



# *L'impatto dell'uomo sugli acquiferi carsici*

Marco Mecchia  
(Associazione Geografica La Venta)

49° CORSO III° LIVELLO - Levigliani (LU) 9-10 Aprile 2011

**INFORMARE d'AMBIENTE, AGIRE CONSAPEVOLMENTE**  
(conoscere l'ambiente delle grotte per una tutela consapevole e efficace)



# L'ACQUIFERO CARSICO

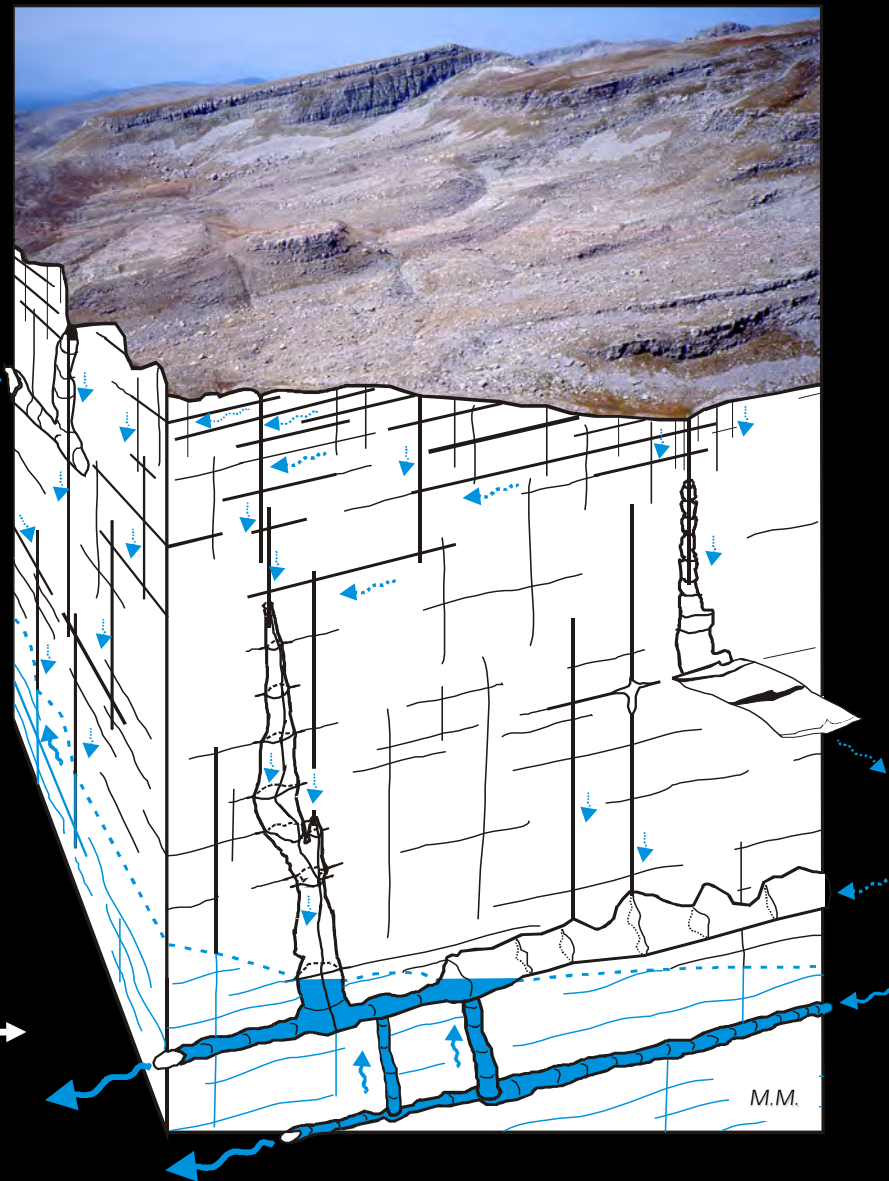
**EPICARSO**  
(CARSISMO SUPERFICIALE)

**ZONA NON SATURA**

**ZONA SATURA**

Obiettivo della caratterizzazione dell'acquifero carsico è di comprendere il comportamento dei contaminanti delle acque:

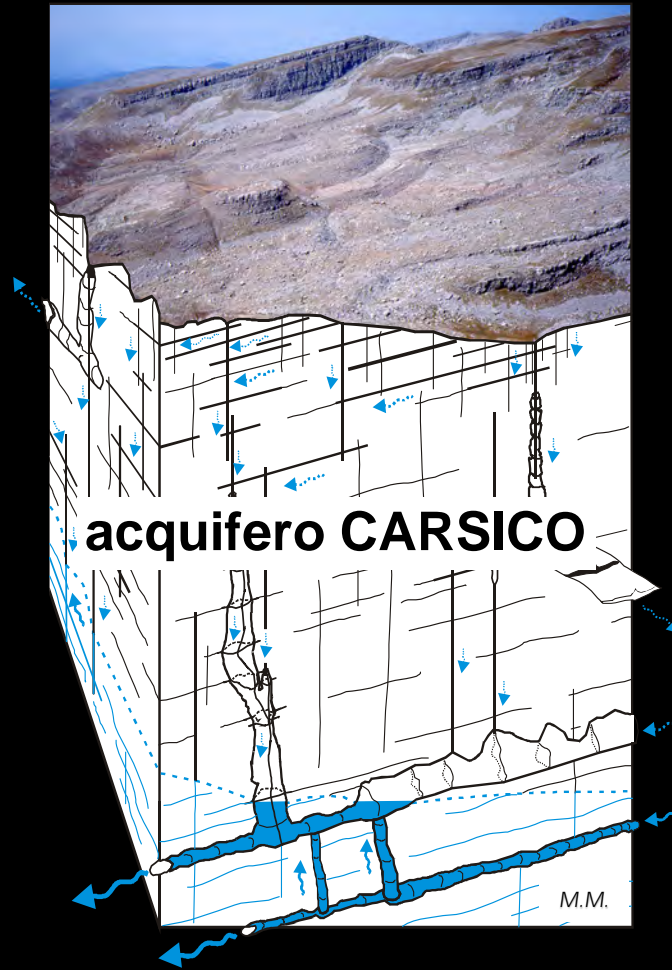
- il percorso sotterraneo
- il tempo di trasporto
- la localizzazione delle emergenze (sorgenti, pozzi)





**acquifero in ROCCE FESSURATE**

M.M.



**acquifero CARSICO**

M.M.



**acquifero in MATERIALE SCIOLTO**

M.M.

