

INTERVENTI FORMATIVI IN MATERIA DI ECOREATI E DELITTI CONTRO L'AMBIENTE EX L. 68/2015 - CIG 9050193785 - CUP H31H16000030008 - 2021/D.01028

MODULO 10 - LE POSSIBILI CAUSE DI INQUINAMENTO AMBIENTALE
– FOCUS SU “INQUINAMENTO DEL SUOLO E BONIFICA”

- DOTT.SSA GIUSEPPINA OLIVA -

LE POSSIBILI CAUSE DI INQUINAMENTO AMBIENTALE FOCUS SU “INQUINAMENTO DEL SUOLO E BONIFICA”



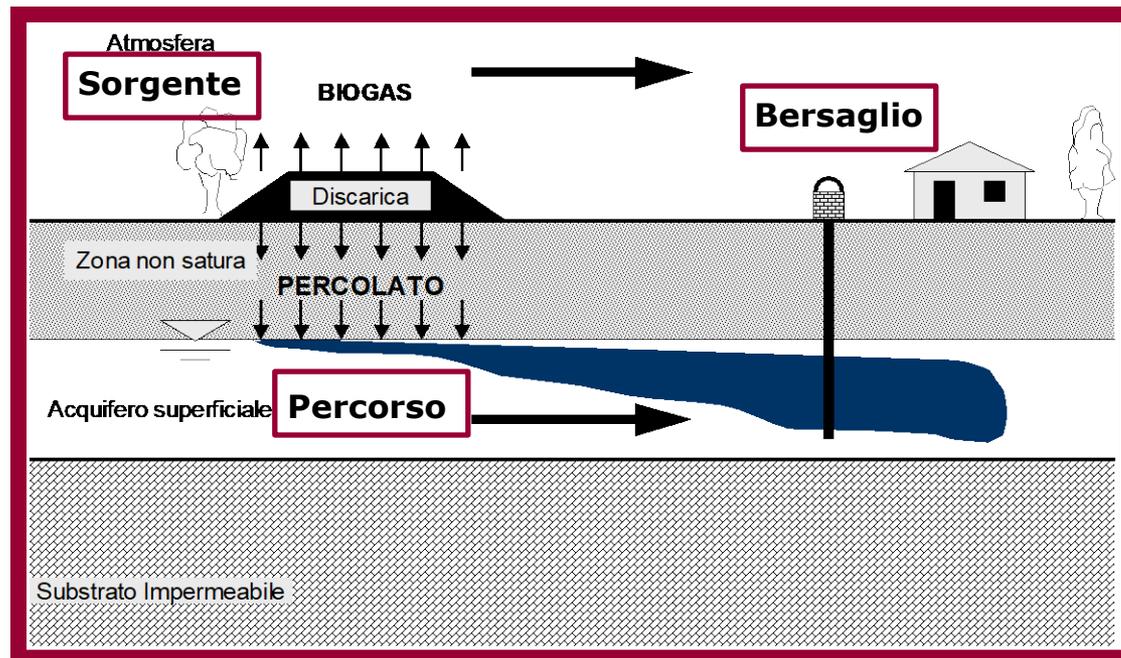
La caratterizzazione del sito

Dott.ing. G. Oliva
goliva@unisa.it

Definizioni

La **caratterizzazione ambientale del sito** rappresenta l'insieme delle attività volte a ricostruire i **fenomeni di contaminazione** a carico delle **matrici ambientali**, al fine di ottenere le informazioni necessarie per gli eventuali interventi di messa in sicurezza e/o bonifica.

[Allegato 2 al Titolo V, Parte IV - D.Lgs. 152/06]



Obiettivi

Nella fase di caratterizzazione del sito bisogna definire:

- ✓ l'**entità** della contaminazione del sito;
- ✓ le **modalità** di **propagazione** del contaminante nell'ambiente;
- ✓ i **bersagli** della potenziale contaminazione;
- ✓ gli **obiettivi** della **bonifica** affinché il rischio associato risulti accettabile.



Le attività di caratterizzazione di un sito

Criteri generali

La **Caratterizzazione del sito** deve articolarsi secondo le seguenti fasi:

- I. Ricostruzione storica delle attività produttive svolte sul sito;**
- II. Elaborazione del Modello Concettuale Preliminare;**
- III. Esecuzione del piano di indagini e delle eventuali indagini integrative necessarie alla luce dei primi risultati raccolti;**
- IV. Elaborazione dei risultati delle indagini eseguite e dei dati storici raccolti e rappresentazione dello stato di contaminazione del suolo, del sottosuolo e delle acque sotterranee.**
- V. Elaborazione del Modello Concettuale Definitivo.**
- VI. Identificazione dei livelli di concentrazione residua accettabili calcolati mediante analisi di rischio.**

[Allegato 2 al Titolo V, Parte IV - D.Lgs. 152/06]

Le attività di caratterizzazione di un sito

Criteria generali

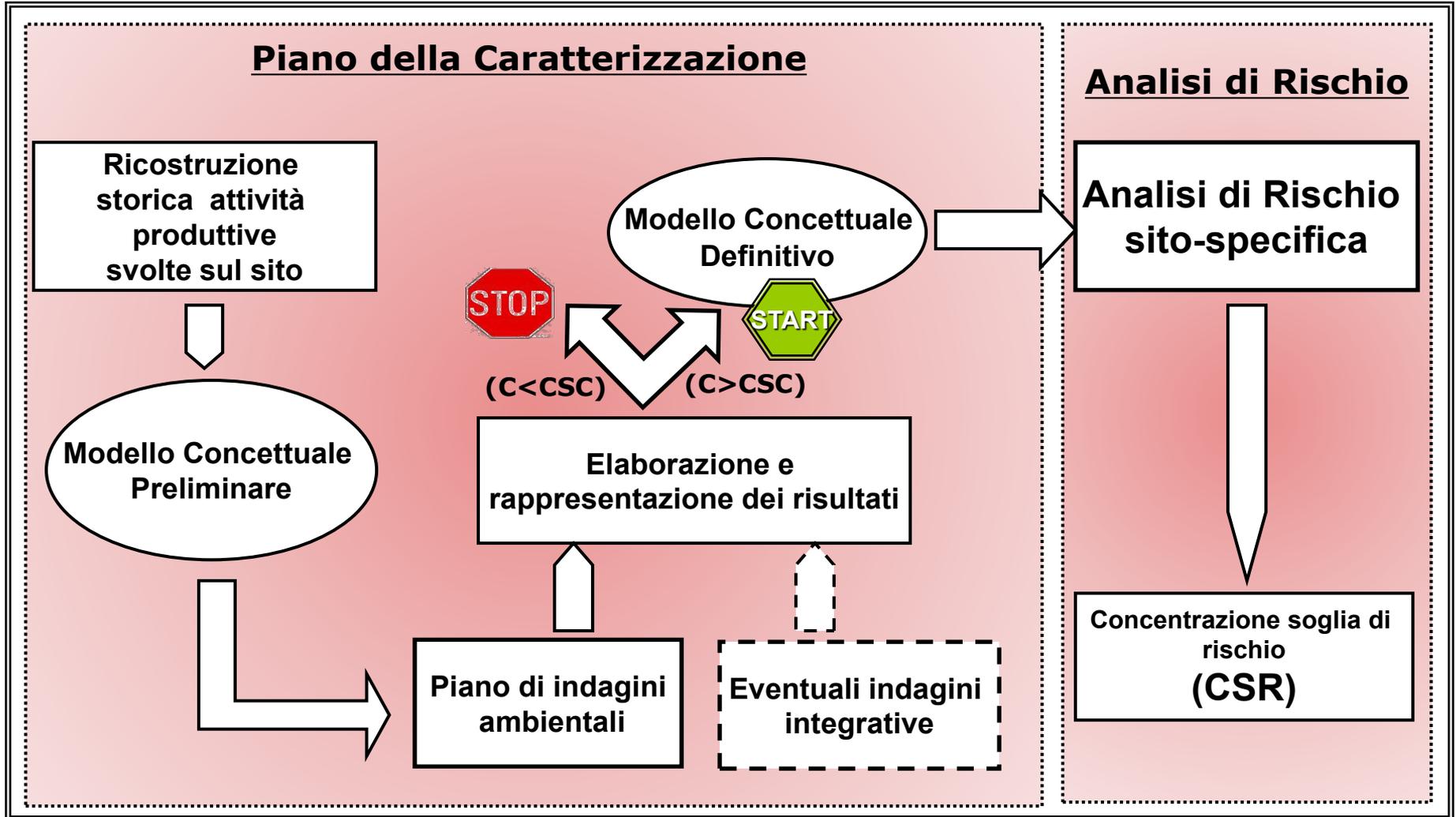
L' allegato 2 al Titolo V, Parte IV del D.Lgs. 152/2006 definisce anche gli **indirizzi generali** per la predisposizione del **Piano di Indagini Ambientali**, con particolare riferimento ai seguenti aspetti:

- ✓ ubicazione dei punti di campionamento;
- ✓ modalità di prelievo, conservazione e trasporto dei campioni;
- ✓ raccomandazioni per le analisi in laboratorio;
- ✓ criteri per il controllo della qualità delle operazioni di campionamento, analisi, elaborazione dei dati.

