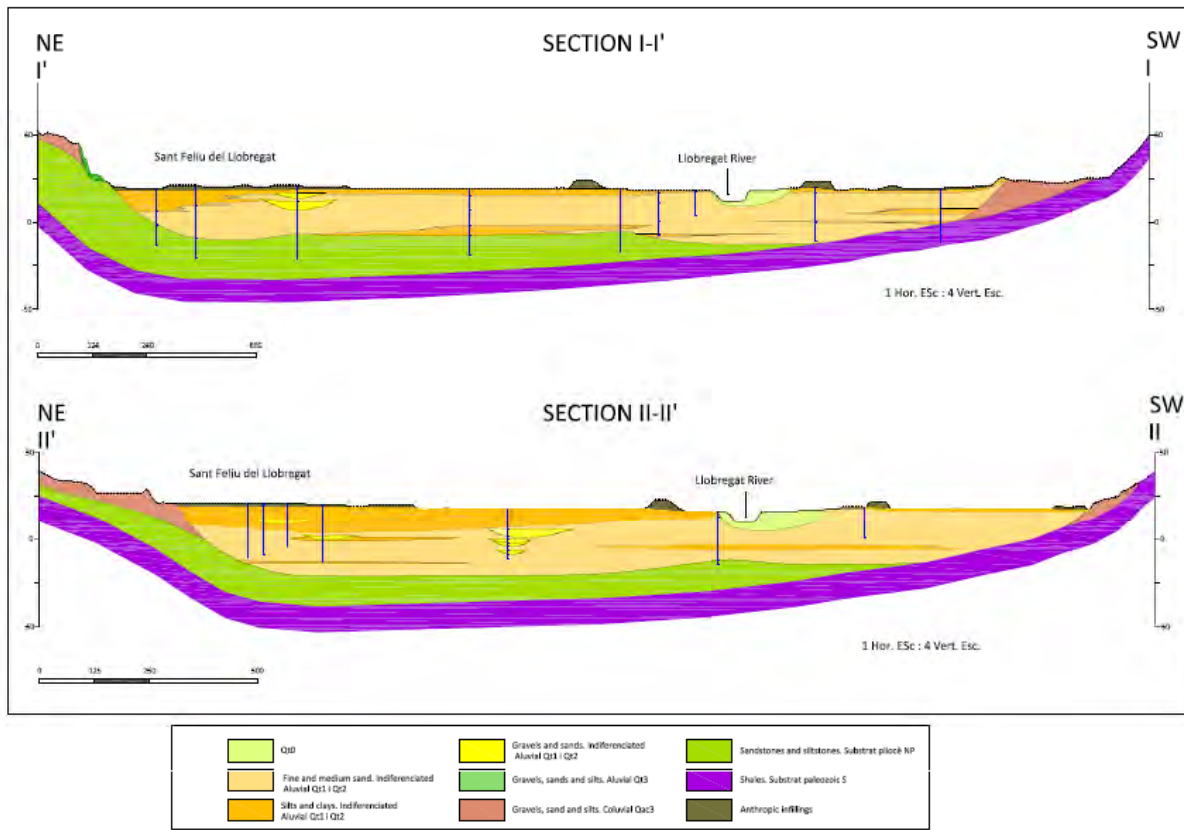
## Cas d'estudi: Sant Feliu del Llobregat





DInSAR Deformation rates (cm/any)		Geological Units	
▲	-0.70 - -0.44	□	-0.14 - -0.04
●	-0.44 - -0.27	×	-0.04 - 0.03
◆	-0.27 - -0.14	⊕	0.03 - 0.41
+	Water Wells	S	Siluric Shales
—	Llobregat River	NP	Conglomerates, breccias, sandstones and shales from Upper Miocene-Lower Pliocene
—	Geological Section	Qac (1-5)	Colluvial and alluvial gravels, sands and silts related to Qt deposits. Lower Pleistocene- Middle Pleistocene
●	Piezometers for comparison	Qt (1-3) and Qv3	Gravel, sands and silts of Llobregat river terraces Upper Pleistocene cene-Holocene
		Qlla	Actual river beds
		Qt0	Present day Llobregat river deposits