☀ **Poco isotropo e poco omogeneo**

- Flusso turbolento e abbastanza veloce

☀ **Variazioni di carico elevate**

- Variazioni di chimismo elevate

☀ **Anisotropo e non omogeneo**

- Flusso turbolento e veloce

☀ **Variazioni di carico anche molto elevate**

- Variazioni di chimismo anche molto forti

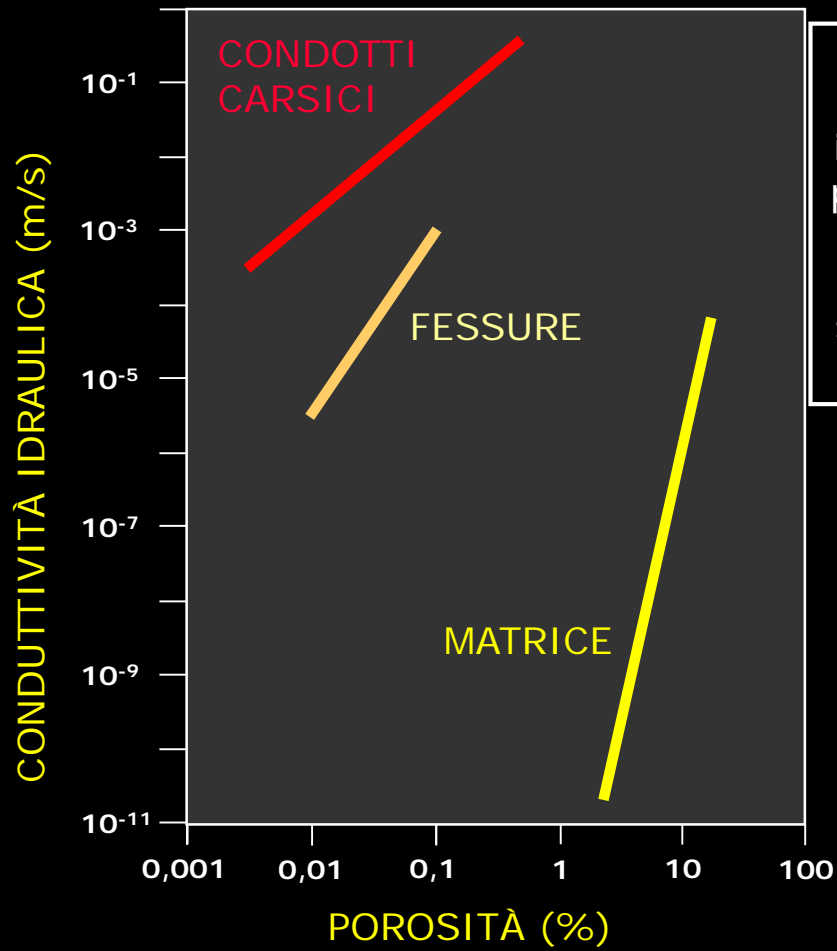
☀ **Isotropo e omogeneo**

- Flusso laminare e lento

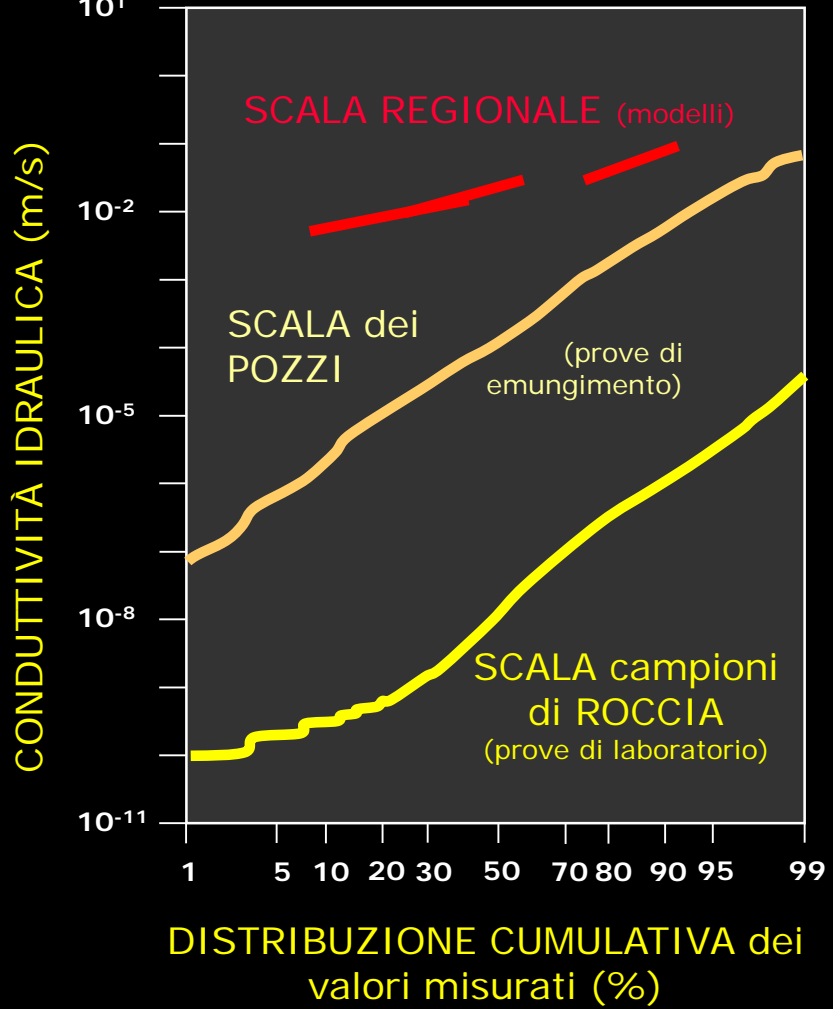
☀ **Variazioni di carico piccole**

- Variazioni di chimismo piccole





il 96-99% dell'acqua è immagazzinata nei pori e nelle fessure del calcare, ma il 94-97% del flusso scorre nei condotti



permeabilità di matrice, fessure e condotti in un acquifero carsico

effetto di scala della permeabilità in un acquifero carsico

dati da Worthington (1999). A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifers. Karst and Water Institute, Special Publication 5, pp. 30-37.

da Halihan, Sharp, Mace (1999). Interpreting flow using permeability at multiple scales. Karst and Water Institute, Special Publication 5, pp. 82-96.



# ACQUIFERO CARSICO o ACQUIFERO POROSO?



Un criterio per la perimetrazione della **fascia di rispetto** di un'opera di captazione consiste nella determinazione di un tempo di percorso degli inquinanti, per esempio 30 giorni

In un **acquifero carsico**, il tempo di percorso calcolato con metodi "tradizionali" (validi per gli acquiferi in materiali sciolti) può risultare errato, anche centinaia di volte maggiore del tempo effettivo misurato in una prova con un tracciante artificiale

Molti professionisti non hanno familiarità con gli acquiferi carsici; le loro previsioni spesso si dimostrano errate

# CONDOTTI CARSICI: DOVE PASSA L'ACQUA?

solo l' 1% dei tratti di grotta si  
forma nei PORI intergranulari

Il 42% dei condotti  
si forma lungo  
FRATTURE/FAGLIE  
favorevoli

Il 57% dei condotti  
si forma lungo  
STRATI favorevoli

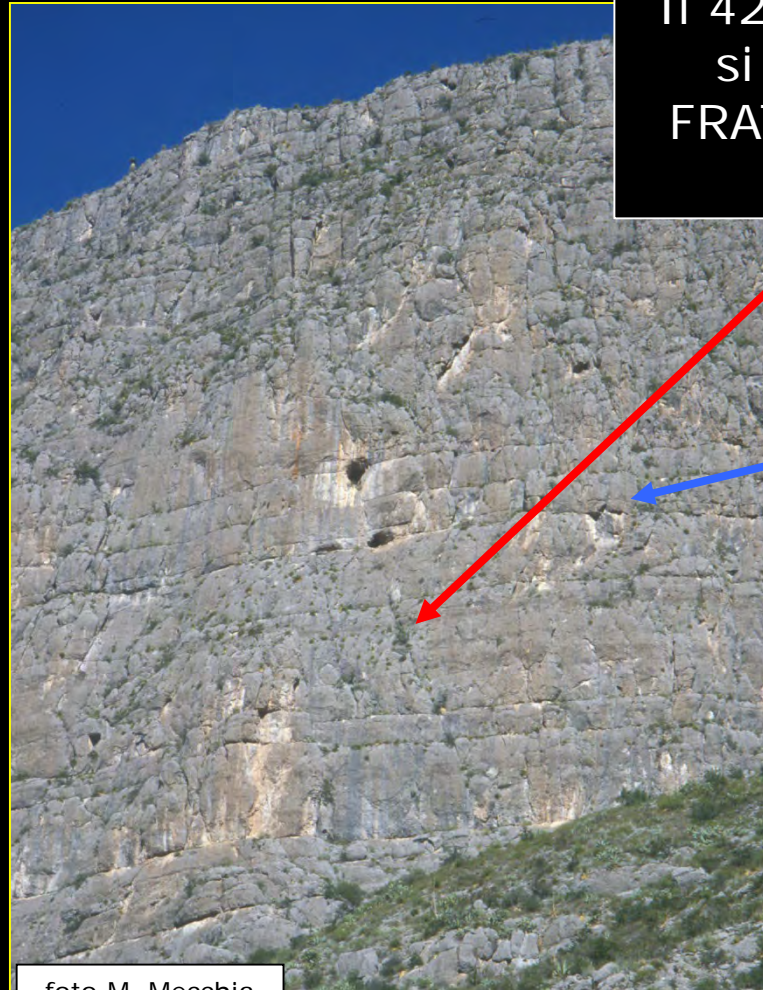
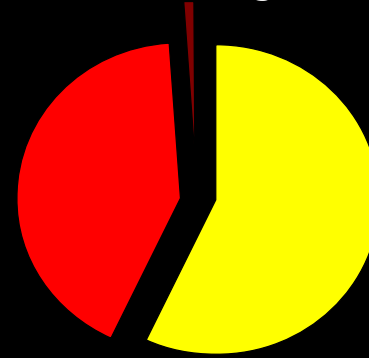