Gli indirizzi per la redazione del Piano della caratterizzazione contenuti nell'Allegato 2 risultano essere molto limitati se confrontati con quelli contenuti nel D.M. 471/99

Le attività di caratterizzazione di un sito

Le fasi



Le attività di caratterizzazione di un sito

Gli elaborati tecnici

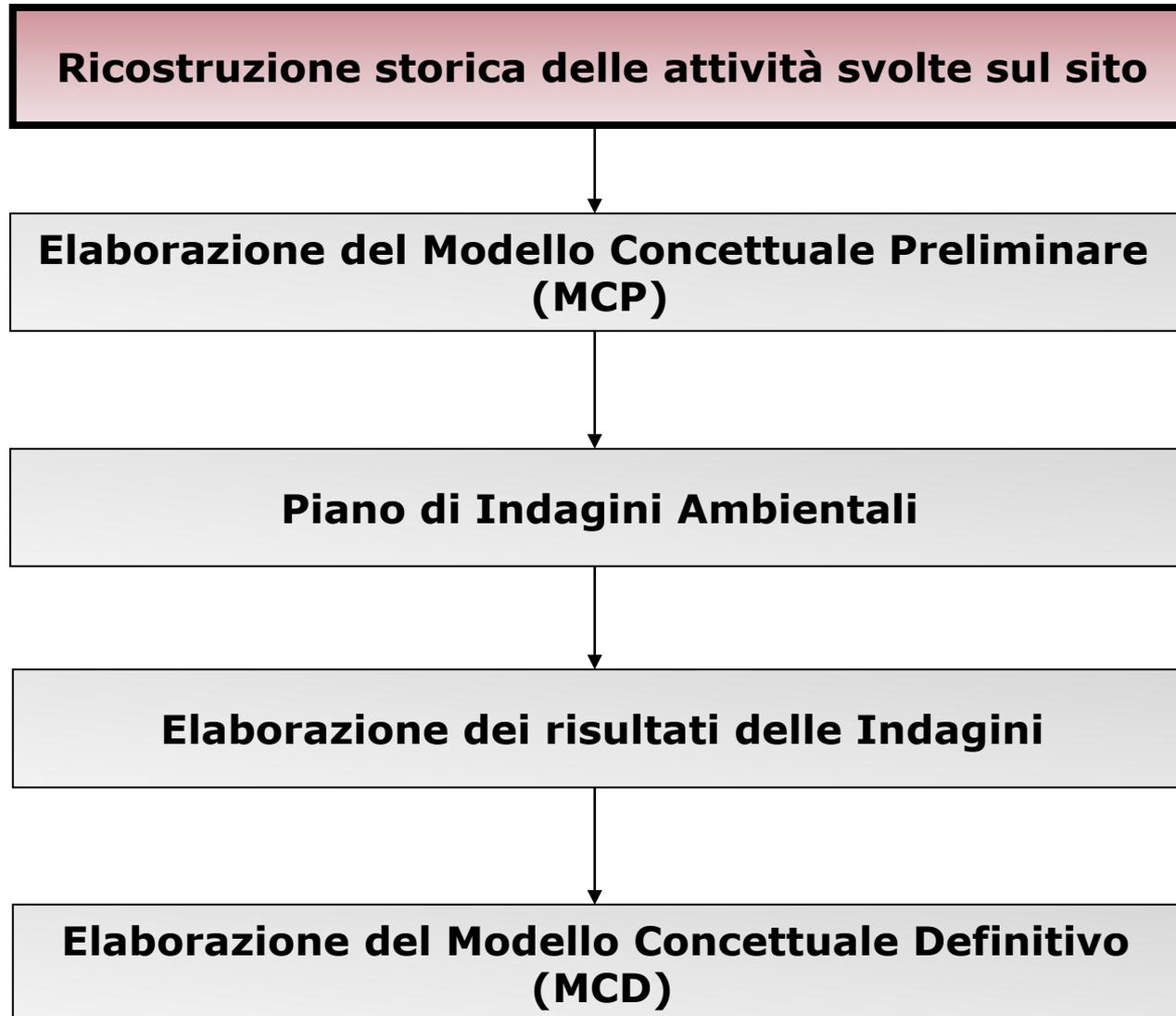
✓ ***Piano della caratterizzazione***

- Il D.Lgs. 152/06 introduce il **piano di caratterizzazione (PdC)** all'articolo 242 - Procedure operative e amministrative, rimandando all'Allegato 2 per le indicazioni sulla sua redazione.
- L'approvazione del PdC da parte degli enti preposti decreta l'avvio della procedura di caratterizzazione del sito.

✓ ***Analisi di Rischio***

- Rappresenta la fase conclusiva della Caratterizzazione Ambientale.
- Permette la determinazione degli obiettivi di bonifica.
- Consente di stabilire se il sito è contaminato.
- Il documento di Analisi di Rischio è richiesto qualora i risultati del Piano della caratterizzazione accertino il reale superamento delle CSC.

Il Piano della Caratterizzazione

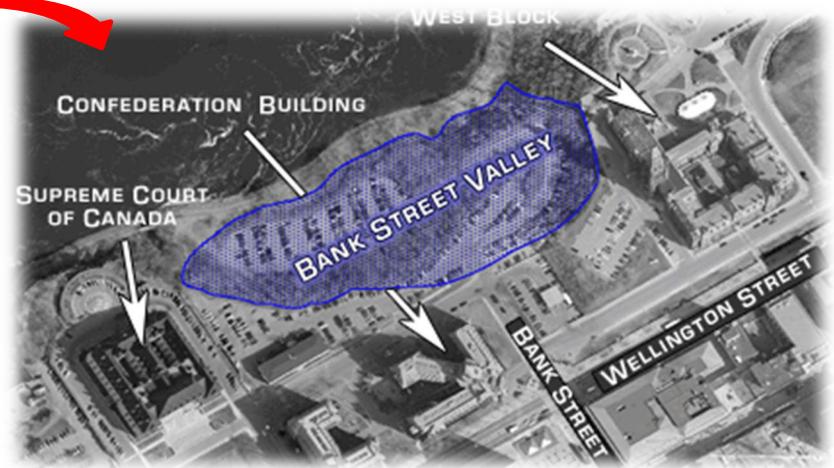
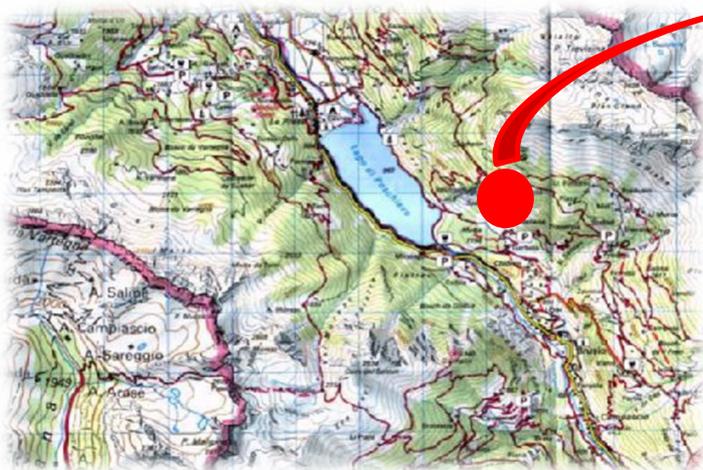


Il Piano della Caratterizzazione

Ricostruzione storica delle attività svolte sul sito

Un primo approccio al sito consiste nell'esecuzione di **sopralluoghi preliminari** e nella **sistematizzazione e raccolta dei dati esistenti**, al fine di identificare:

- ✓ il contesto territoriale e ambientale (inquadramento geografico; identificazione del sito, delimitazione ed estensione superficiale; ...)
- ✓ le caratteristiche del sito (tipologia di area, descrizione dei confini, con particolare riferimento alle attività svolte in aree limitrofe, ...)