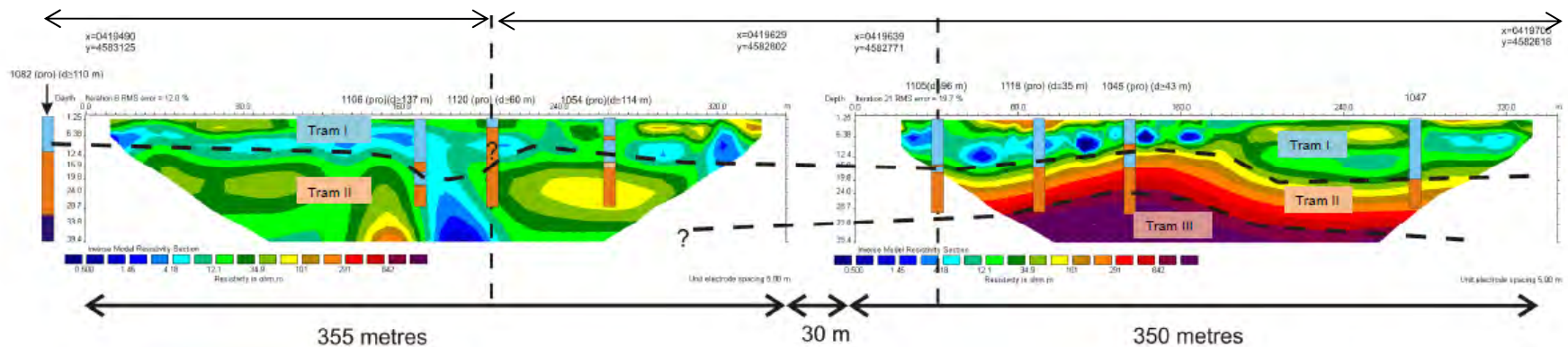




*Correlació de perfils ERT amb sondejos geotècnics i talls geològics a la zona de màxima deformació:*  
**TRAM I, Argiles i llims;**  
**TRAM II: Sorres i graves amb matriu llimosa gravels;**  
**TRAM III: graves cementades**

Most intense subsidence (0.7-0.44 cm/any)

Subsidence (0.44-0.27 cm/any)



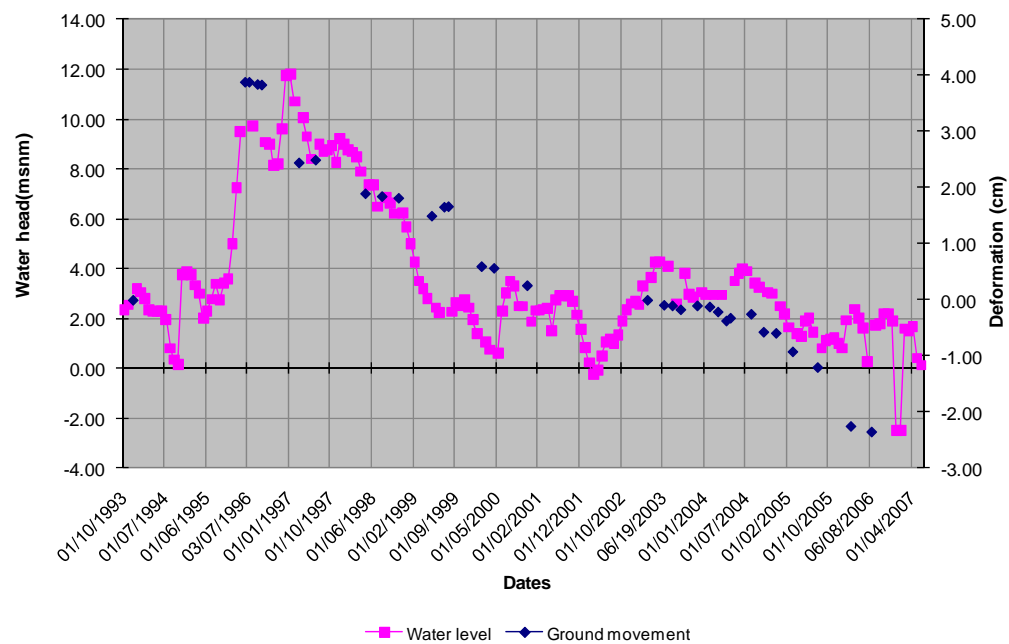


## Correlació de deformació DInSAR i evolució piezométrica

Comparació Deformació Punt ID10228 vs. Piezomètre Estrella 6

*Corbes isovalors piezomètrics del aqüífer superior del Llobregat (msnm) a la zona de màxima subsidència*