foto M. Mecchia



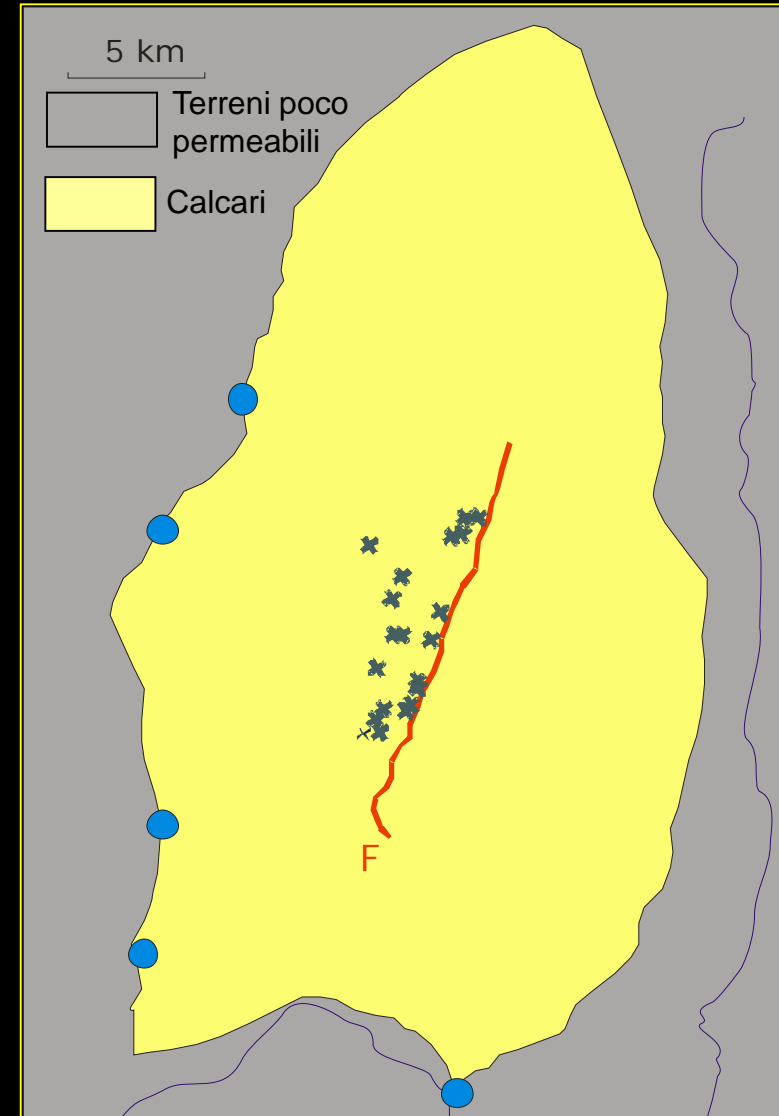
foto G. Savino

# DIREZIONE DI FLUSSO

## FLUSSO NELLA ZONA SATURA

da Bartolomei C., Celico P., Pecoraro A. (1980). Ipotesi di alimentazione artificiale della falda di base dei monti Lepini. Atti IV Congr. Intern. Acque Sott., I.A.H., Acireale.

- Sorgente
- ✱ Grotta

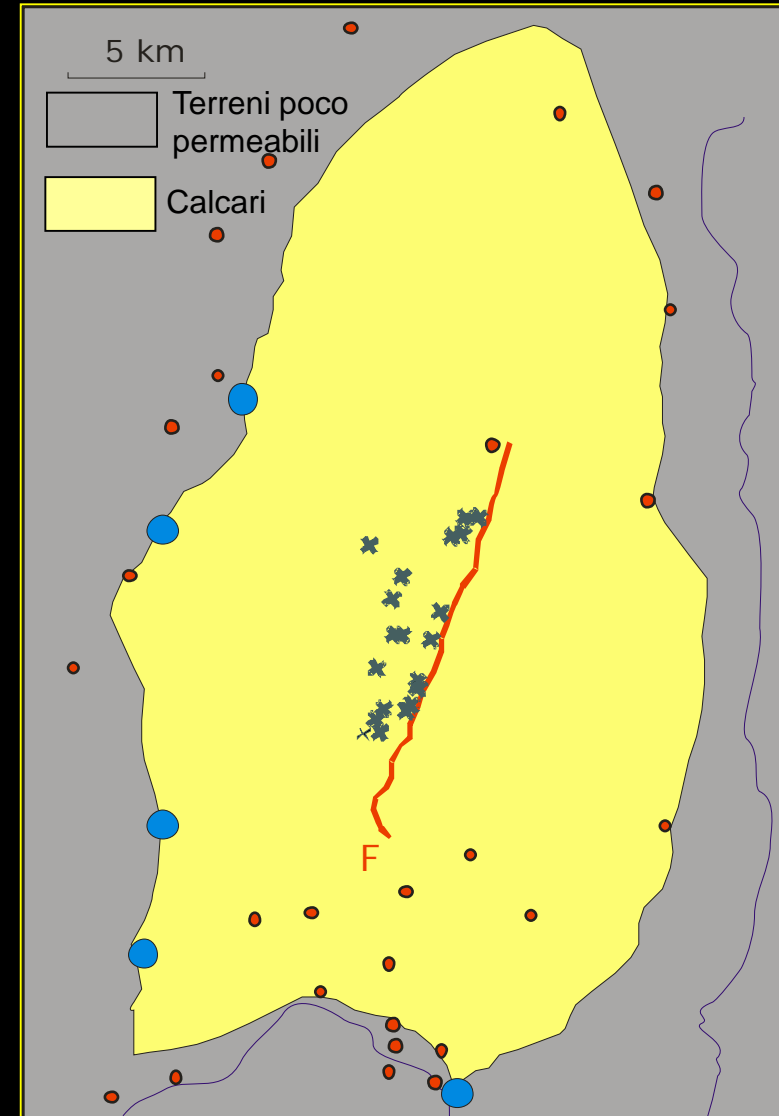


# DIREZIONE DI FLUSSO

## FLUSSO NELLA ZONA SATURA

da Bartolomei C., Celico P., Pecoraro A. (1980). Ipotesi di alimentazione artificiale della falda di base dei monti Lepini. Atti IV Congr. Intern. Acque Sott., I.A.H., Acireale.