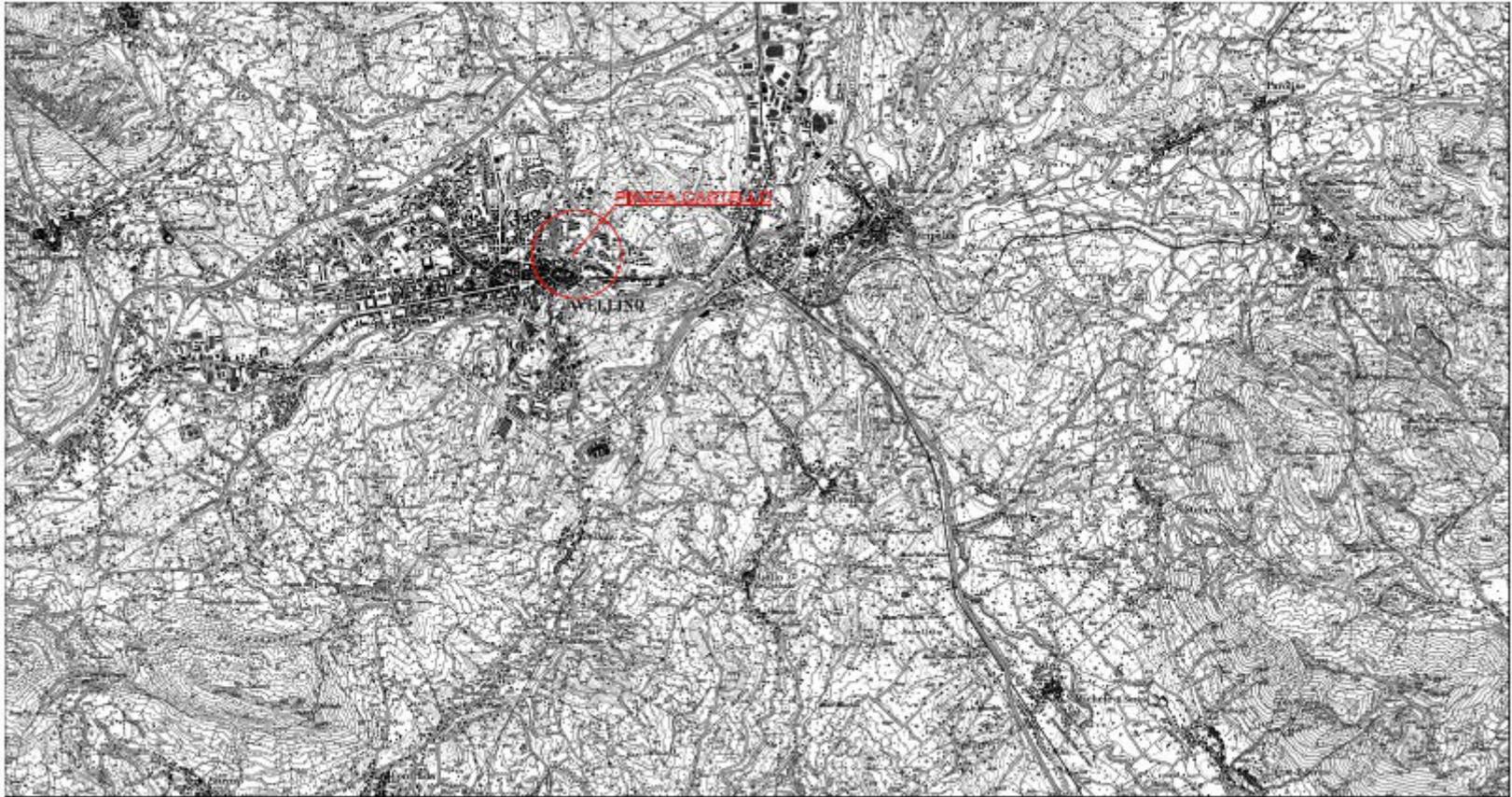
Il Piano della Caratterizzazione

Analisi dei dati esistenti

Oggetto di analisi	Tipologia di dato	Fonti
Sito	<ul style="list-style-type: none">- Cartografie attuali e serie storiche;- Utilizzo attuale e sviluppo storico;- Dati urbanistici;- Atti amministrativi e giudiziari;- Dettagli di edifici, impianti, stoccaggi e reti tecnologiche;- Cicli di processo e materiali utilizzati.	<ul style="list-style-type: none">- Amministrazioni pubbliche (Comuni, Regioni, ARPA, ...)- Operatori del sito (proprietari, affittuari, lavoratori, ...)
Territorio	<ul style="list-style-type: none">- Cartografie attuali e serie storiche;- Risorse idriche e fonti di approvvigionamento;- Popolazione residente ed attività antropiche;- Reti viarie, ferroviarie e vie di trasporto in genere.	<ul style="list-style-type: none">- Altre fonti (università, consorzi privati, proprietari lotti limitrofi, ...)
Matrice ambientale	<ul style="list-style-type: none">- Analisi pregresse: ambientali, geologiche, idrogeologiche, geotecniche ecc.;- Informazioni di varia natura su geologia e idrogeologia locale e regionale.	

Il Piano della Caratterizzazione

Inquadramento territoriale: il caso studio di Piazza Castello



Carta corografica (1: 250.000)

Il Piano della Caratterizzazione

Inquadramento territoriale: il caso studio di Piazza Castello



Planimetria generale di dettaglio (1: 5.000)

Il Piano della Caratterizzazione

Inquadramento territoriale: il caso studio di Piazza Castello



Aerofotogrammetria con indicazione dell' area di intervento (1: 2.000)

Il Piano della Caratterizzazione

Inquadramento territoriale: il caso studio di Piazza Castello



Ortofoto con indicazione dell' area di intervento

Il Piano della Caratterizzazione

Le caratteristiche del sito

✓ ***Storia del sito***

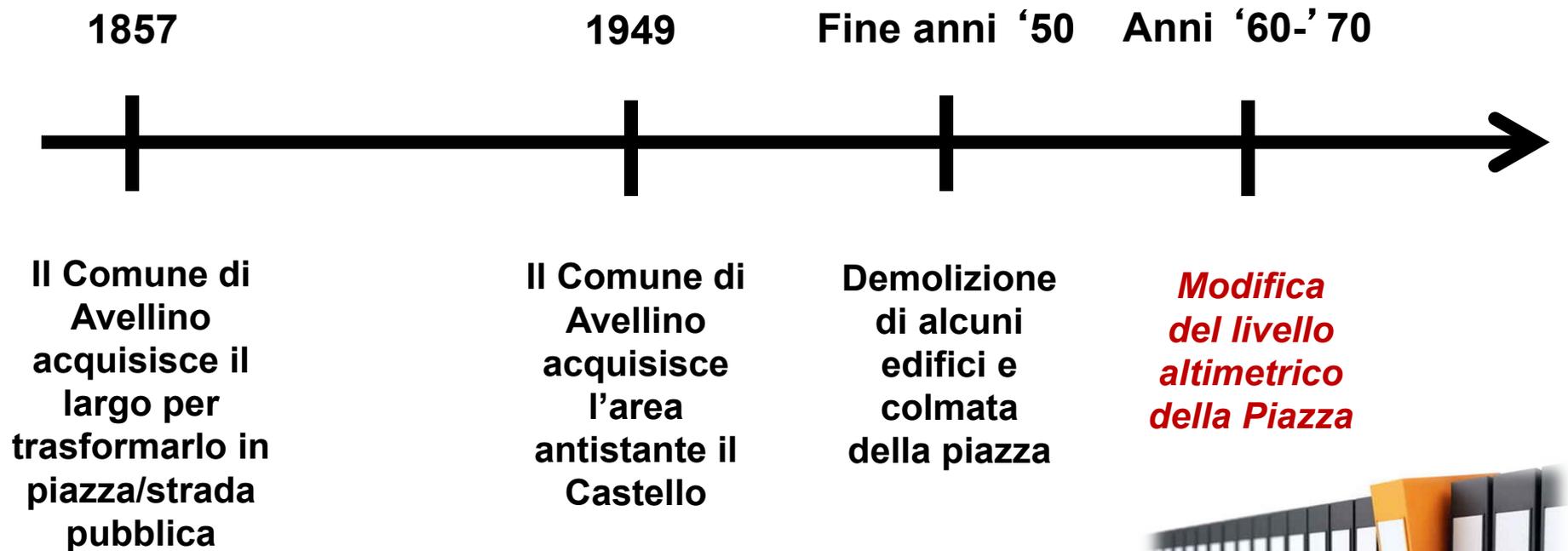
- Storia dell'evoluzione del sito;
- Storia societaria (cambi di proprietà, proprietà attuale, ...);
- Planimetrie e/o foto aeree storiche per la comprensione delle trasformazioni dell'area nel tempo;
- Eventuali incidenti avvenuti.

✓ ***Cicli produttivi attuali e pregressi***

- Descrizione dei cicli produttivi;
- Materie prime, prodotti intermedi e finali del ciclo produttivo;
- Numero di addetti e loro principali variazioni nel tempo.