*Correlació temporal entre valors piezomètrics al piezometre Estrella 6 i el punt de deformació DInSAR més proper*

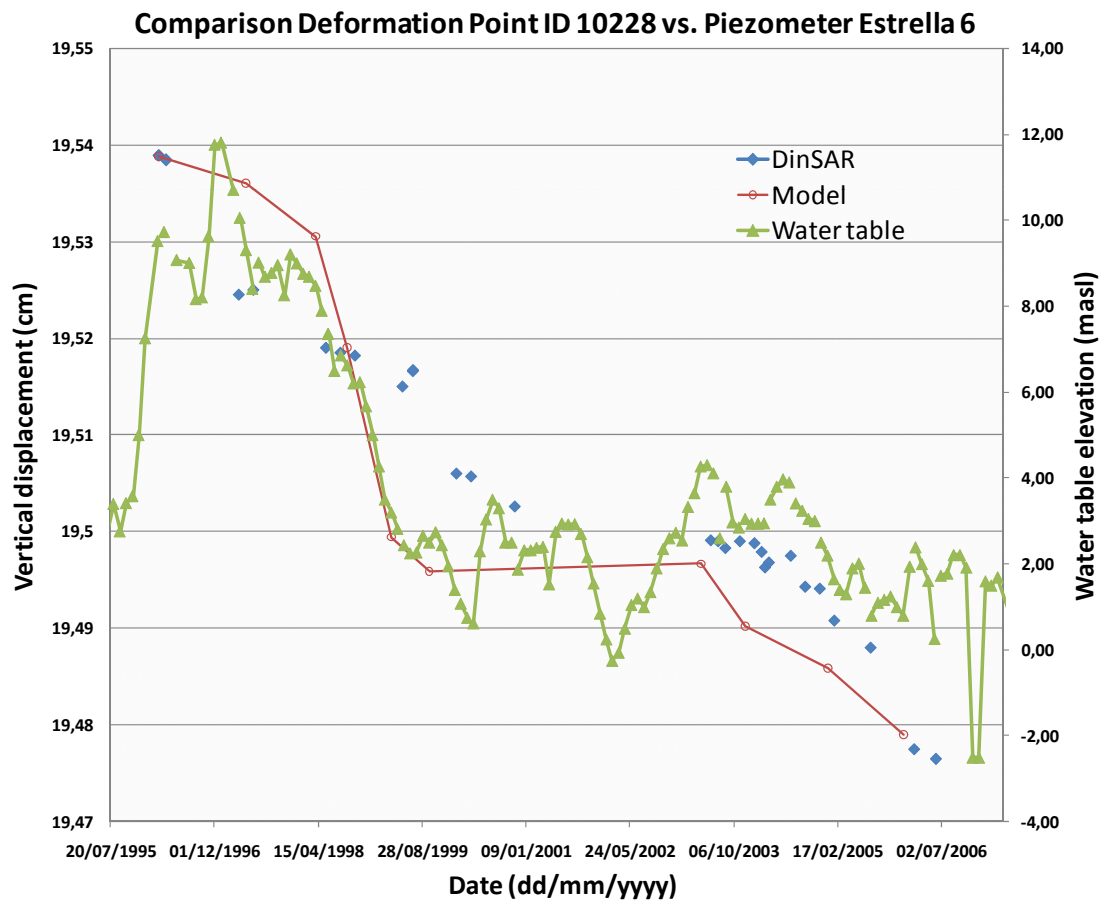




## Anàlisi 1D. Consolidació de la columna litològica .