- Pozzo misura livello
- Sorgente
- ✱ Grotta



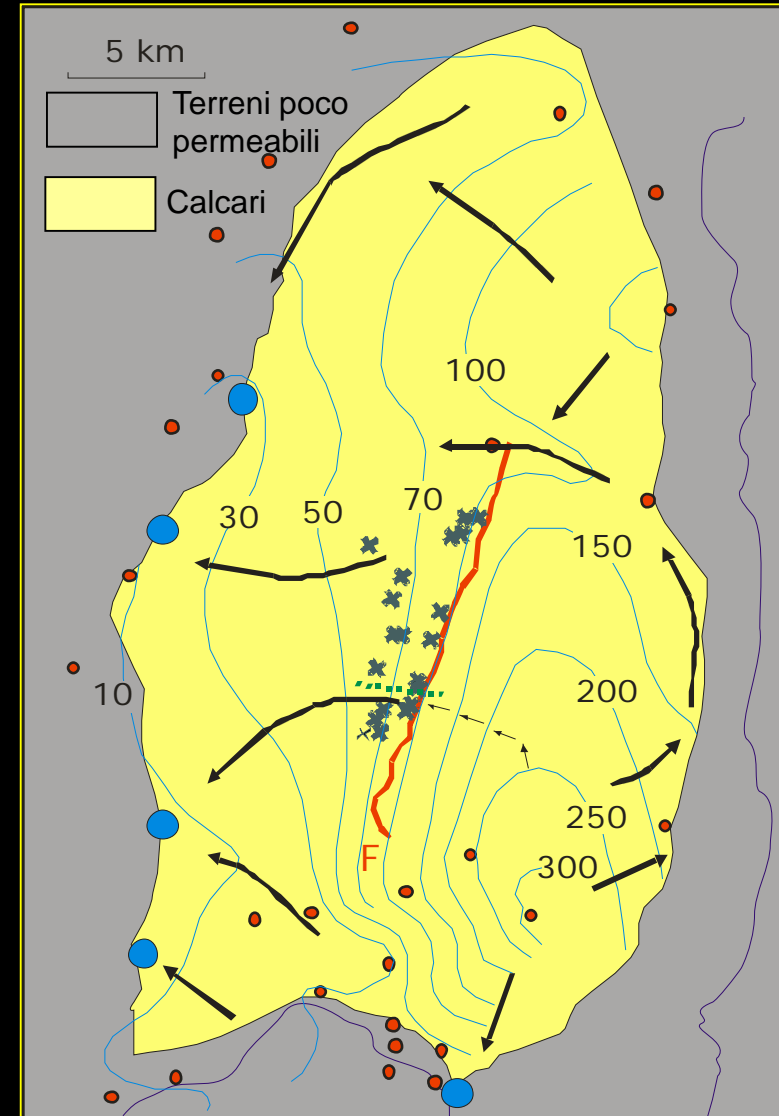


# DIREZIONE DI FLUSSO

## FLUSSO NELLA ZONA SATURA

da Bartolomei C., Celico P., Pecoraro A. (1980). Ipotesi di alimentazione artificiale della falda di base dei monti Lepini. Atti IV Congr. Intern. Acque Sott., I.A.H., Acireale.

- Pozzo misura livello
- Sorgente
- ✱ Grotta

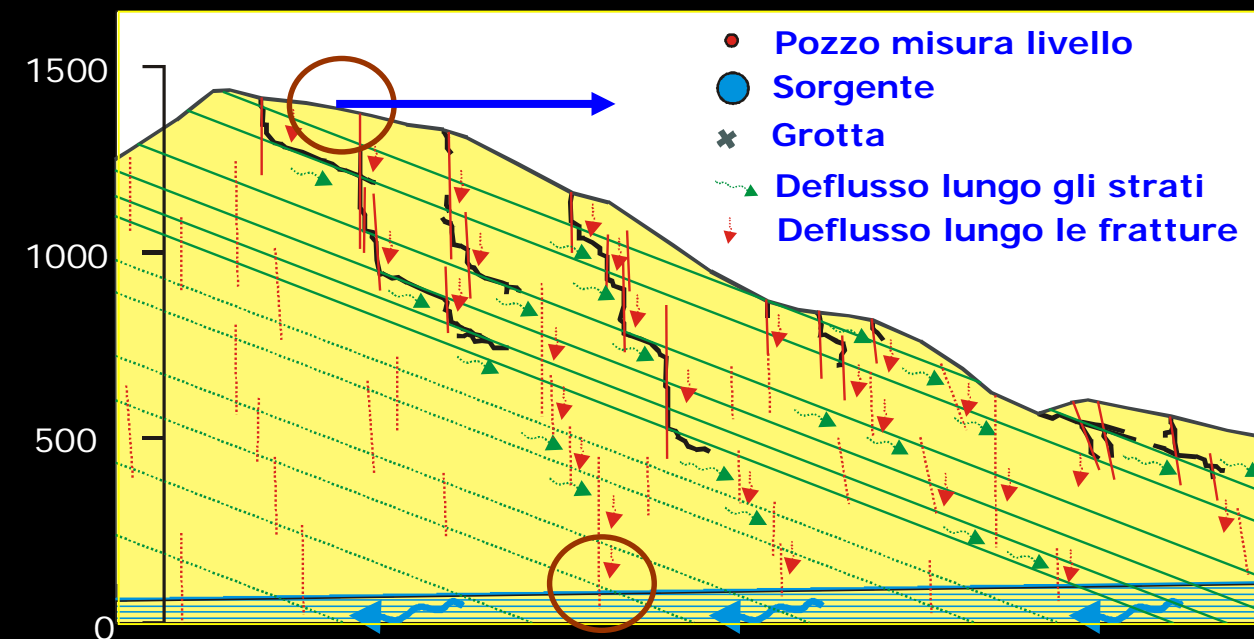


# DIREZIONE DI FLUSSO

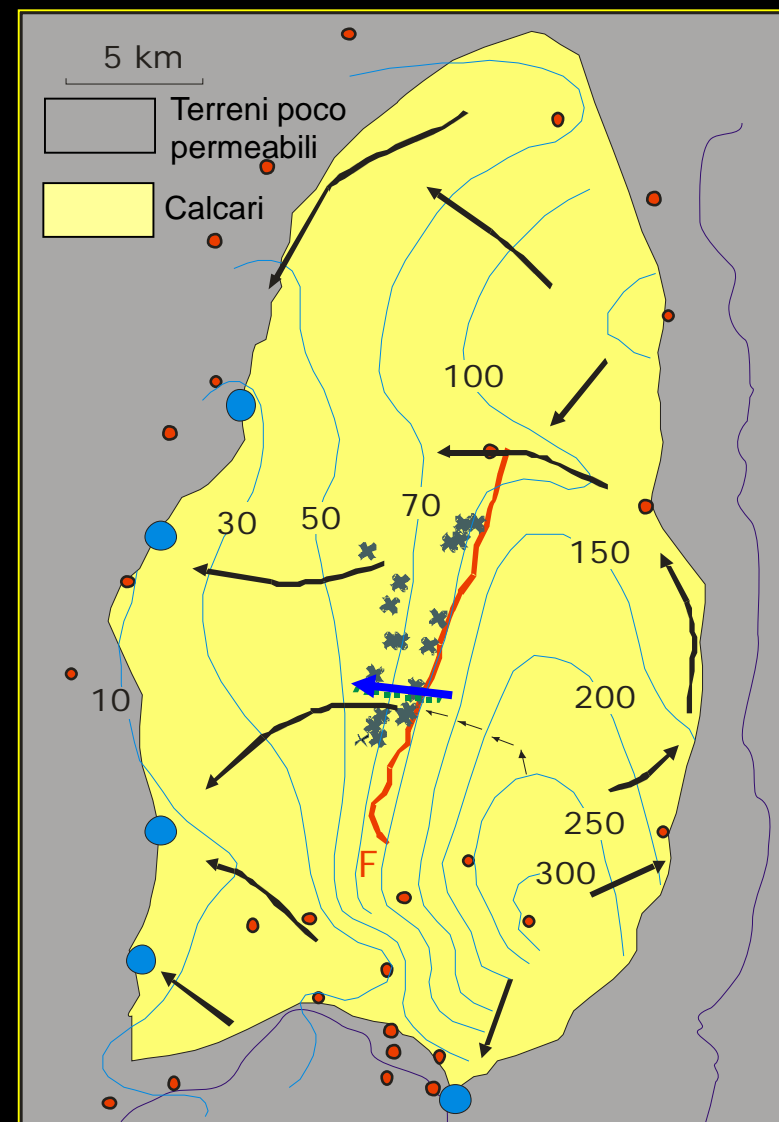
## FLUSSO NELLA ZONA SATURA

le direzioni di flusso  
(e di contaminazione)  
possono essere diverse

## FLUSSO NELLA ZONA NON SATURA



da Bartolomei C., Celico P., Pecoraro A. (1980). Ipotesi di alimentazione artificiale della falda di base dei monti Lepini. Atti IV Congr. Intern. Acque Sott., I.A.H., Acireale.



# CONTAMINAZIONE delle acque sotterranee

l'acquifero CARSICO rispetto ad un acquifero in MATERIALI SCIOLTI ha:

limitate capacità di assorbimento e di filtrazione = **trasporto rapido del contaminante**

elevata velocità di scorrimento = breve tempo di residenza nell'acquifero = **decadimento meno efficace** = il contaminante può raggiungere le sorgenti molto velocemente



Miniera di Naica (foto S.-E. Lauritzen)

condizioni generalmente ossidanti = **riduzione della concentrazione di alcuni contaminanti** (ammoniaca, Fe, Mn e altri metalli pesanti)

minore tempo di residenza = **alcuni tipi di contaminazione si risolvono più rapidamente**

minore sensibilità alle **piogge acide**

# COSA SI INTENDE PER CONTAMINANTE E PER INQUINAMENTO?

“Tutte le sostanze disciolte immesse in un corpo idrico come risultante delle attività dell’uomo vengono definite contaminanti, anche quando la concentrazione non raggiunge livelli tali da determinare uno scadimento significativo della qualità dell’acqua”

Freeze R.A., Cherry J.A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, 604 pp.