Il Piano della Caratterizzazione

Cronistoria del sito: il caso studio di Piazza Castello



Il Piano della Caratterizzazione

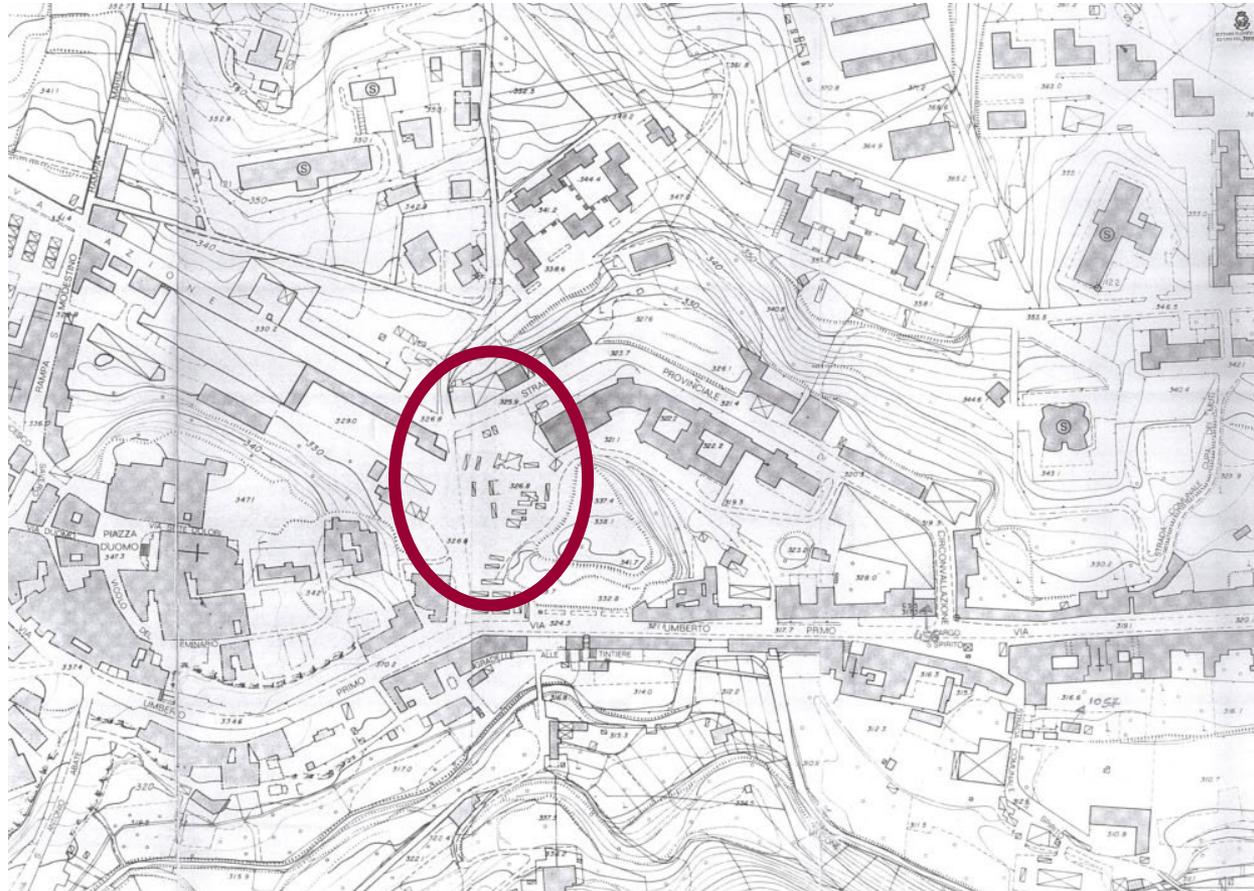
Cronistoria del sito: il caso studio di Piazza Castello



Cartografia del **1957** ➔ *Quota altimetrica media: **324 m***

Il Piano della Caratterizzazione

Cronistoria del sito: il caso studio di Piazza Castello



Cartografia del 1984



Quota altimetrica media: **326 m**

Il Piano della Caratterizzazione

Cronistoria del sito: il caso studio di Piazza Castello



Cartografia del **2000**



Quota altimetrica media: 326 m

Il Piano della Caratterizzazione

Le caratteristiche del sito

✓ **Descrizione del sito**

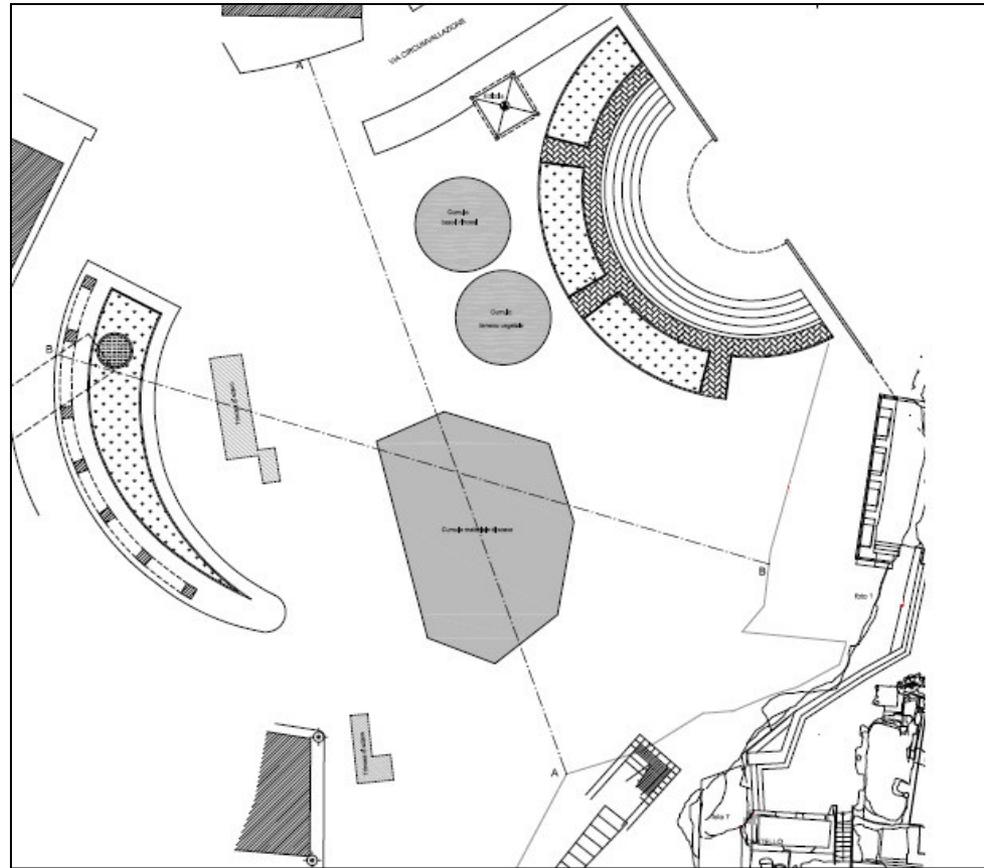
- Caratterizzazione delle strutture entro e fuori terra;
- Caratterizzazione delle aree di stoccaggio;
- Caratterizzazione dei serbatoi esistenti (*specifiche tecniche, capacità, tipologie di sostanze contenute, eventuali verifiche di tenuta, eventuale anno di rimozione*);
- Caratterizzazione dell'approvvigionamento idrico (*tipologia, presenza di pozzi e loro specifiche tecniche, eventuali analisi sulle acque*).

✓ **Produzione e gestione dei rifiuti**

- Caratterizzazione quantitativa e qualitativa dei rifiuti prodotti (solidi e liquidi);
- Modalità di smaltimento dei rifiuti;
- Modalità di raccolta e smaltimento delle acque reflue (*eventuali impianti di pretrattamento, punti di scarico, eventuali analisi di laboratorio*).