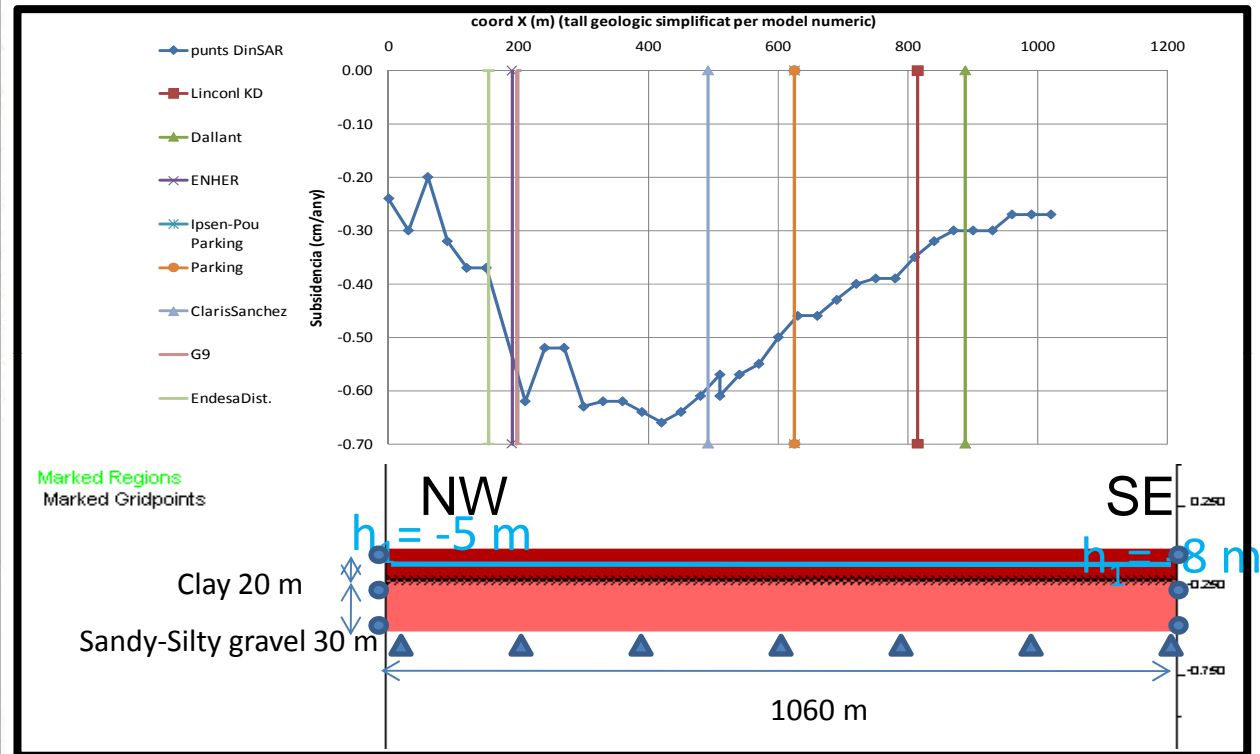
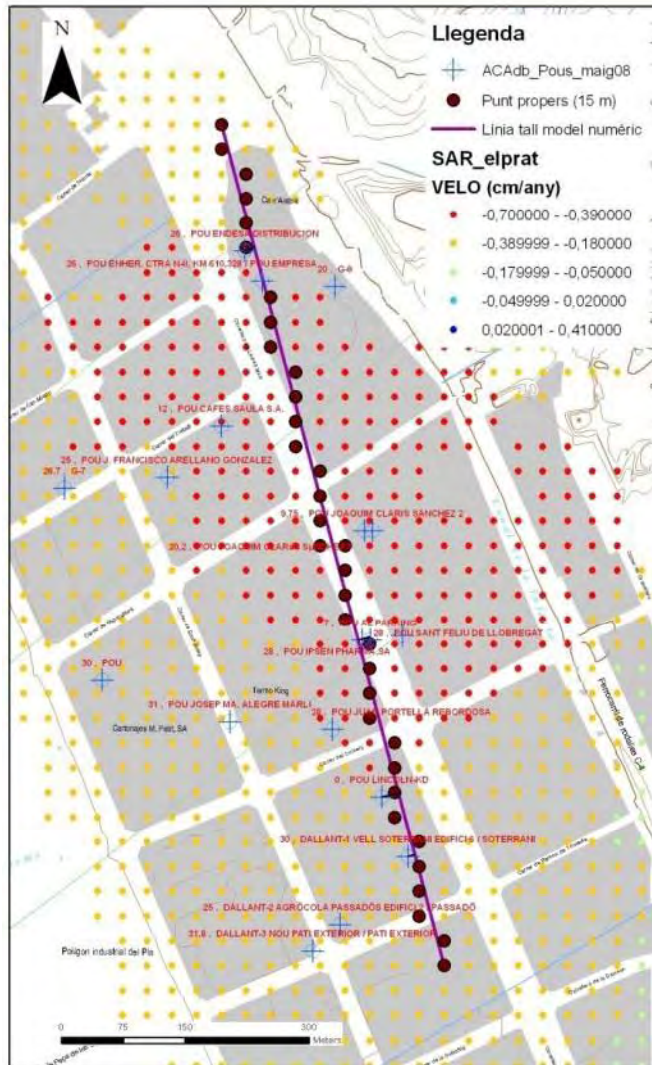
Aquest anàlisi considera 10 etapes de decrement del nivell piezomètric per a calcular los canvis diferencials de gruix de la capa d'argiles.

