

Idrogeofisica

tecniche non invasive a supporto della caratterizzazione idrologica ed idrogeologica del sottosuolo

Giorgio Cassiani e Rita Deiana



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

Dipartimento di Geoscienze

Università di Padova

giorgio.cassiani@unipd.it

rita.deiana@unipd.it

Idrologia e tematiche ambientali

Alluvioni

Instabilità dei versanti montani

Contaminazione dei suoli e delle acque

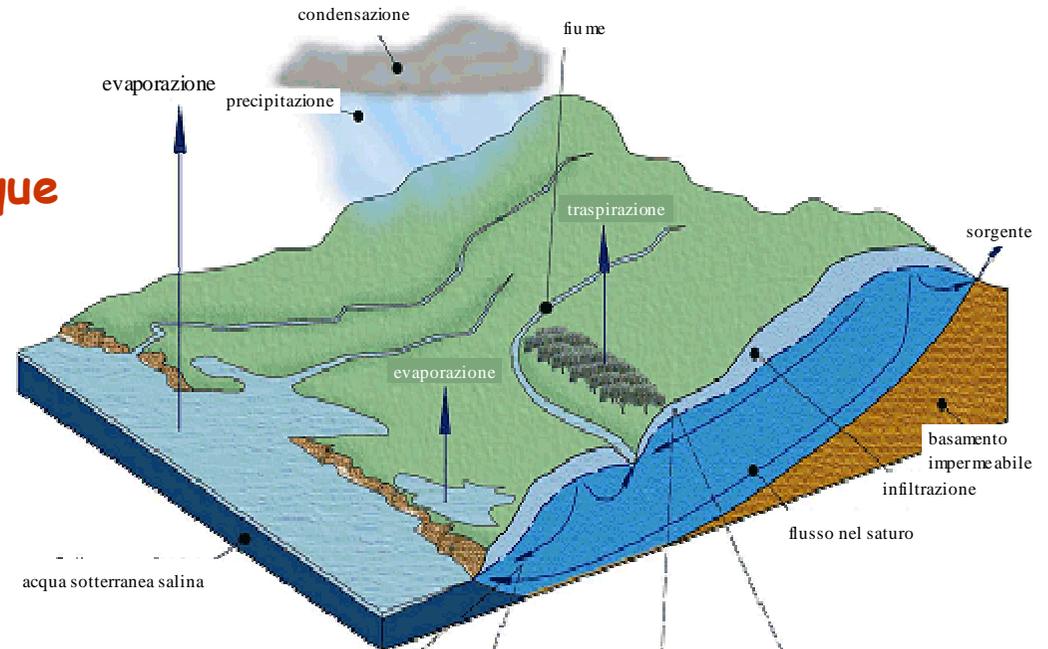
Impatto sul clima

L'acqua nel sottosuolo

trasporta energia

modifica lo stato di stress

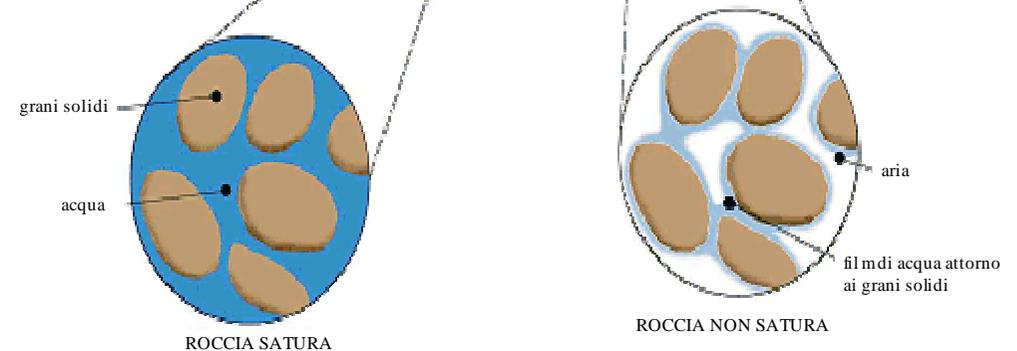
trasporta contaminanti



Idrologia
(fluidodinamica ambientale)

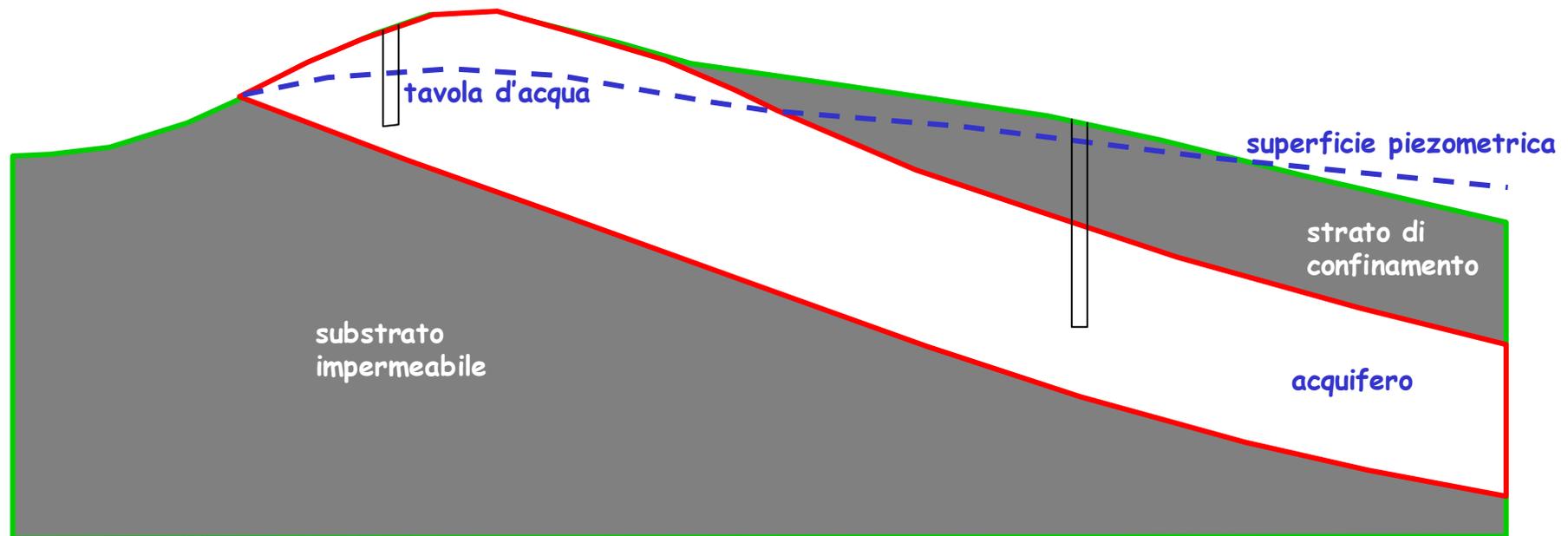


Geofisica
(idro-geofisica)



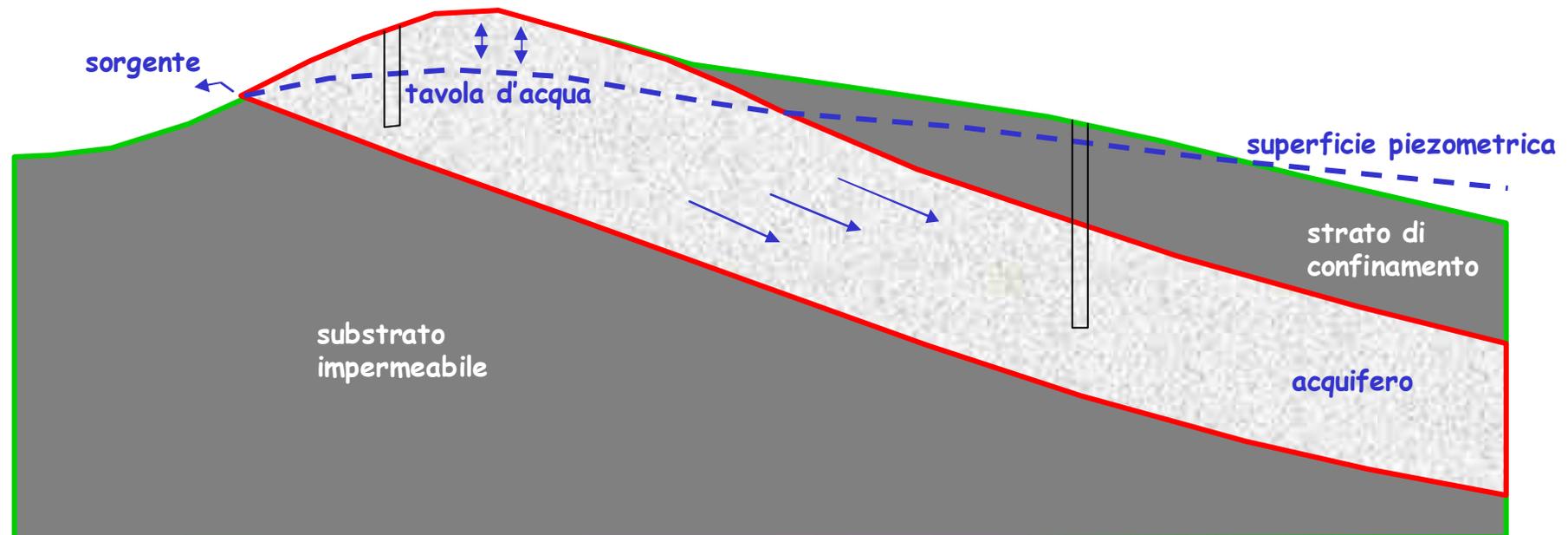
Aspetti del problema ambientale:

- struttura



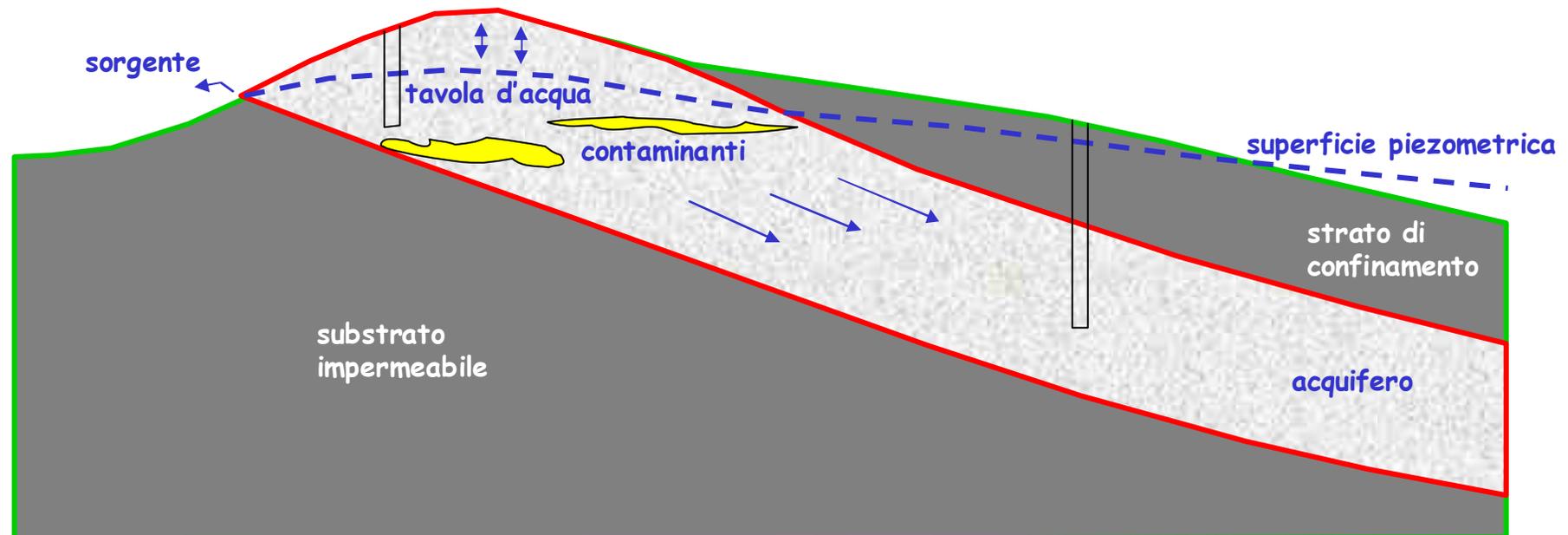
Aspetti del problema ambientale:

- struttura
- dinamica dei fluidi



Aspetti del problema ambientale:

- struttura
- dinamica dei fluidi
- presenza di contaminanti





che può fare
la **Geofisica**
in tutto
questo?



Sommario

- ❑ **Gli strumenti dell'idrogeofisica**

- ❑ **Esempi:**
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona non satura
 - Monitoraggio idrogeofisico di pendii montani
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona satura

- ❑ **Conclusioni e prospettive**

Sommario

□ Gli strumenti dell'idrogeofisica

□ Esempi:

- Caratterizzazione idrogeofisica della zona non satura
- Monitoraggio idrogeofisico di pendii montani
- Caratterizzazione idrogeofisica della zona satura

□ Conclusioni e prospettive

PROPRIETA' FISICHE UTILIZZATE NEI METODI GEOFISICI

- ❑ **sismica**: moduli elastici e densità
- ❑ **gravimetria**: densità
- ❑ **metodi magnetici**: suscettività e magn. permanente
- ❑ **geoelettrica**: conduttività elettrica
- ❑ **metodi elettromagnetici**: conduttività elettrica
- ❑ **polarizzazione indotta**: conduttività elettrica complessa
- ❑ **potenziale spontaneo**: conduttività elettrica e sorgenti
- ❑ **ground penetrating radar**: costante dielettrica

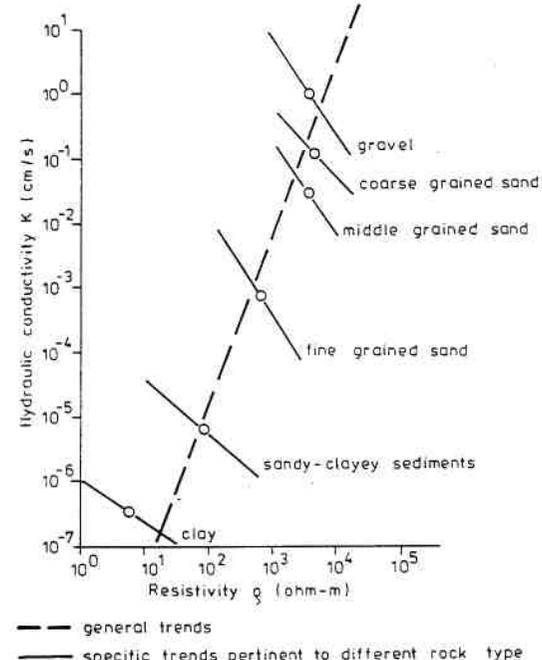
PROPRIETA' FISICHE UTILIZZATE NEI METODI GEOFISICI

- ❑ **sismica**: moduli elastici e densità
- ❑ **gravimetria**: densità
- ❑ **metodi magnetici**: suscettività e magn. permanente
- ❑ **geoelettrica**: conduttività elettrica
- ❑ **metodi elettromagnetici**: conduttività elettrica
- ❑ **polarizzazione indotta**: conduttività elettrica complessa
- ❑ **potenziale spontaneo**: conduttività elettrica e sorgenti
- ❑ **ground penetrating radar**: costante dielettrica

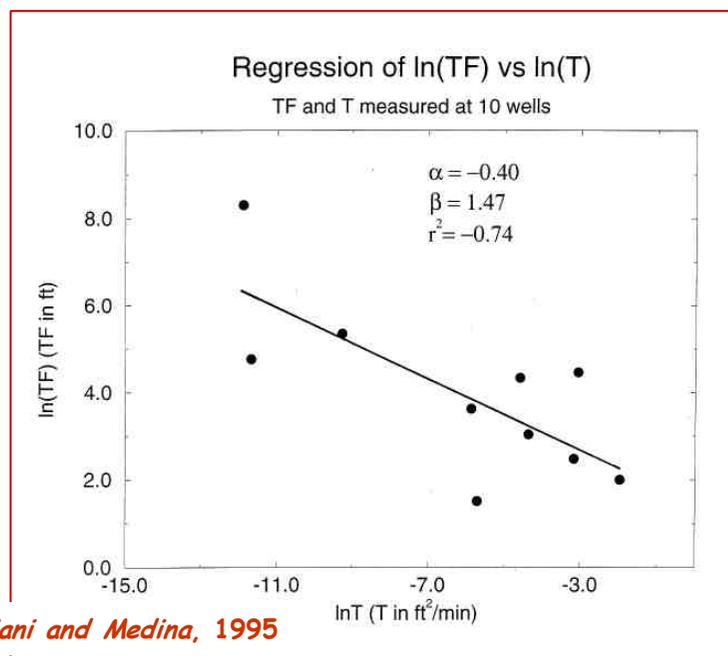
(proprietà direttamente modificate dalla presenza d'acqua)

Due approcci:

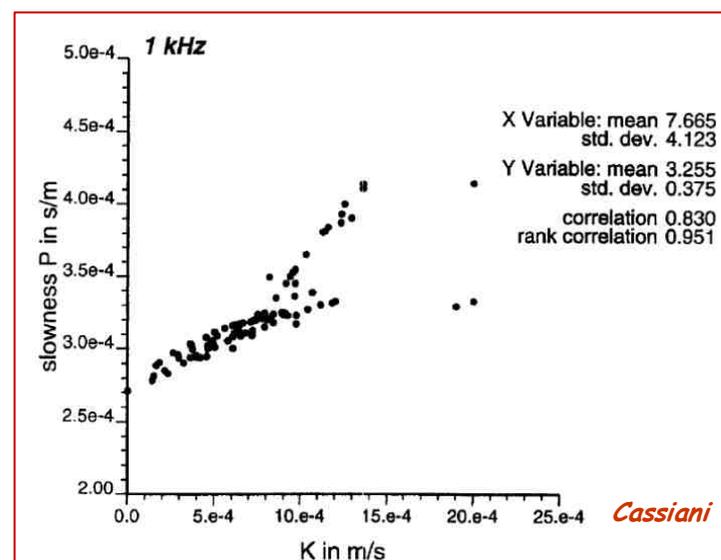
- 1) **relazioni dirette** tra grandezze geofisiche (p.es. velocità sismica, resistività elettrica) e grandezze idrologiche (p.es. conduttività idraulica)



Mazac et al., 1985



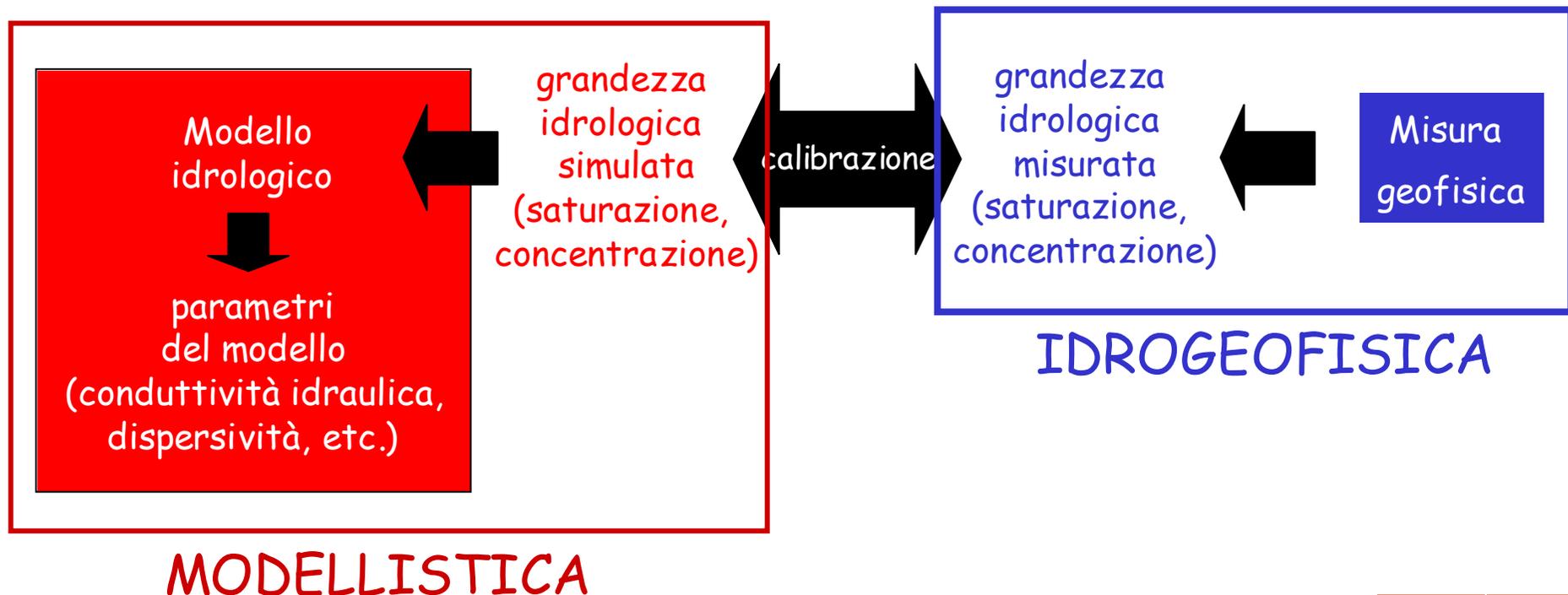
Cassiani and Medina, 1995



Cassiani et al., 1998

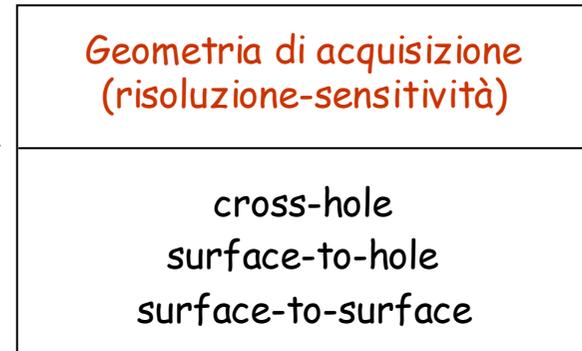
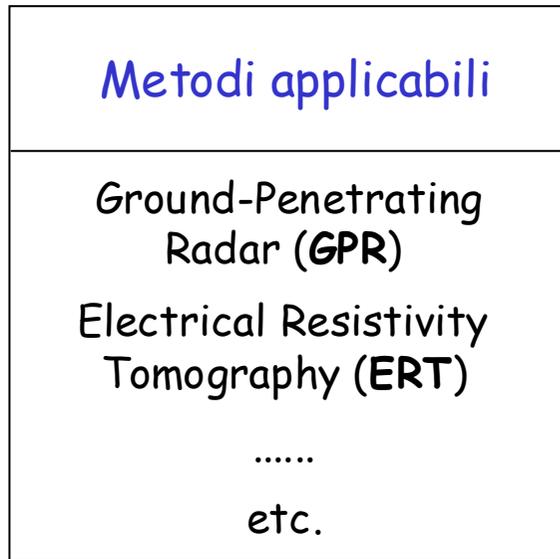
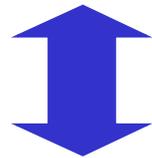
Due approcci:

- 2) **calibrazione di modelli idrologici sulla base di misure geofisiche, attraverso:**
- contenuto idrico nel non saturo
 - resistività / salinità nel saturo





IDROGEOFISICA



Ground-Penetrating Radar (GPR)

Viene usata una sorgente di onde elettromagnetiche a frequenze di **10-1000 MHz**.

In questo range di frequenza, la velocità di propagazione v dipende solo dalla costante dielettrica del mezzo κ .

Se c è la velocità della luce nel vuoto:

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}}$$

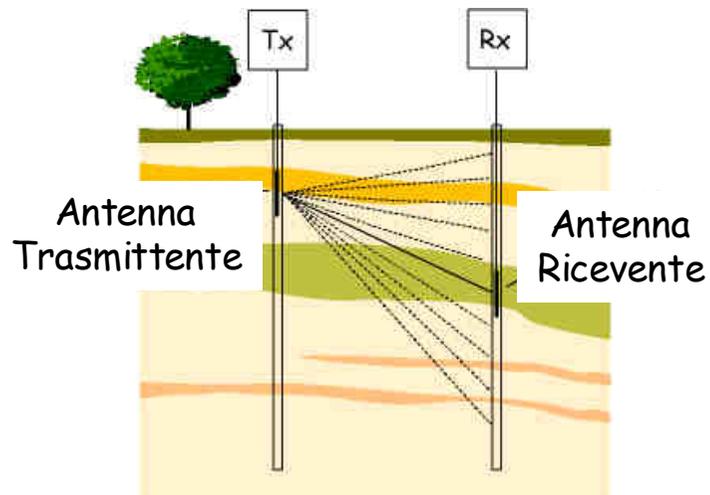
L'ampiezza del segnale ricevuto dipende dalla conduttività elettrica del mezzo. La penetrazione supera di rado i 10 m.



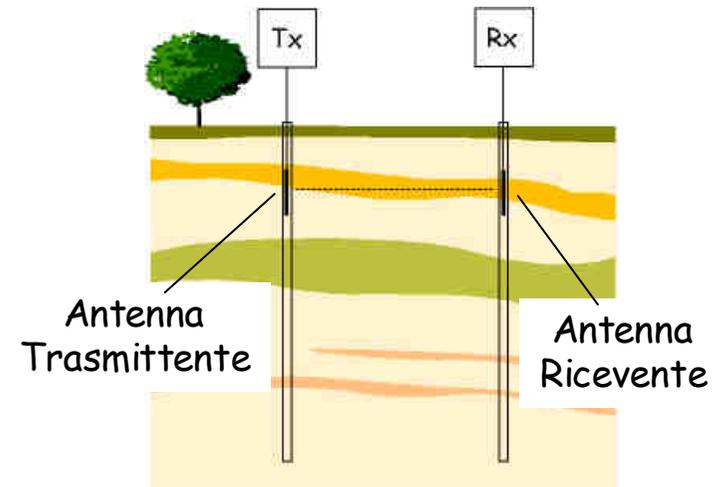
Cross-Hole GPR

- gli strati conduttivi del suolo superficiale sono by-passati
- la velocità si determina con facilità

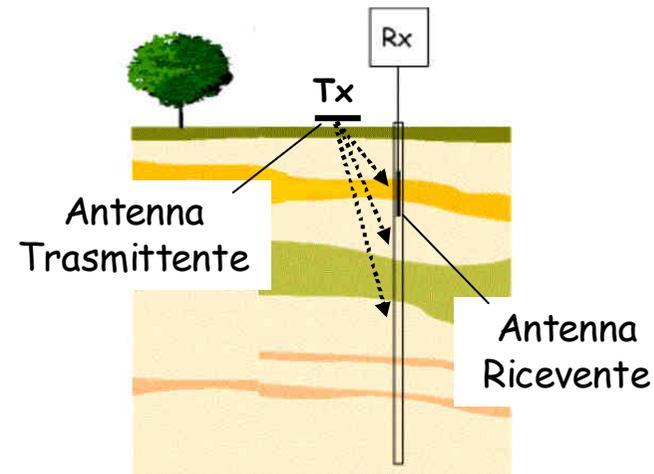
Multiple Offset Gather (MOG)



Zero Offset Profile (ZOP)



Vertical Radar Profiles (VRP)



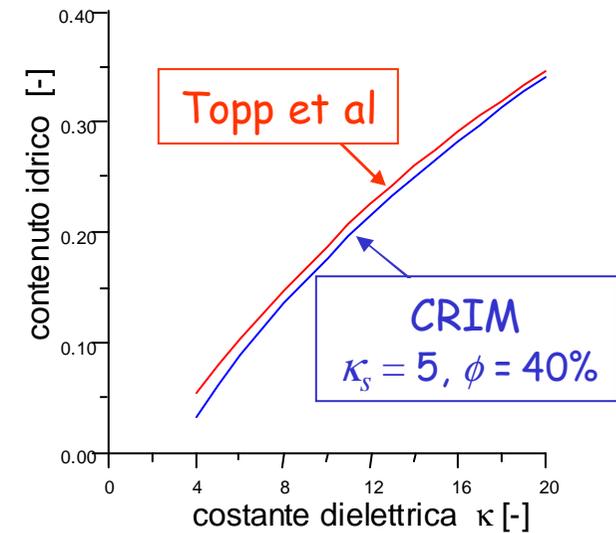
Relazioni tra contenuto idrico e costante dielettrica

Complex Refractive Index Model (CRIM):

$$\sqrt{\kappa} = (1 - \varphi)\sqrt{\kappa_s} + \theta\sqrt{\kappa_w} + (\varphi - \theta)\sqrt{\kappa_a}$$

Topp et al., [1980]:

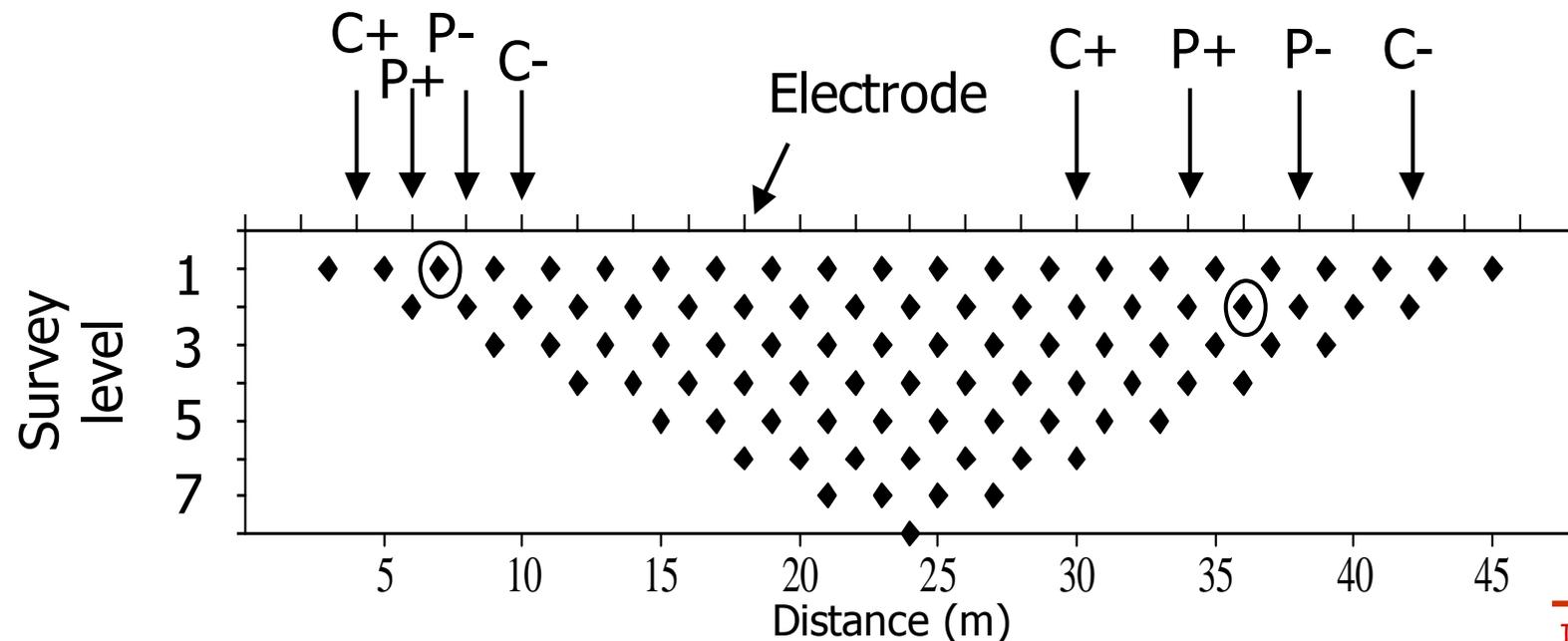
$$\theta = \left(-530 + 292 \kappa - 5.5 \kappa^2 + 0.043 \kappa^3\right) \times 0.0001$$



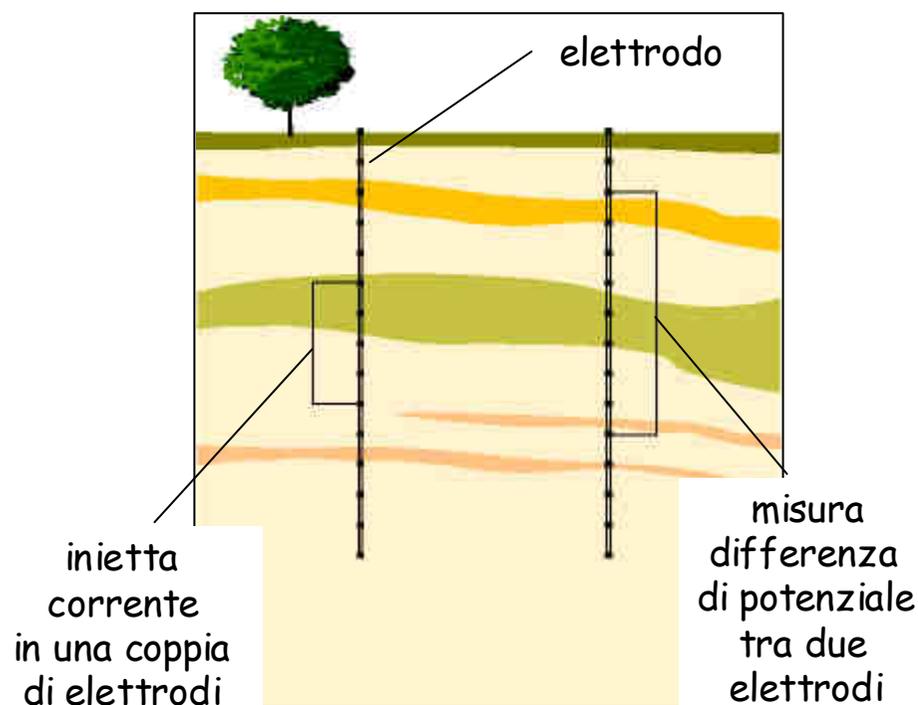
Tomografia di resistività elettrica

Lo sviluppo di strumenti multi-elettrodo ha reso possibile la ricostruzione di immagini 2D e 3D di resistività del sottosuolo.