Si confrontano idee diverse

Celico P. (1986). Prospezioni idrogeologiche. Liguori, 528 pp.



Contaminazione “naturale” (foto M. Mecchia)

“Per inquinamento delle acque si intende il fenomeno della contaminazione che interessa i corpi idrici per la presenza naturale o per l’immissione di sostanze organiche, di sostanze chimiche e di calore oltre determinati limiti”



# La TUTELA delle acque sotterranee in ITALIA

D. Lgs. 152/2006 e D. Lgs. 30/2009

## Qualità delle acque sotterranee

La normativa fissa due obiettivi:



"tutte le acque superficiali e sotterranee, ancorché non estratte dal sottosuolo, appartengono al demanio dello Stato"

foto S.-E. Lauritzen

## 1) Qualità ambientale

ha l'obiettivo di mantenere i processi naturali di **autodepurazione**

riguarda i corpi idrici SIGNIFICATIVI, cioè falde freatiche e falde profonde, sorgenti concentrate o diffuse non riguarda gli orizzonti saturi di modesta estensione

## 2) Qualità per specifica destinazione (per es. potabile)

ha l'obiettivo di mantenere i requisiti di idoneità per il **consumo da parte dell'uomo**

riguarda tutti i corpi idrici sotterranei che forniscono (o potrebbero fornire) in media oltre 10 m<sup>3</sup> al giorno (0,12 L/s) o servono più di 50 persone



# ACQUA POTABILE

D. Lgs. 31/2001 e D. Lgs. 27/2002

Il giudizio di potabilità di un'acqua viene dato sulla base di un esame chimico-fisico e batteriologico di routine

- parametri **microbiologici**:

E. coli ed enterococchi = 0 in 100 mL

- parametri **chimici**, per es.:

arsenico  $\leq 10 \mu\text{g/L}$

benzene  $\leq 1,0 \mu\text{g/L}$

boro  $\leq 1,0 \text{ mg/L}$

cadmio  $\leq 5,0 \mu\text{g/L}$

piombo  $\leq 10 \mu\text{g/L}$

nitrati (come  $\text{NO}^3$ )  $\leq 50 \text{ mg/L}$

nitriti (come  $\text{NO}^2$ )  $\leq 0,5 \text{ mg/L}$

antiparassitari totali  $\leq 0,50 \mu\text{g/L}$

idrocarburi policiclici aromatici  $\leq 0,10 \mu\text{g/L}$

- parametri **indicatori**, per es.:

pH compreso fra 6,5 e 9,5

odore, colore, sapore, torbidità = accettabile per i consumatori  
e senza variazioni anomale

Per essere sottoposta ai trattamenti di potabilizzazione e raggiungere il livello di qualità previsto per l'acqua "potabile", l'acqua sotterranea deve rispettare i limiti previsti dal D. Lgs. 31/2001



# QUALITÀ "AMBIENTALE" delle acque sotterranee

Deve essere valutata in base a due tipi di parametri:

1 – "Stato quantitativo" = Livello acque sotterranee

2 – "Stato chimico" = 1) Conduttività  
2) Concentrazioni di:  
ossigeno, pH, conduttività,  
nitrati, ione ammonio, ...



foto G. Savino

D. Lgs. 152/2006 e D. Lgs. 30/2009

# LE SOSTANZE CONTAMINANTI

---

In base alle **modalità di trasporto** nell'acquifero carsico:

- ☀ Sostanze organiche e inorganiche solubili in acqua
- ☀ Sostanze organiche poco solubili, meno dense dell'acqua
- ☀ Sostanze organiche poco solubili, più dense dell'acqua
- ☀ Agenti microbiologici patogeni
- ☀ Metalli
- ☀ Rifiuti

Vesper D.J., Loop C.M., White W.B. (2001). Contaminant transport in karst aquifers. *Theoretical and Applied Karstology*, 13-14, pp. 101-111.





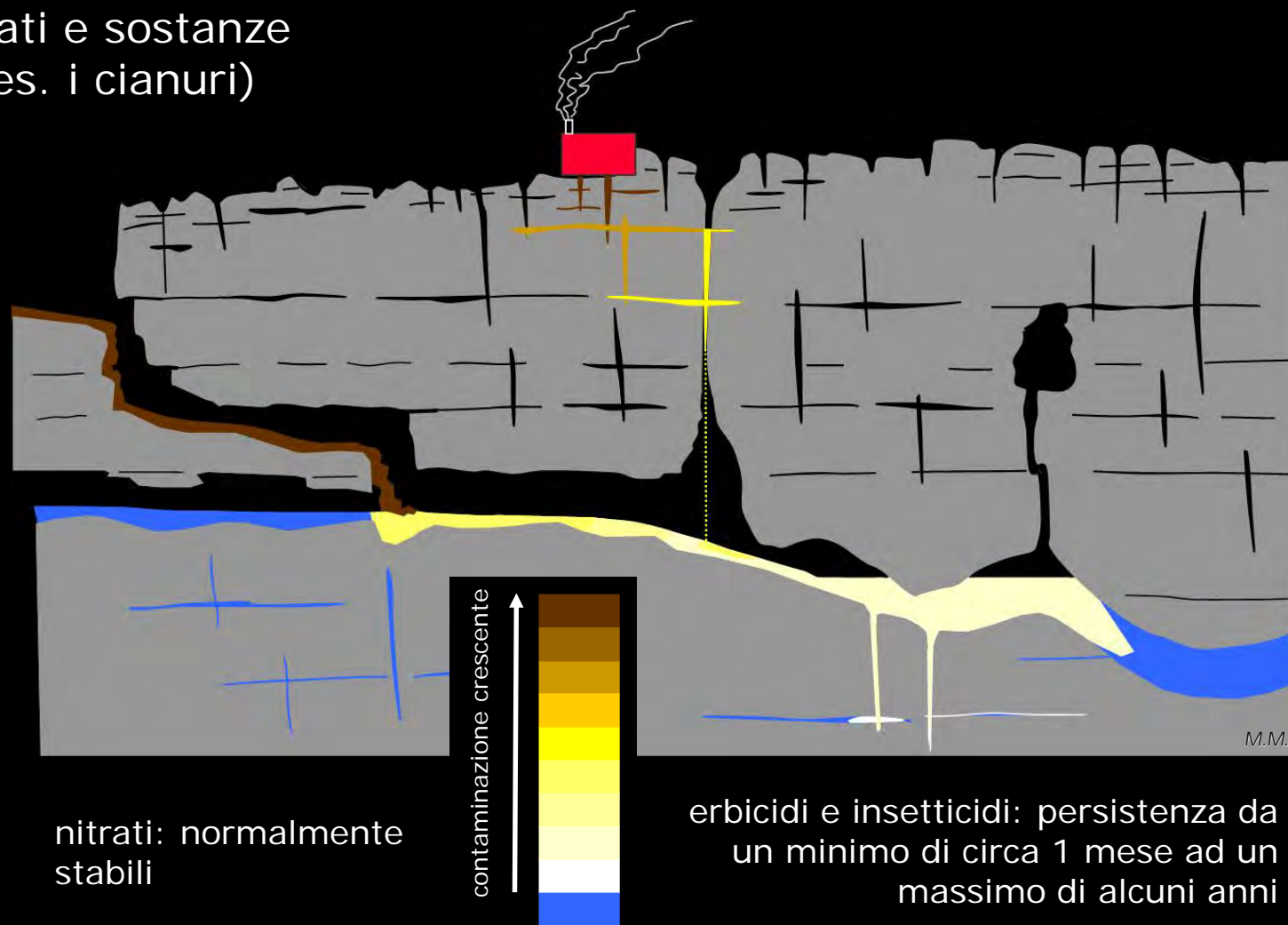
**Organiche:** ammoniaca e nitrati (che derivano da decomposizione, principalmente da rifiuti umani e animali), acidi carbossilici, fenoli, alcuni fitofarmaci

**Inorganiche:** cloruri, solfati e sostanze altamente tossiche (per es. i cianuri)

Si muovono insieme all'acqua e formano una "striscia" che migra verso valle lungo il condotto carsico