La deformació en superfície considera els canvi en gruix i es comparada amb la deformació mesurada en el punt més proper al piezòmetre considerat (piezòmetre Estrella 6).



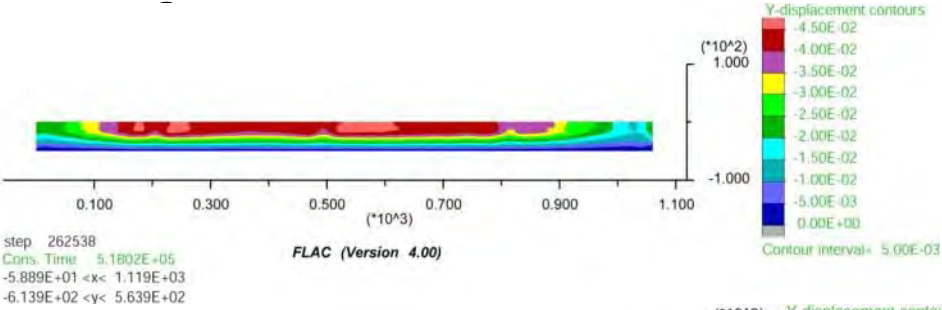
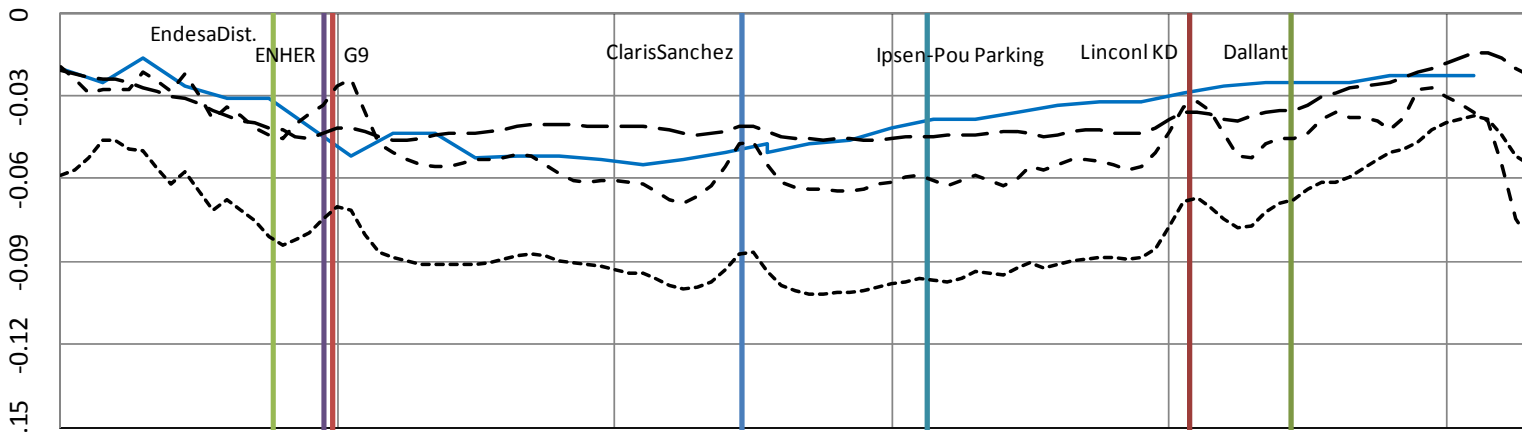
Parameter	Value	Units
Dry density, $g_d$	17.50	KN/m <sup>3</sup>
Porosity, $n$	0.55	--
Initial void ratio, $e_0$	0.562	--
Compression Index, $C_c$	0.130	--
Swelling Index, $C_s$	0.012	--