Diverse combinazioni di array sono possibili nella stessa sequenza, variando la profondità di investigazione.



Geoelettrica da foro



Cross Borehole
Electrical Resistivity
Tomography (ERT)

Alle limitazioni della geoelettrica da superficie si può ovviare con misure in foro, con cavi ed elettrodi assicurati a casing non metallico, o immersi sotto la tavola d'acqua.

Si misura ΔV in un gran numero di configurazioni possibili.

Si mantiene una risoluzione adeguata anche in profondità

Si evita l'effetto di strati conduttivi nel suolo superficiale

Relazione della resistività con il contenuto idrico e la salinità dell'acqua

La classica relazione empirica è la legge di Archie [1942]:

$$\sigma_b = \sigma_w \phi^m S_w^n + \sigma_s$$

σ_b = conduttività bulk

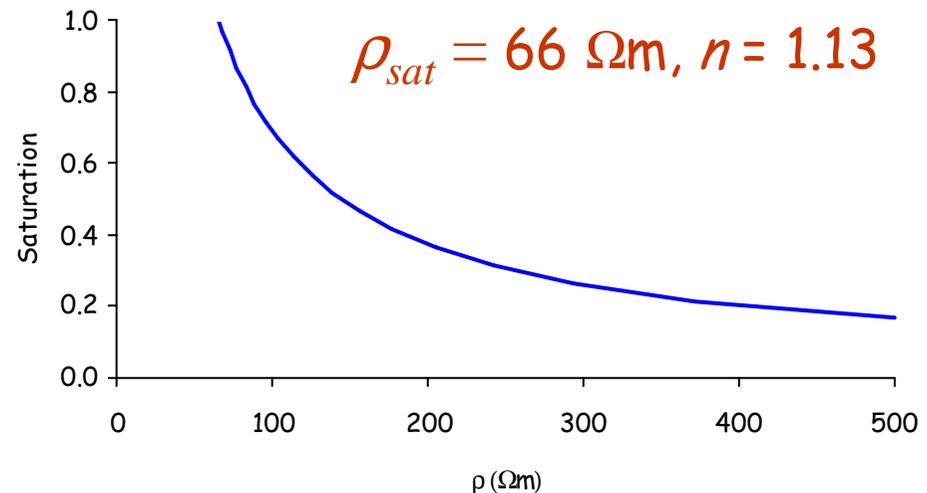
σ_w = conduttività dell'acqua che satura i pori

ϕ = porosità

S_w = saturazione in acqua

σ_s = conduttività superficiale de

n ed m sono parametri della formazione

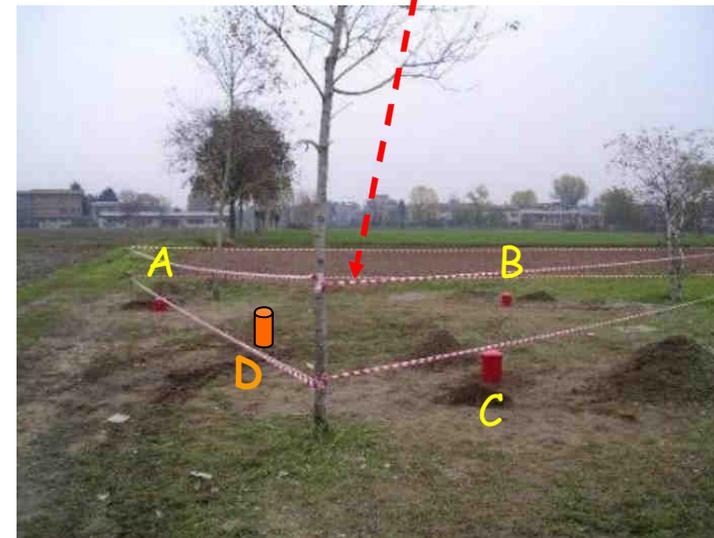
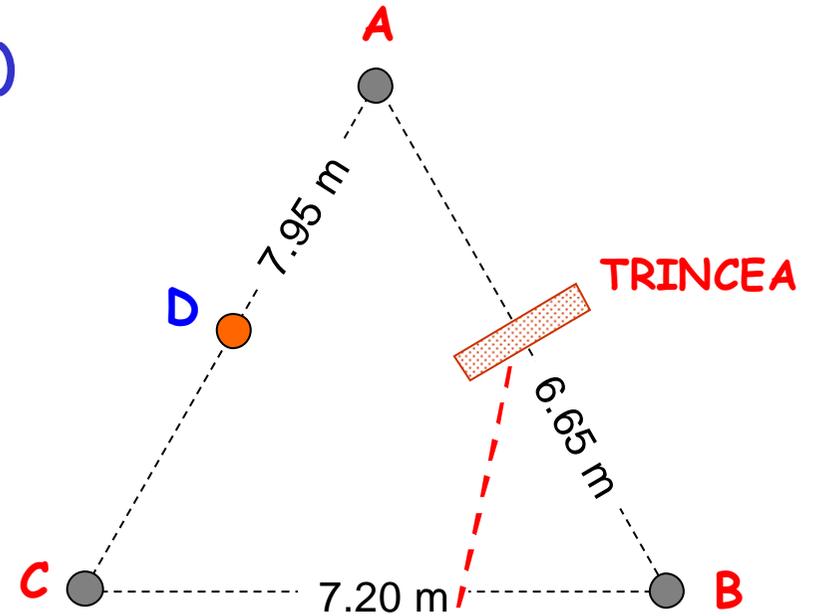


Sommario

- Gli strumenti dell'idrogeofisica
- Esempi:
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona non satura
 - Monitoraggio idrogeofisico di pendii montani
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona satura
- Conclusioni e prospettive

Il sito sperimentale di Gorgonzola (MI)

(Deiana et al., 2008, *Vadose Zone Journal*;
Deiana et al., 2007, *Near Surface Geophysics*)





Il sito sperimentale di Gorgonzola (MI)



24 elettrodi spazati 0.8 m

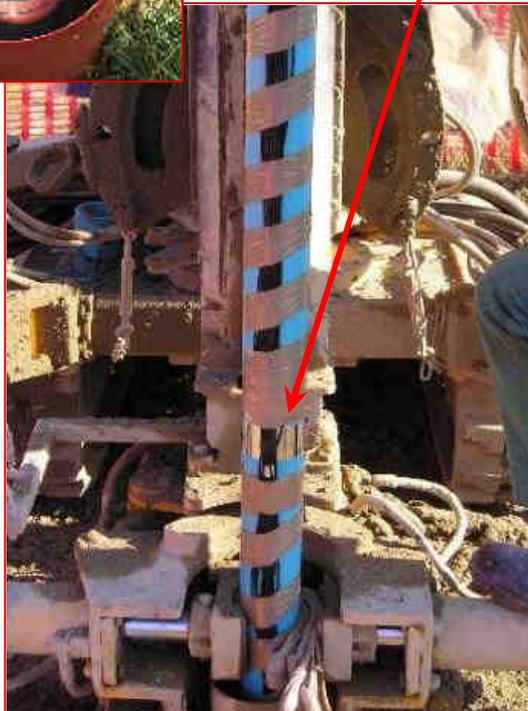
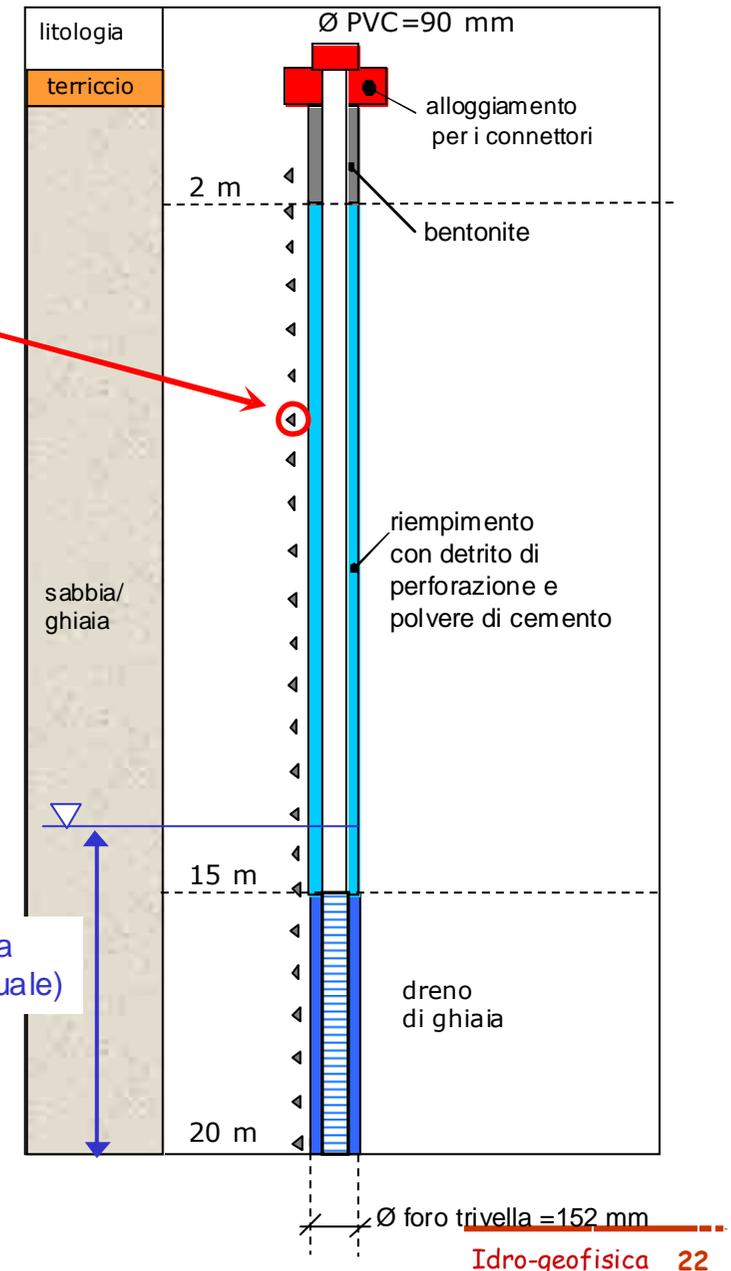
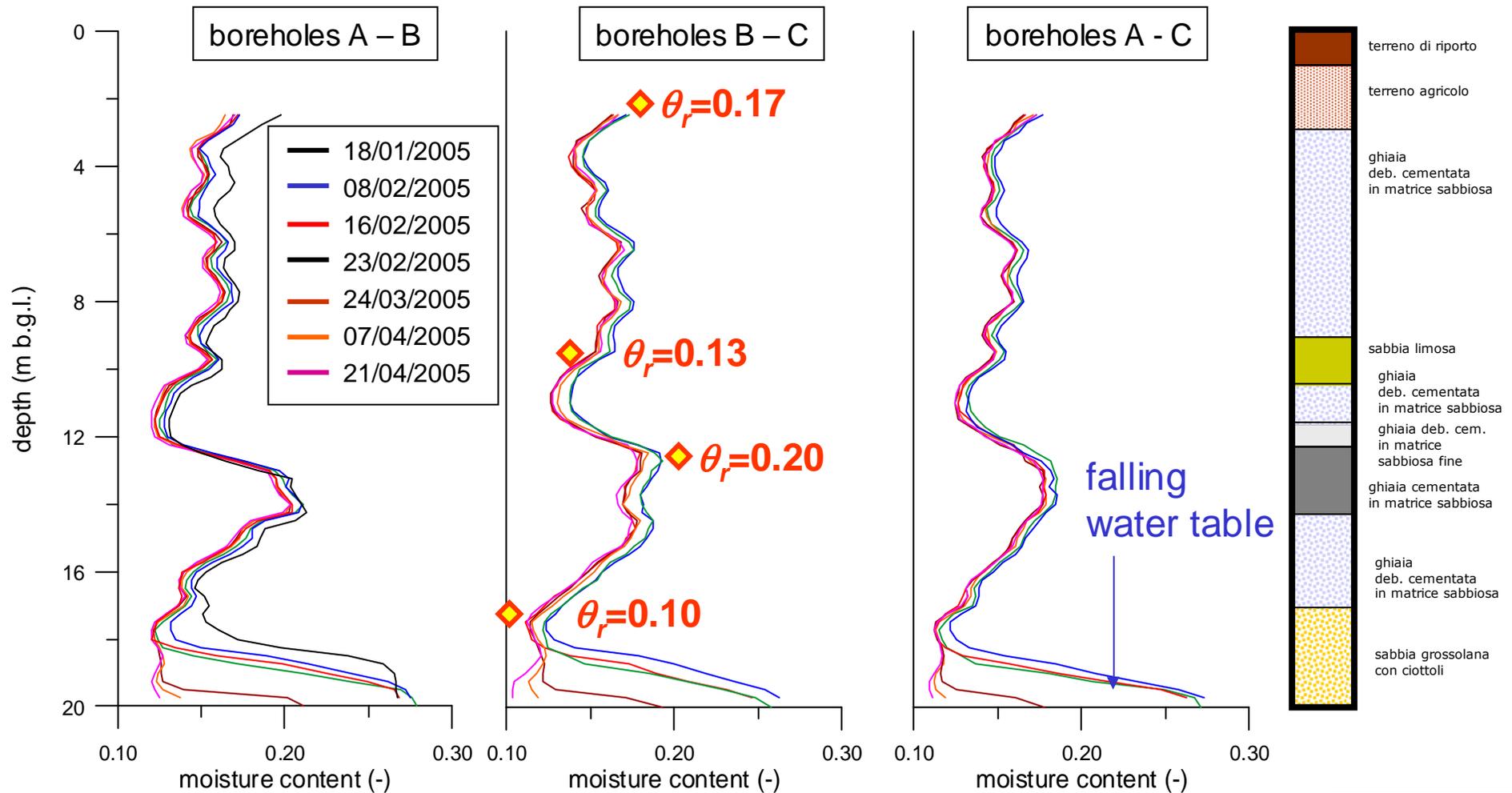
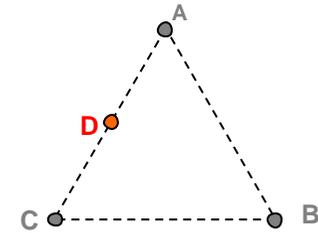


Tavola d'acqua (oscillazione annuale)



Misure di background: contenuto idrico da GPR ZOP

◆ valori di contenuto idrico residuo da laboratorio



Sito di Gorgonzola: esperimenti di iniezione d'acqua



primo esperimento (Luglio 2005):
3 m³ iniettati in 2 ore

secondo esperimento (Gennaio 2006):
22 m³ iniettati in 10 ore

terzo esperimento (Giugno 2007):
11 m³ iniettati in 6 ore

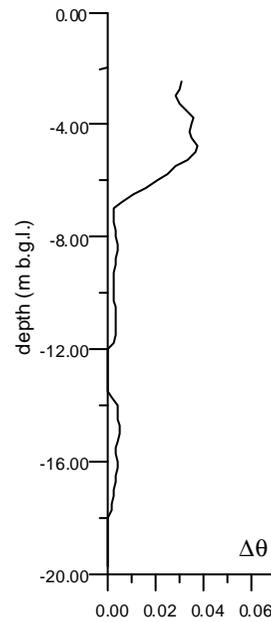


**3 ore
dall'iniezione**

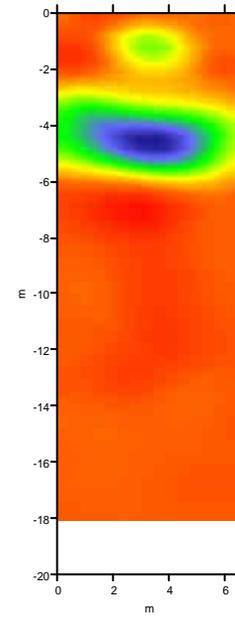
**Secondo
esperimento:**

**variazioni del
contenuto
d'acqua
rispetto al
background**

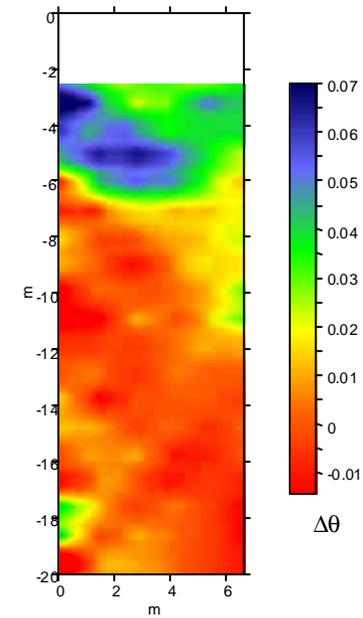
**45 ore
dall'iniezione**



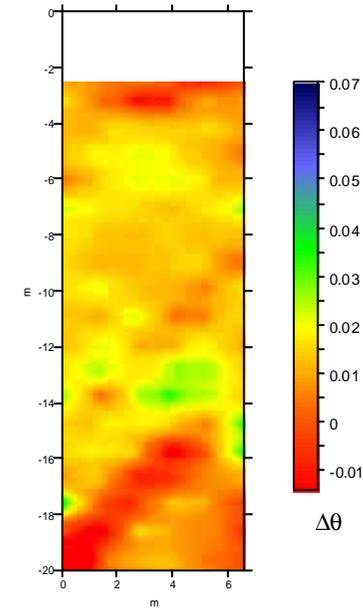
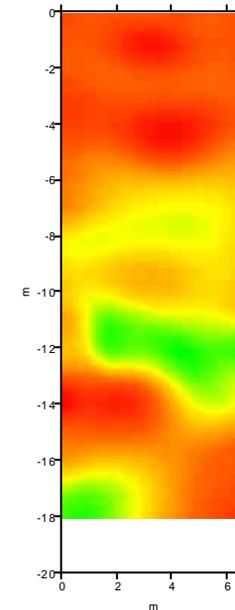
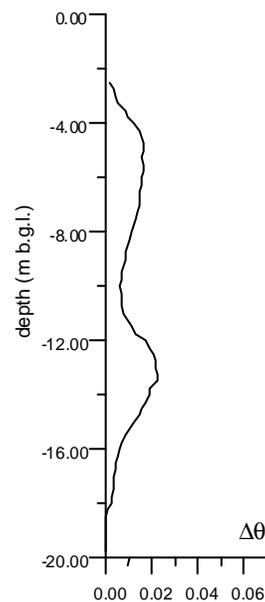
ZOP



ERT

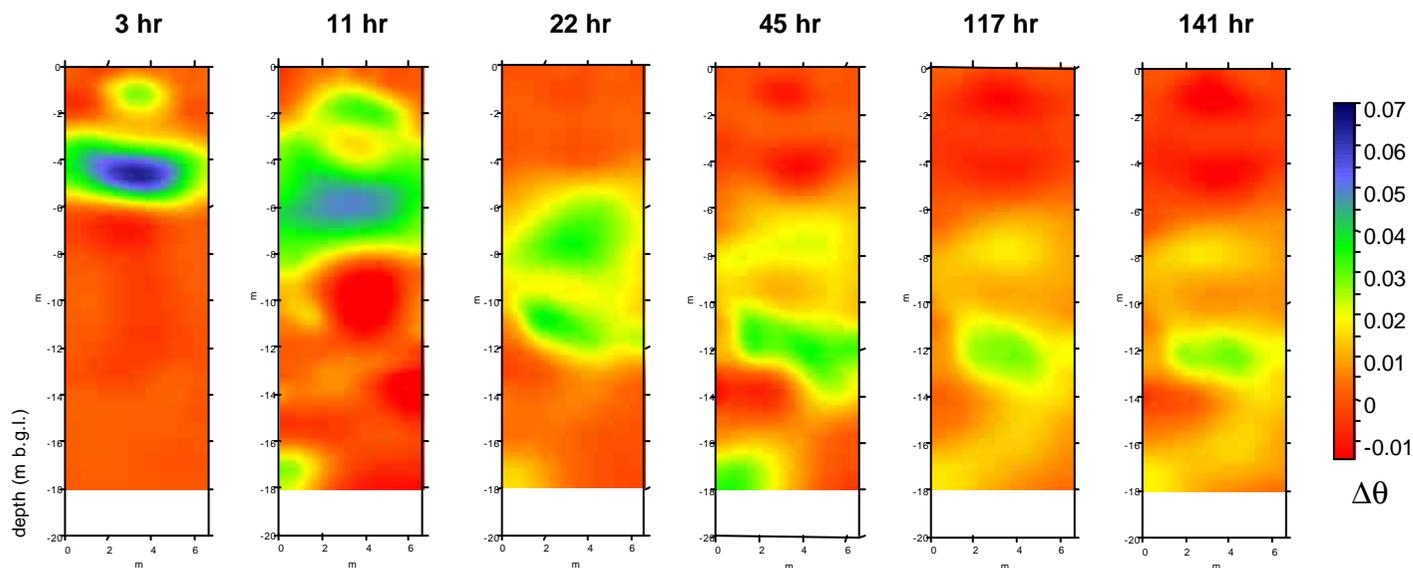


MOG

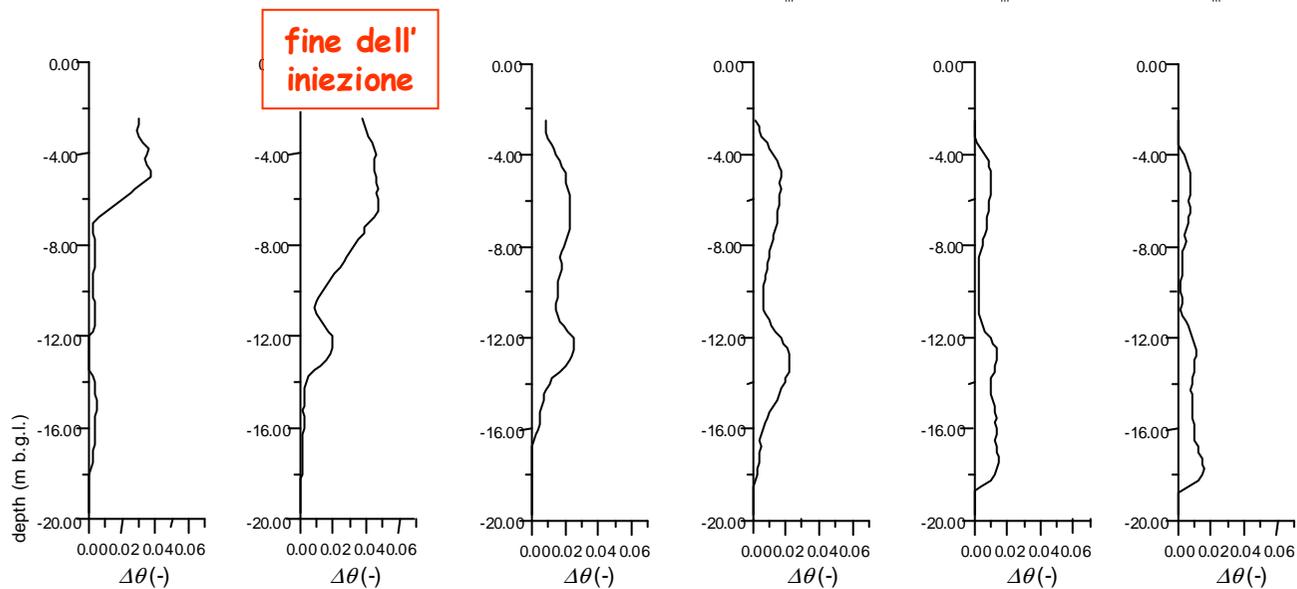




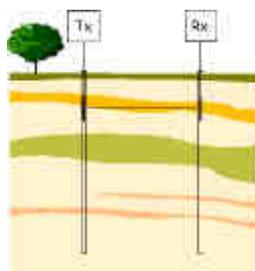
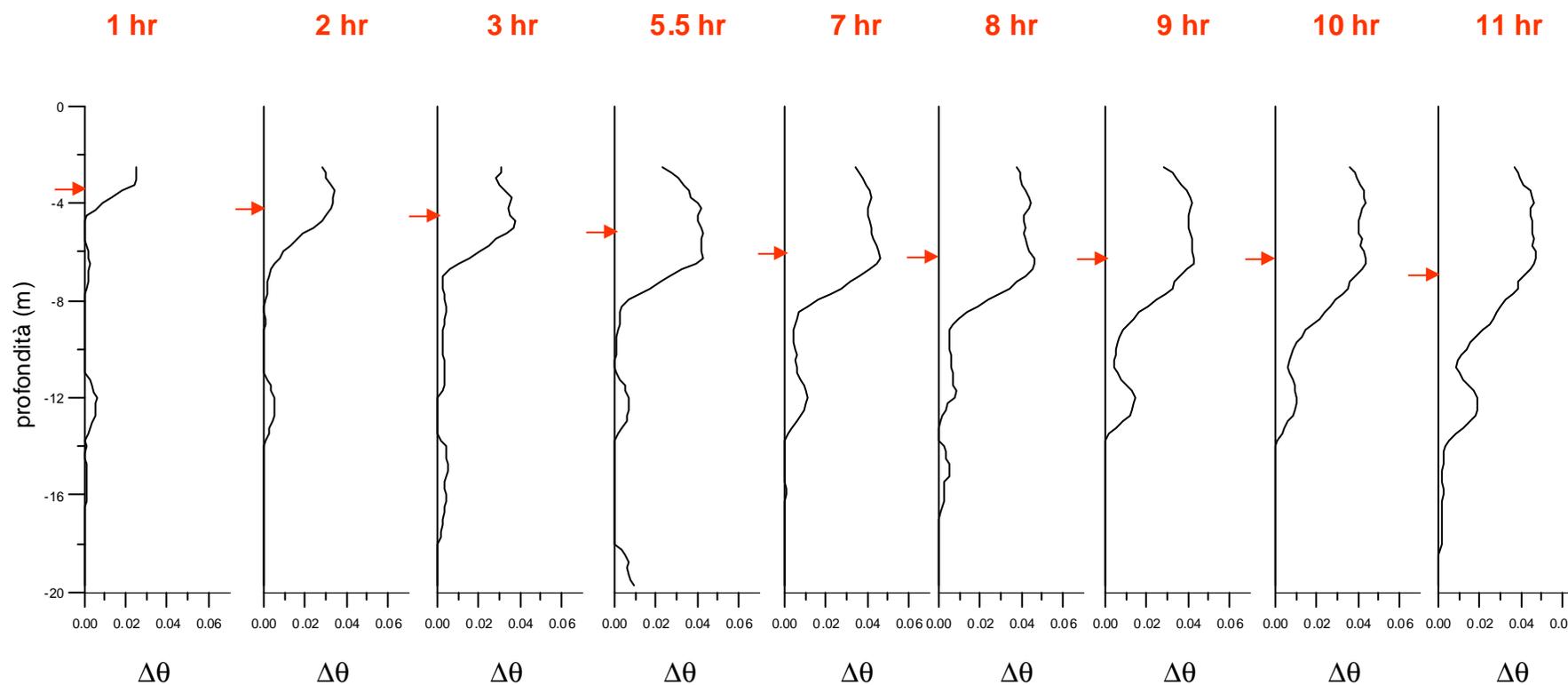
ERT



ZOP
GPR

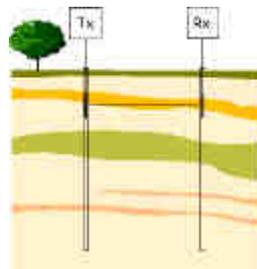
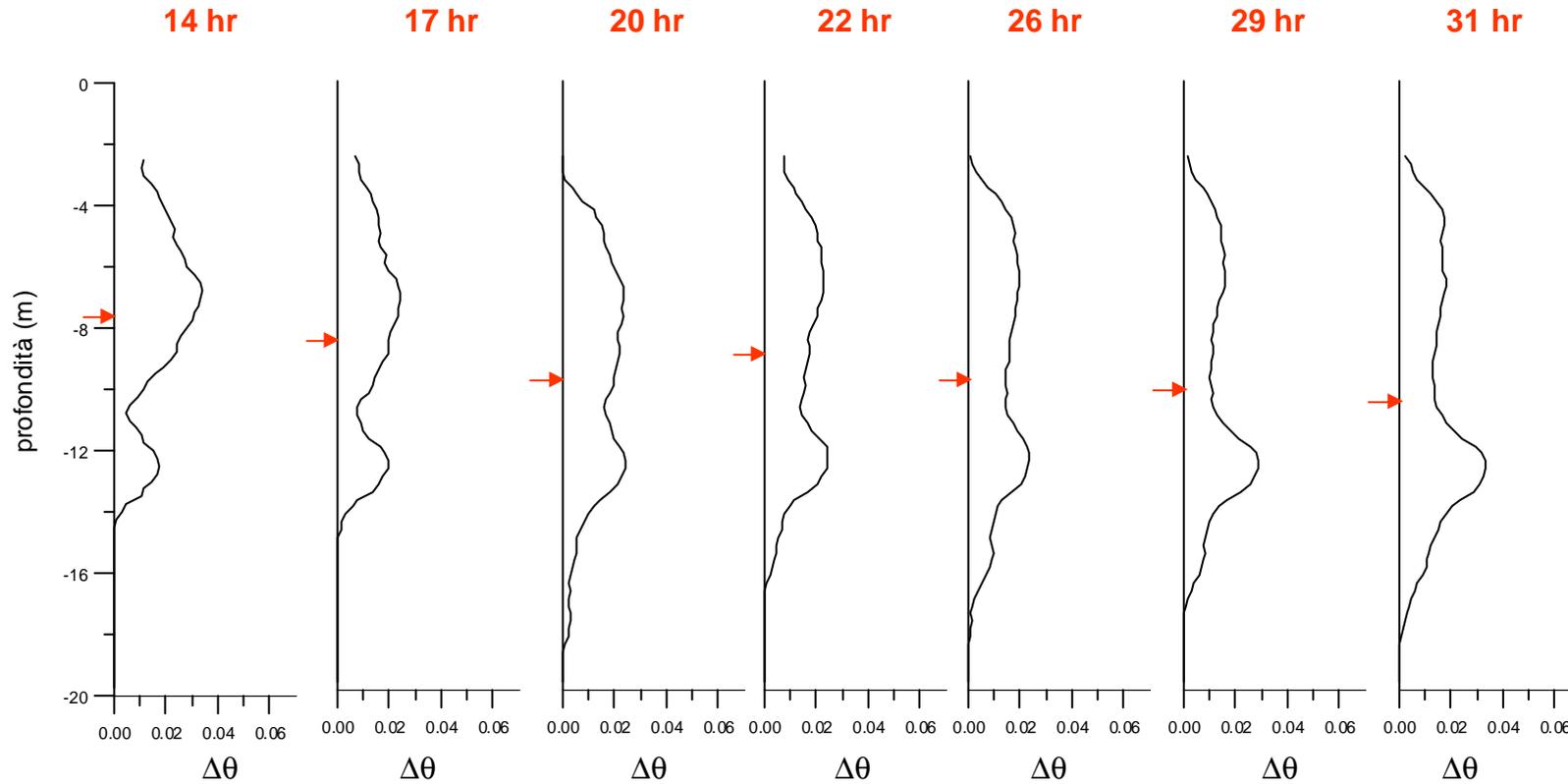


Fase di iniezione



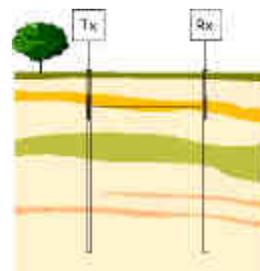
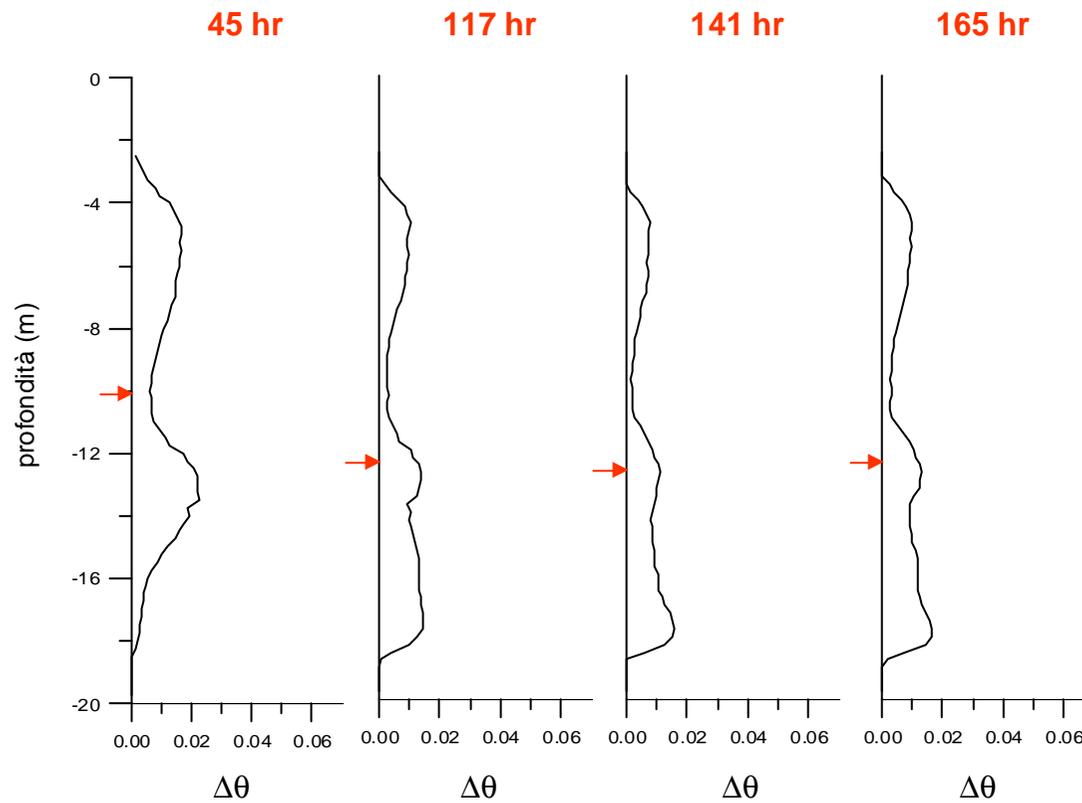
zop GPR