Il Piano della Caratterizzazione

Descrizione del sito: il caso studio di Piazza Castello



Planimetria con indicazione delle aree di stoccaggio dei rifiuti (1:200)

Il Piano della Caratterizzazione

L'assetto territoriale ed ambientale

✓ **Assetto territoriale**

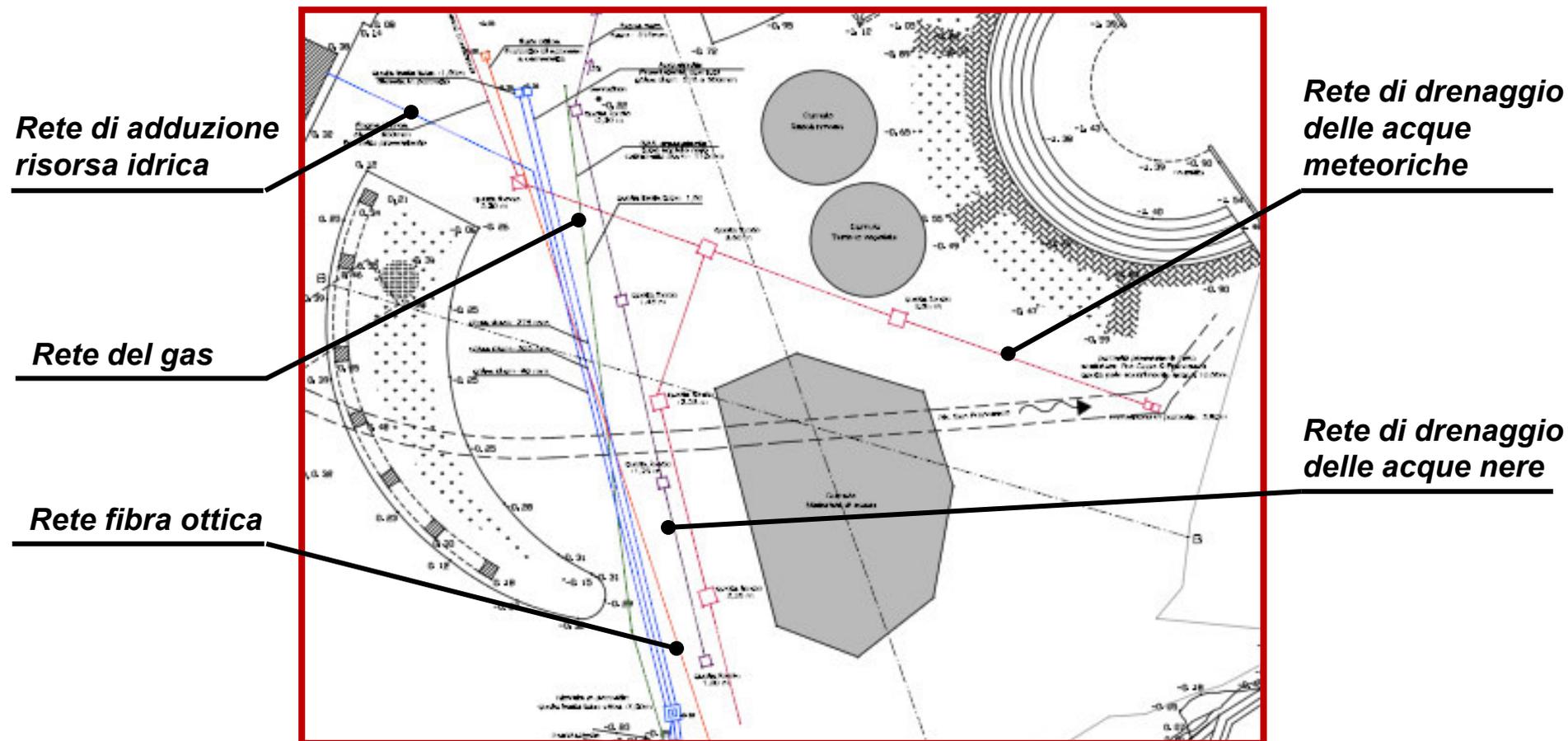
- Destinazione urbanistica delle aree adiacenti;
- Vicinanza e tipologia di edifici di particolare interesse pubblico.
- Caratterizzazione della rete dei sottoservizi.

✓ **Assetto geologico ed idrogeologico dell' area**

- Stratigrafia dell' area (profondità, spessore dei litotipi, granulometria, litologie affioranti)
- Idrografia locale e aree esondabili (rappresentazione grafica su base catastale);
- Manifestazioni idrogeologiche superficiali (sorgenti, fontanili, zone umide)
- Morfologia del territorio.
- Valutazione di stabilità dei versanti o pendii.

Il Piano della Caratterizzazione

L'assetto territoriale: il caso studio di Piazza Castello



Planimetria con identificazione dei sottoservizi (1:200)

Il Piano della Caratterizzazione

L'assetto territoriale: il caso studio di Piazza Castello



Legenda



Zona A3 – Borghi storici

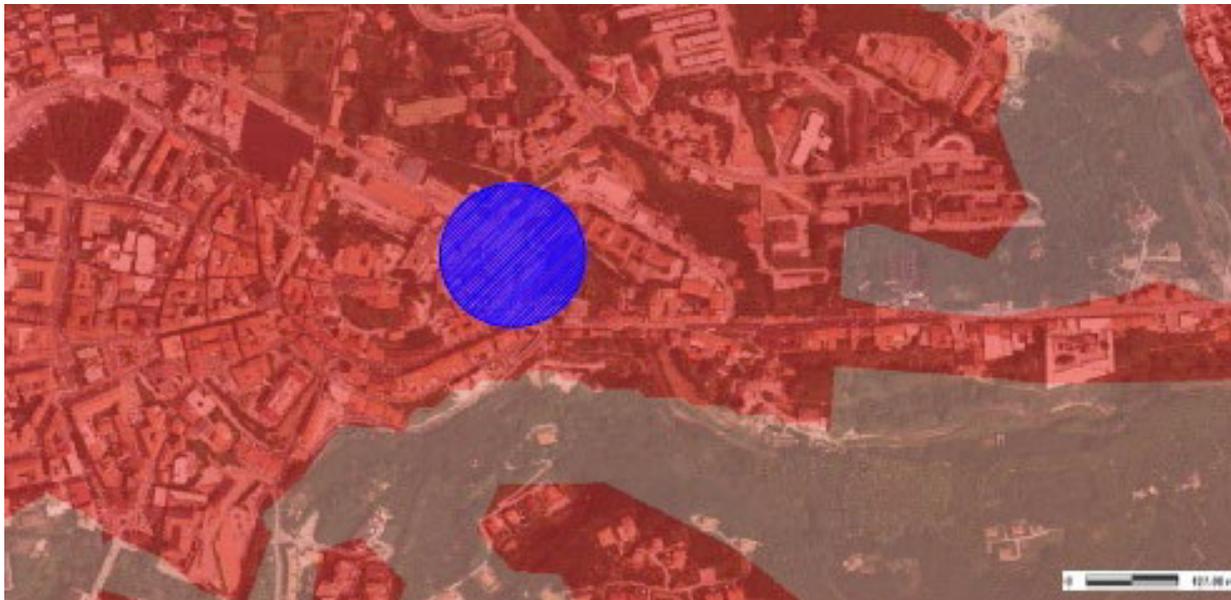


Aree da trasformare per servizi in zona A

Zonizzazione ai sensi del Piano Urbanistico Comunale (1:5.000)

Il Piano della Caratterizzazione

L'assetto territoriale: il caso studio di Piazza Castello



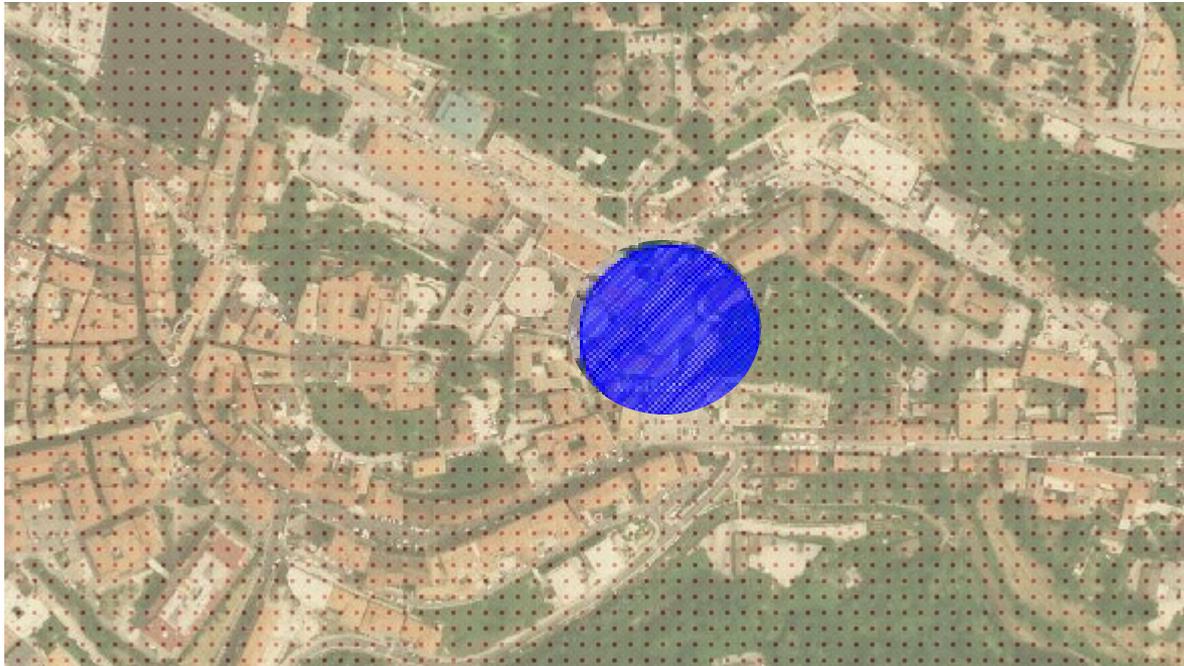
Legenda

-  **1.1.1 Tessuto urbano continuo**
-  **2.4.4 Aree agroforestali**
-  **Ubicazione del sito**