Man mano che nuovi affluenti aumentano la portata del condotto, il contaminante viene diluito

Durante le piene, però, la concentrazione può salire per effetto del pistonaggio del contaminante presente sopra la falda



nitrati: normalmente stabili

erbicidi e insetticidi: persistenza da un minimo di circa 1 mese ad un massimo di alcuni anni

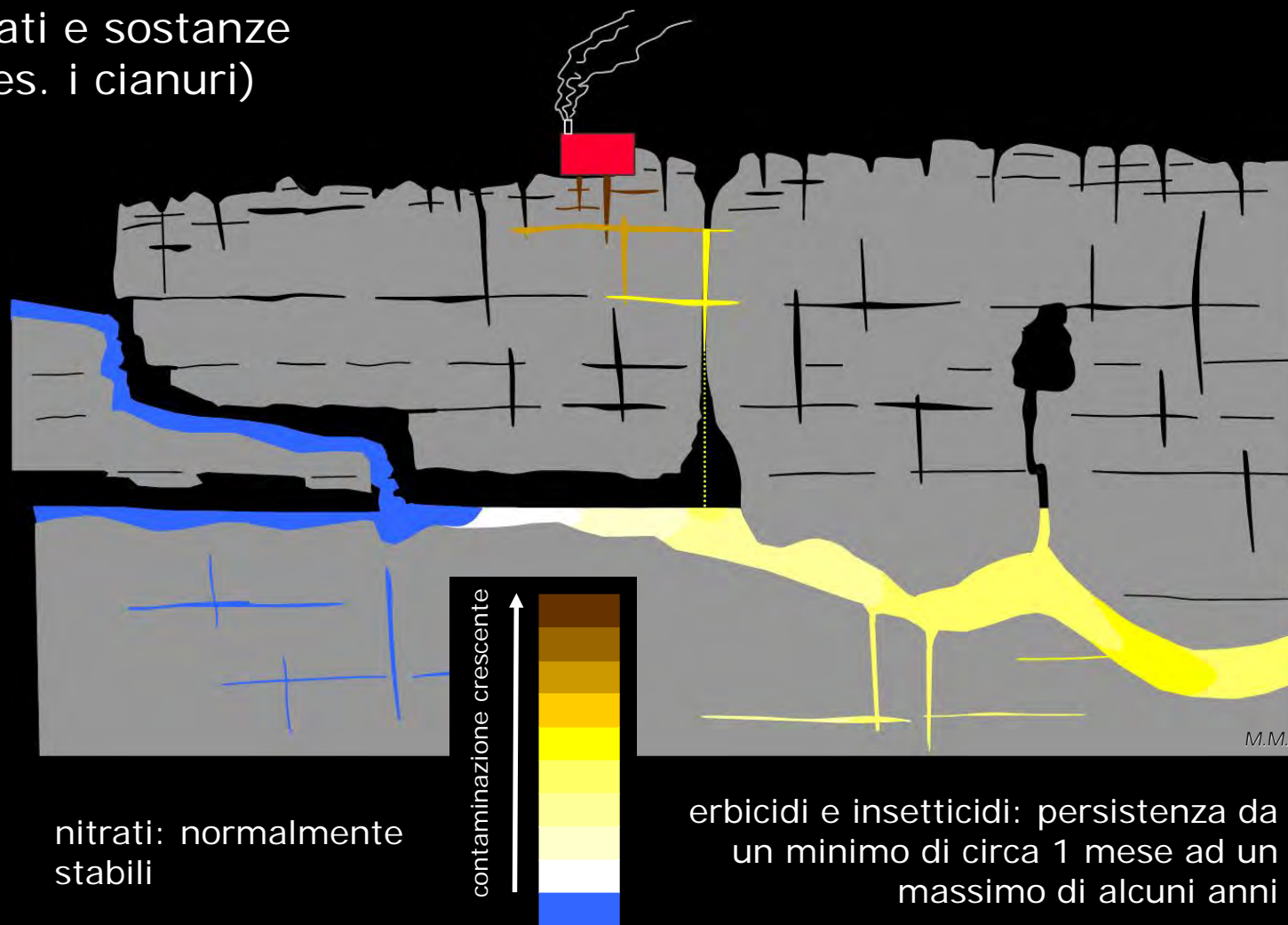
**Organiche:** ammoniaca e nitrati (che derivano da decomposizione, principalmente da rifiuti umani e animali), acidi carbossilici, fenoli, alcuni fitofarmaci

**Inorganiche:** cloruri, solfati e sostanze altamente tossiche (per es. i cianuri)

Si muovono insieme all'acqua e formano una "striscia" che migra verso valle lungo il condotto carsico

Man mano che nuovi affluenti aumentano la portata del condotto, il contaminante viene diluito

Durante le piene, però, la concentrazione può salire per effetto del pistonaggio del contaminante presente sopra la falda



# CONTAMINANTI

SOSTANZE POCO SOLUBILI,  
MENO DENSE DELL'ACQUA

**Idrocarburi del petrolio** (LNAPL = fase liquida leggera non acquosa: benzina, gasolio [con benzene e toluene])

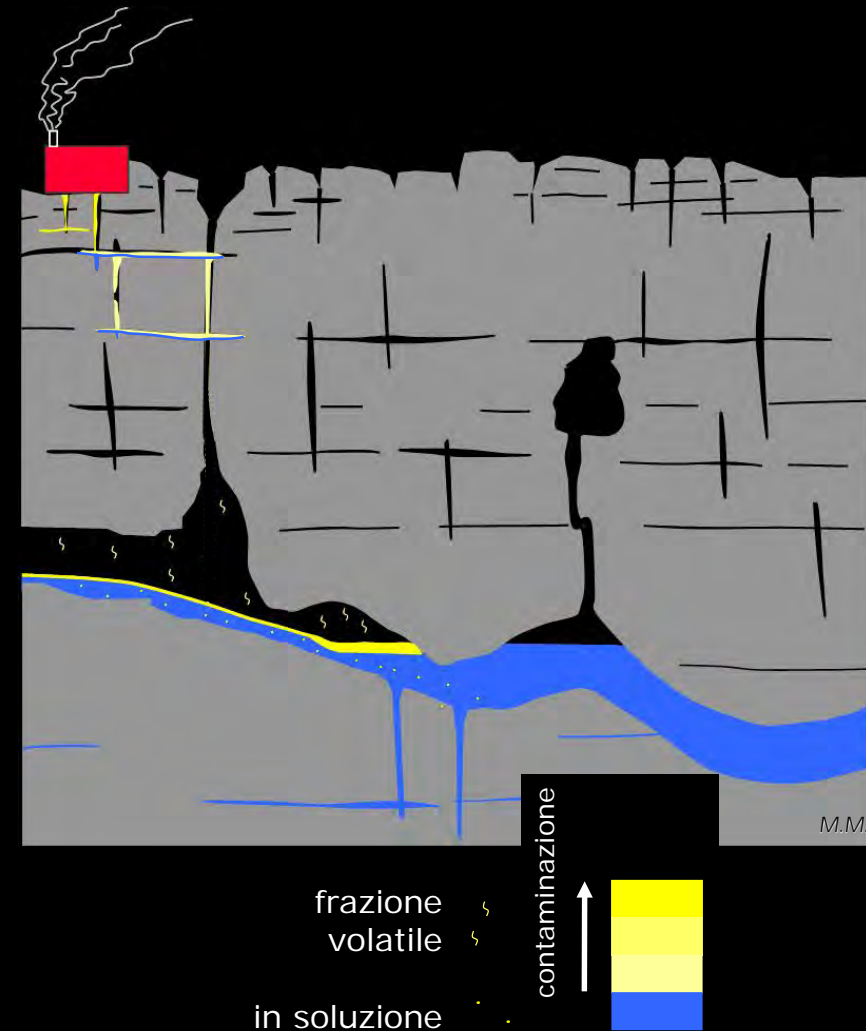
Galleggiano sulle superfici d'acqua

**A contatto con l'aria vengono lentamente degradati**

Raggiunto un condotto attivo tendono a fermarsi nelle pozze che precedono i sifoni