Prima fase di drenaggio



zop GPR

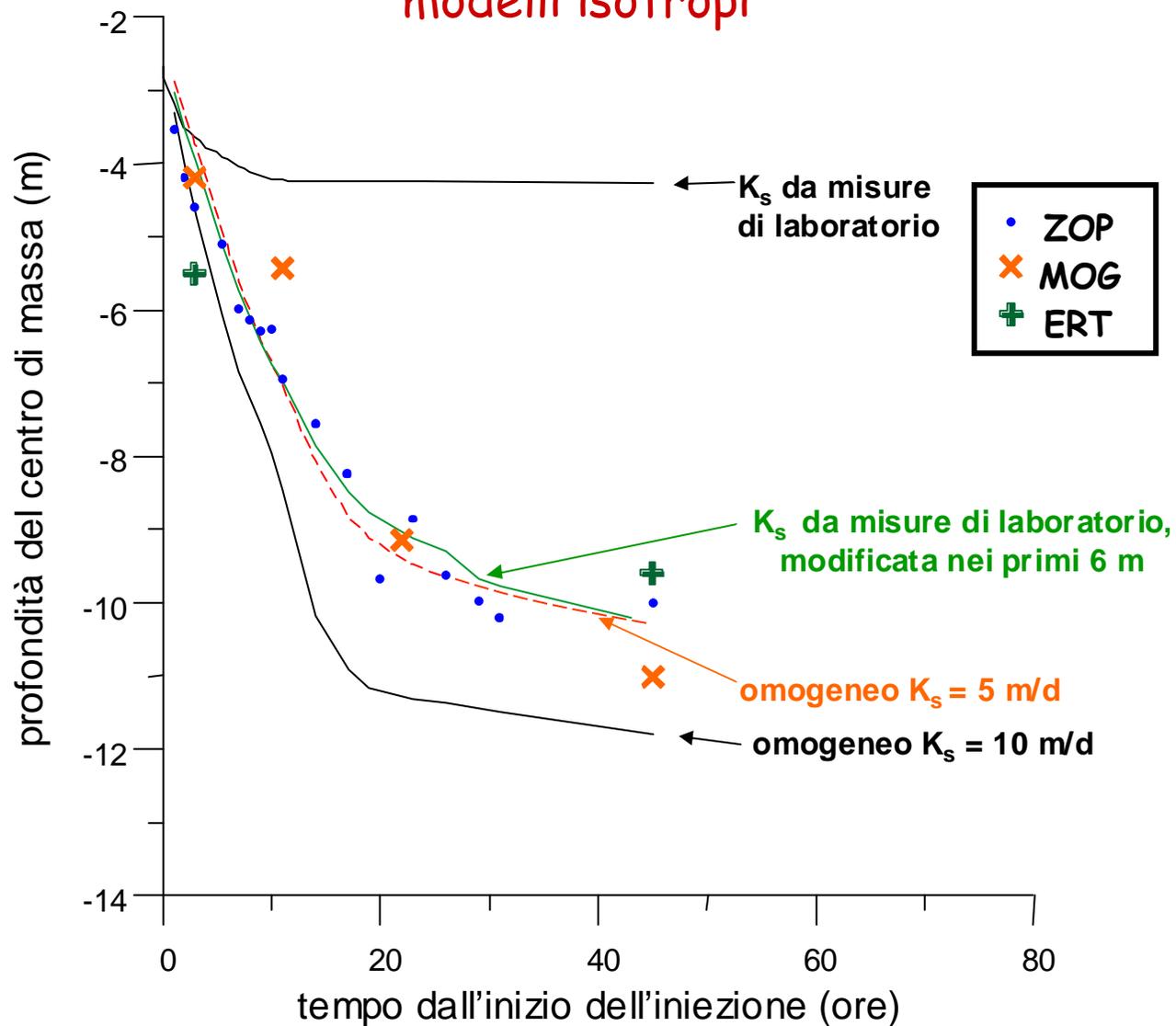
Seconda fase di drenaggio



zop GPR



Calibrazione del modello sul centro di massa modelli isotropi



BILANCIO DI MASSA

una questione da risolvere

massa d'acqua iniettata: nota

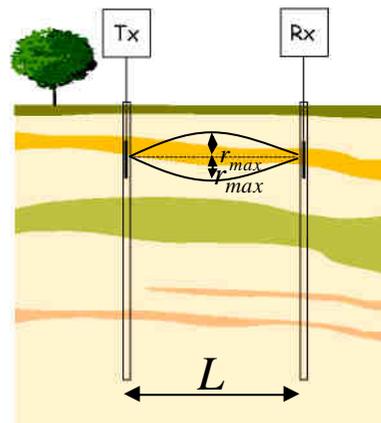


MODELLO



massa d'acqua in un certo volume di controllo

zone di Fresnel



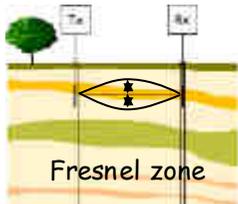
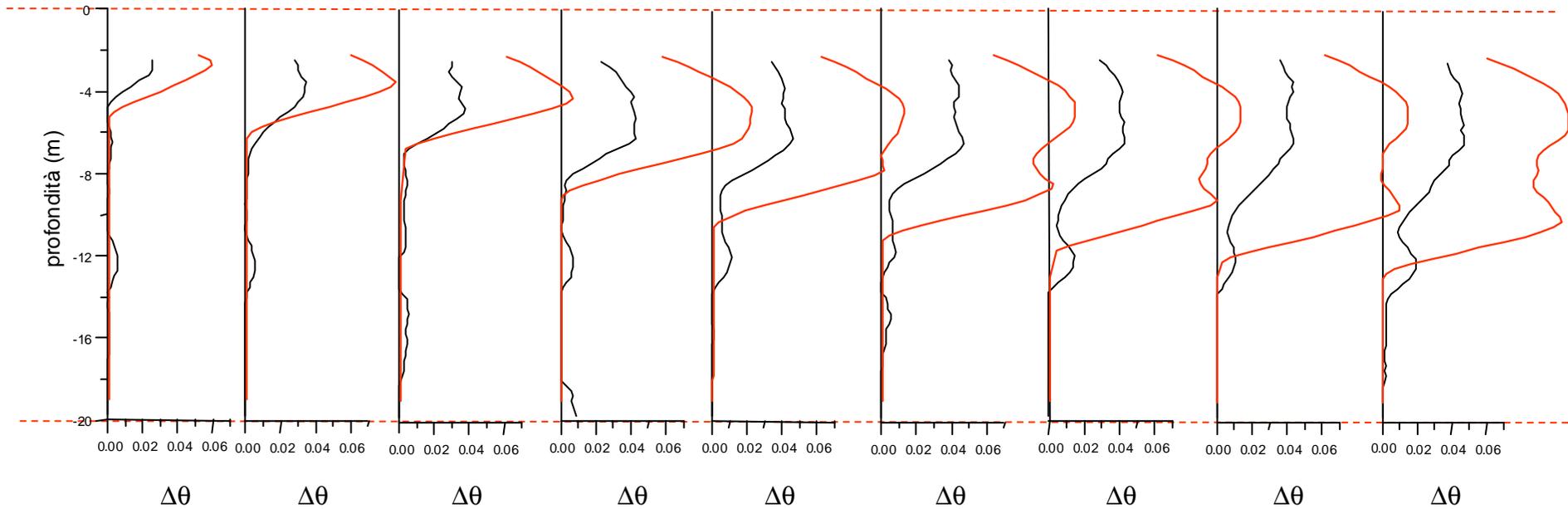
DATI DI CAMPO



massa d'acqua in un certo volume di controllo

Fase di iniezione

1 hr 2 hr 3 hr 5.5 hr 7 hr 8 hr 9 hr 10 hr 11 hr

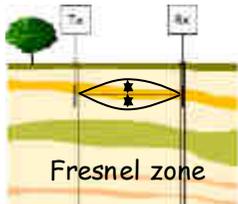
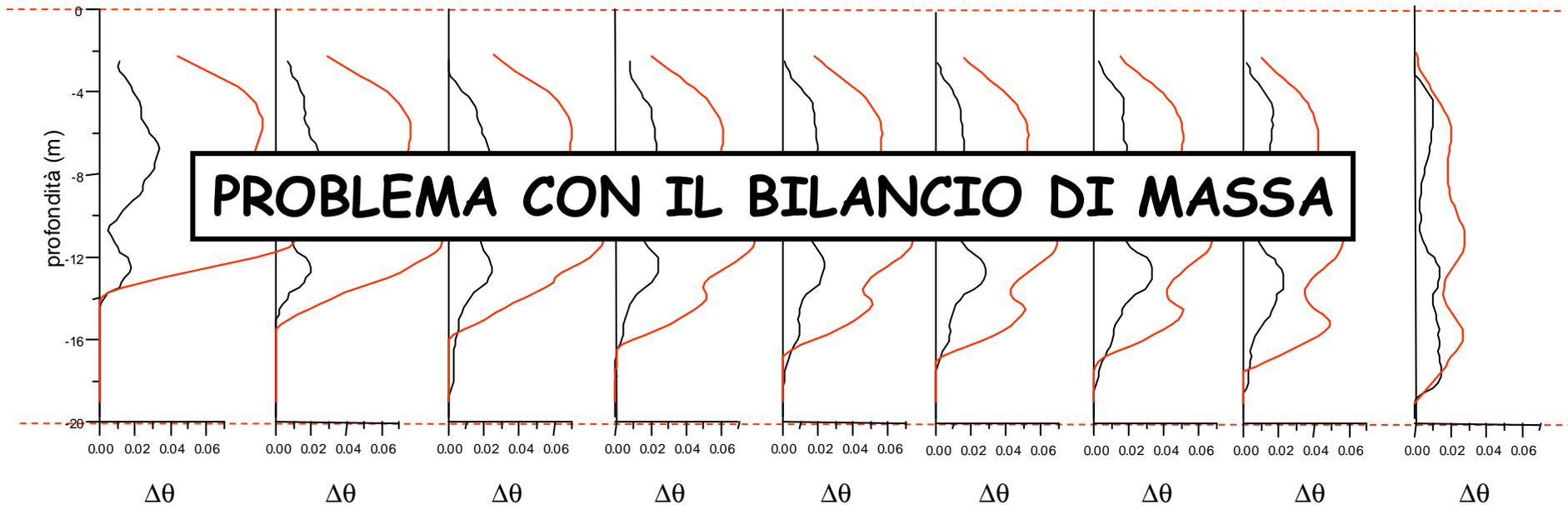


misure con ZOP GPR

risultati del modello isotropo con $K_s = 5 \text{ m/d}$

Fase di drenaggio

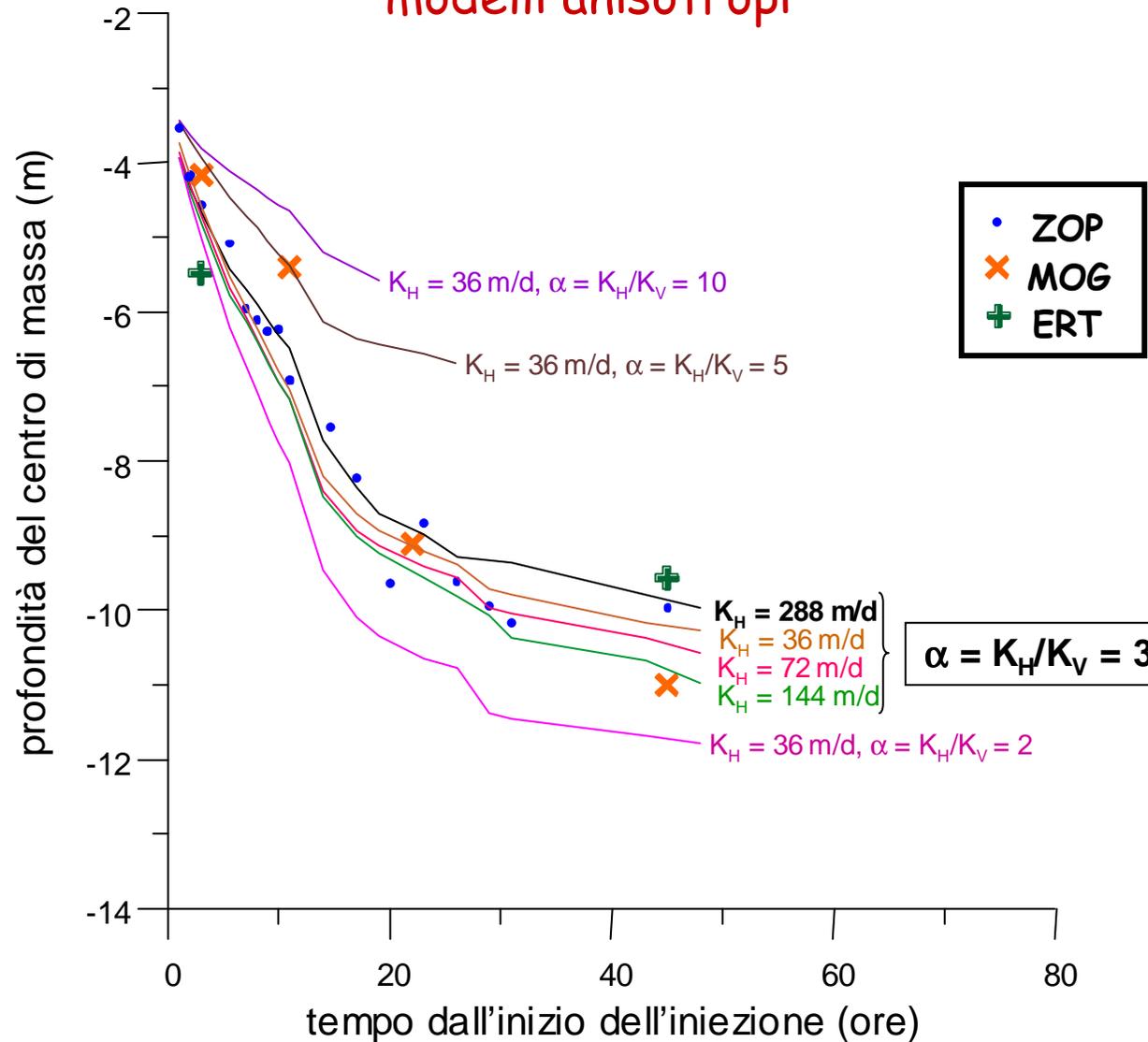
14 hr 17 hr 20 hr 22 hr 26 hr 29 hr 31 hr 45 hr 117 hr



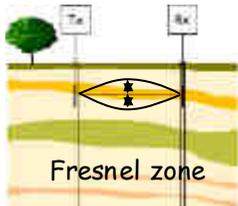
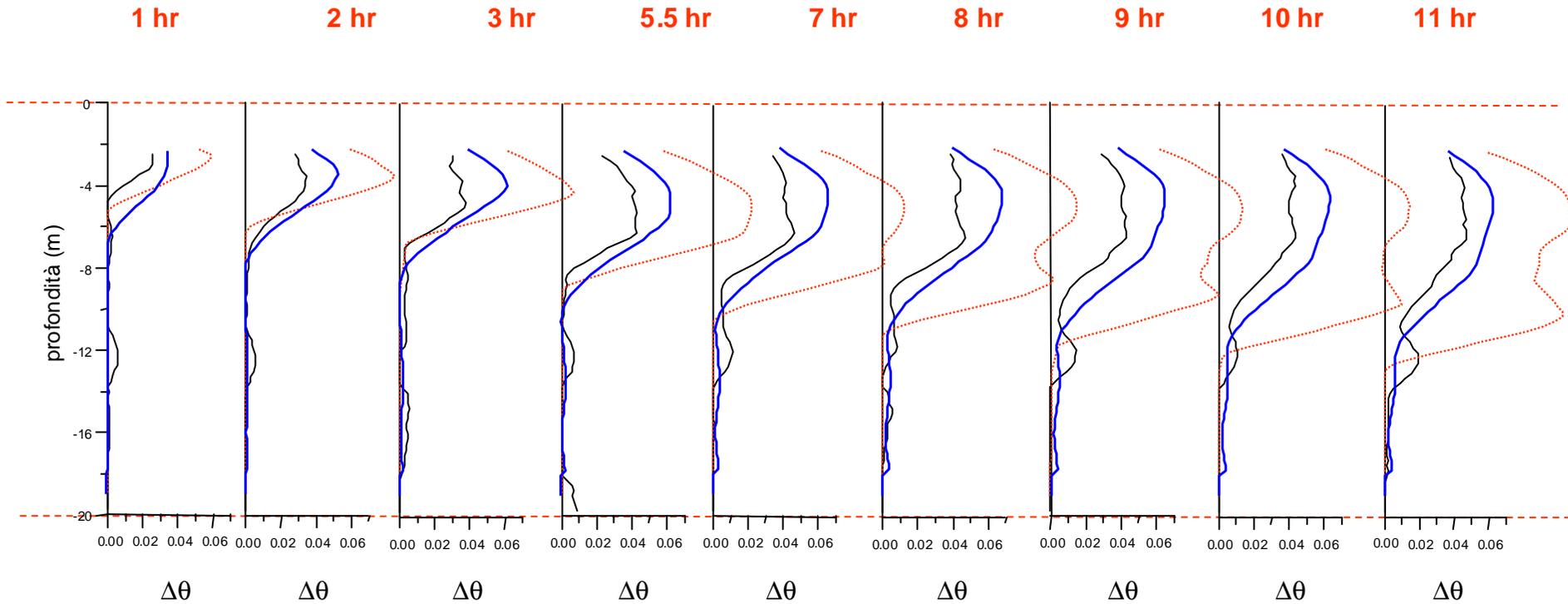
misure con ZOP GPR

risultati del modello isotropo con $K_s = 5 \text{ m/d}$

Calibrazione del modello sul centro di massa modelli anisotropi



Fase di iniezione



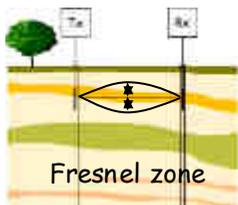
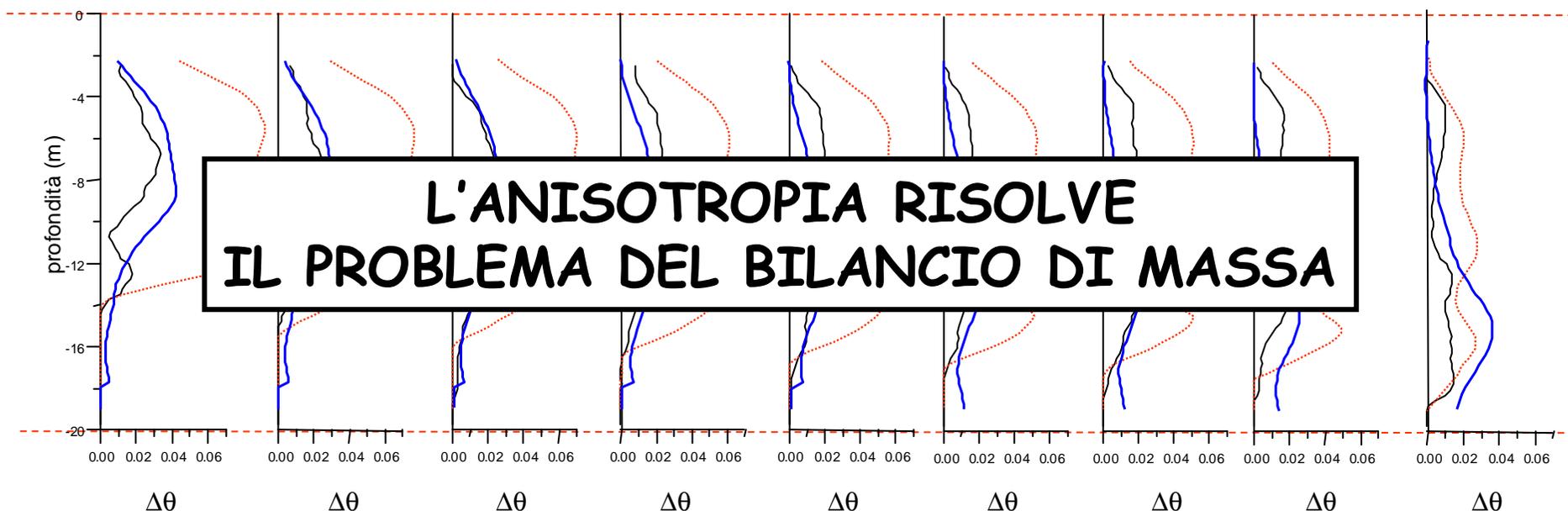
misure con ZOP GPR

risultati del modello isotropo con $K_s = 5 \text{ m/d}$

risultati del modello anisotropo con $K_{sH} = 288 \text{ m/d}$, $\alpha = K_{sH}/K_{sV} = 3$

Fase di drenaggio

14 hr 17 hr 20 hr 22 hr 26 hr 29 hr 31 hr 45 hr 117 hr



misure con ZOP GPR

risultati del modello isotropo con $K_s = 5 \text{ m/d}$

risultati del modello anisotropo con $K_{sH} = 288 \text{ m/d}$, $\alpha = K_{sH}/K_{sV} = 3$

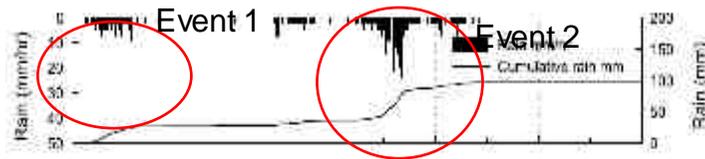
Sommario

- ❑ Gli strumenti dell'idrogeofisica

- ❑ Esempi:
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona non satura
 - Monitoraggio idrogeofisico di pendii montani
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona satura

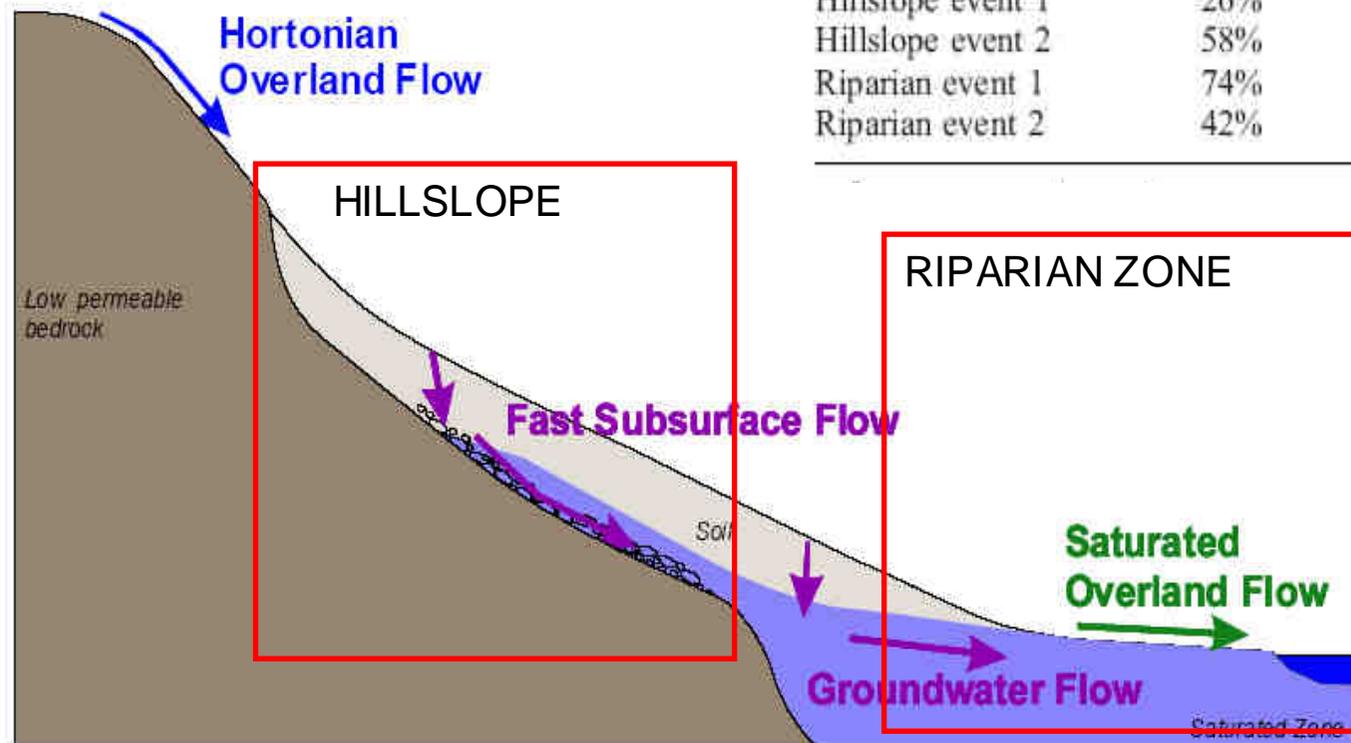
- ❑ Conclusioni e prospettive

Acqua "vecchia" e acqua "nuova"



Three-Component Separation
New/Old Riparian/Old Hillslope)
(3CompHS)

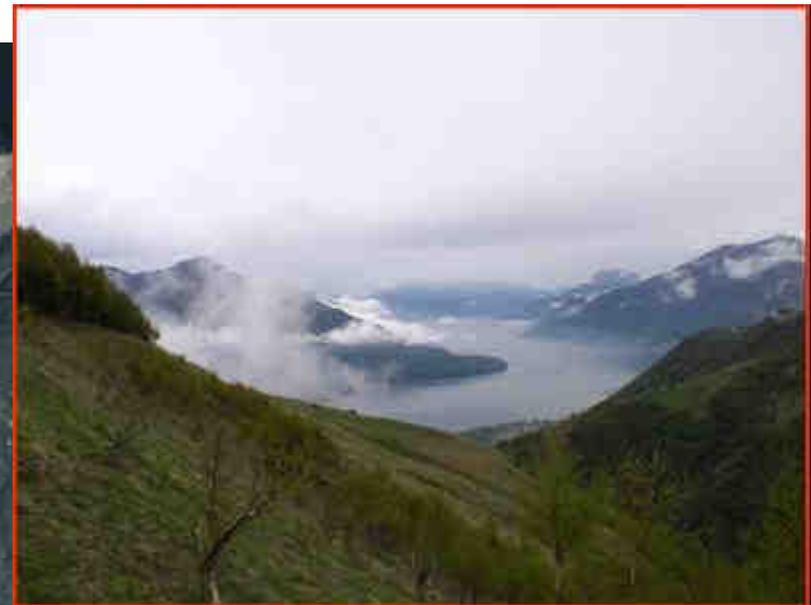
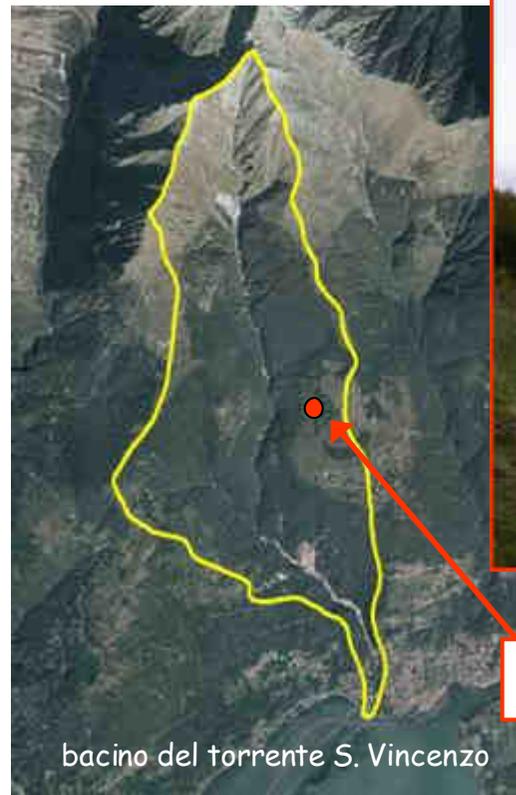
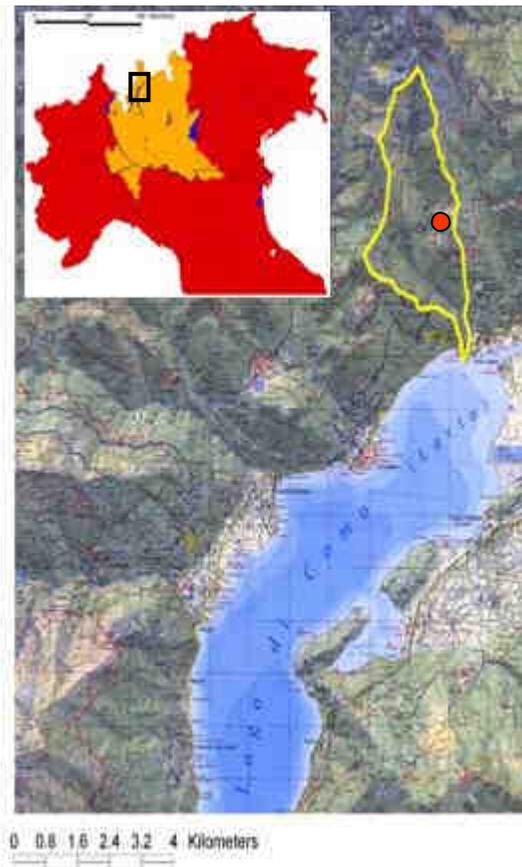
Event 1	19%/55%/26%
Event 2	21%/23%/56%
Hillslope event 1	26%
Hillslope event 2	58%
Riparian event 1	74%
Riparian event 2	42%



McGlynn and McDonnell, 2003

Sito sperimentale di Montemezzo (CO)

Obiettivo: caratterizzare la struttura e l'idrologia dei versanti di un piccolo bacino montano affetto da frane per scivolamento e soprattutto rischio alluvione



Sito sperimentale di Montemezzo

(Cassiani et al., 2009, *Near Surface Geophysics*
Strobbia and Cassiani, 2007, *Geophysics*)



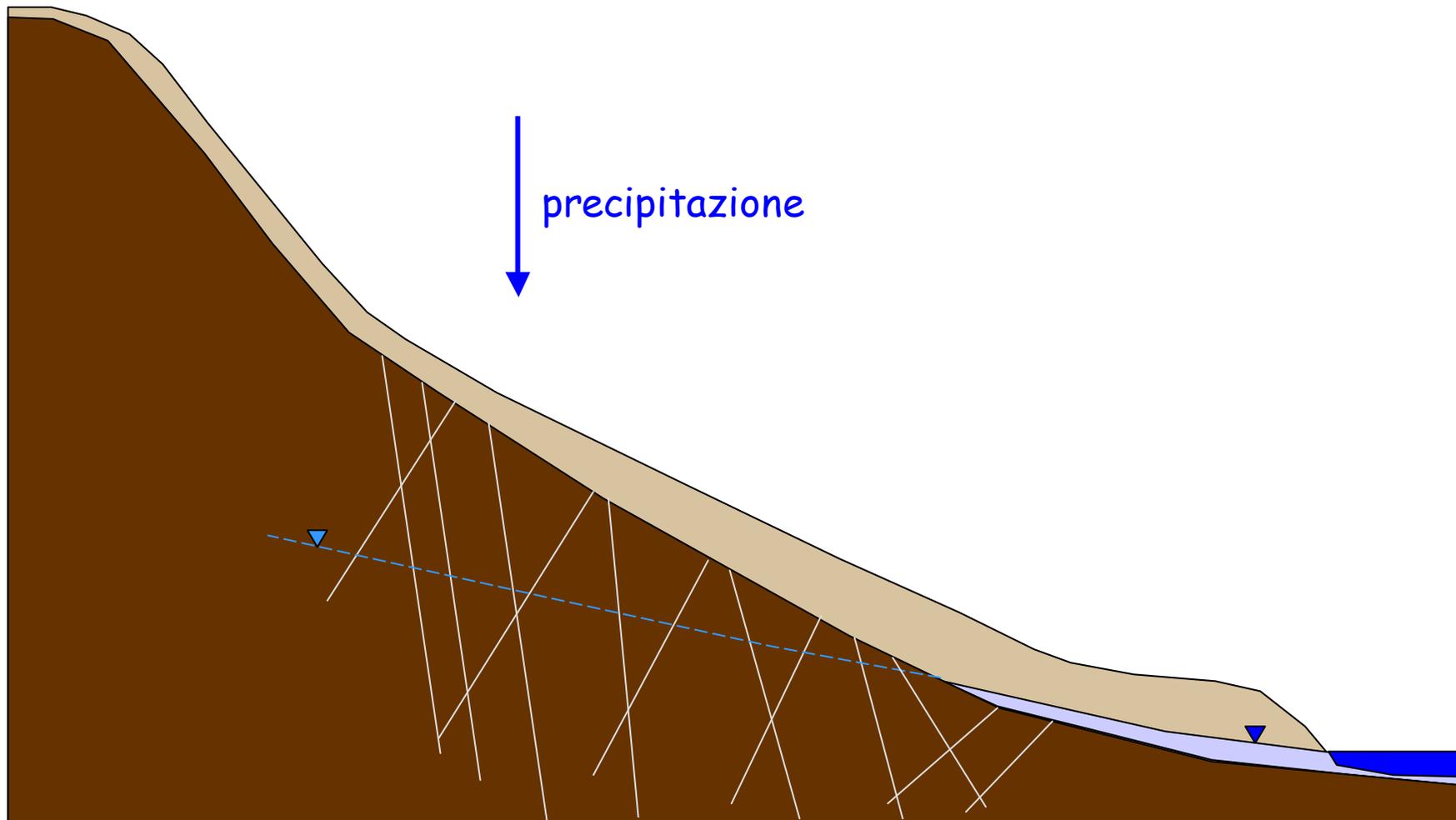
Descrizione del sito



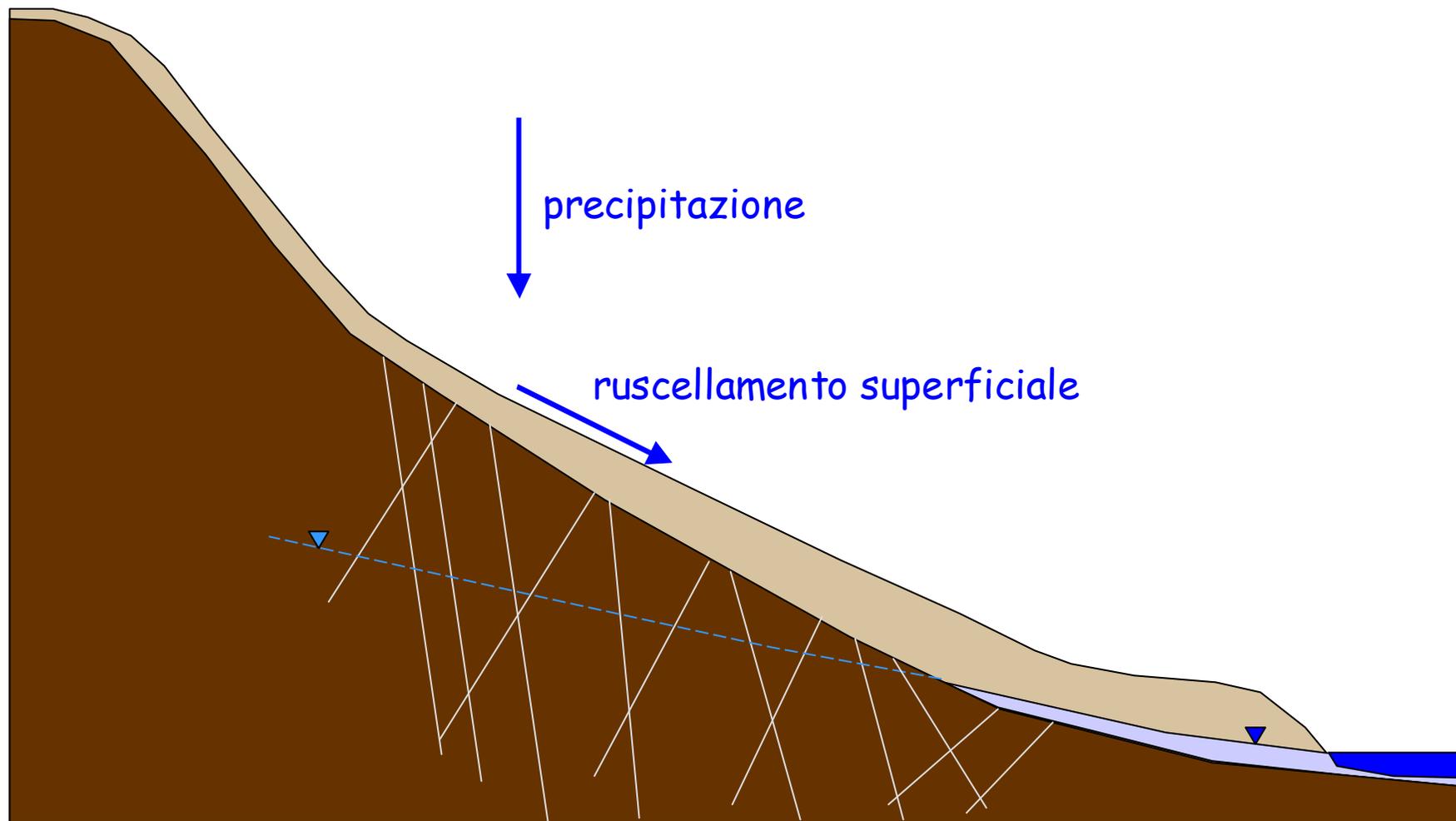
quota: 1150 m s.l.m.
pendenza: 30-40 gradi
copertura di suolo: spessore di 1-2 m, morena
sabbioso-ghiaiosa; conduttività idraulica medio
bassa (10^{-6} m/s)
basamento: paragneiss con foliazione sub-verticale,
friabile.
vegetazione: erba, con bosco circostante di faggi e
betulle