Corin Land Cover 2006 (1:5.000)

Il Piano della Caratterizzazione

L'assetto territoriale: il caso studio di Piazza Castello



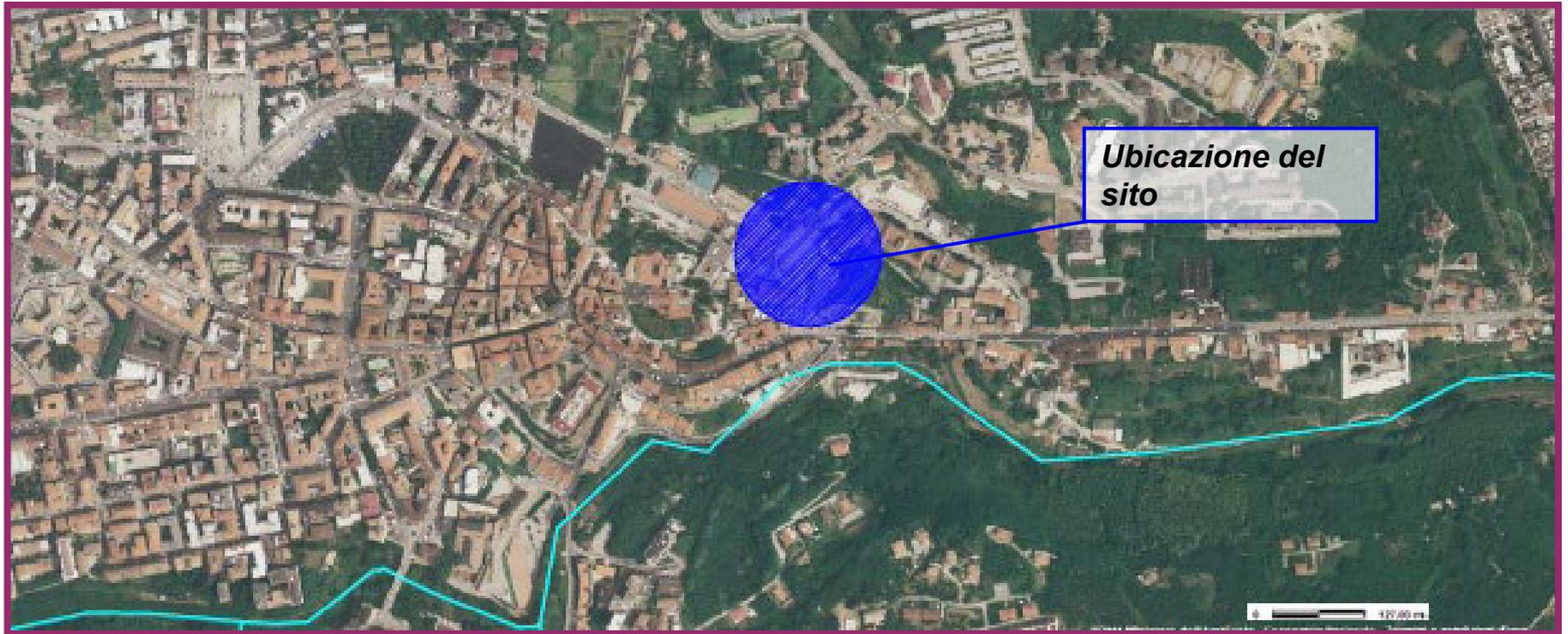
Legenda

-  **B1_Rioliti, riolaciti, latiti (ciclo quaternario)**
-  **B2_Andesiti (ciclo quaternario)**
-  **B3_Fonoliti e trachiti sodiche (ciclo quaternario)**
-  **B4_Latiti, trachiti, fonoliti (ciclo quaternario)**
-  **B5_Basalti alcalini, trachibasalti (ciclo quaternario)**
-  **Ubicazione del sito**

Carta geologica (1:5.000)

Il Piano della Caratterizzazione

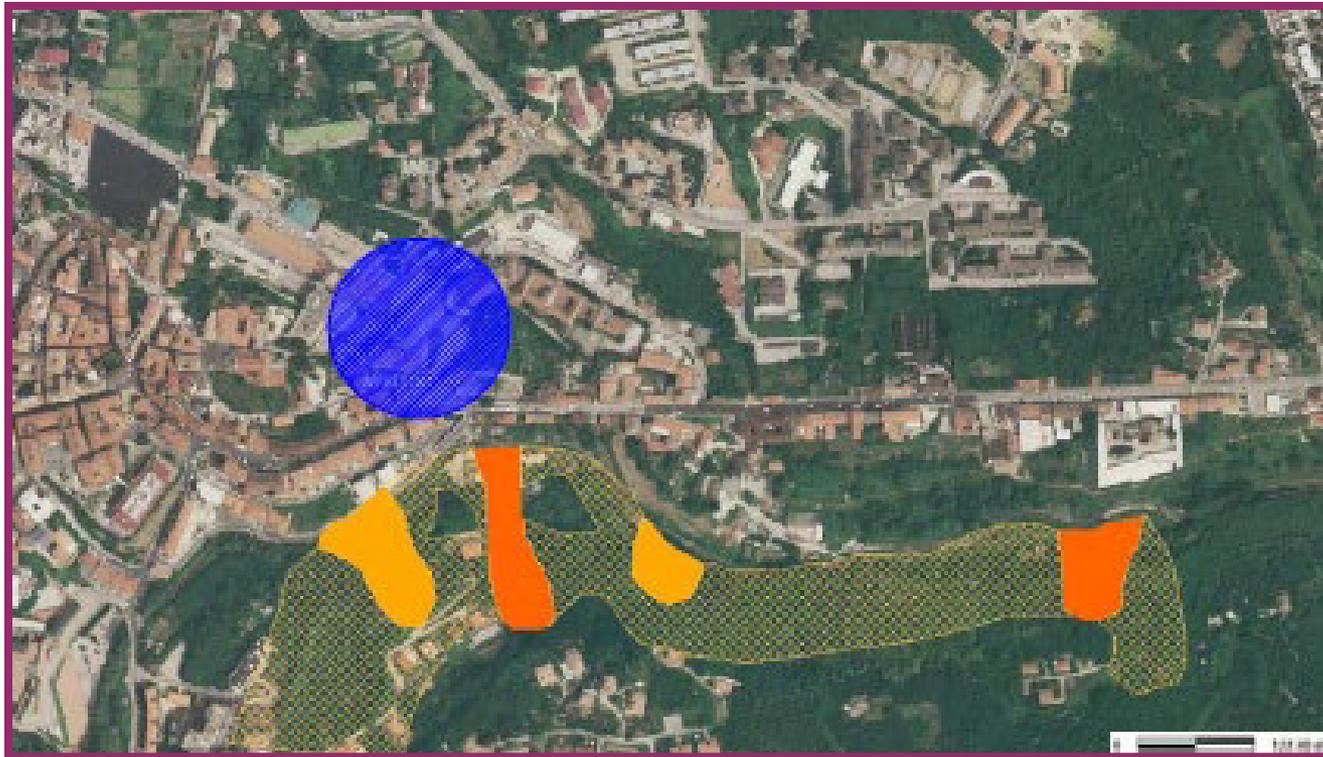
L'assetto geologico e idrogeologico: il caso studio di Piazza Castello



Ortofoto con indicazione reticolo idrografico (1:5.000)