**La frazione solubile si muove insieme all'acqua**

La frazione volatile invade fessure e condotti sovrastanti

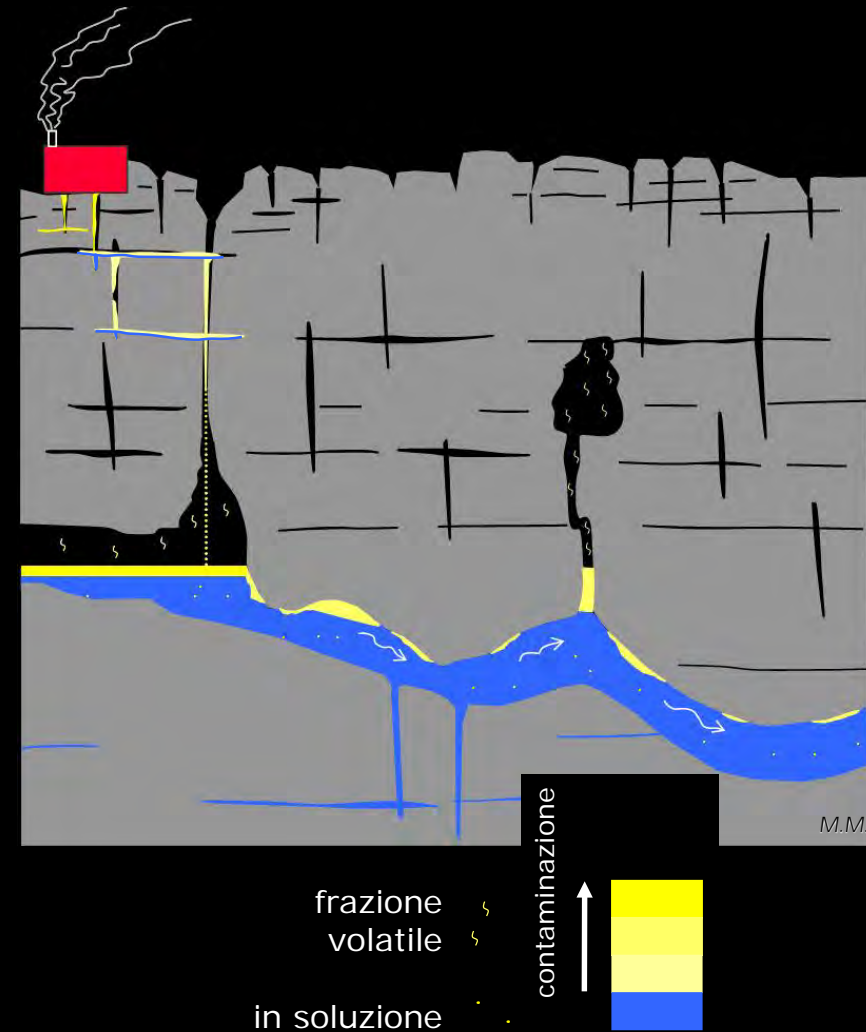


# CONTAMINANTI

## SOSTANZE POCO SOLUBILI, MENO DENSE DELL'ACQUA

Nella zona epicarsica, pochi metri sotto la superficie topografica, ristagnano galleggiando nelle pozze d'acqua, per essere mobilizzati in occasione degli eventi piovosi

Durante le piene salgono insieme alla superficie dell'acqua e alla sommità del condotto vengono spinti nelle fessure eventualmente presenti; in assenza di vie di fuga si mobilizzano avanzando nel condotto in pressione



# CONTAMINANTI

## SOSTANZE POCO SOLUBILI, PIU' DENSE DELL'ACQUA

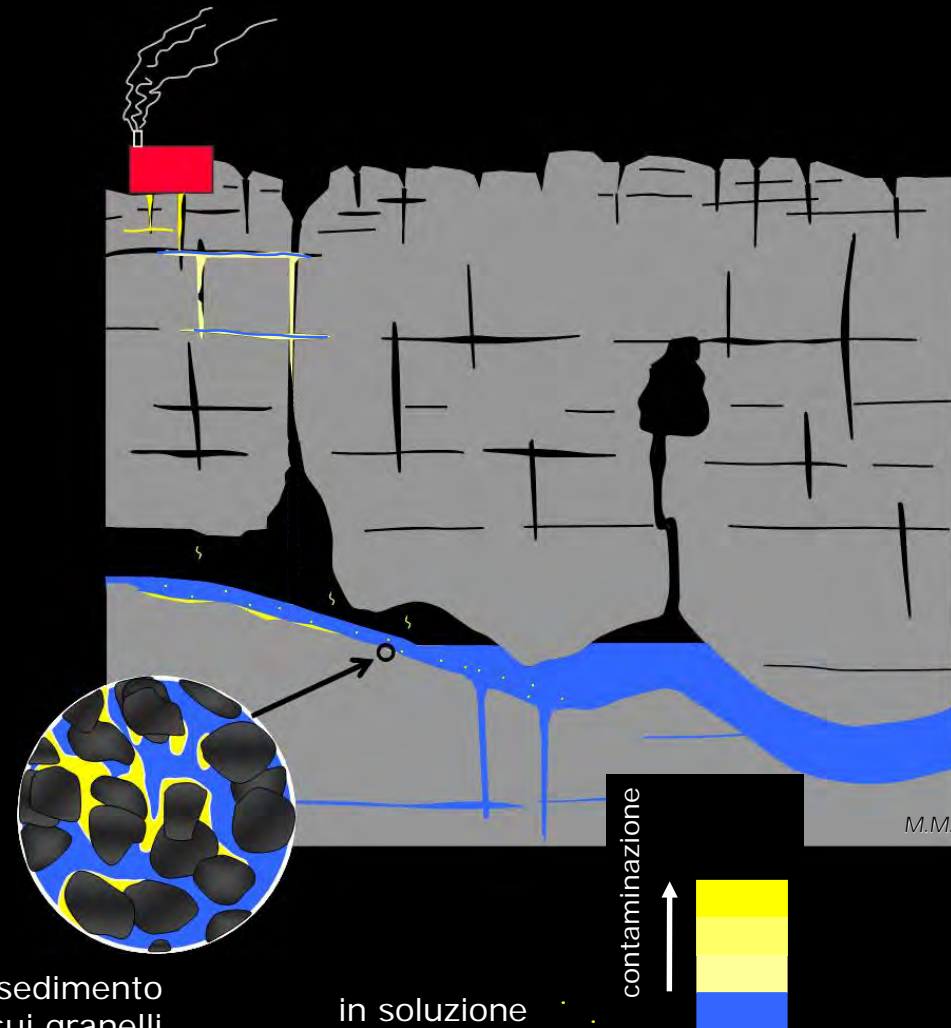
**Idrocarburi clorurati** (DNAPL = liquidi densi in fase non acquosa: trielina, cloruro di metilene, PCB)

In acqua affondano

Nei condotti carsici attivi si accumulano sul fondo e impregnano il sedimento

La degradazione in acqua è poco efficiente

La frazione solubile si scioglie progressivamente in acqua e viene trasportata con essa



gli idrocarburi pesanti impregnano il sedimento  
e vengono adsorbiti sui granelli

in soluzione

contaminazione



# CONTAMINANTI

## SOSTANZE POCO SOLUBILI, PIU' DENSE DELL'ACQUA

Nella zona epicarsica, pochi metri sotto la superficie topografica, si depositano sul fondo delle pozze d'acqua, da dove vengono mobilizzati in occasione degli eventi piovosi, colando lungo le fessure della zona non satura