Grave rischio di inondazione

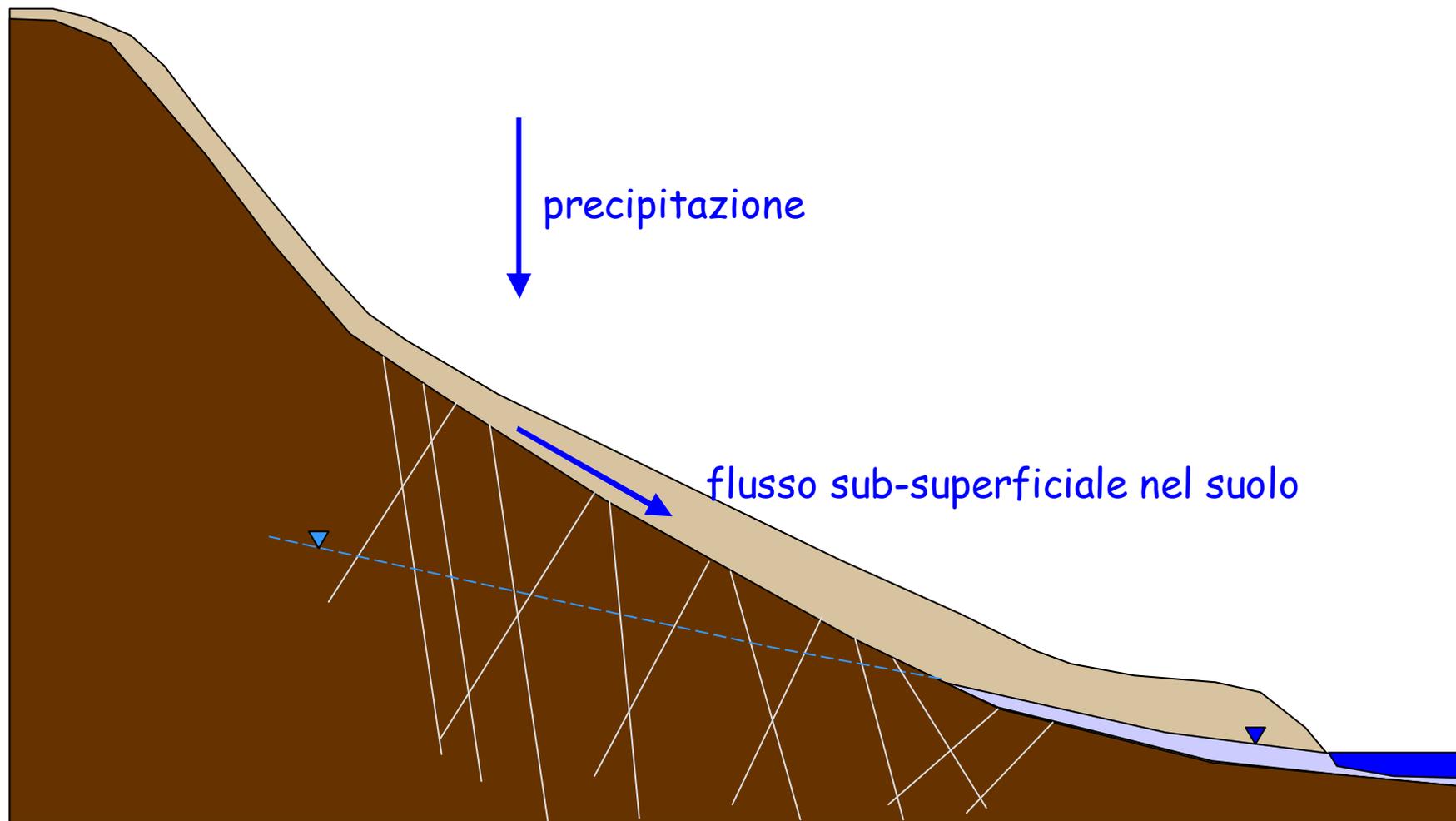
Acqua "vecchia" o acqua "nuova" ?



Acqua "vecchia" o acqua "nuova" ?

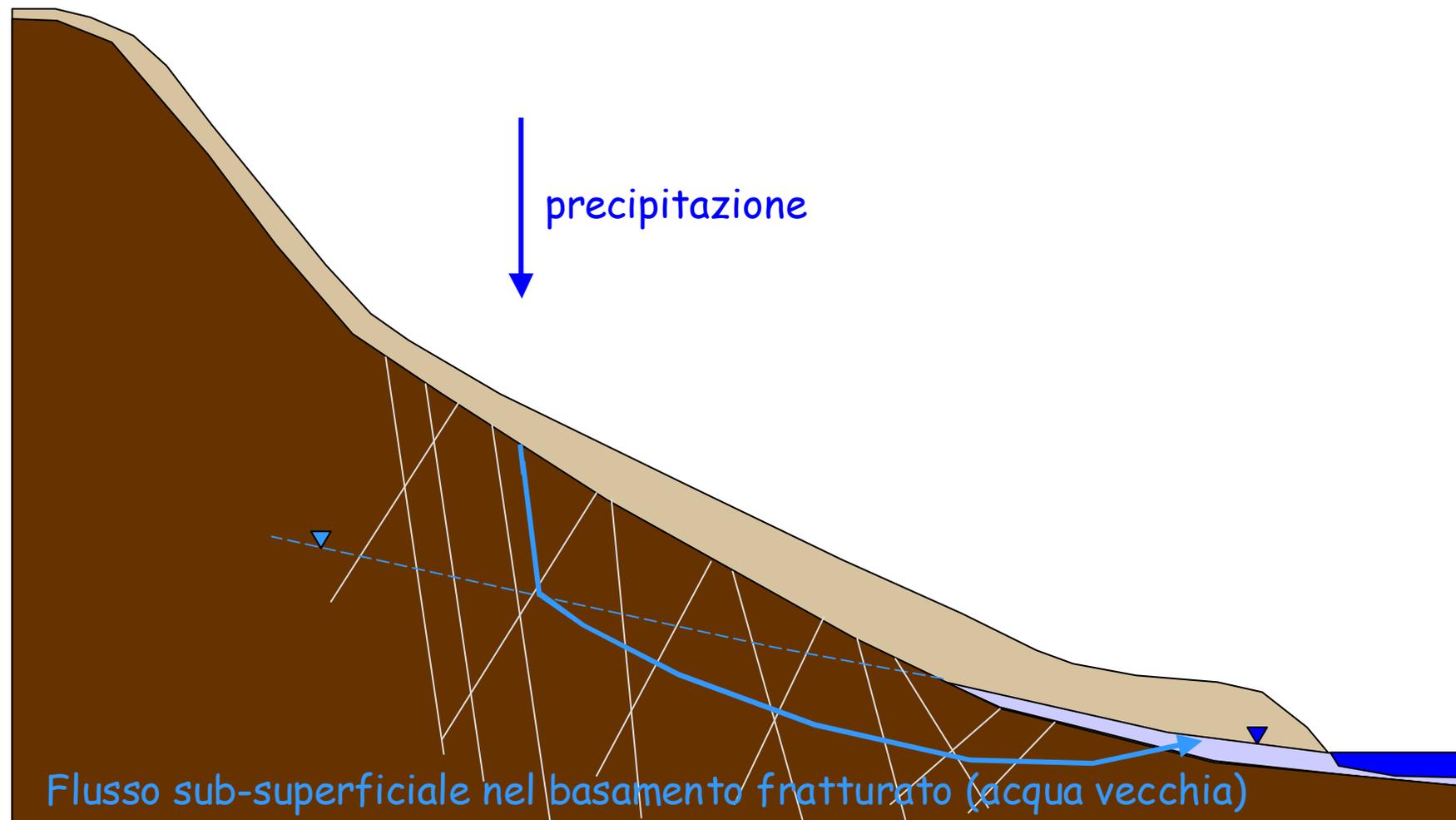


Acqua "vecchia" o acqua "nuova" ?





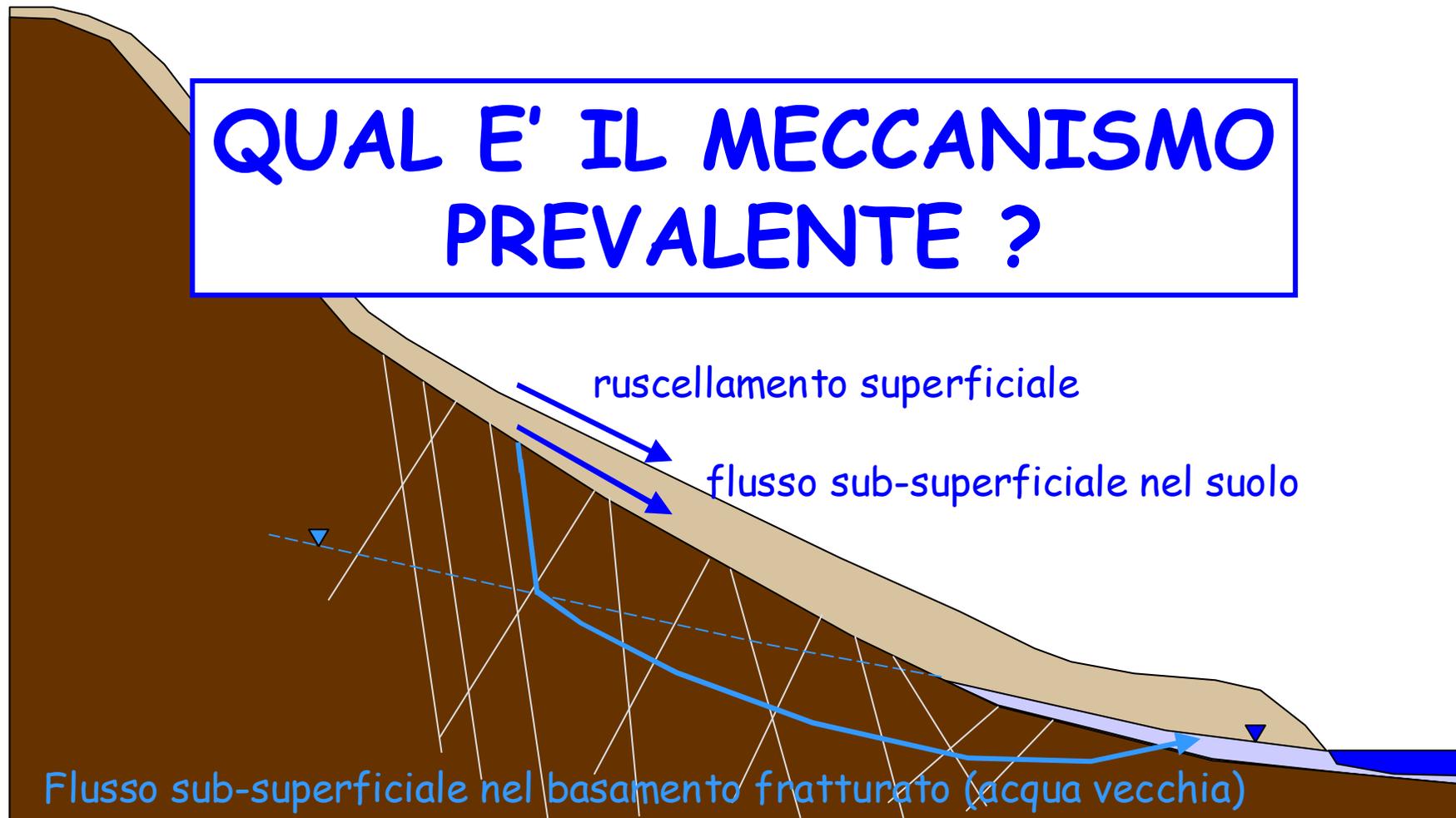
Acqua "vecchia" o acqua "nuova" ?

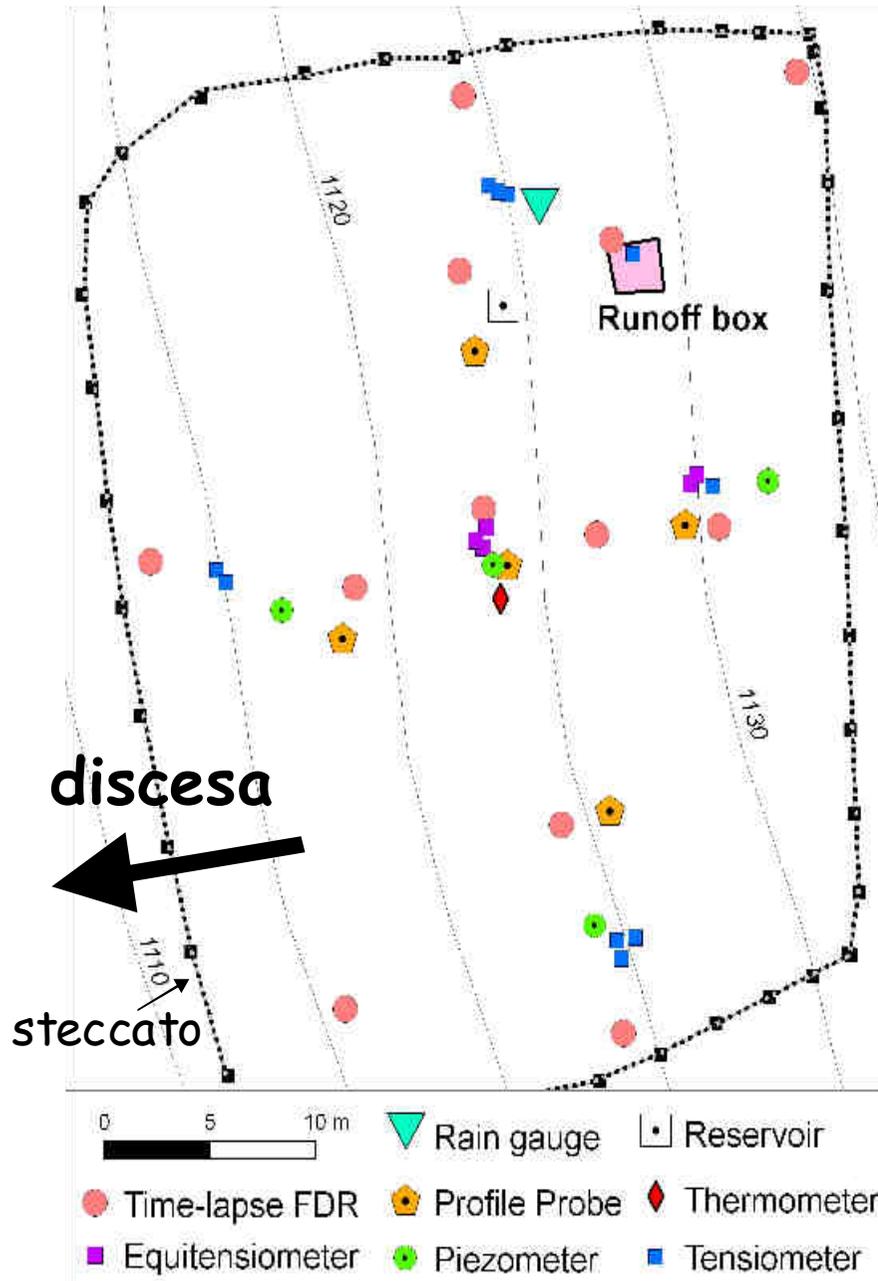




Acqua "vecchia" o acqua "nuova" ?

QUAL E' IL MECCANISMO
PREVALENTE ?





Stazione di monitoraggio idrologico

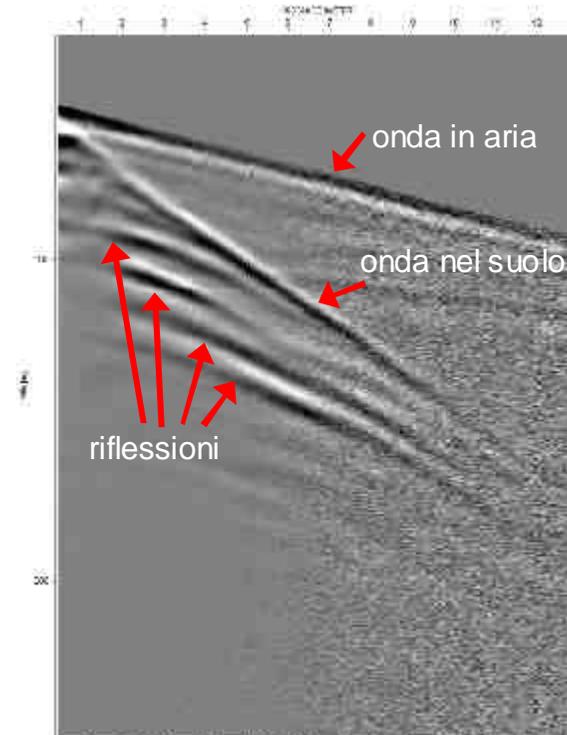
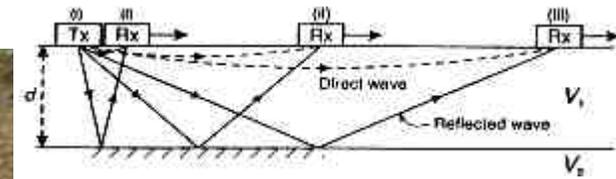


A partire dal 2003 è stata condotta una campagna di monitoraggio di lungo termine, con misure di:

- precipitazione,
- ruscellamento superficiale,
- temperatura del suolo,
- contenuto idrico del suolo.

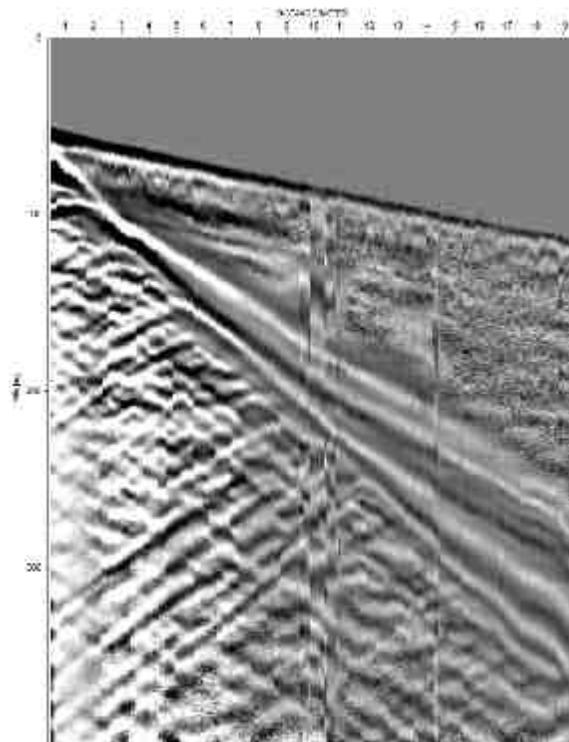
Acquisizioni GPR

Wide-Angle Reflection and Refraction (WARR)

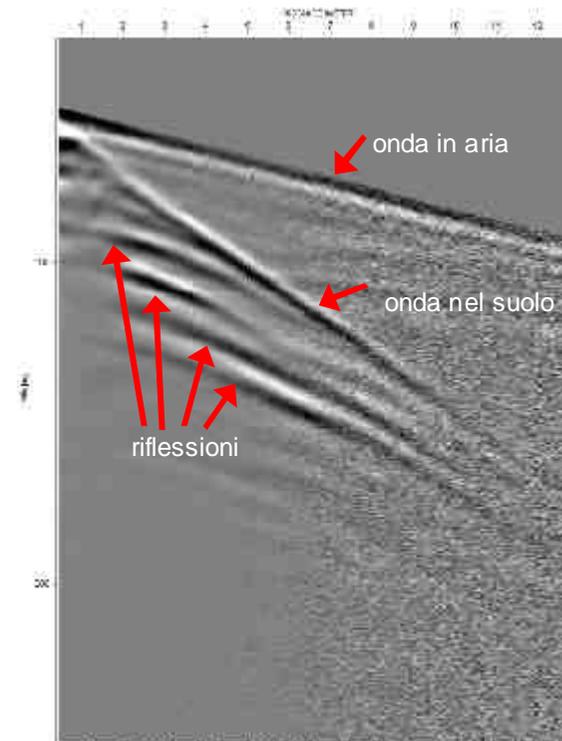


Acquisizioni GPR

I dati WARR acquisiti al sito di Montemezzo
sono diversi dai normali dati WARR!



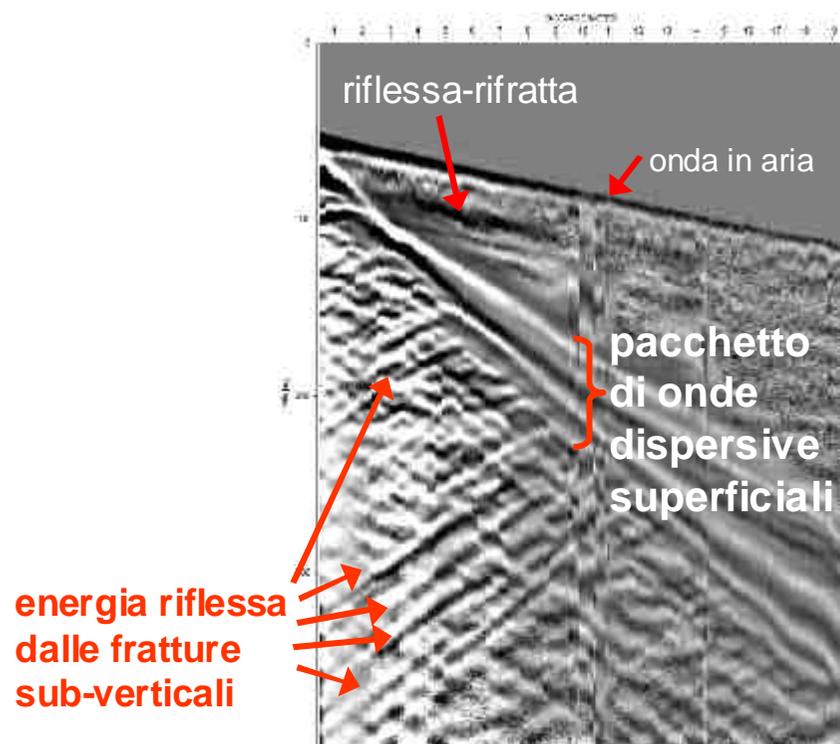
WARR with 100 MHz antennas
Montemezzo - line 1 - April 22, 2004 - with AGC



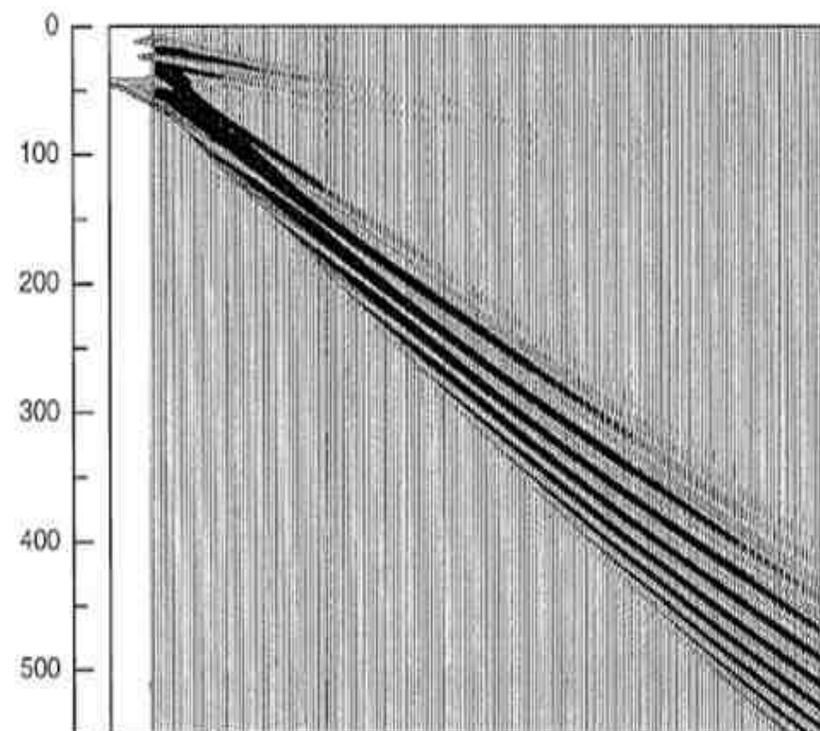
WARR with 200 MHz antennas
Grugliasco (Turin) - March 19, 2004

Acquisizioni GPR

I dati WARR acquisiti al sito di Montemezzo sono simili a dati sintetici da letteratura



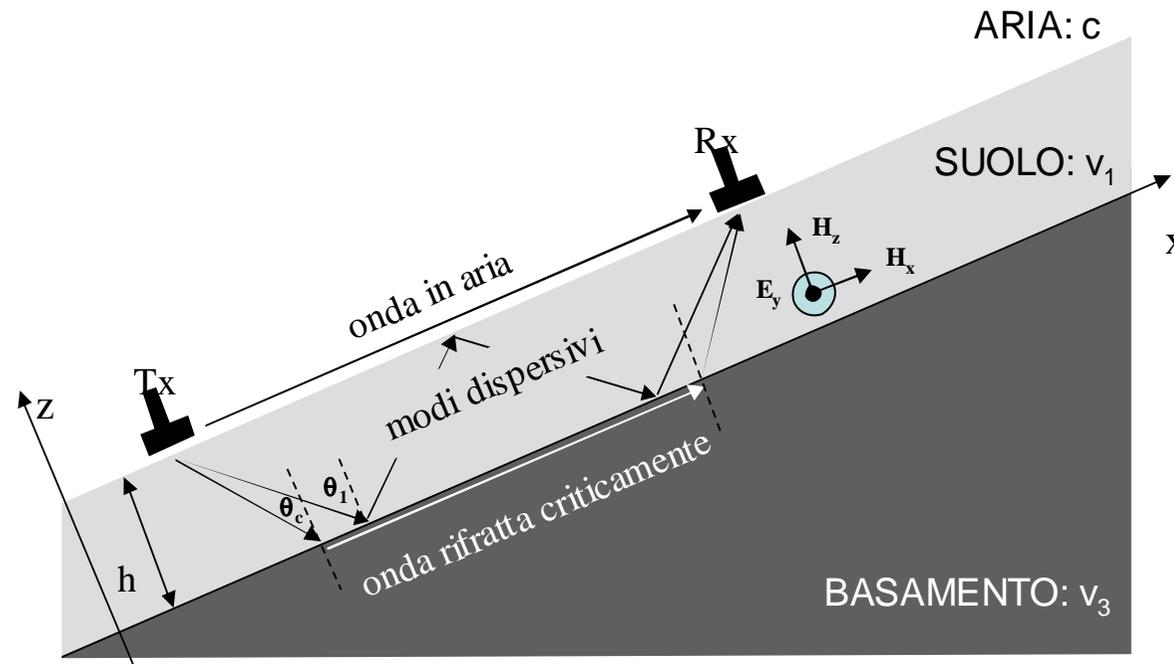
WARR with 100 MHz antennas
Montemezzo - line 1 - April 22, 2004 - with AGC



after Arcone, Peapples and Liu, 2003,
GEOPHYSICS, VOL. 68, NO. 6

Onde guidate GPR

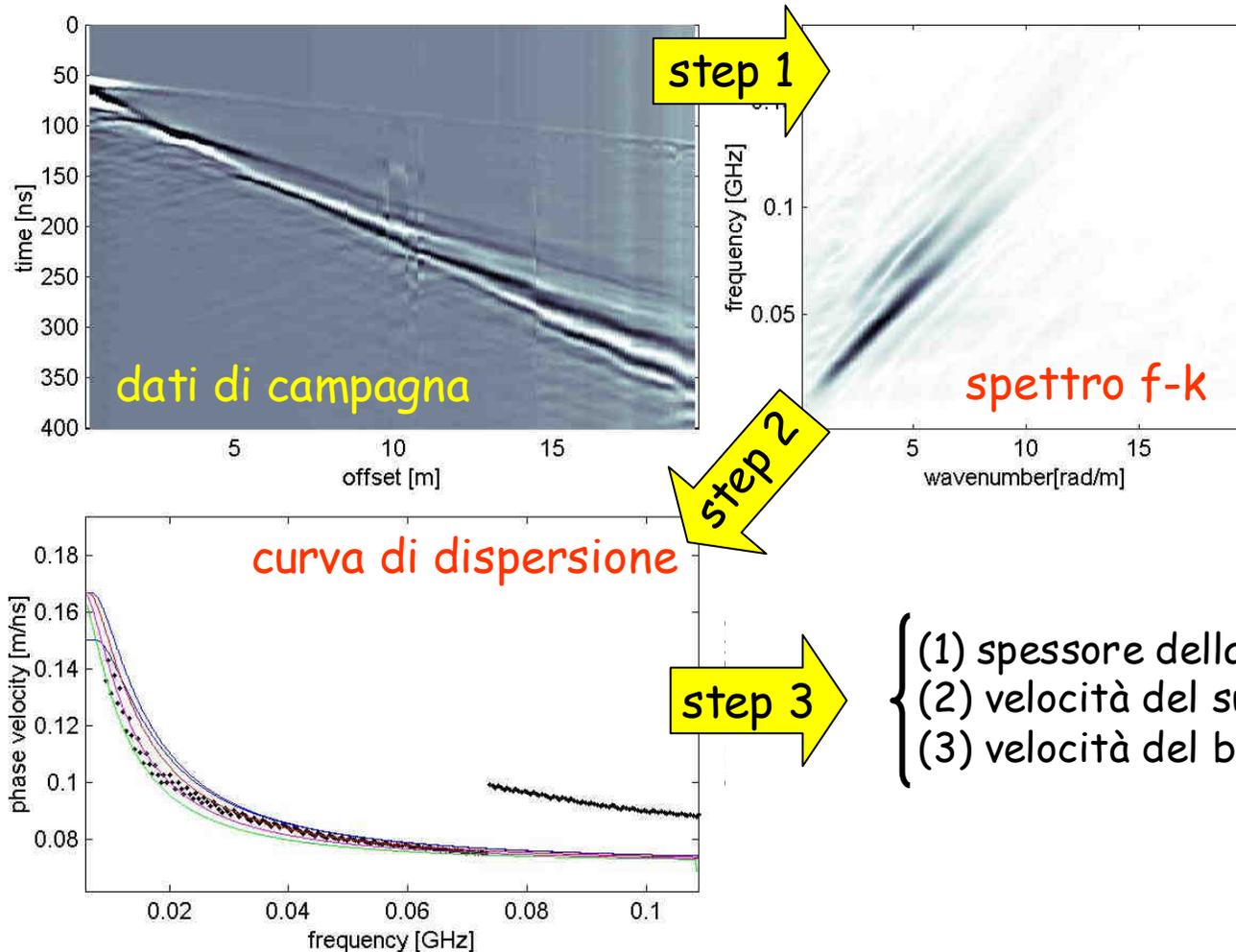
(Strobbia and Cassiani, *Geophysics*, 2007)



Uno strato a bassa velocità circondato da due strati ad alta velocità si comporta come una **guida d'onda**.