Il Piano della Caratterizzazione

L'assetto geologico e idrogeologico: il caso studio di Piazza Castello



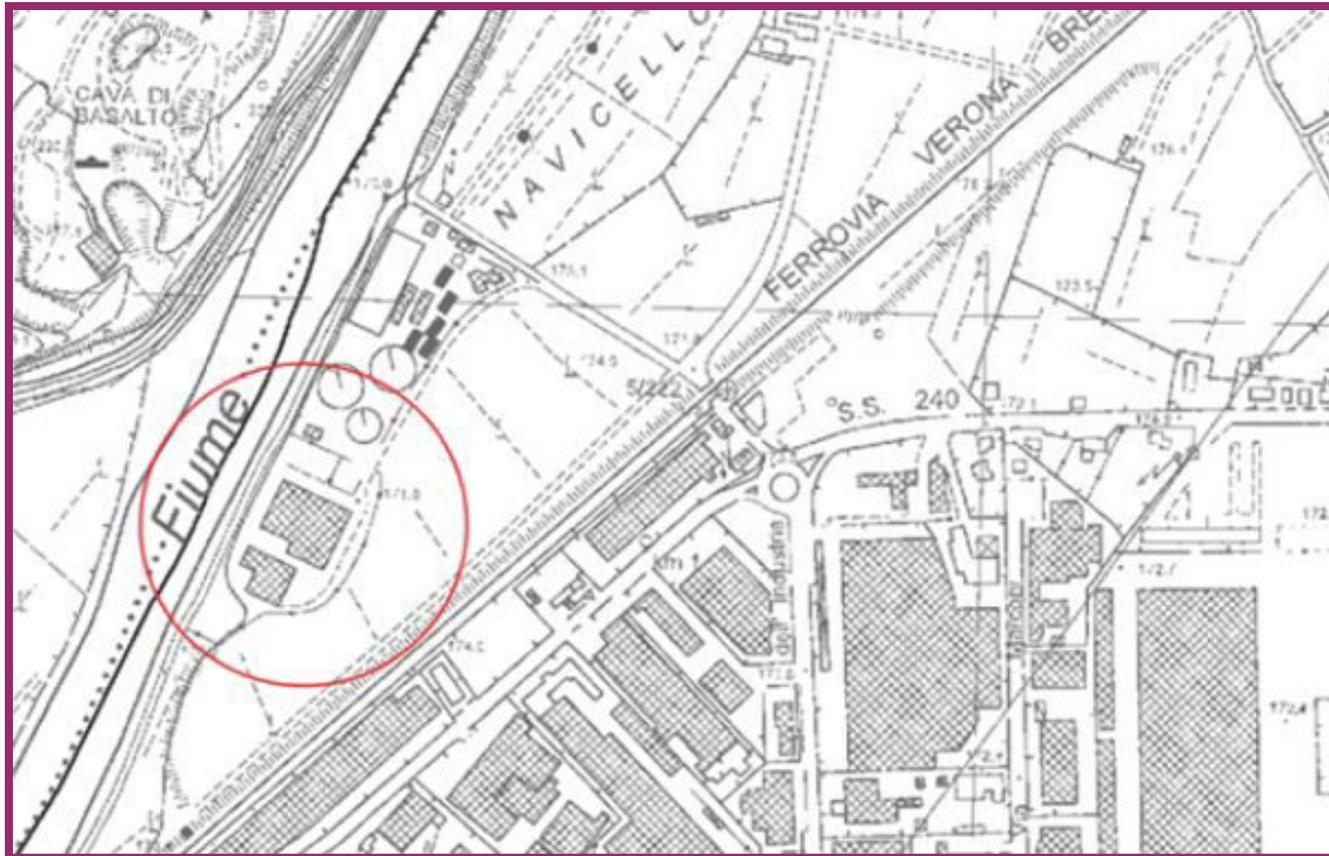
Legenda

-  Zona 1
-  Zona 1/Sottozona 2 A
-  Zona 2
-  Sottozona 2 A
-  Sottozona 2 A/ 2 B
-  Sottozona 2 B
-  Sottozona 2 B/ 3 A
-  Sottozona 2 B/ 3 A / 3 B
-  Ubicazione del sito

Carta rischio idrogeologico (1:5.000)

Il Piano della Caratterizzazione

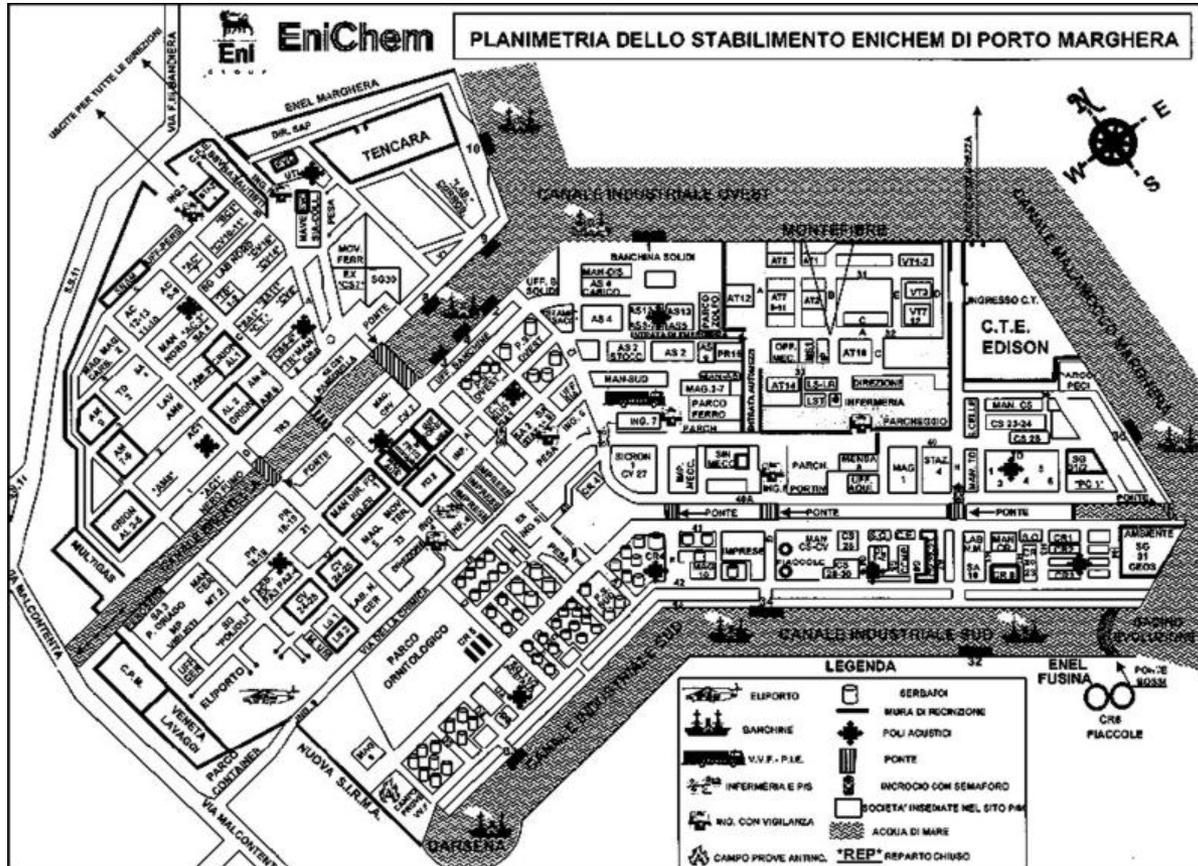
L'assetto territoriale: il caso studio di un sito industriale dismesso



Planimetria generale

Il Piano della Caratterizzazione

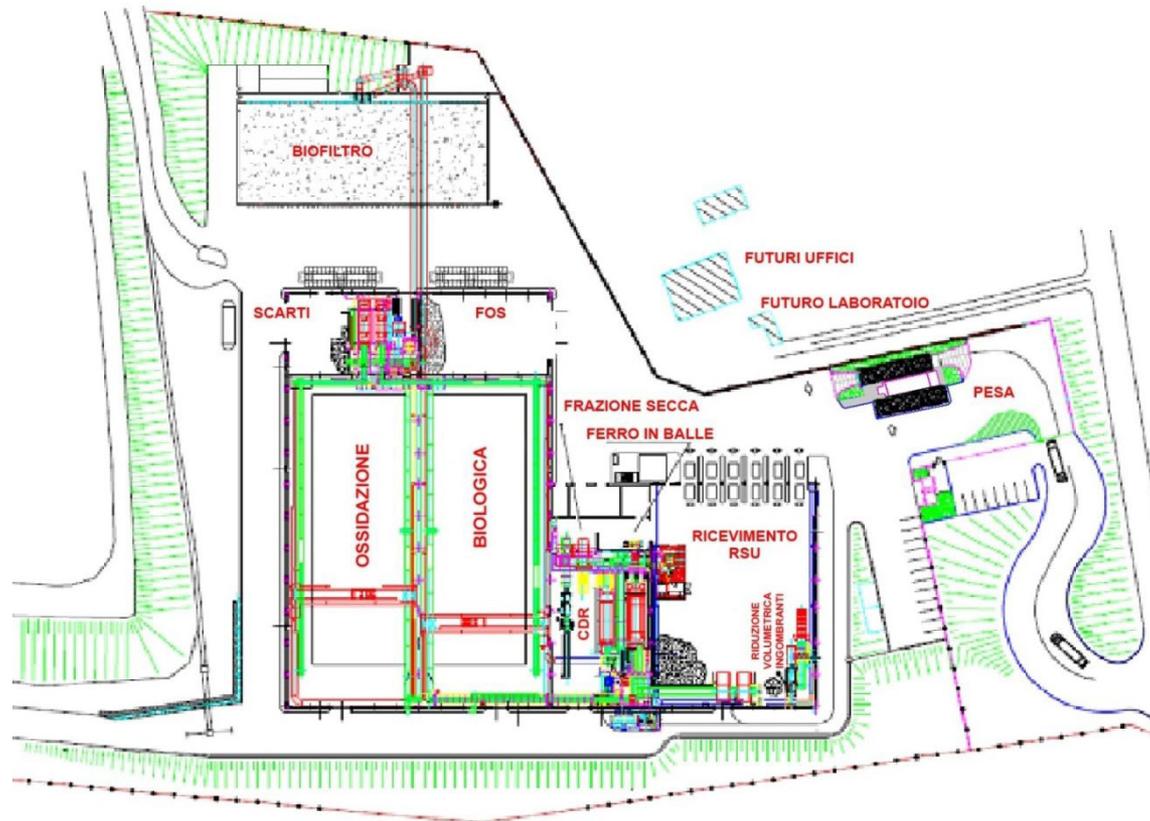
L'assetto territoriale: il caso studio di un sito industriale dismesso