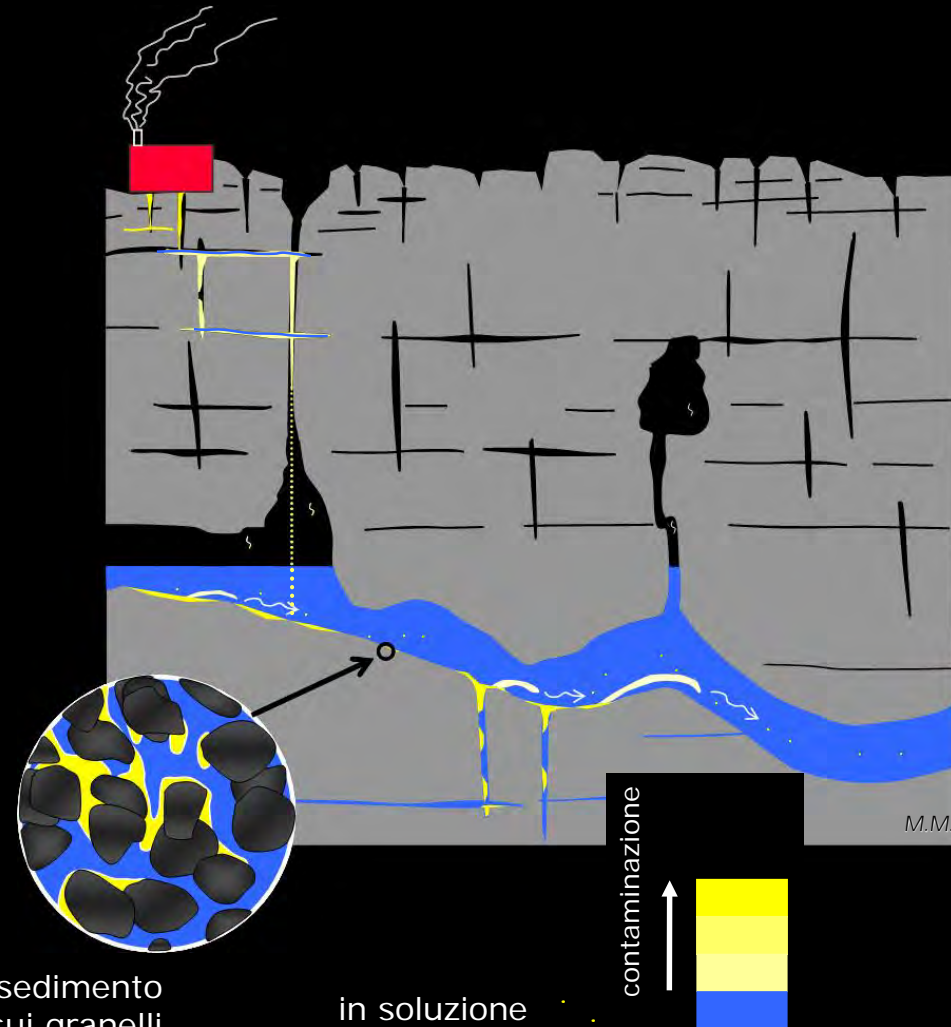
Si mobilizzano durante le piene, durante le quali anche il sedimento viene movimentato

Affondando, possono raggiungere grandi profondità sotto il livello dell'acqua

Sono spesso immiscibili in acqua e vengono adsorbiti e ritenuti "per sempre" nelle fessure e nei sedimenti, divenendo fonte di un rilascio in soluzione continuo e progressivo della fase contaminante

gli idrocarburi pesanti impregnano il sedimento e vengono adsorbiti sui granelli

in soluzione



Cromo, nickel, cadmio, mercurio, piombo, ...

Nelle acque carsiche, con pH neutro, tendono a precipitare come idrossidi e carbonati; in generale, la contaminazione è attenuata

Vengono adsorbiti sui materiali detritici fini, in particolare sui piccoli granelli di argilla del sedimento

Una frazione passa comunque in soluzione e la loro concentrazione in acqua può superare quella prevista per le acque potabili



M.M.



Cromo, nickel, cadmio, mercurio, piombo, ...

L'elevata velocità di flusso nei condotti carsici, soprattutto dopo le piogge, porta in sospensione grandi quantità di sedimento e quindi dei metalli eventualmente adsorbiti sui granelli

I picchi di concentrazione si riscontrano quindi durante le piene





Virus, batteri, parassiti da scarichi fognari o di origine animale

Dimensioni tipiche dei microorganismi: da meno di 1 micron a centinaia di micron

Negli acquiferi porosi i microbi vengono trattenuti nei pori, dove muoiono dopo un certo tempo (20-50 giorni)

Nell'acquifero carsico, mancando la filtrazione, vengono rapidamente trasportati nei condotti dove rimangono attivi per lunghe distanze

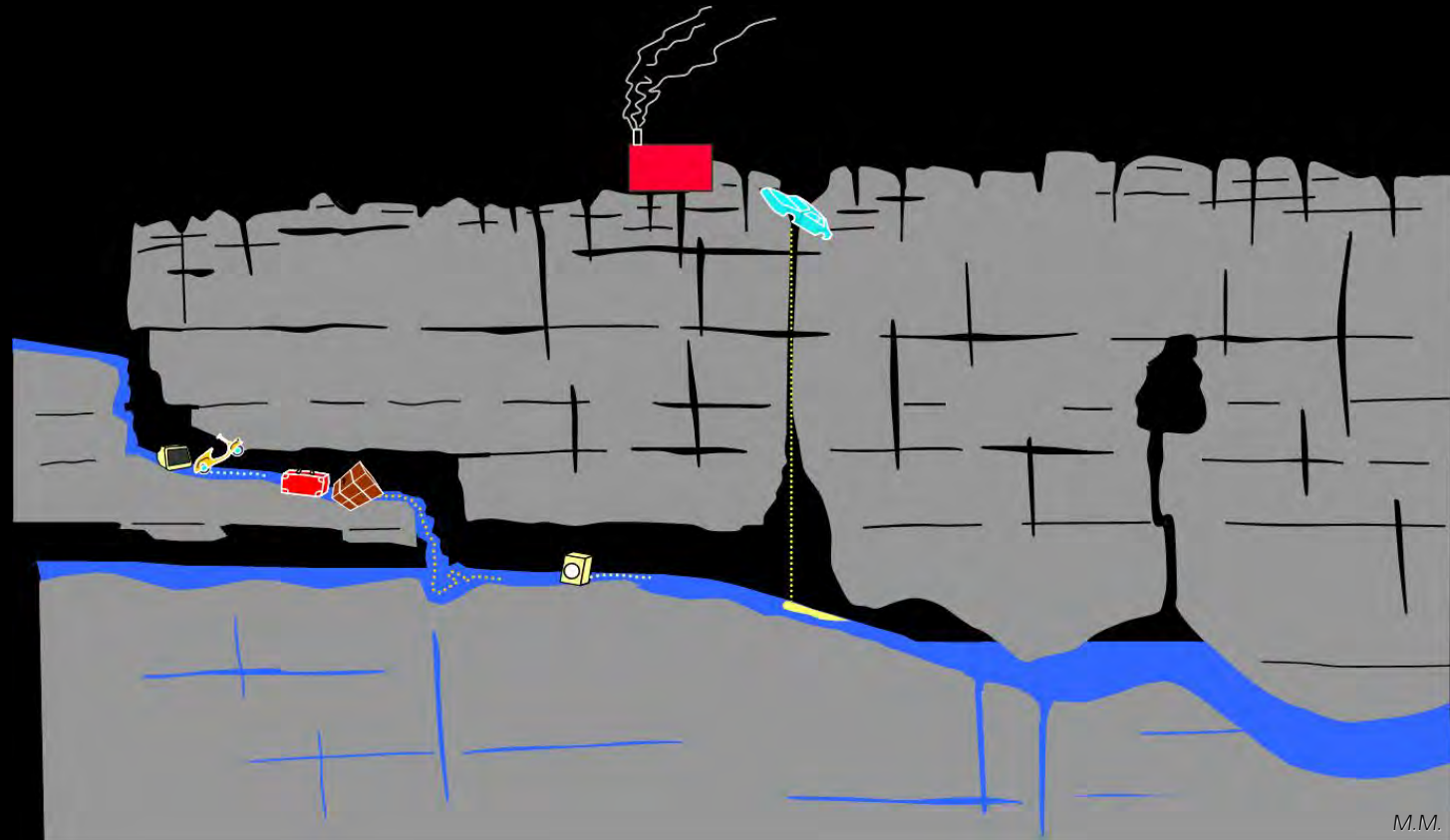


Numerosi i fattori influenzano la vita dei virus nel sottosuolo: temperatura, umidità, pH, attività microbica, sali, materia organica, ...

L'utilizzo di doline e inghiottitoi come luoghi di abbandono di rifiuti di ogni tipo è stato, ed è ancora, largamente diffuso

Durante le piene, i rifiuti possono essere trasportati per distanze anche lunghe nei condotti carsici attivi

Nel tempo i rifiuti rilasciano progressivamente in acqua i contaminanti che contengono



M.M.