Questo fenomeno induce **una velocità diversa per ogni frequenza**: il mezzo è **dispersivo**.

Onde guidate GPR inversione ed interpretazione



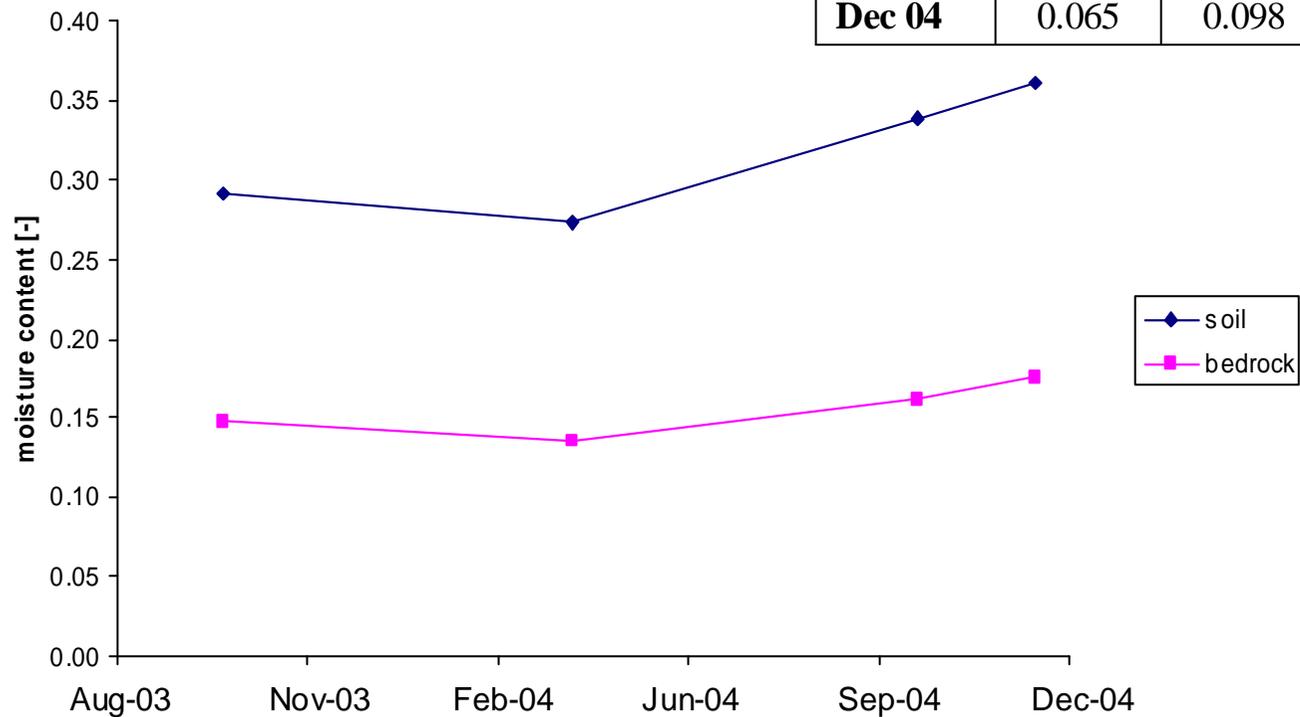
- (1) spessore della guida d'onda
- (2) velocità del suolo
- (3) velocità del basamento

Onde guidate GPR

inversione ed interpretazione delle misure in time-lapse

Risultati:
contenuto idrico
sulla base di
Topp et al. [1980]

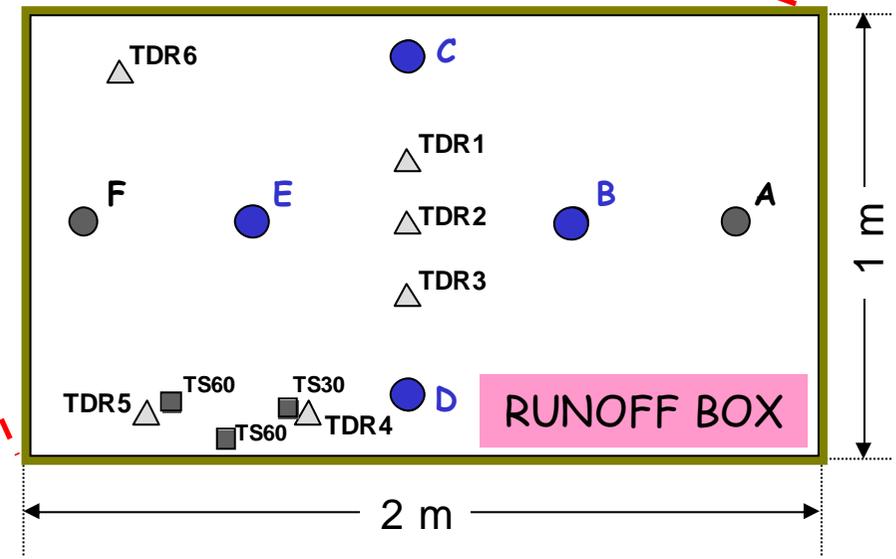
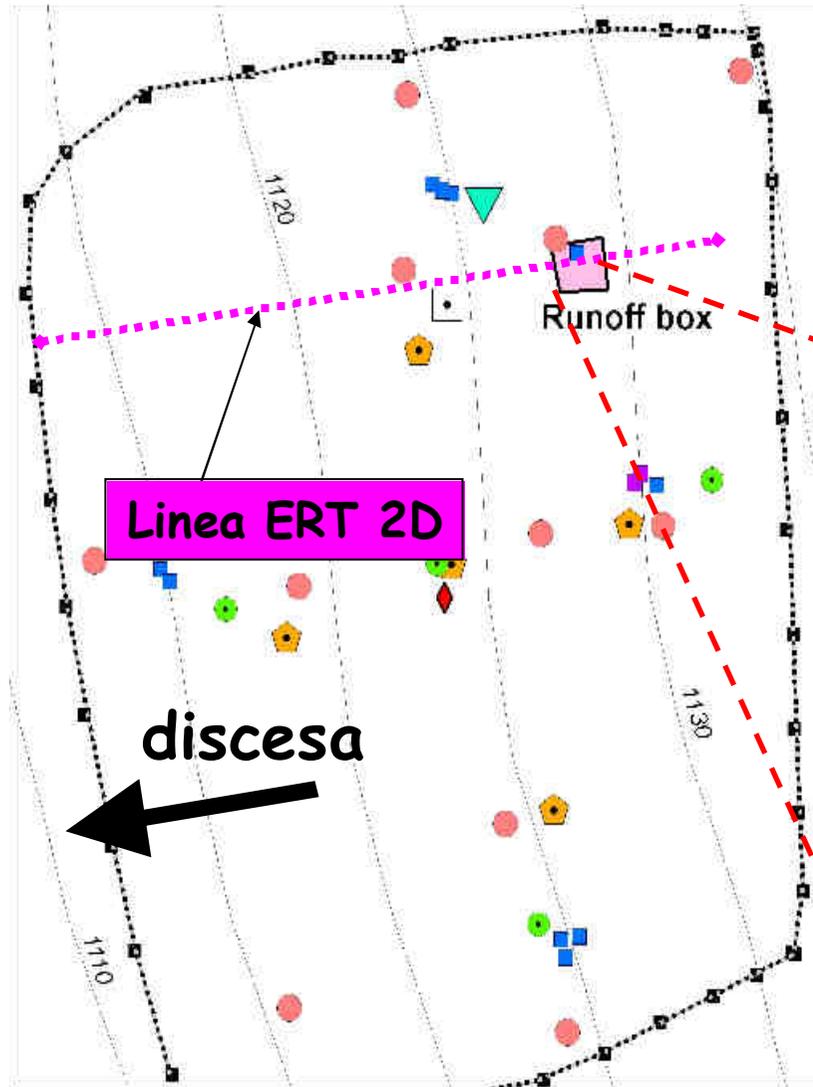
	v_{soil} (m/ns)	v_{bedrock} (m/ns)	h (m)	θ_{soil} [-]	θ_{bedrock} [-]
Oct 03	0.075	0.106	1.01	0.29	0.15
Apr 04	0.078	0.11	0.95	0.27	0.14
Oct 04	0.068	0.102	0.68	0.34	0.16
Dec 04	0.065	0.098	0.65	0.36	0.18



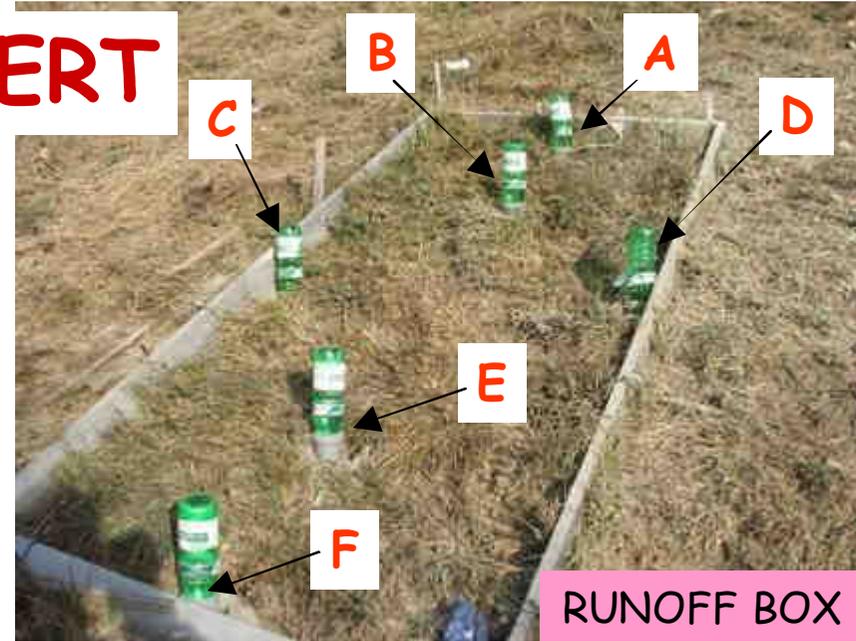


Test di irrigazione

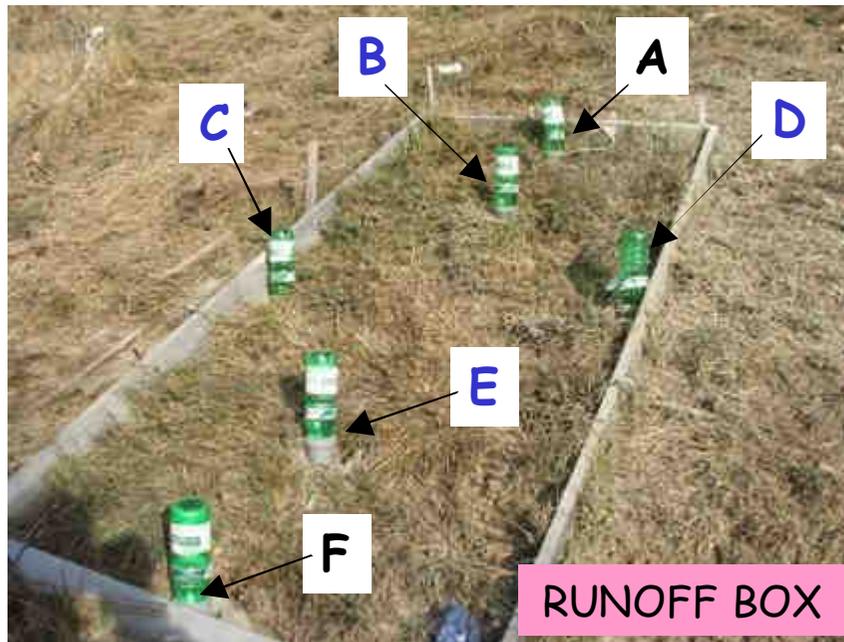
Nel 2006 e nel 2007 sono stati condotti due test di irrigazione su una runoff box, equipaggiata con TDR, tensiometri e fori attrezzati con elettrodi per ERT.



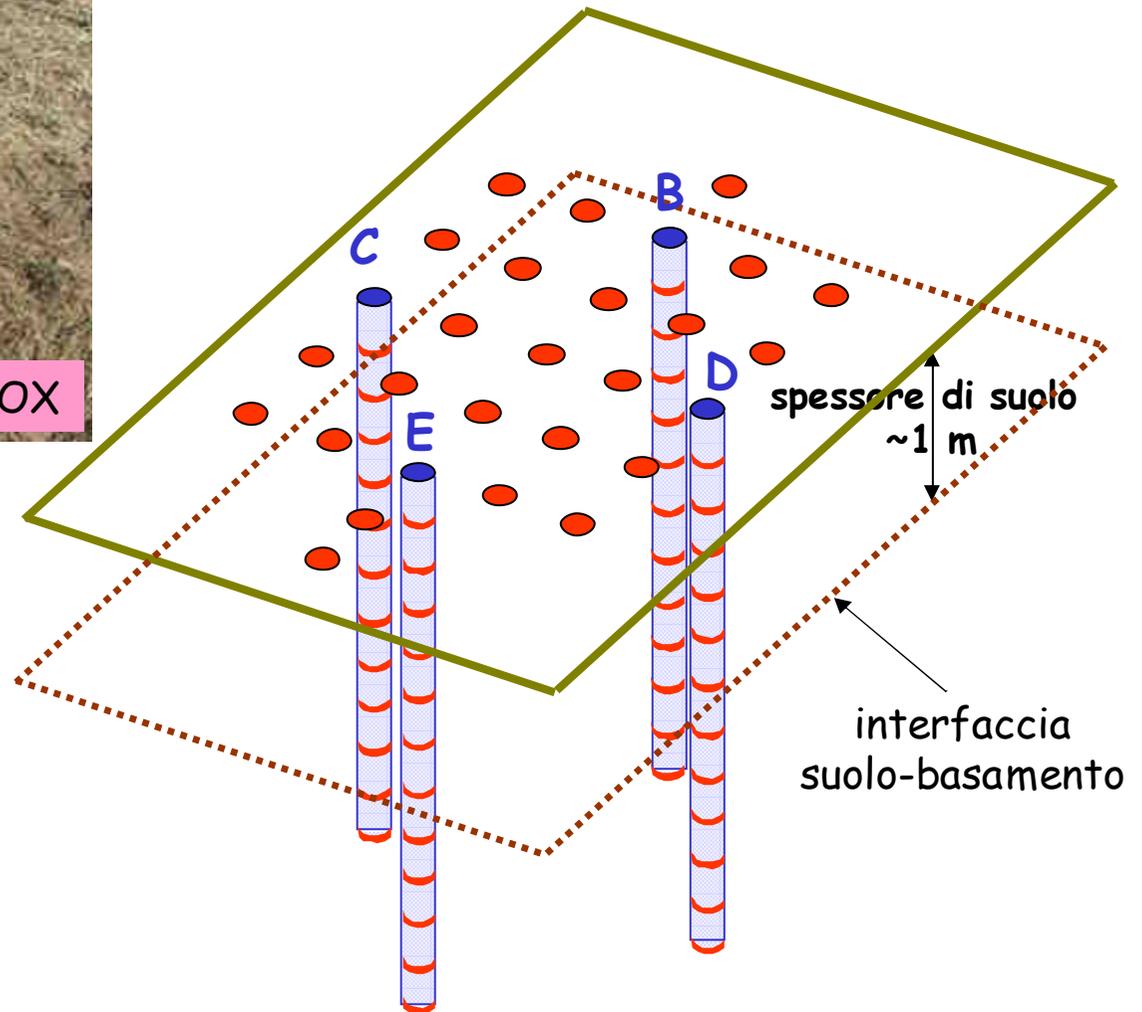
Istallazione dei fori ERT



Sei fori profondi 2 m.
12 elettrodi in ciascun foro.

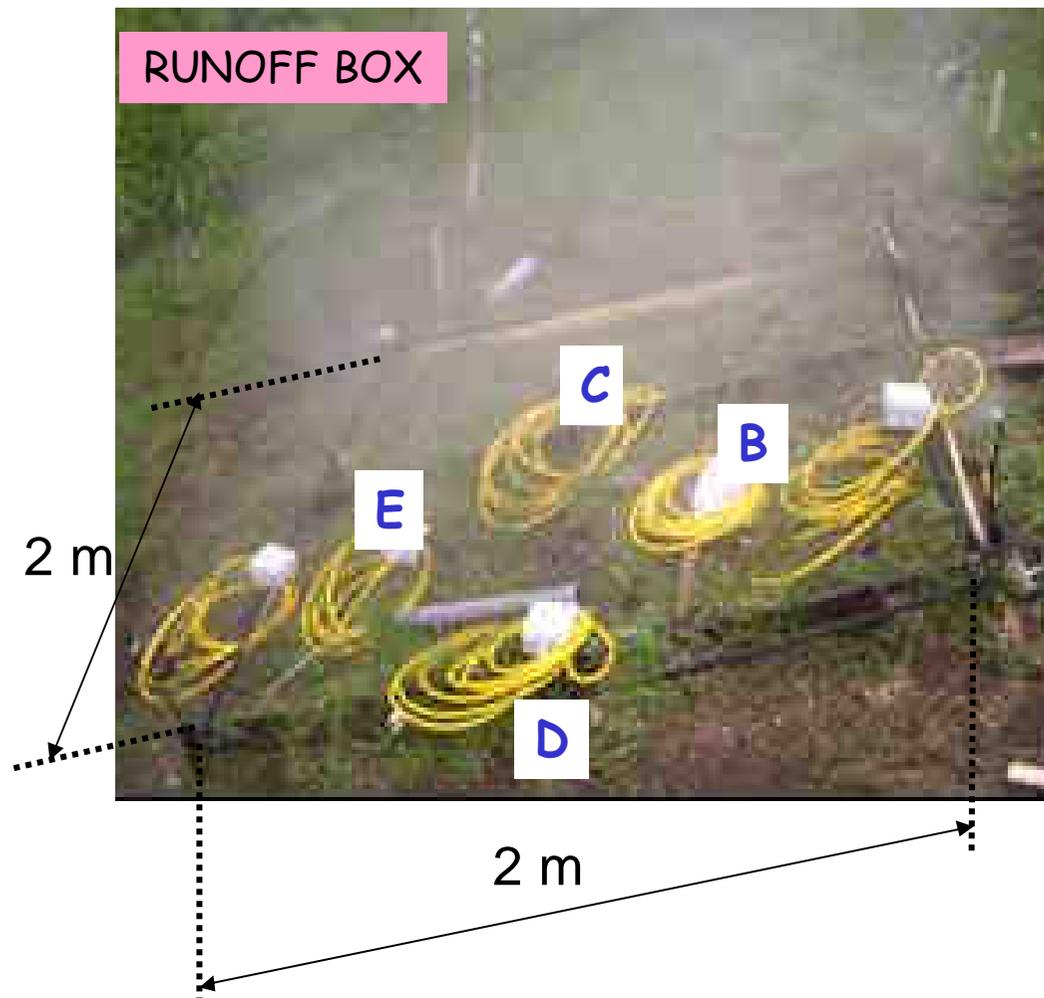


4D (time-lapse) ERT



- ❑ 72 elettrodi (12 in ognuno di 4 fori + 24 elettrodi da superficie)
- ❑ schema di acquisizione dipolo-dipolo skip 0, con reciproci
- ❑ tempo di acquisizione di circa 40 min per ogni time step con un IRIS Syscal Pro.
- ❑ per l'inversione è stato usato il codice R3 (A.M. Binley - Lancaster University)

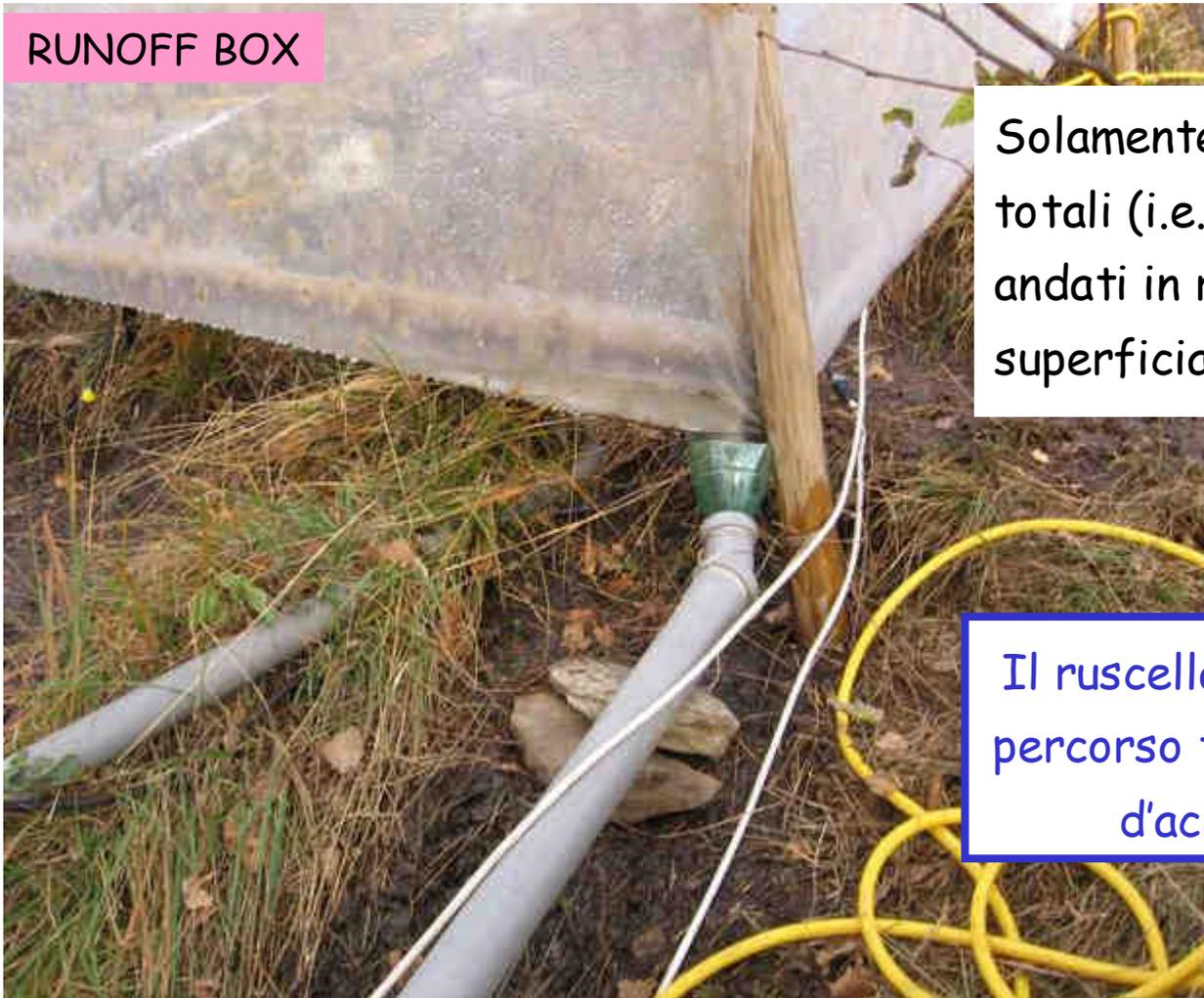
Test di irrigazione



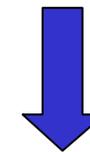
- Il 29 ottobre 2007, sono stati applicati 9330 litri di pioggia artificiale su un'area di 2 m x 2 m per 18 ore (equivalenti a una pioggia di 2500 mm).
- L'infiltrazione è stata stimata sottraendo il **ruscellamento misurato**.
- Date le condizioni meteo ed il ridotto periodo di irrigazione l'**evapo-transpirazione** è stata trascurata.

Misure di ruscellamento

RUNOFF BOX



Solamente 640 litri dei 9330 totali (i.e. **meno del 7%**) sono andati in ruscellamento superficiale.



Il ruscellamento superficiale è un percorso trascurabile per il flusso d'acqua lungo il pendio.



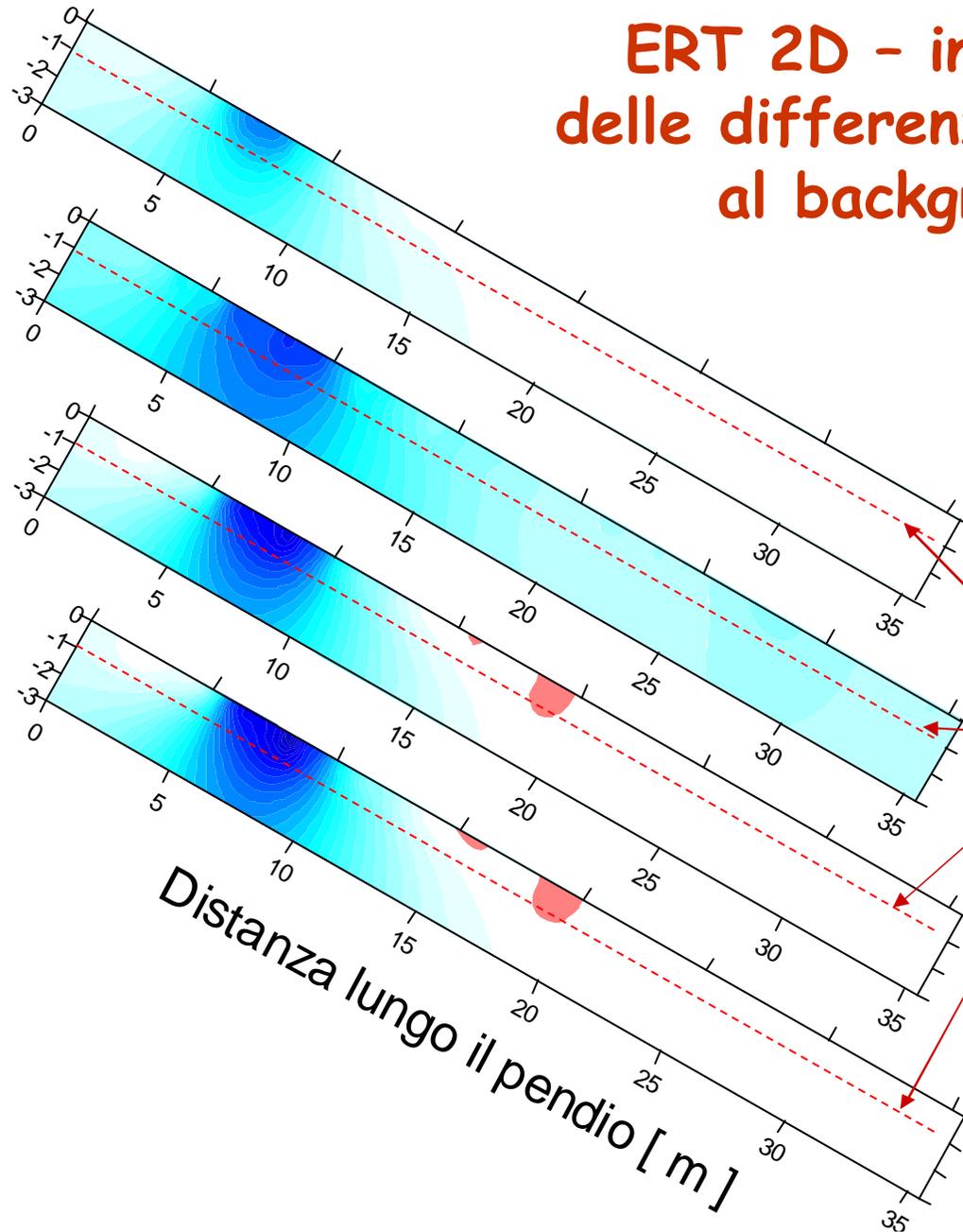
ERT 2D - inversione delle differenze rispetto al background

dopo 1.2 h

dopo 3 h

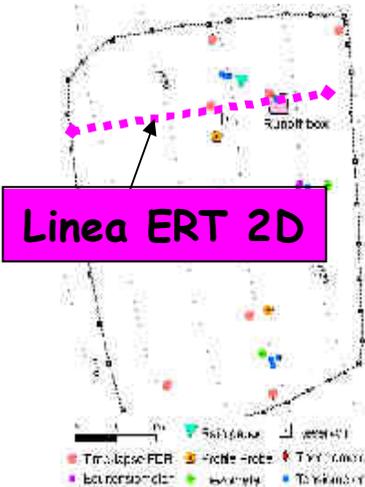
dopo 5 h

dopo 10 h



interfaccia suolo-basamento

% di variazione rispetto alla resistività di background





ERT 2D - inversione delle differenze rispetto al background

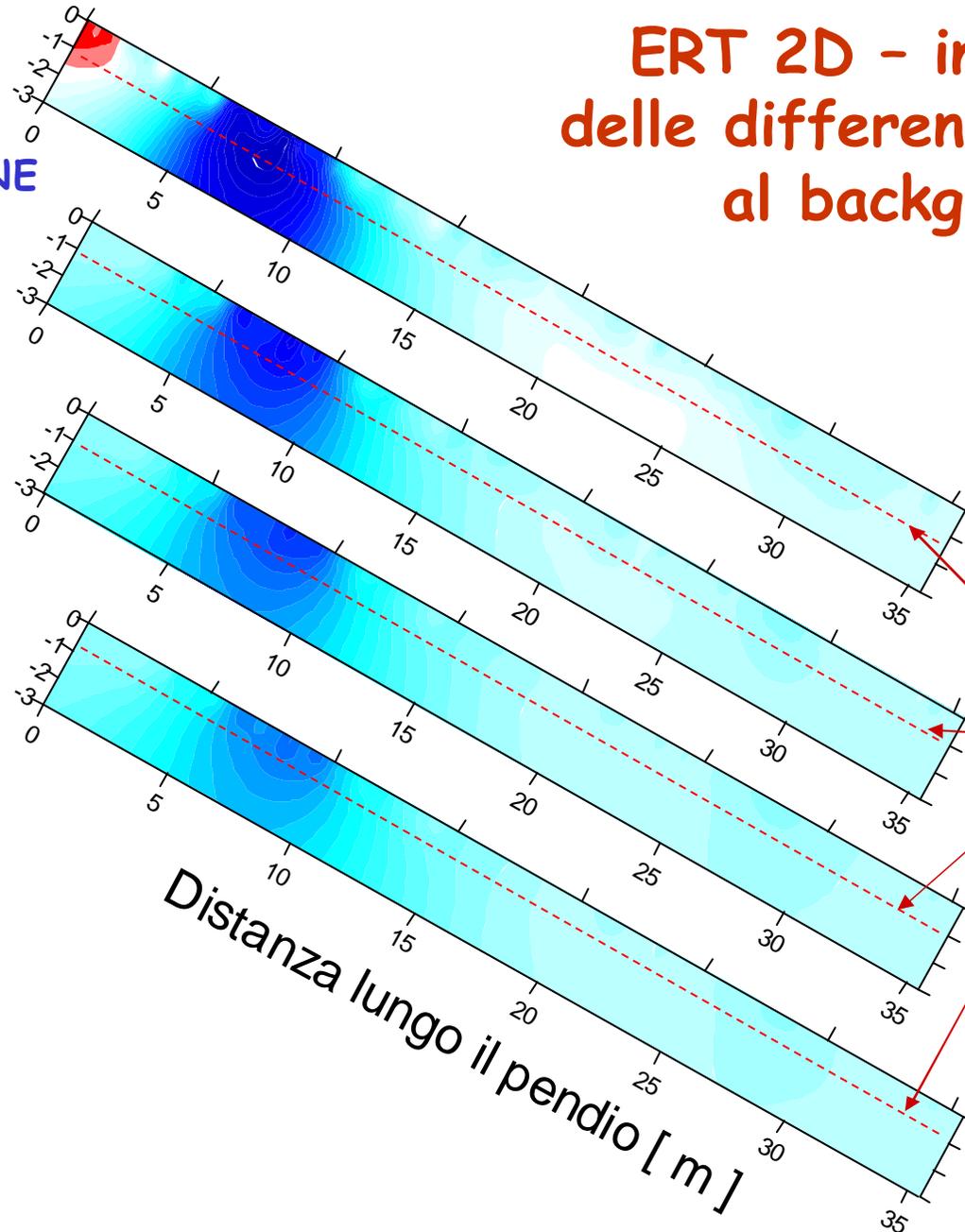
FINE IRRIGAZIONE

dopo 18 h

dopo 19 h

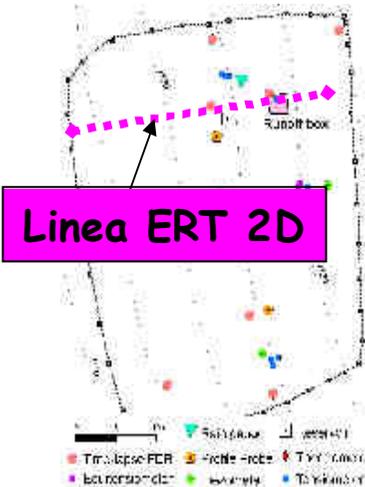
dopo 21 h

dopo 26 h



interfaccia
suolo-basamento

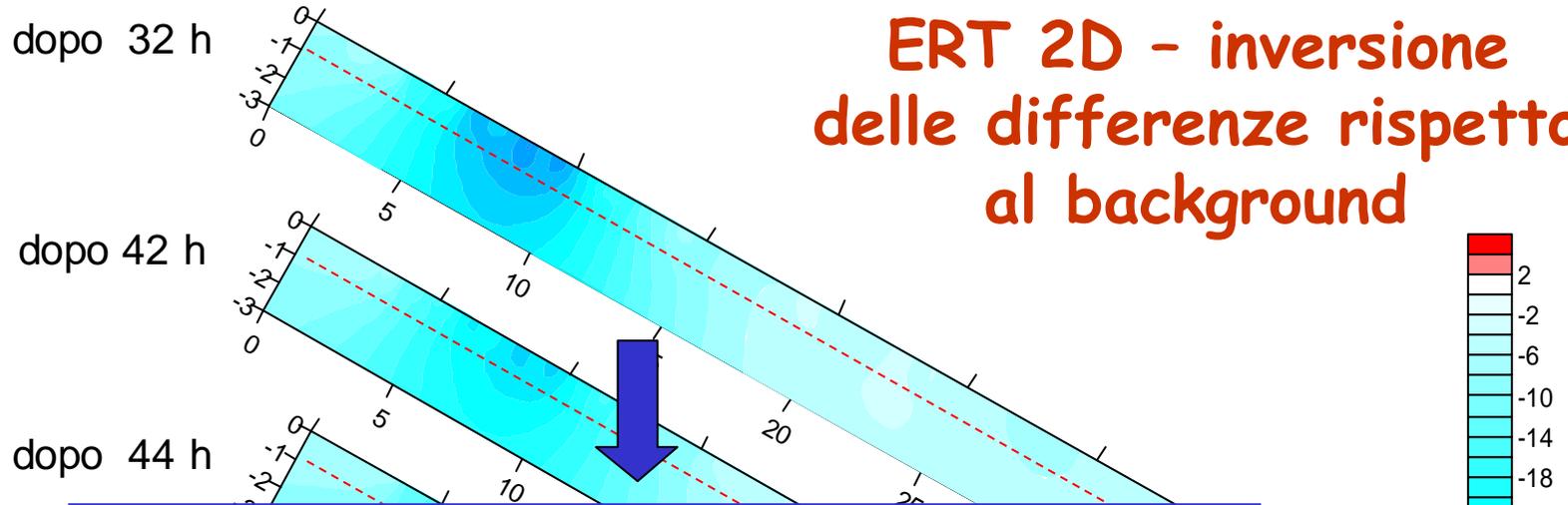
% di variazione
rispetto
alla resistività
di background