## Analisi 2D. Model acoplat flux d'aigua-deformació

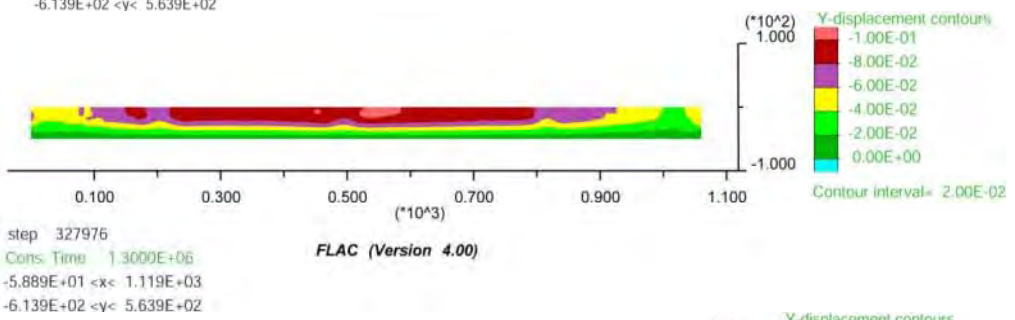




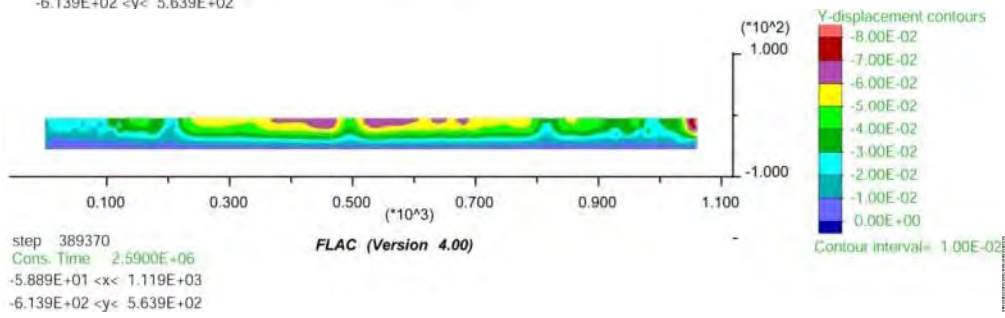
— punts DinSAR    
 - - - 6 days    
 - - - - - 15 days (turn off pumping)    
 - - - - - 1 month model



6 dies



15 dies (parada de bombament)



30 days.

## Conclusions

- La tècnica DinSAR ha permès identificar noves àrees amb deformacions del terreny en zones urbanes/industrials provocades per l'extracció d'aigua.
- La xarxa de control establerta ha permès validar els resultats obtinguts
- L'anàlisi de l'evolució dels nivells piezomètrics ha permès corroborar la hipòtesis de l'extracció d'aigua com a causa principal de les deformacions del terreny.
- L'aplicació d'un model 1D ha permès establir el mecanisme de consolidació del terreny per extracció d'aigua .
- L'aplicació d'un model 2D acoblat geològic-hidrogeològic ha permès modelar la zona de màxima deformació estimant els cabals extrems.



**Moltes gràcies !**