Linea ERT 2D

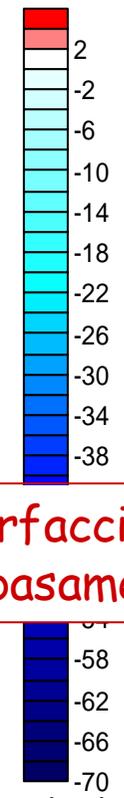


ERT 2D - inversione delle differenze rispetto al background

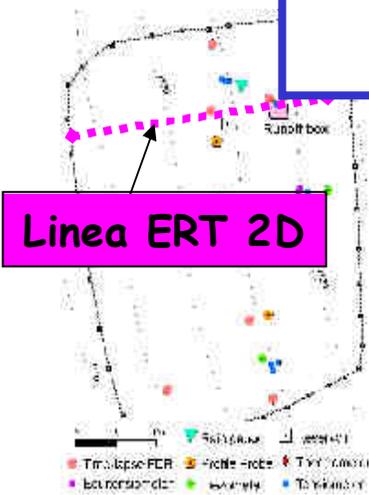


Il flusso subsuperficiale nel suolo è un percorso trascurabile per l'acqua lungo il pendio.

interfaccia suolo-basamento

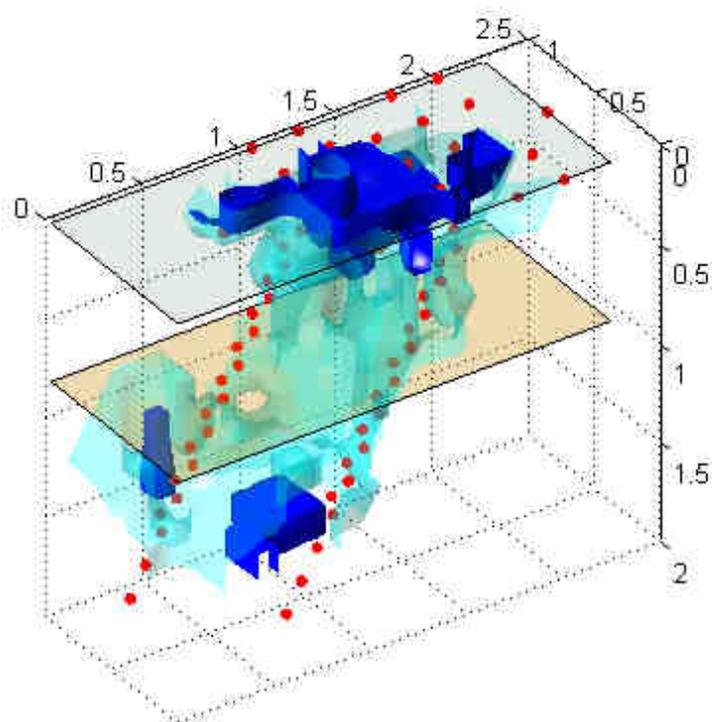


% di variazione rispetto alla resistività di background

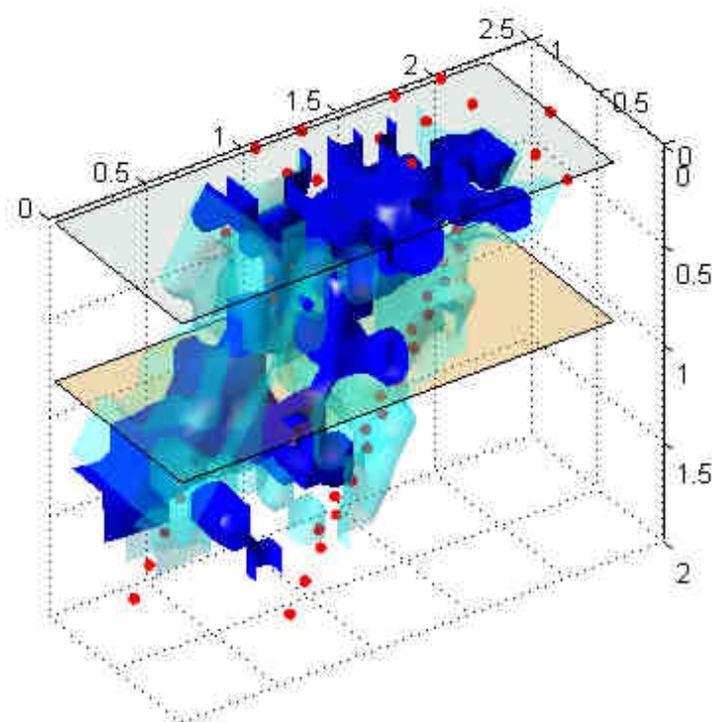


Distanza lungo il pendio [m]

3D ERT inversione di resistività rispetto al background



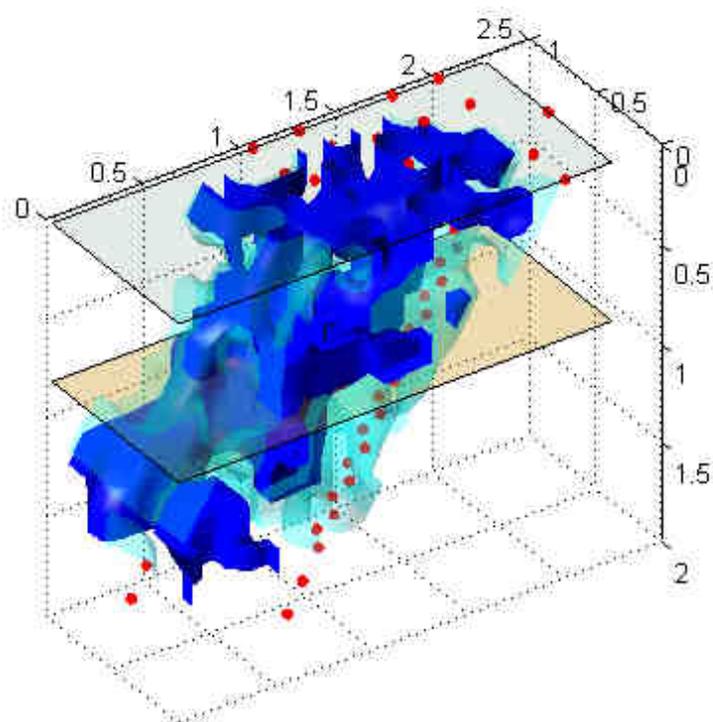
dopo 0.8 h



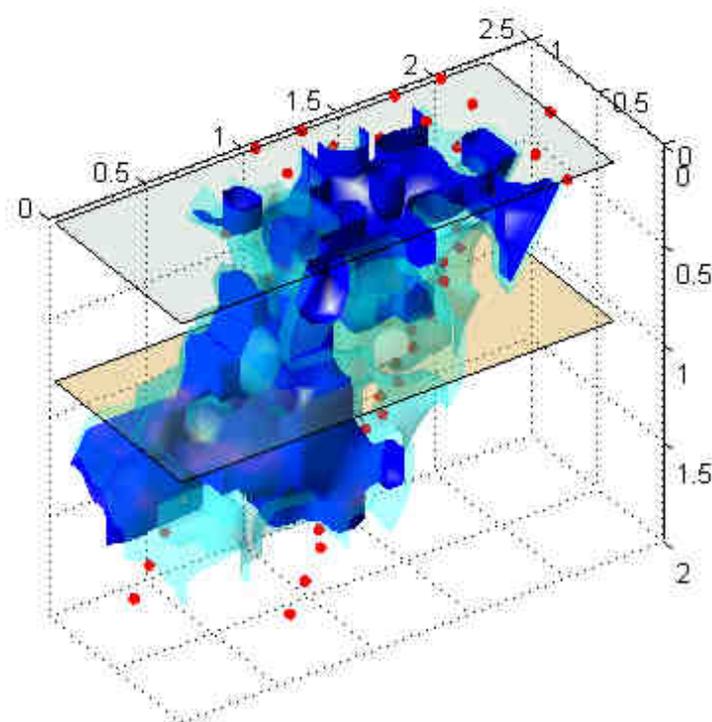
dopo 2.4 h

blu = 30% del background, azzurro = 70% del background

3D ERT inversione di resistività rispetto al background



dopo 4.2 h

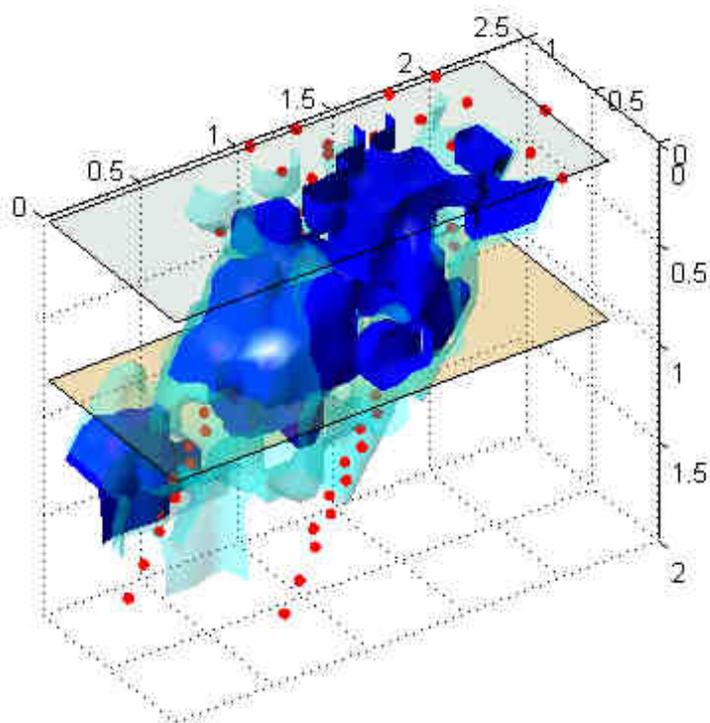


dopo 9.5 h

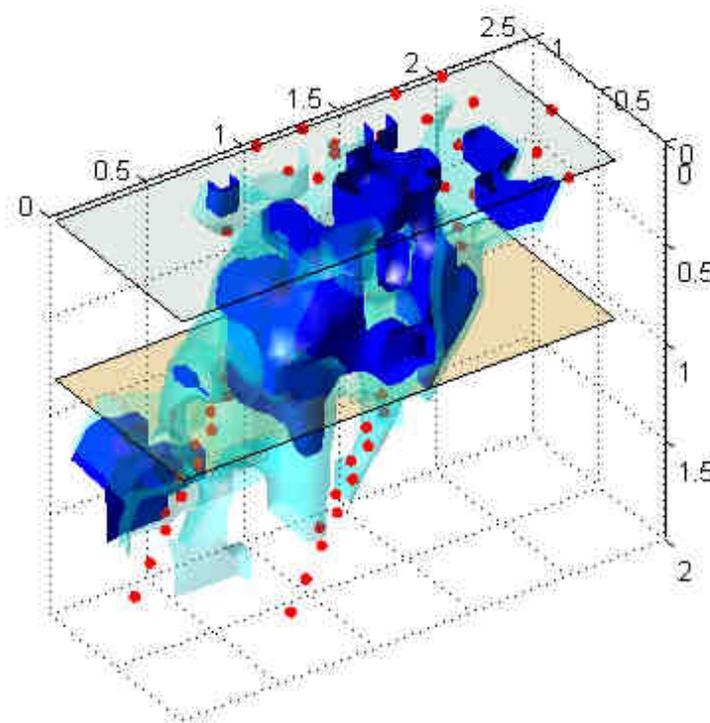
blu = 30% del background, azzurro = 70% del background

3D ERT inversione di resistività rispetto al background

FINE IRRIGAZIONE



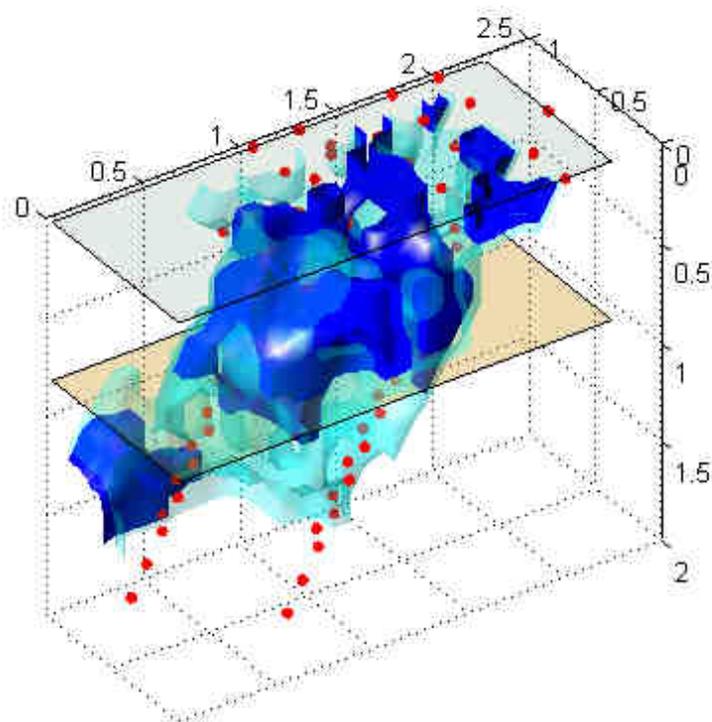
dopo 19.0 h



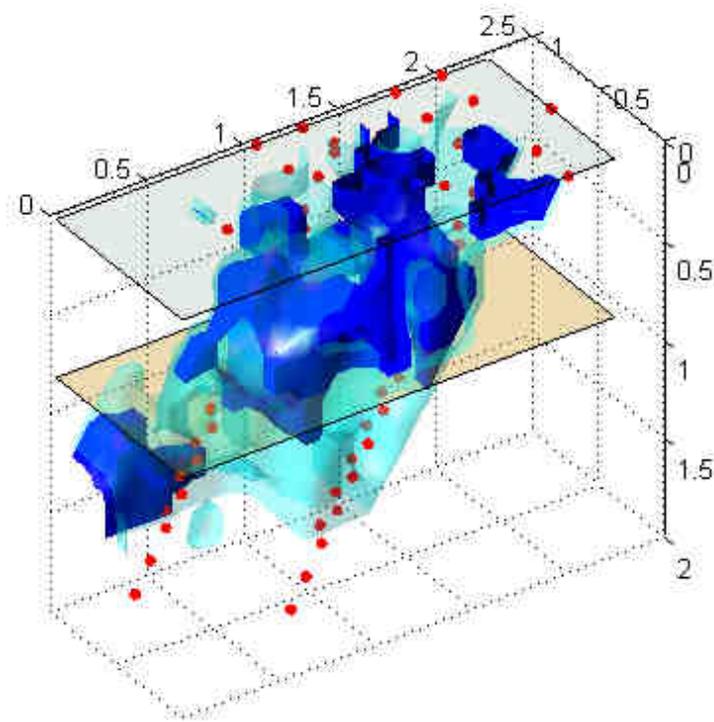
dopo 20.5 h

blu = 30% del background, azzurro = 70% del background

3D ERT inversione di resistività rispetto al background



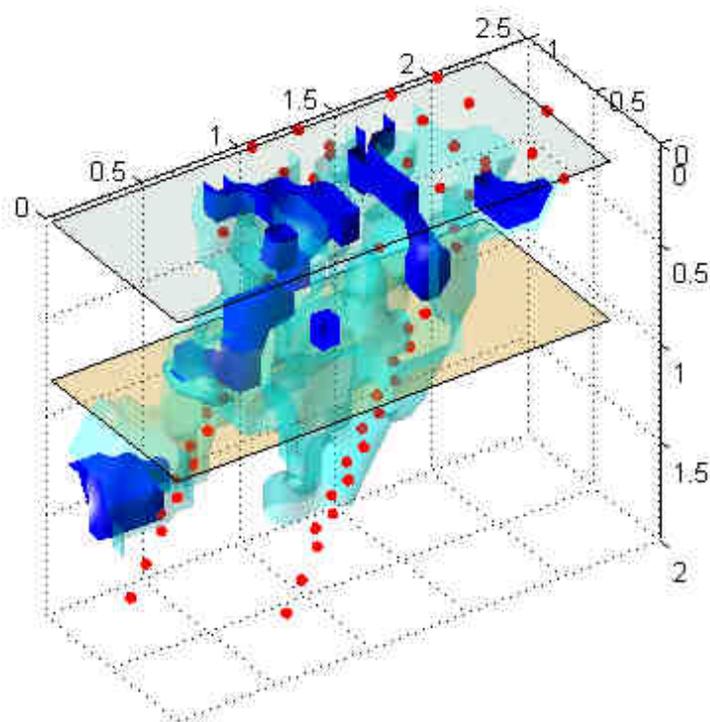
dopo 23.6 h



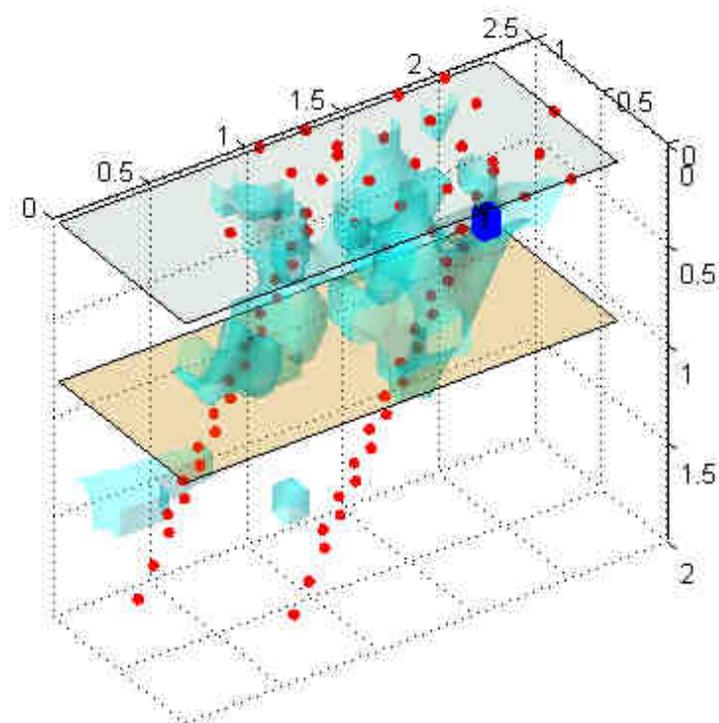
dopo 25.3 h

blu = 30% del background, azzurro = 70% del background

3D ERT inversione di resistività rispetto al background



dopo 47.2 h



dopo 214 h

blu = 30% del background, azzurro = 70% del background

Test con traccianti colorati



original picture

spectral analysis

B/W thresholding

Acqua "vecchia" o acqua "nuova" ?

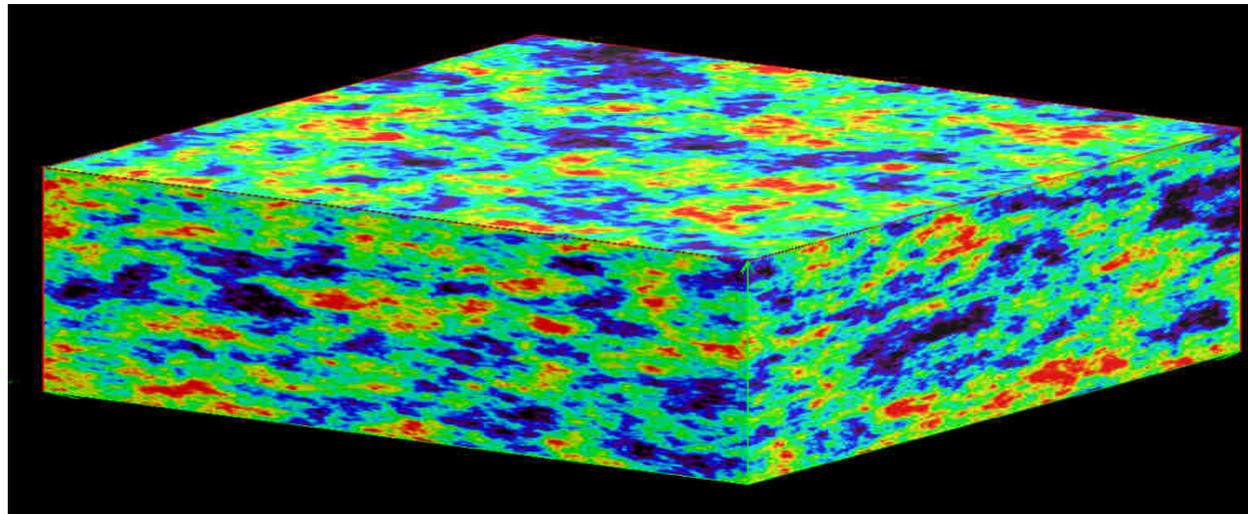
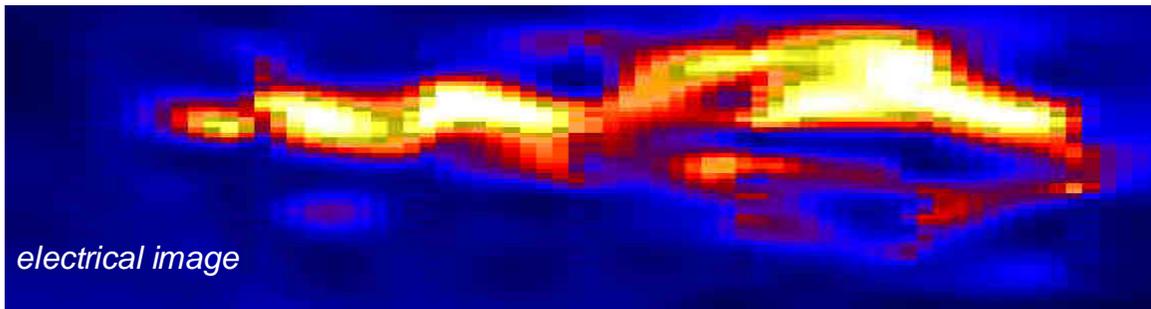
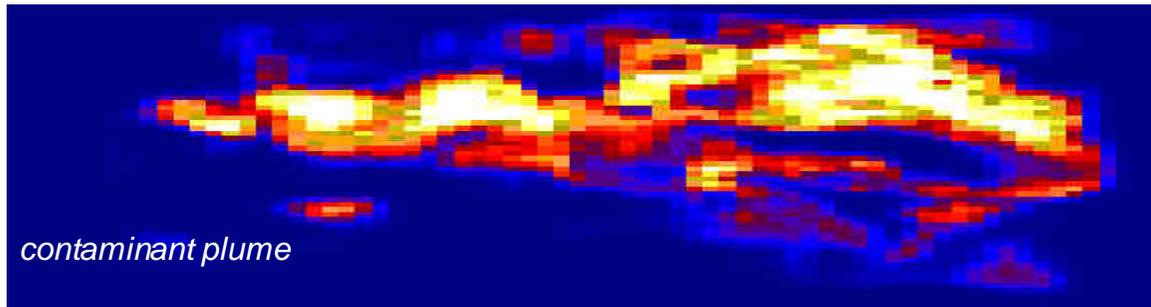


Sommario

- Gli strumenti dell'idrogeofisica

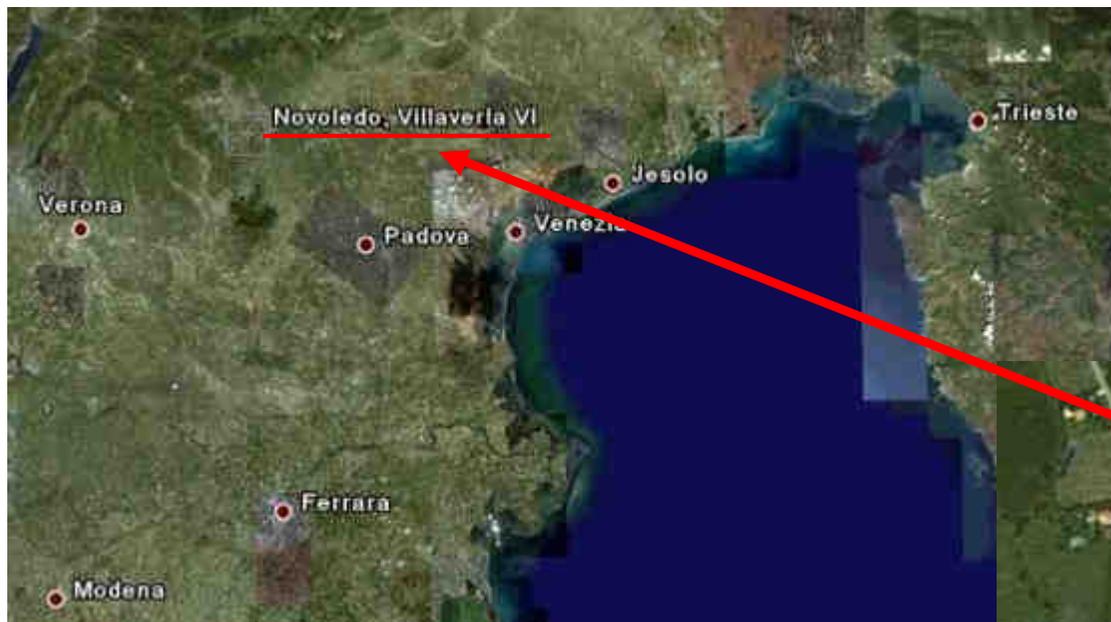
- Esempi:
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona non satura
 - Monitoraggio idrogeofisico di pendii montani
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona satura

- Conclusioni e prospettive



courtesy: A. Kemna - University of Bonn

Il sito sperimentale nell'oasi di Novoledo-Villaverla (Vi)



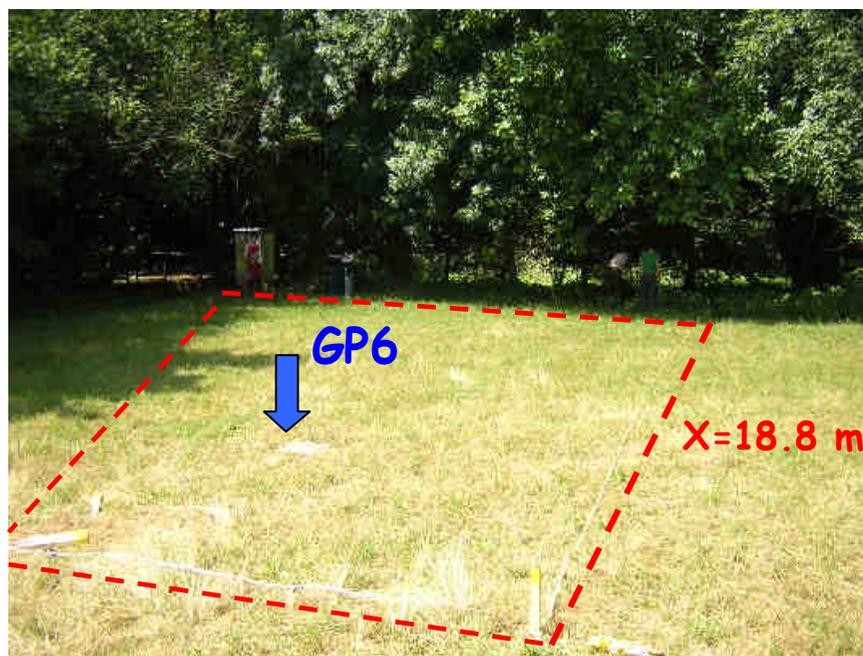
CENTRO IDRICO NOVOLEDO è partecipata, in pari quota, da **AIM Vicenza S.p.A.** e da **APS di Padova** ed ha sede a Villaverla, all'interno dell'area naturalistica da cui prende origine l'acquedotto di Padova



•l'oasi si estende nel territorio del Comune di Villaverla, nel vicentino, su 258.214 metri quadri



Il sito sperimentale nell'oasi di Novoledo-Villaverla (Vi)



pozzetto di iniezione

campo prove :
18.8 m x 11.75 m

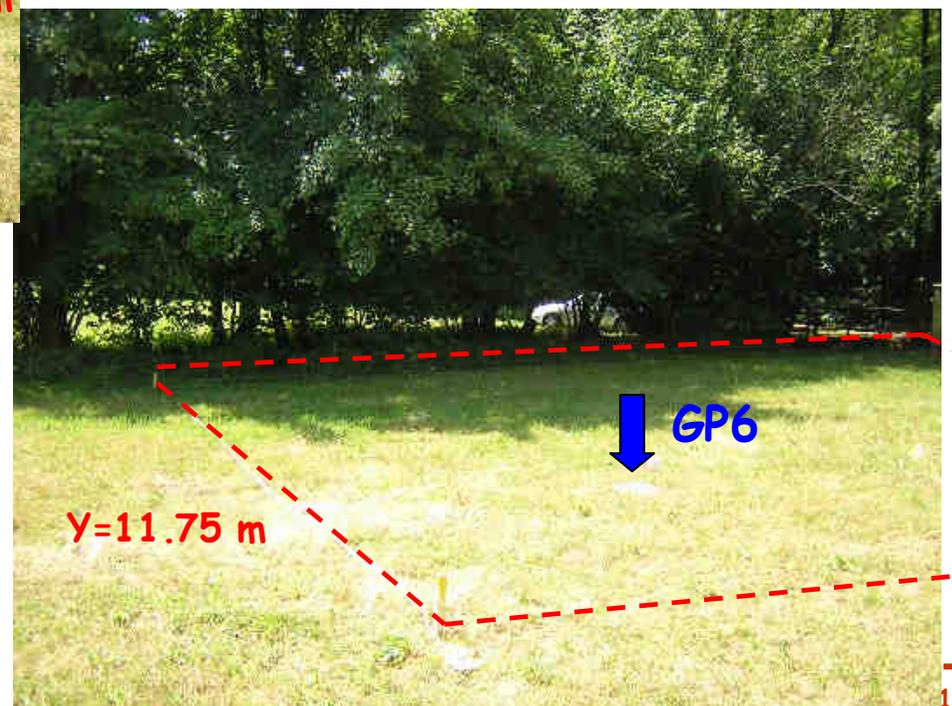
Misure geofisiche

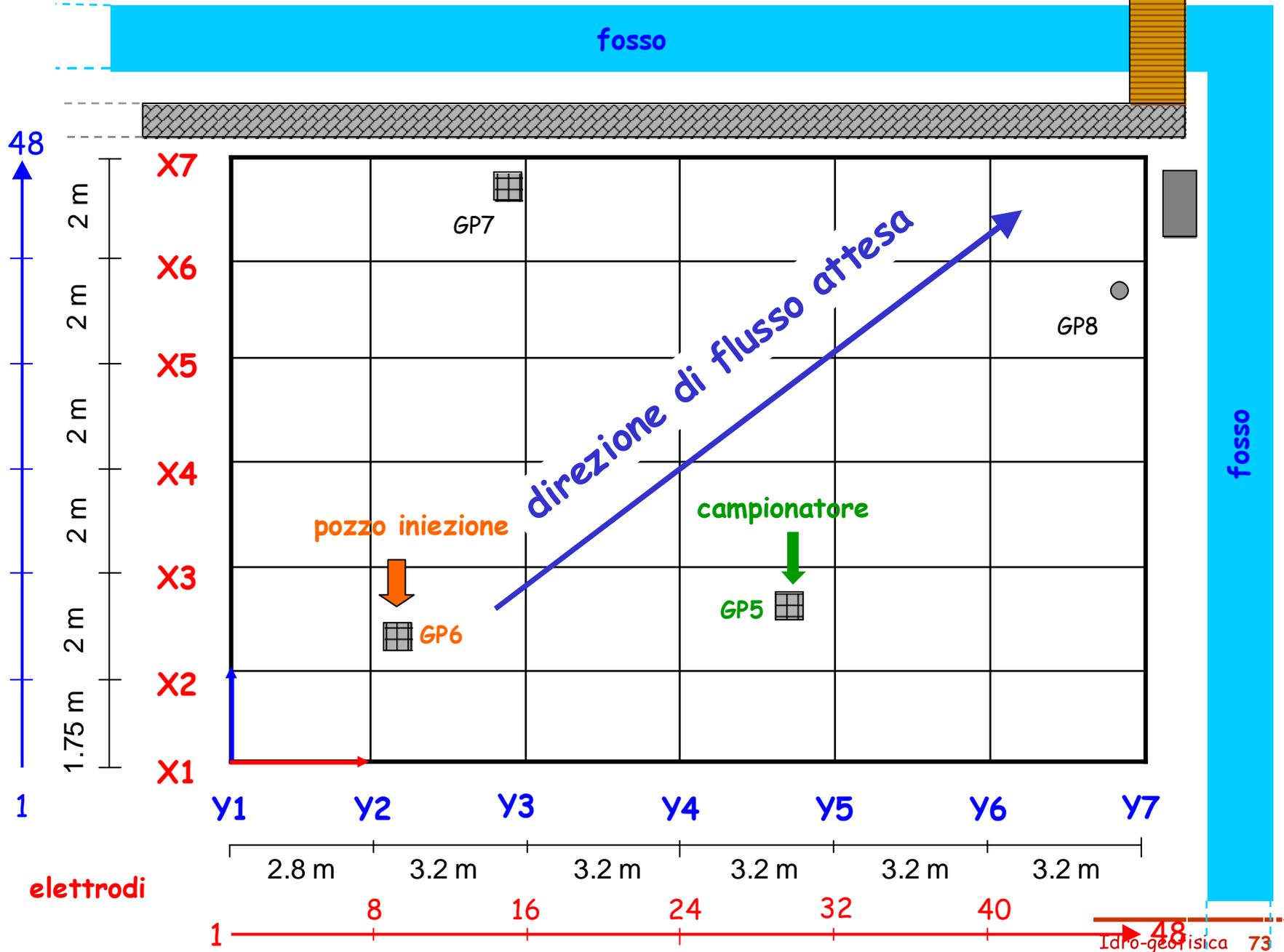
Lungo l'asse X:

7 linee da 48 elettrodi (spaziatura 40 cm)

Lungo l'asse Y:

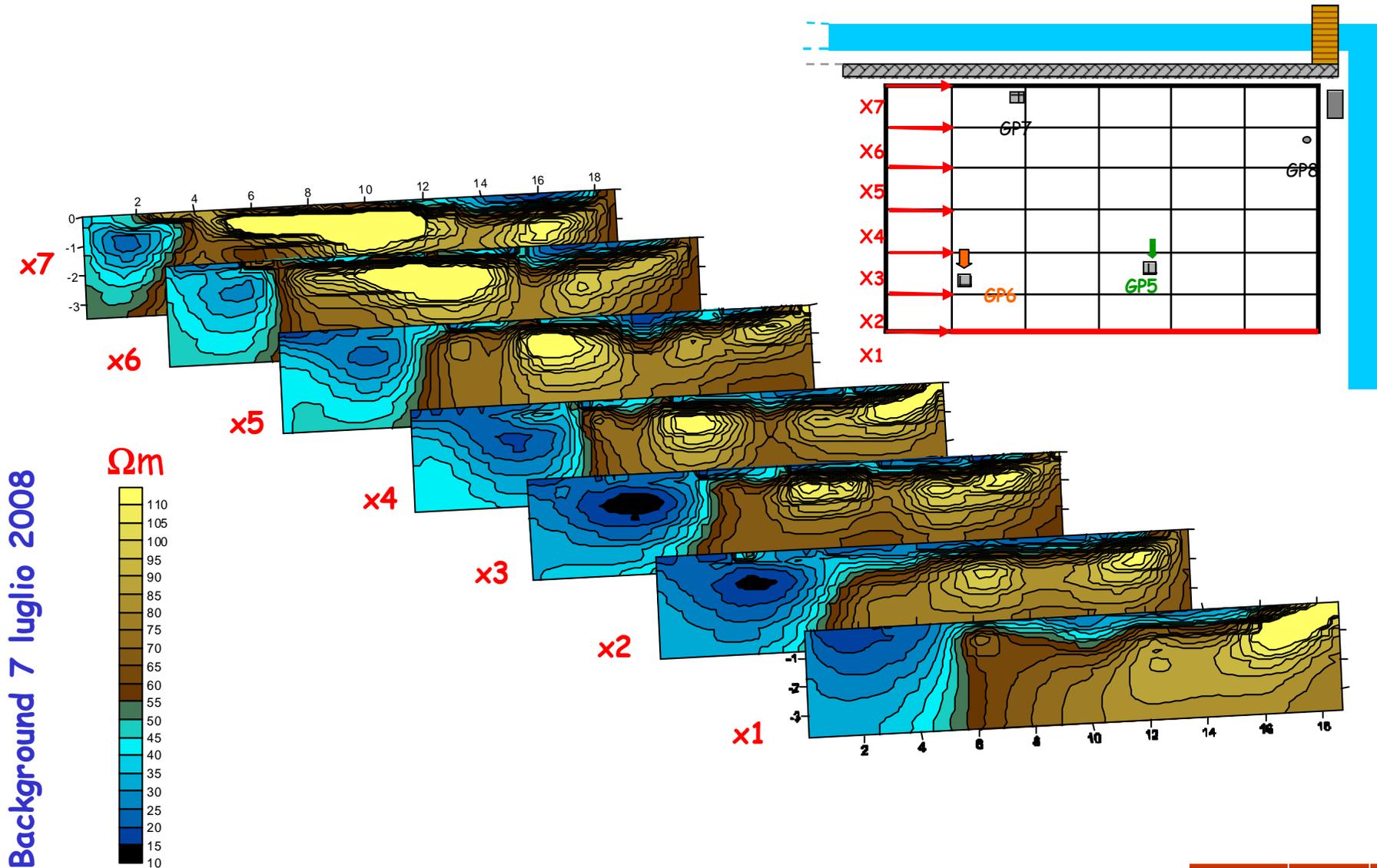
7 linee da 48 elettrodi (spaziatura 25 cm)







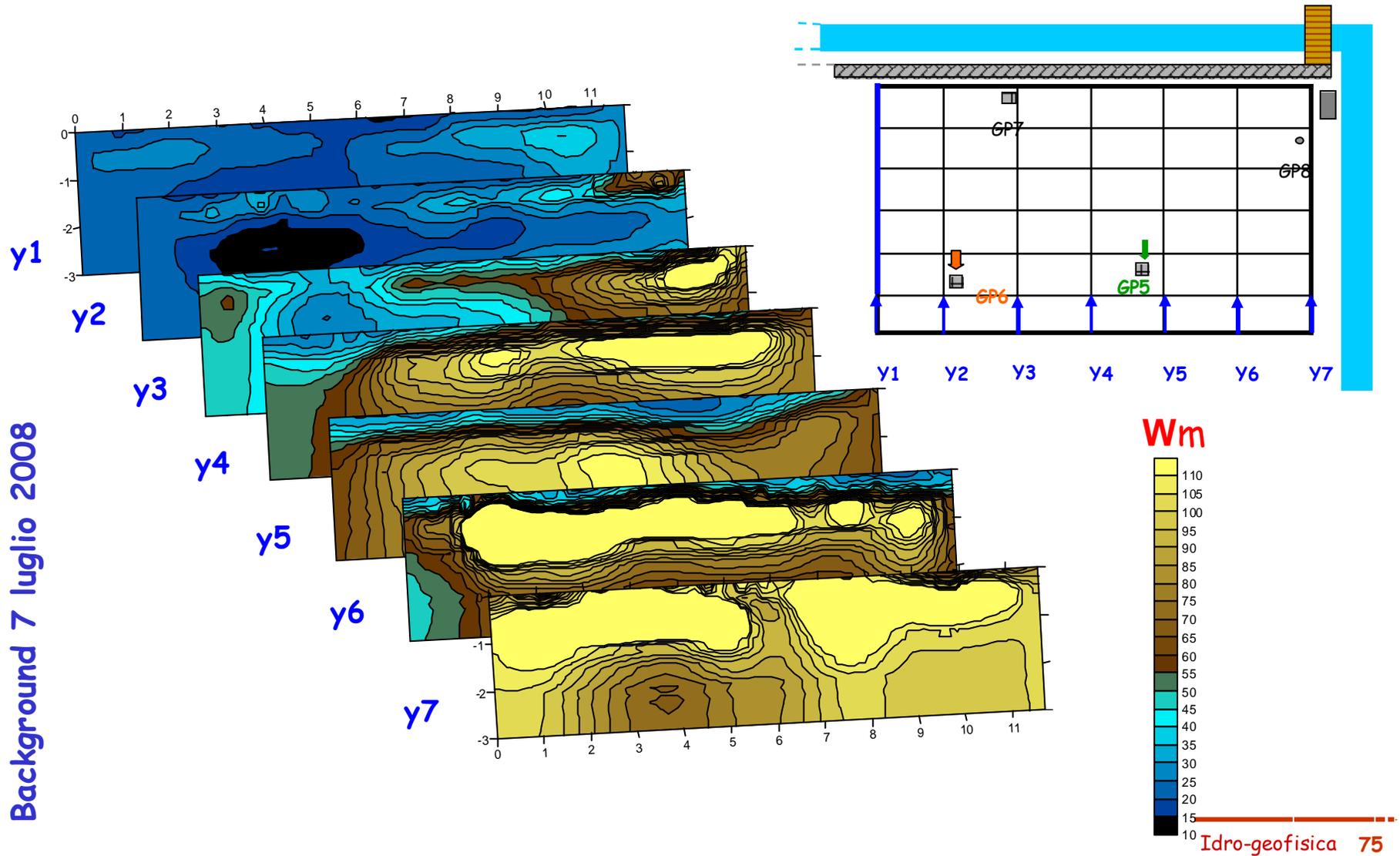
Tomografie elettriche 2D - Misure di background



Background 7 luglio 2008

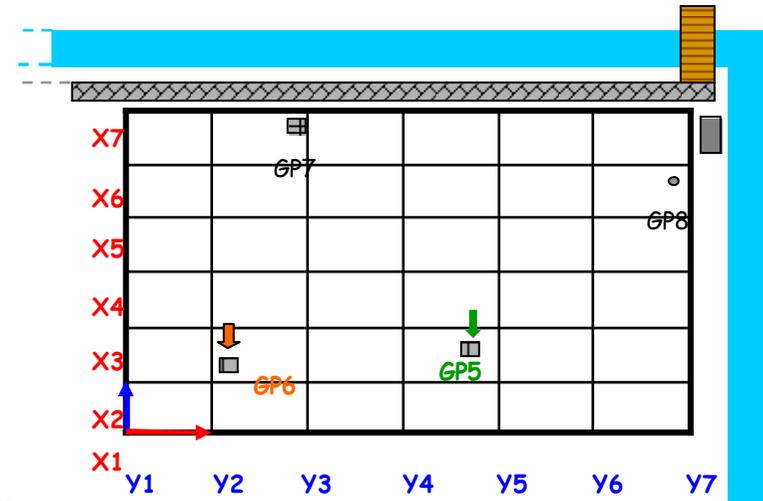
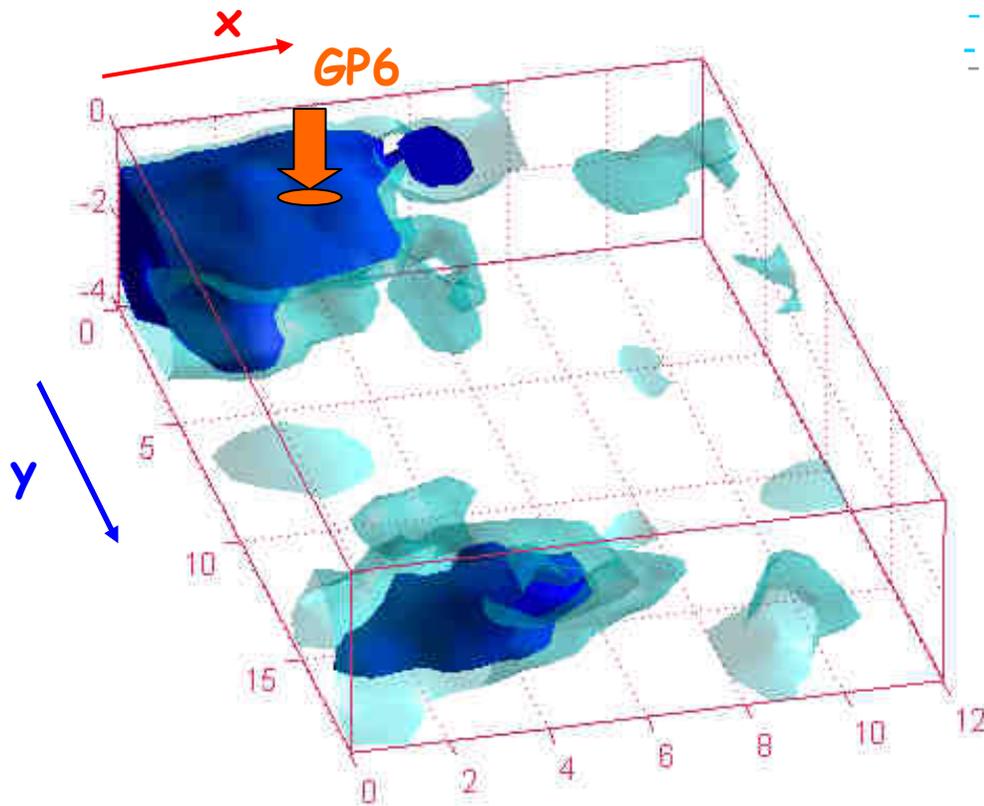


Tomografie elettriche 2D - Misure di background



3D ERT - Inversione dei rapporti rispetto al background

FINE INIEZIONE 14 luglio 2008

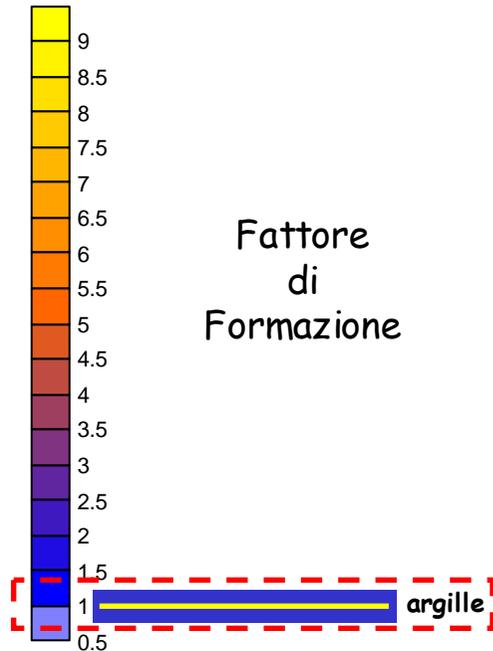
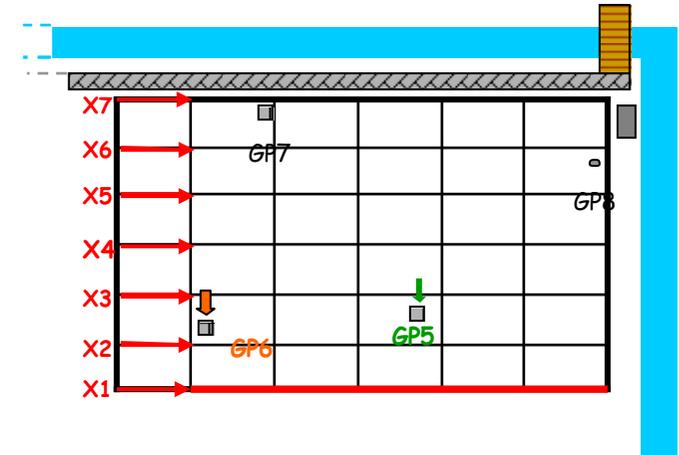
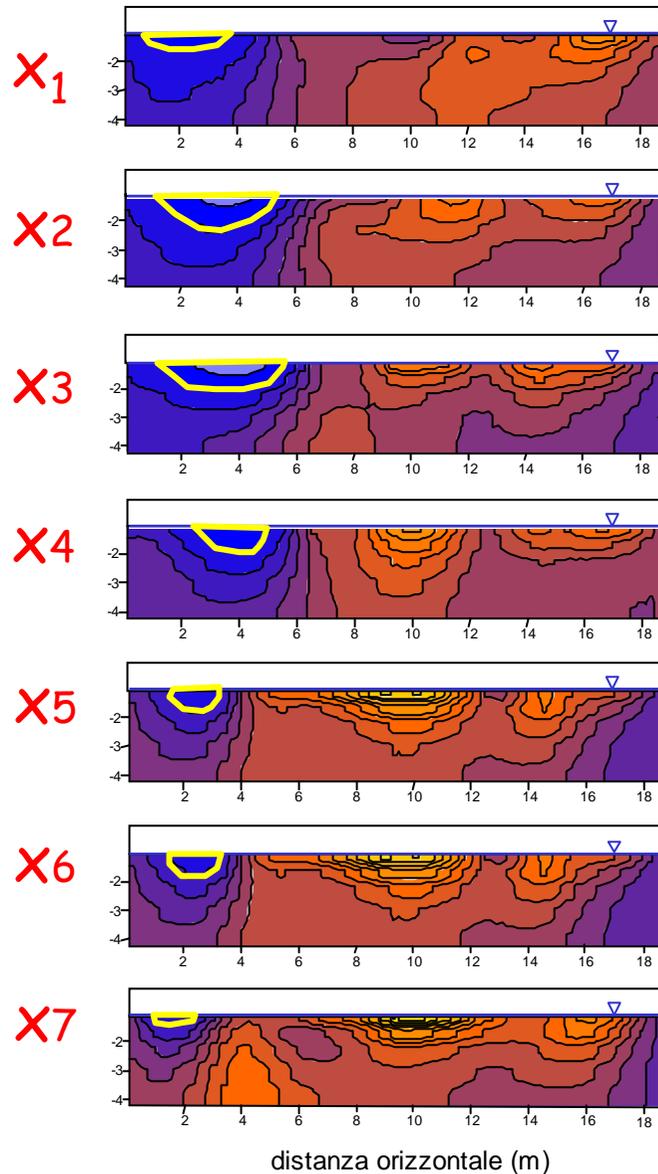


- Time 1: 15 luglio 2008
- Time 2: 17 luglio 2008
- Time 3: 29 luglio 2008
- Time 4: 1 agosto 2008
- Time 5: 5 agosto 2008
- Time 6: 7 agosto 2008
- Time 7: 1 settembre 2008

BLU SCURO = 85% background, CELESTE = 90% background

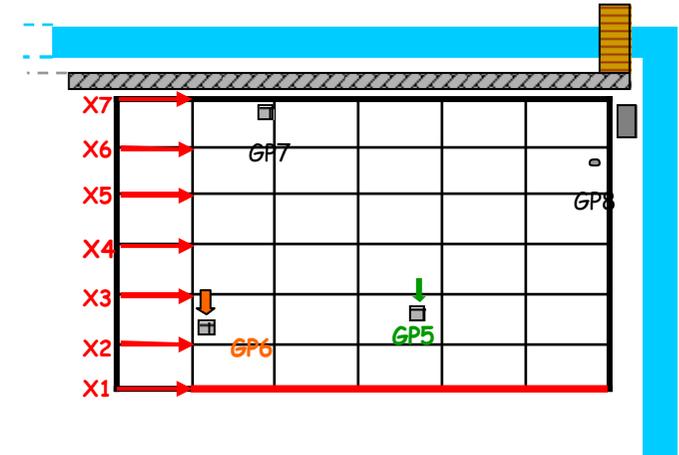
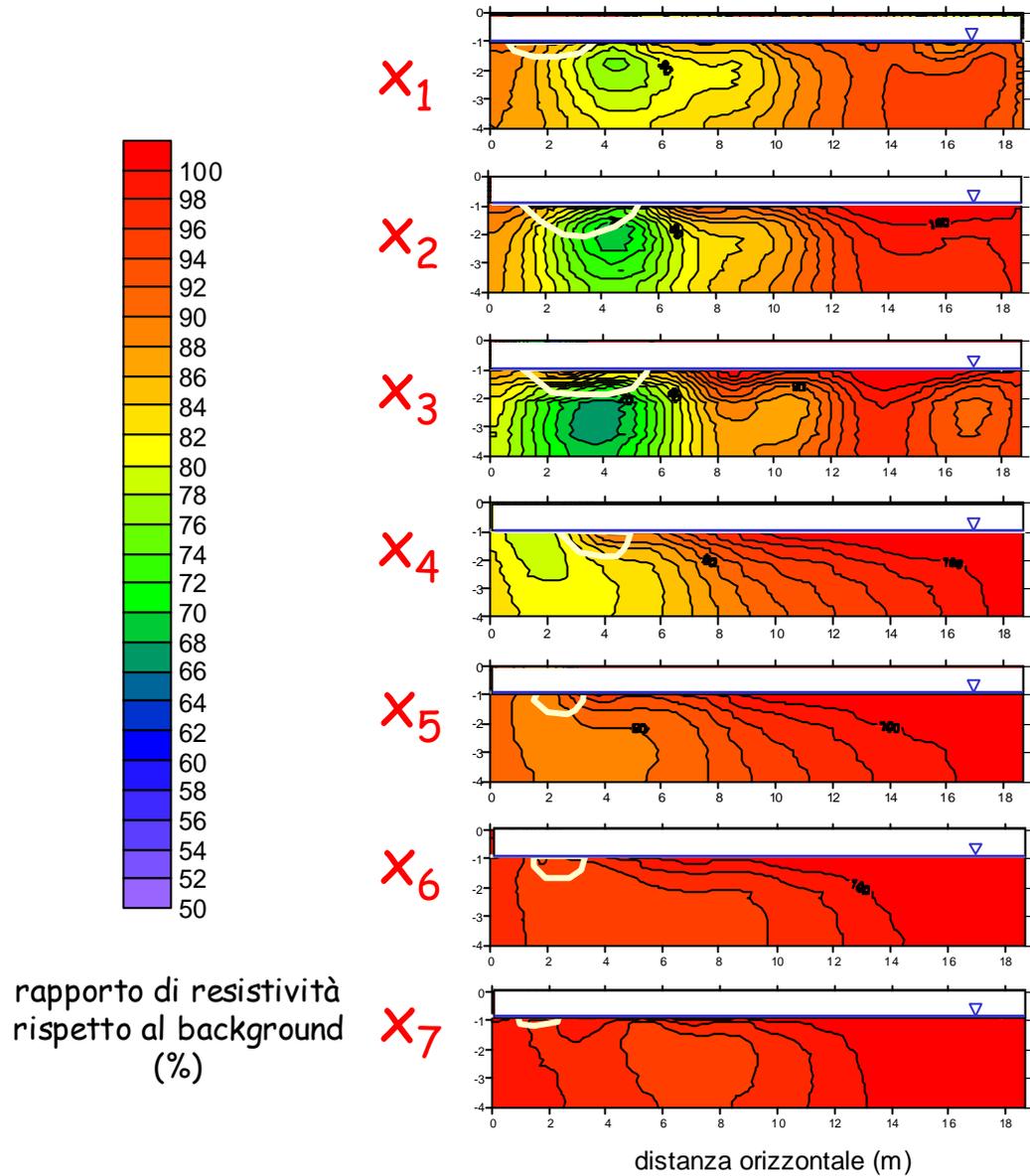
Fattore di formazione con σ_w media 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$

lenti argillose





Time 1: 15 luglio 2008

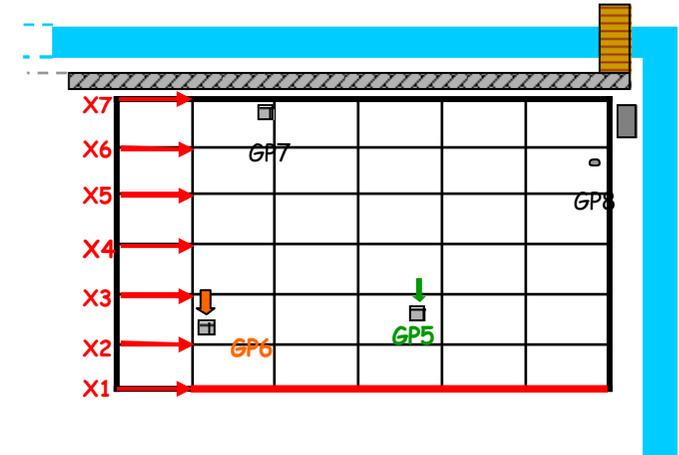
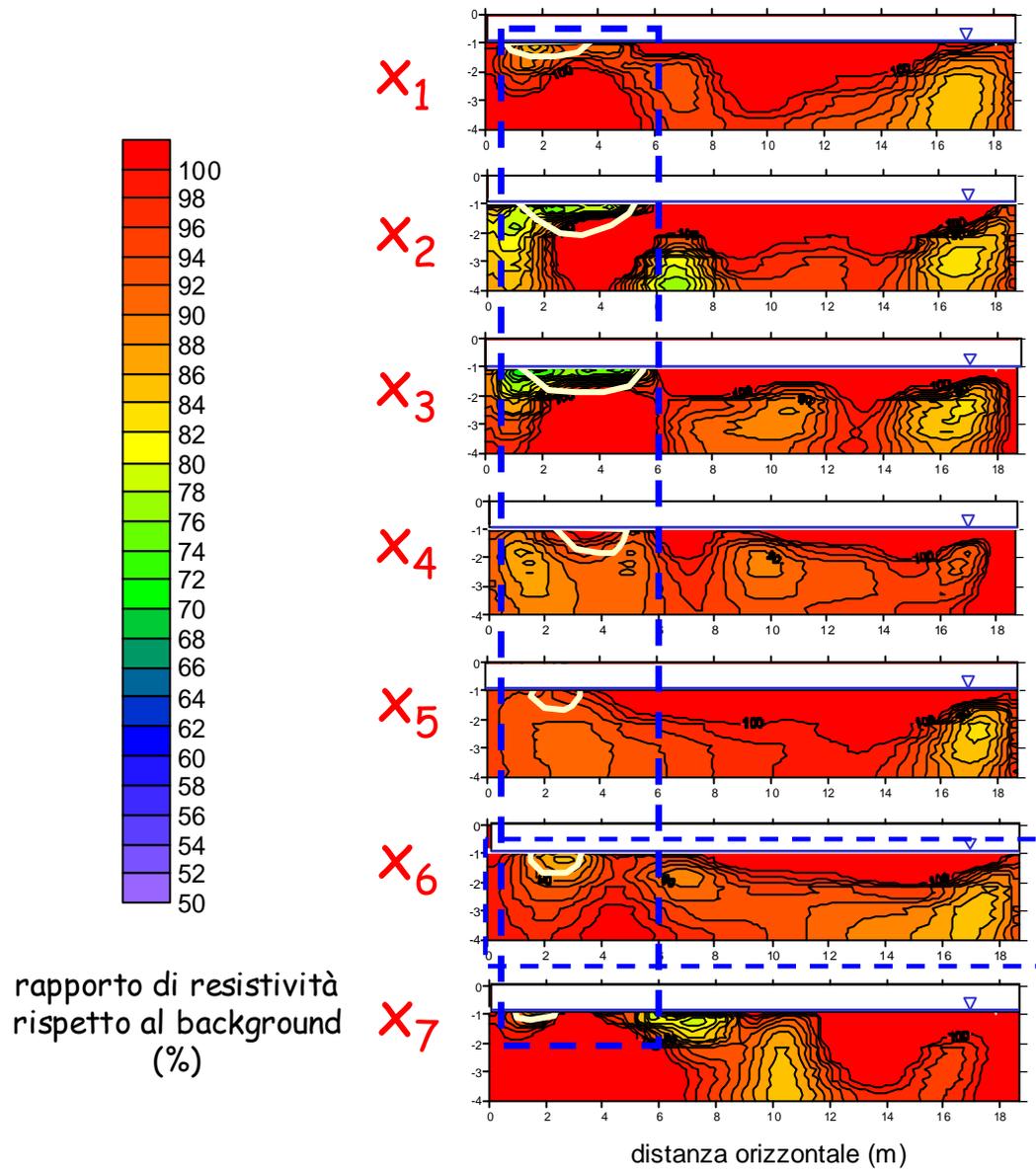


Background 7 luglio 2008

Fine iniezione 14 luglio 2008



Time 7: 1 settembre 2008



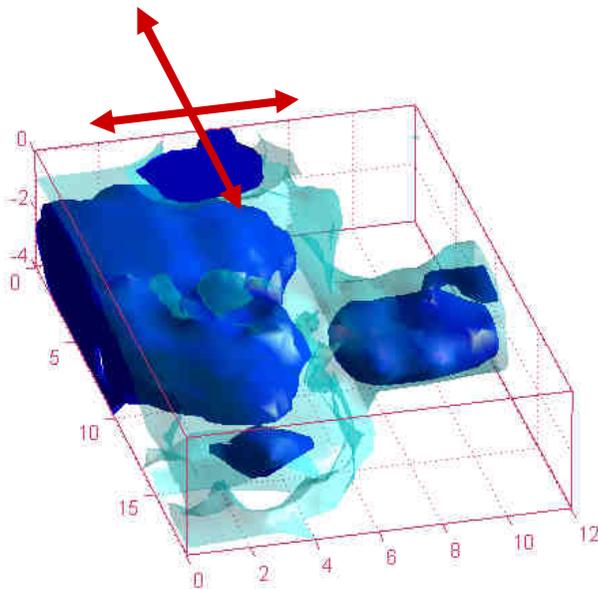
Background 7 luglio 2008

Fine iniezione 14 luglio 2008

Prospettive: misure ERT in time-lapse per la stima di K

1

stima dei momenti spaziali $\sigma_x^2(t)$ $\sigma_y^2(t)$ in funzione del tempo



2

calcolo dei coefficienti di macro-dispersione a partire dalla variazione nel tempo dei momenti spaziali

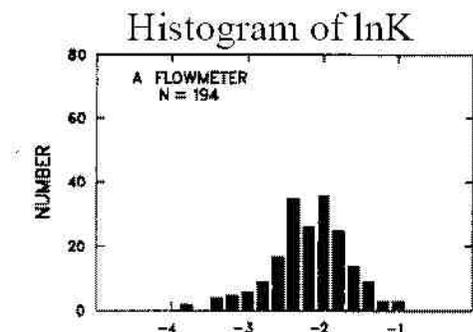
$$D_x(t) = \frac{1}{2v_x} \frac{d\sigma_x^2(t)}{dt}$$

$$D_y(t) = \frac{1}{2v_x} \frac{d\sigma_y^2(t)}{dt}$$

3

stima della varianza e della correlazione spaziale del campo di conducibilità idraulica K a partire dai coefficienti di macro-dispersione

$$\begin{matrix} D_x(t) & \rightarrow & \sigma_{\ln K}^2 \\ & & \lambda_x \\ D_y(t) & & \lambda_y \end{matrix}$$



Sommario

- ❑ Gli strumenti dell'idrogeofisica

- ❑ Esempi:
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona non satura
 - Monitoraggio idrogeofisico di pendii montani
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona satura

- ❑ Conclusioni e prospettive

Conclusioni

- ❑ La dinamica idrologica può essere **studiata efficacemente con metodi non invasivi**.
- ❑ L'informazione ottenuta è massima se ottenuta da misure in **time-lapse** ed in presenza di **forti stress idraulici**.
- ❑ **Le leggi costitutive** che legano idrologia e geofisica sono essenziali.
- ❑ Le **caratteristiche dell'acquisizione e dell'inversione** dei metodi idro-geofisici adottati hanno un impatto critico (p.es., effetto scala).
- ❑ L'importanza **delle informazioni ausiliarie su litologia e geologia** non va sottovalutata.



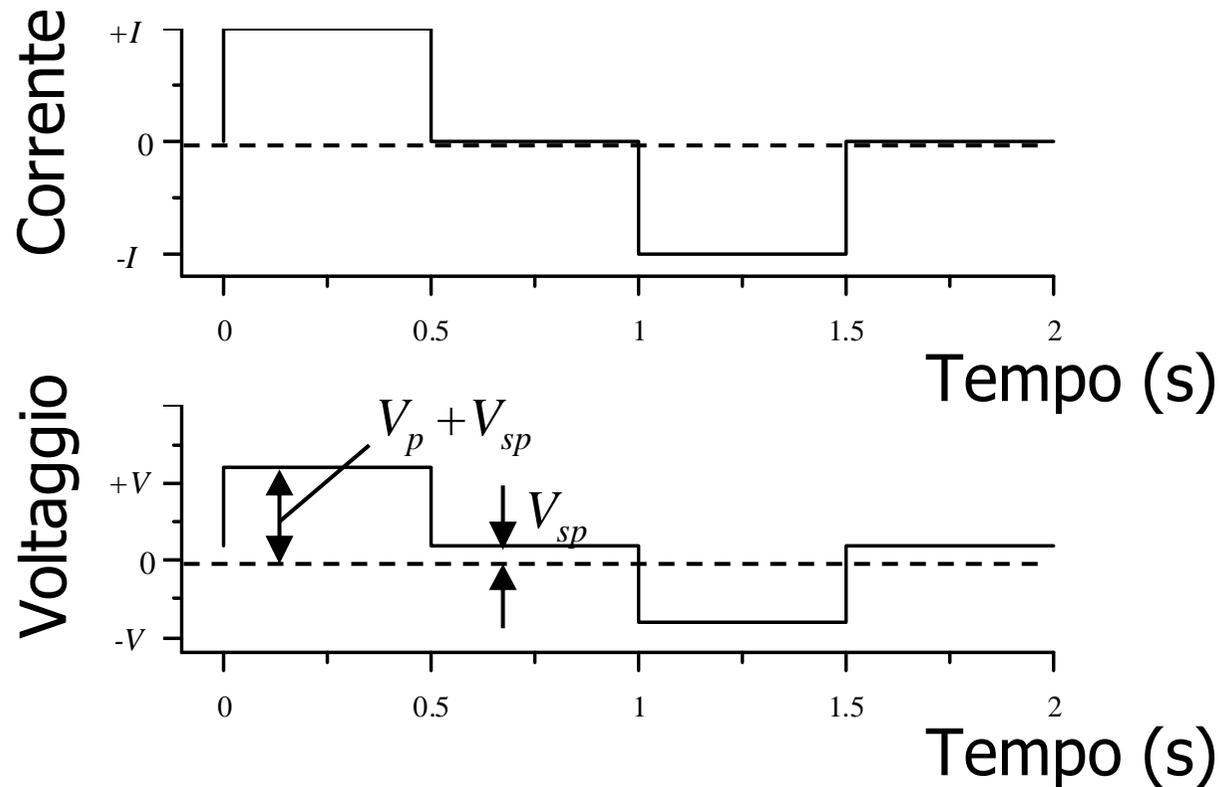


Sommario

- ❑ Gli strumenti dell'idrogeofisica
- ❑ Esempi:
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona non satura
 - Monitoraggio idrogeofisico di pendii montani
 - Caratterizzazione idrogeofisica della zona satura
- ❑ Conclusioni e prospettive
 - Stima della conduttività idraulica e della presenza di contaminanti

Polarizzazione indotta (IP) principi di misura

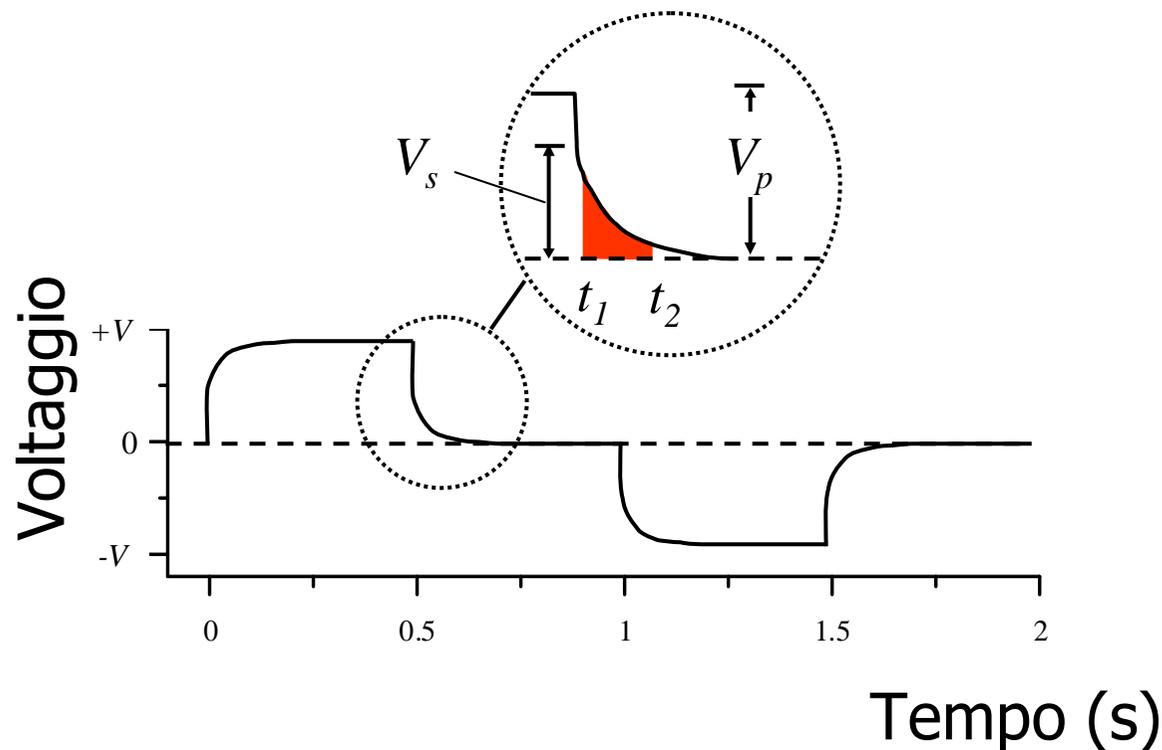
Nella misure di resistività in corrente continua, la differenza di potenziale dovrebbe scendere a zero al cessare dell'iniezione di corrente.



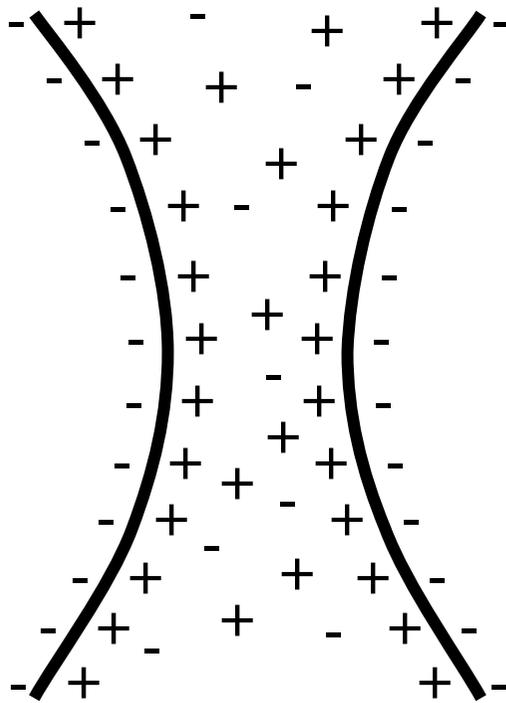
Polarizzazione indotta (IP) principi di misura

In pratica, c'è un processo di accumulo e rilascio di cariche nel sistema.

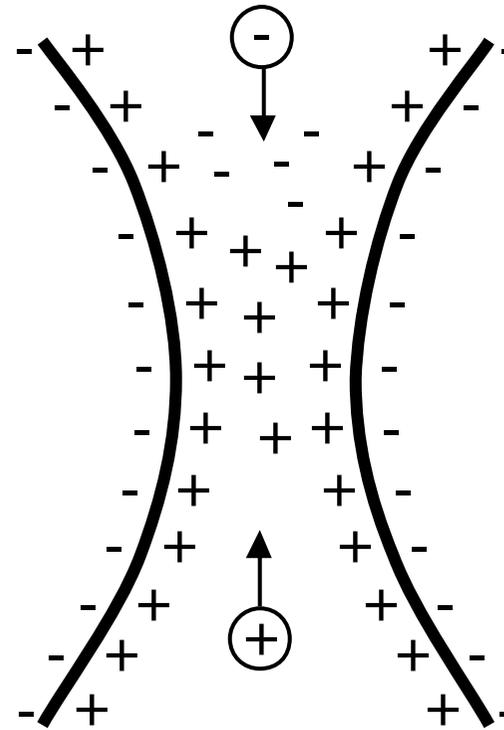
Questo forma la base delle misure di polarizzazione indotta nel dominio del tempo.



Polarizzazione indotta (IP) meccanismi fisici

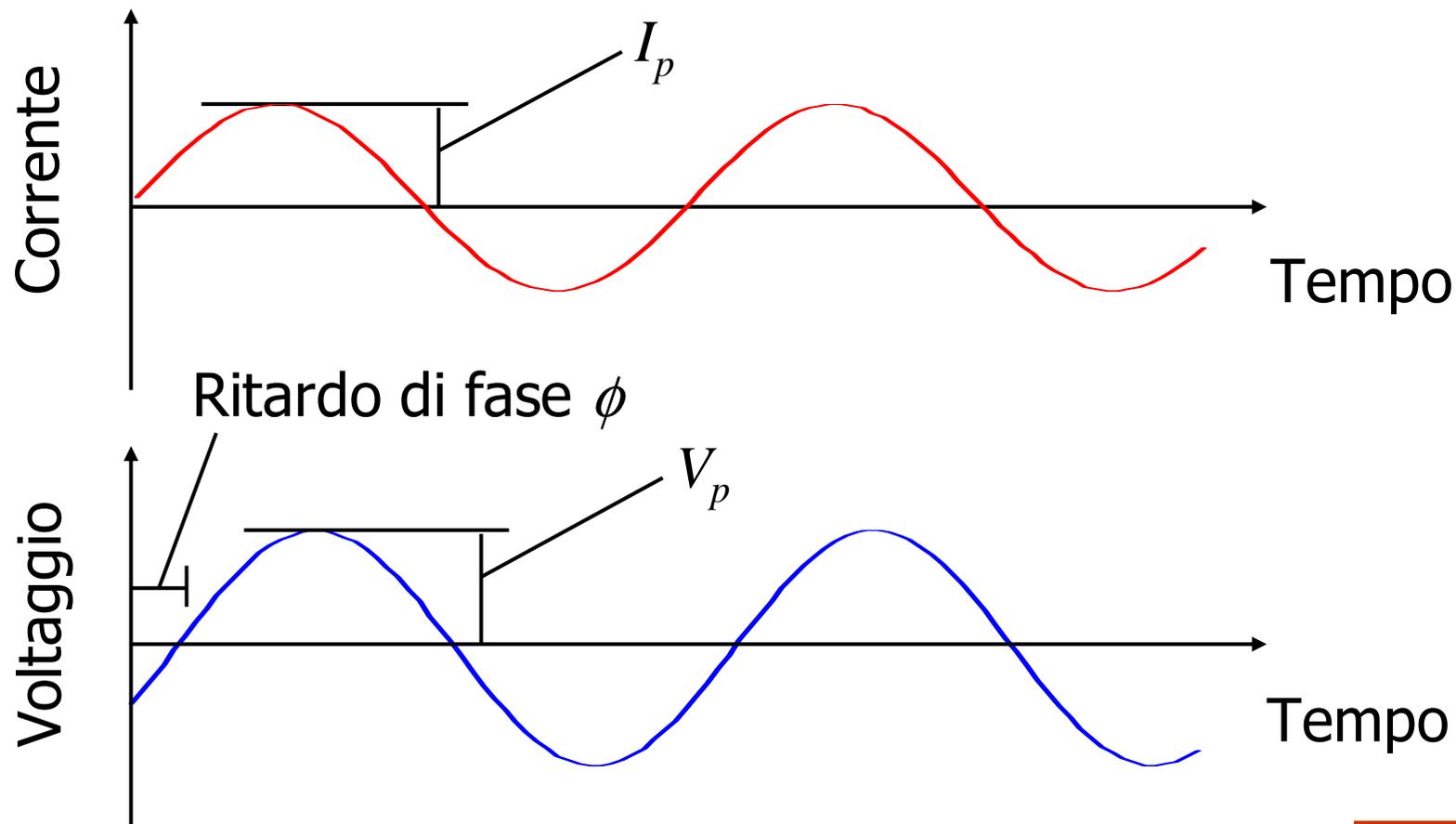


Assenza di campo esterno



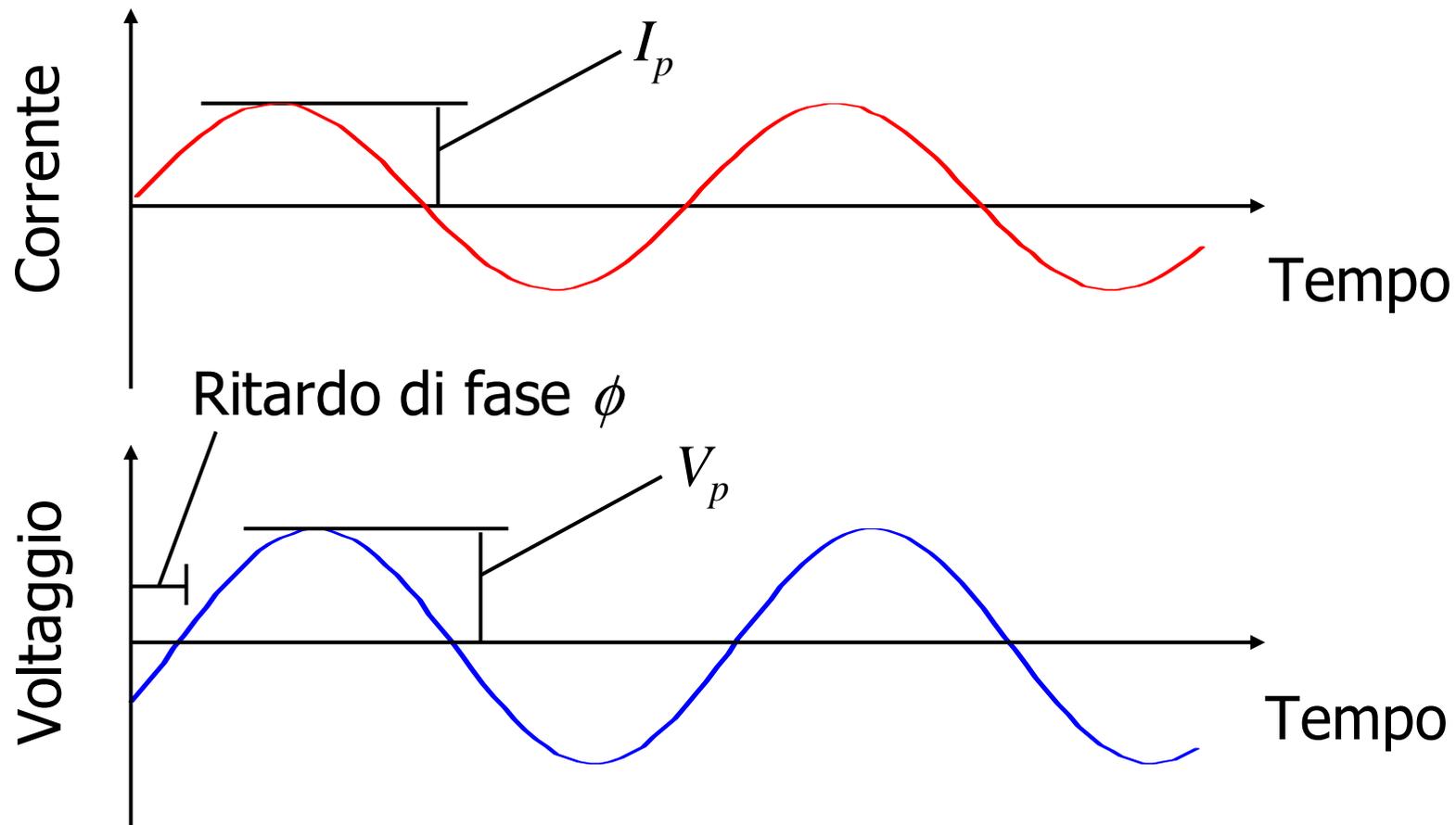
Presenza di campo esterno

La IP può anche essere misurata nel *dominio della frequenza*, osservando alla variazione di ampiezza ed al ritardo di fase tra corrente iniettata e potenziale che ne deriva. Questa è detta **Spectral Induced Polarisation (SIP)**.



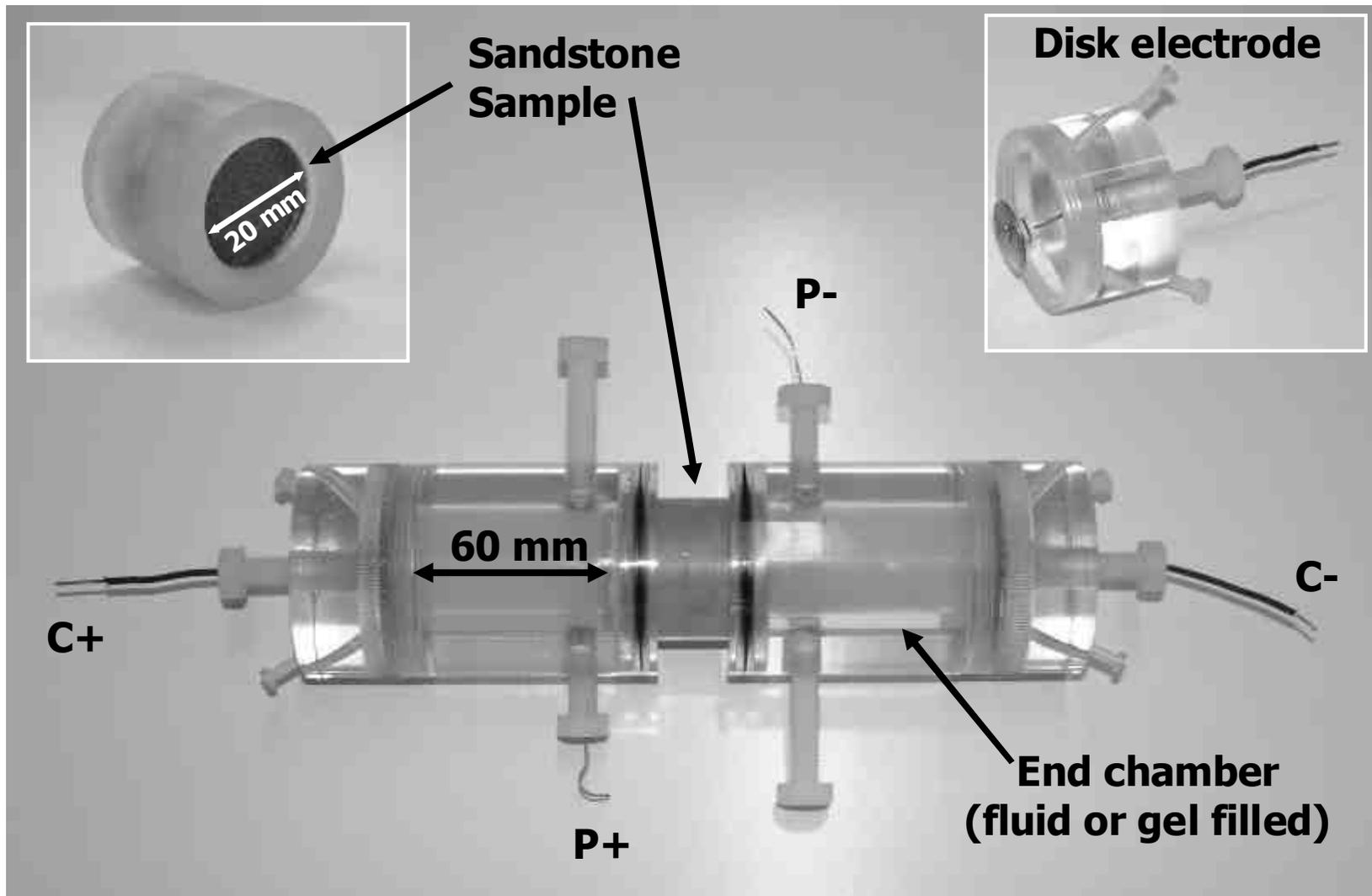
Spectral Induced Polarisation (SIP)

Si misura una resistività complessa con ampiezza $|\rho| = V_p/I_p$ e fase ϕ



Misure SIP su arenarie semi-consolidate

(Binley et al., 2005, *Water Resources Research*)

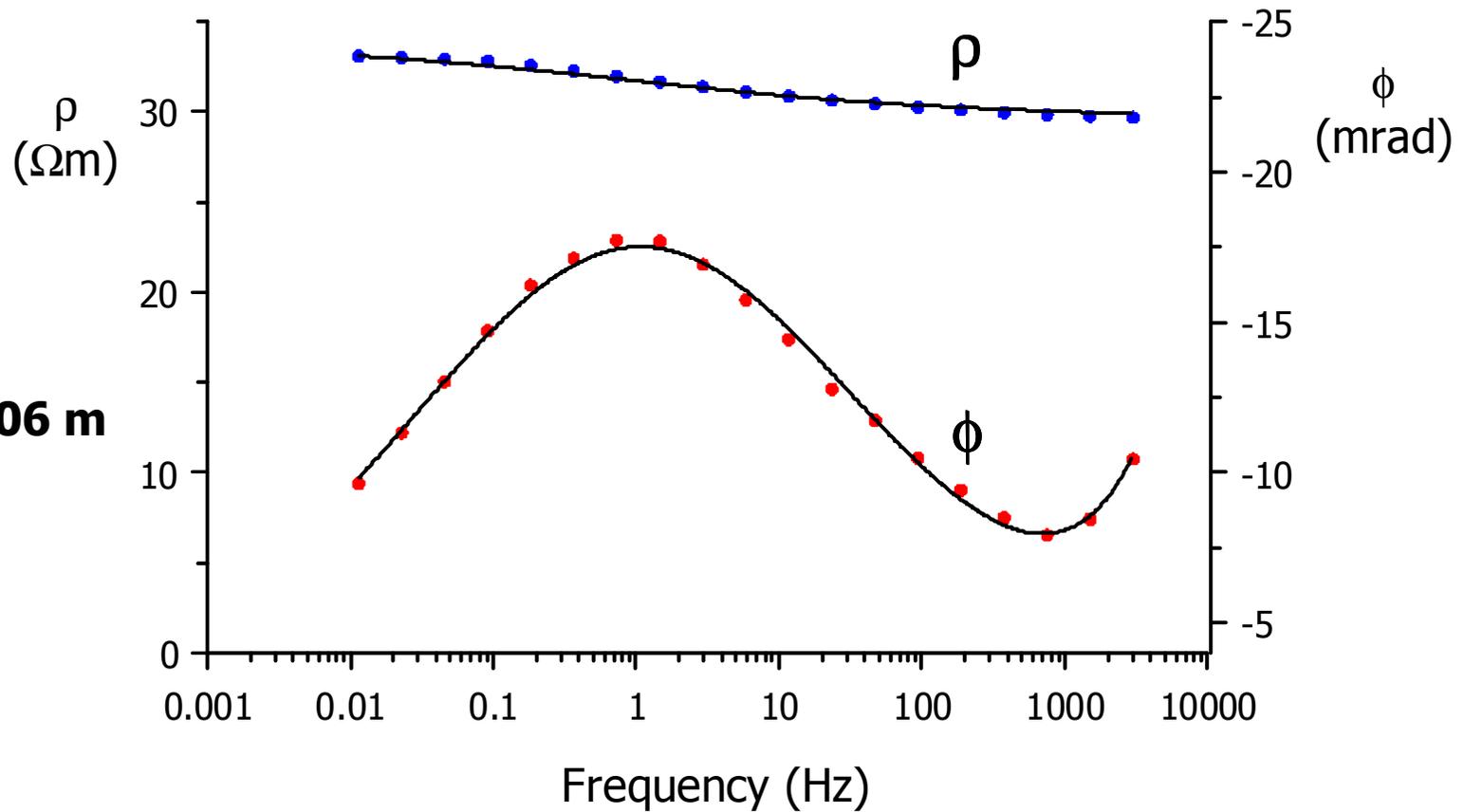


Misure SIP su arenarie semi-consolidate

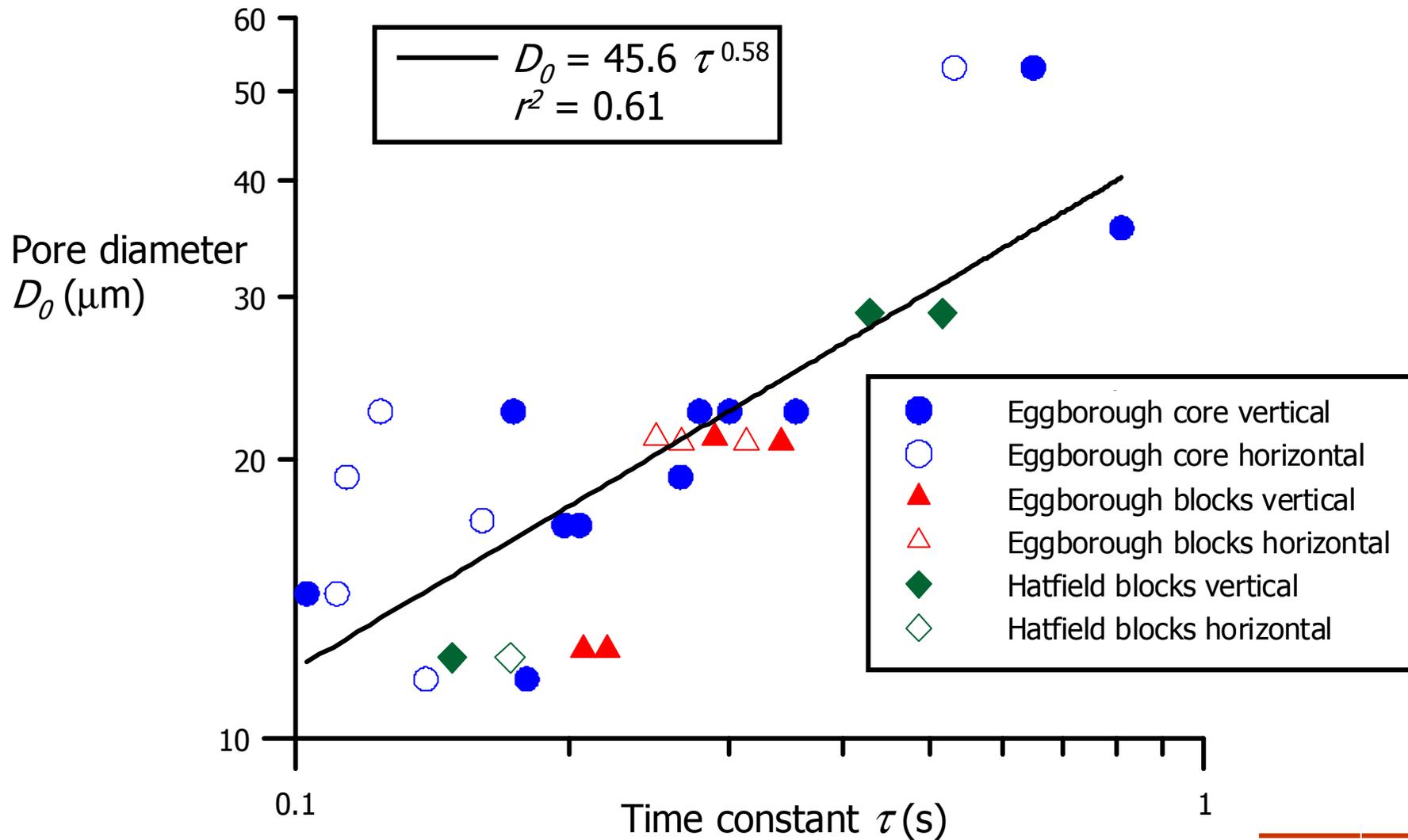
(Binley et al., WRR, 2005)

— Cole-Cole fit
 $\rho_0 = 33.76 \Omega\text{m}$
 $m = 0.120$
 $\tau = 0.180 \text{ s}$
 $C = 0.342$

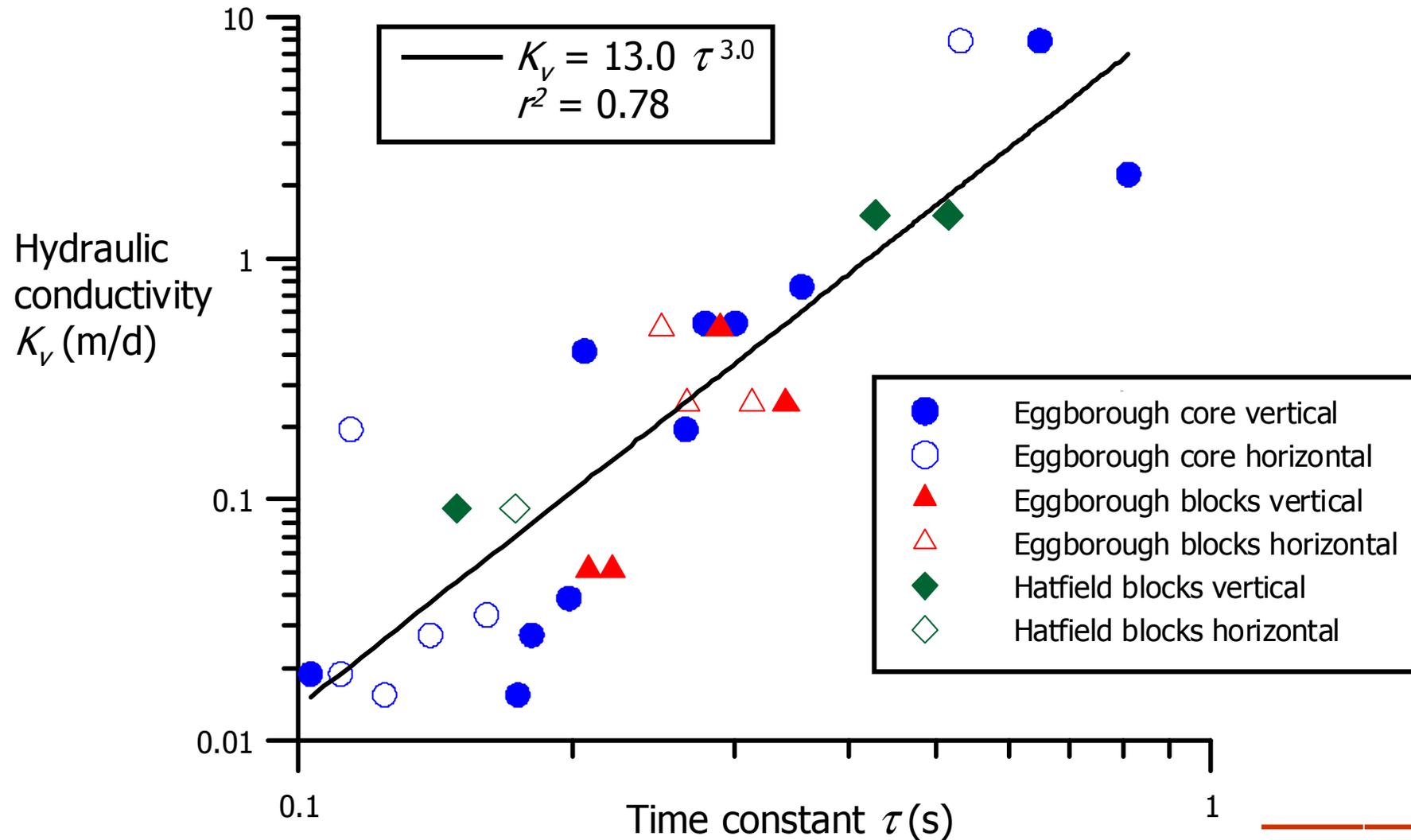
VEC18-2
Depth: 19.06 m



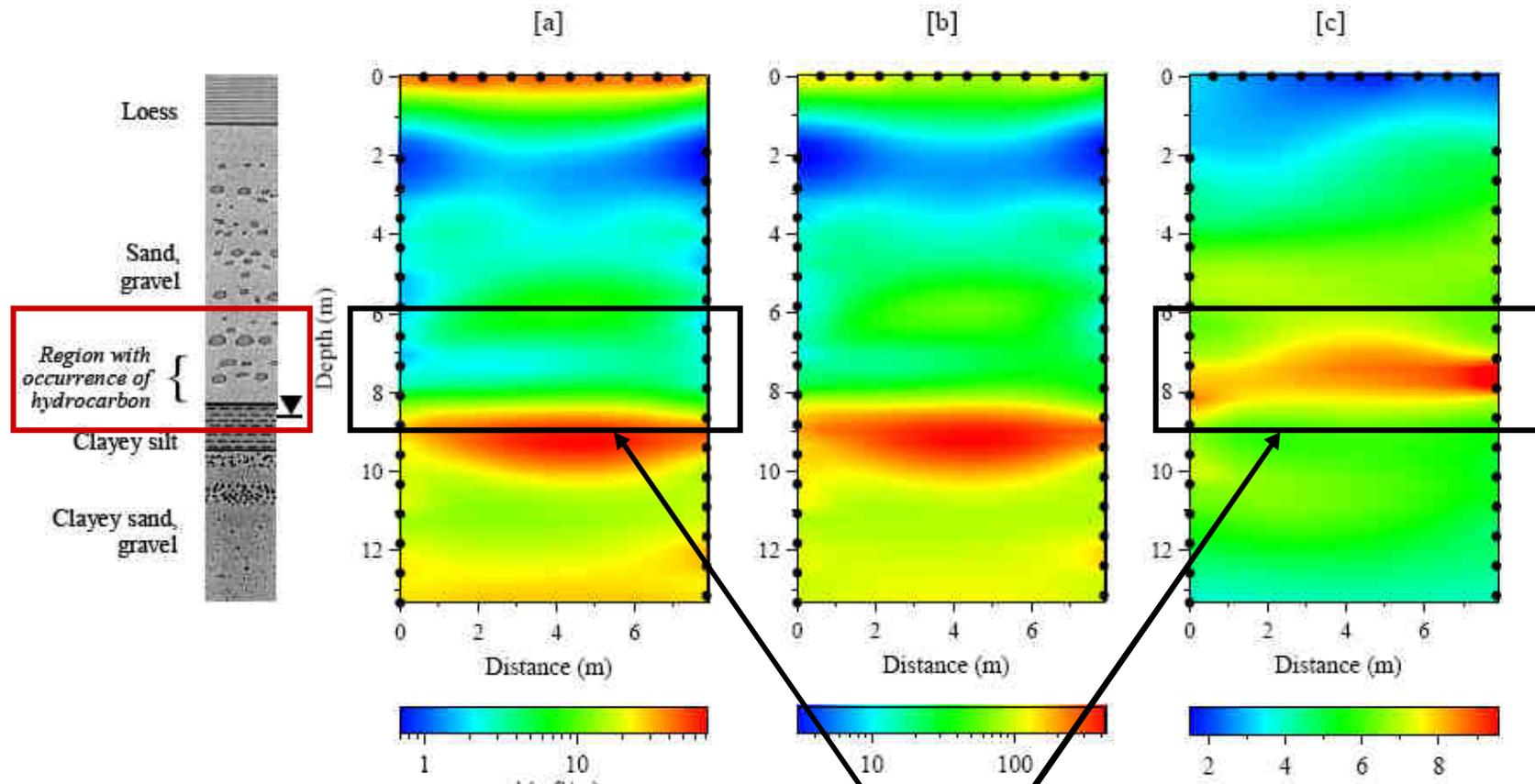
Confronto tra spettri SIP e distribuzione delle dimensioni dei pori



Confronto tra spettri SIP e conduttività idraulica



Tomografia SIP cross-hole imaging al Strasbourg-Entzheim site (Kemna, 2000; Kemna et al., Geophysics, 2004)



identificazione della presenza di idrocarburi da misure SIP (e non dai risultati ERT)

Idro-geofisica in campo...



Ringraziamenti

Matteo Rossi

Maria Teresa Perri

Giulio Vignoli

Vittorio Bruno

Alessandro Brovelli

Dip di Geoscienze, Università di Padova

Martina Monego

Giulia Passadore

Dip IMAGE, Università di Padova

Mario Putti

Dip DMMMSA, Università di Padova

Andrew M. Binley, Lancaster University, UK

Andreas Kemna, University of Bonn, Germany

Lee Slater, Rutgers University, USA

Alberto Godio, Politecnico di Torino, Italy

Alberto Bellin, Università di Trento, Italy

Claudio Strobbia, Western-Geco, London

Alberto Villa, Nicoletta Fusi, Paolo Frattini, Elisa Dalla, Università di Milano Bicocca

Michela Giustiniani, OGS Trieste, Italy