Planimetria con indicazione della tipologia delle strutture e degli impianti presenti

Il Piano della Caratterizzazione

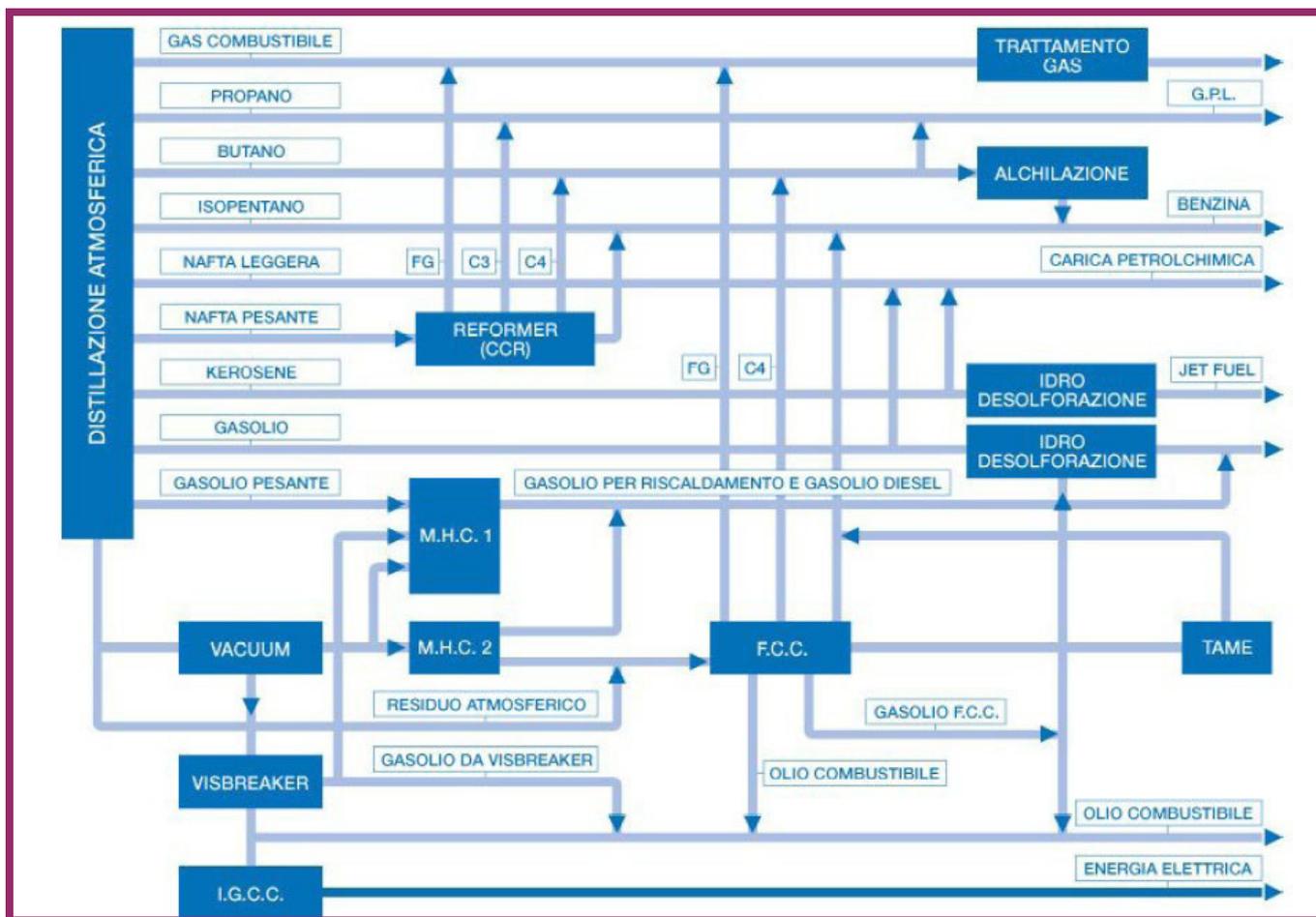
L'assetto territoriale: il caso studio di un sito industriale dismesso



Planimetria impianto TMB Viterbo con indicazione di strutture e impianti presenti

Il Piano della Caratterizzazione

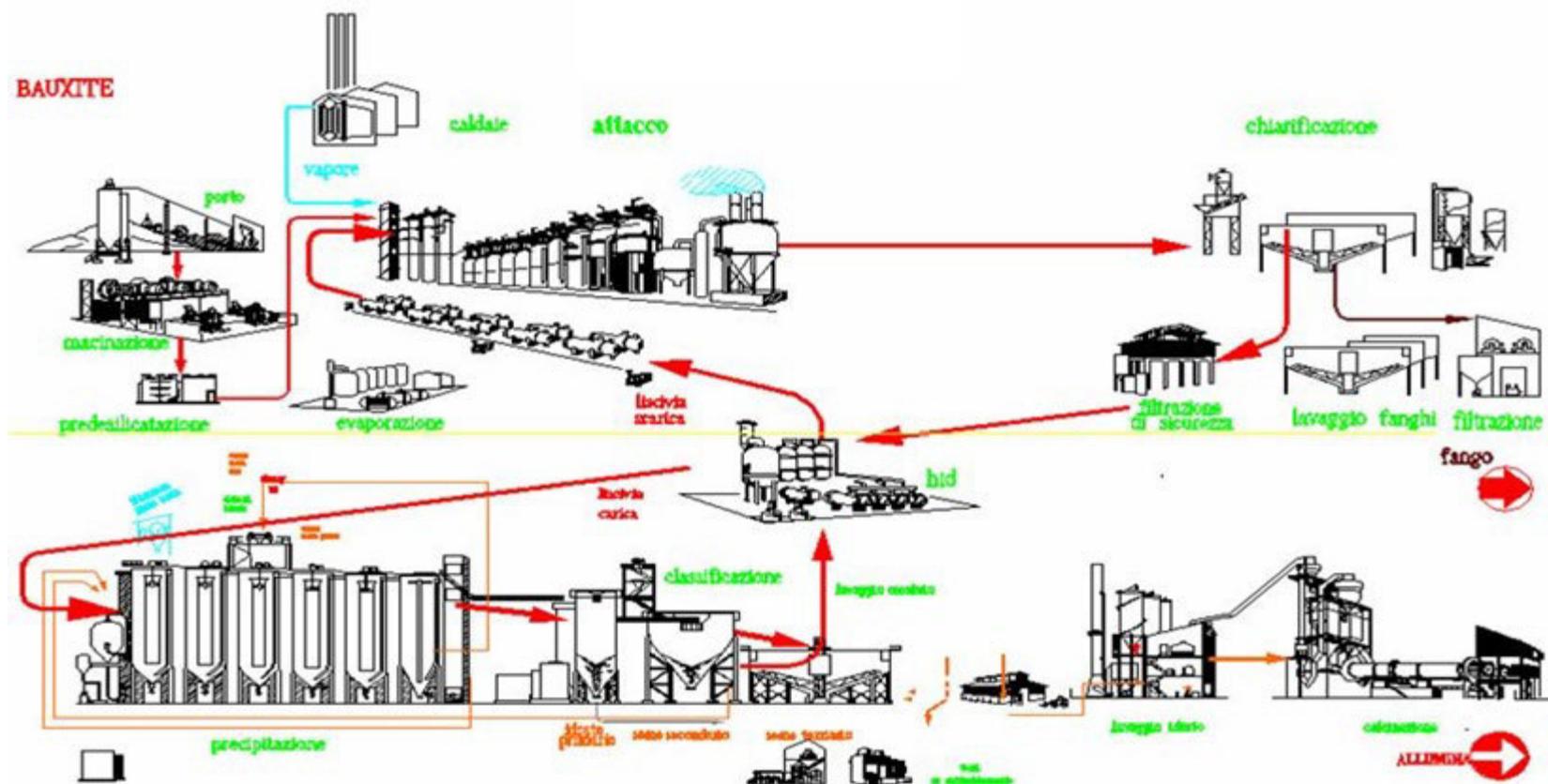
Caratteristiche di un sito industriale dismesso: i cicli produttivi



Schema di processo di una raffineria

Il Piano della Caratterizzazione

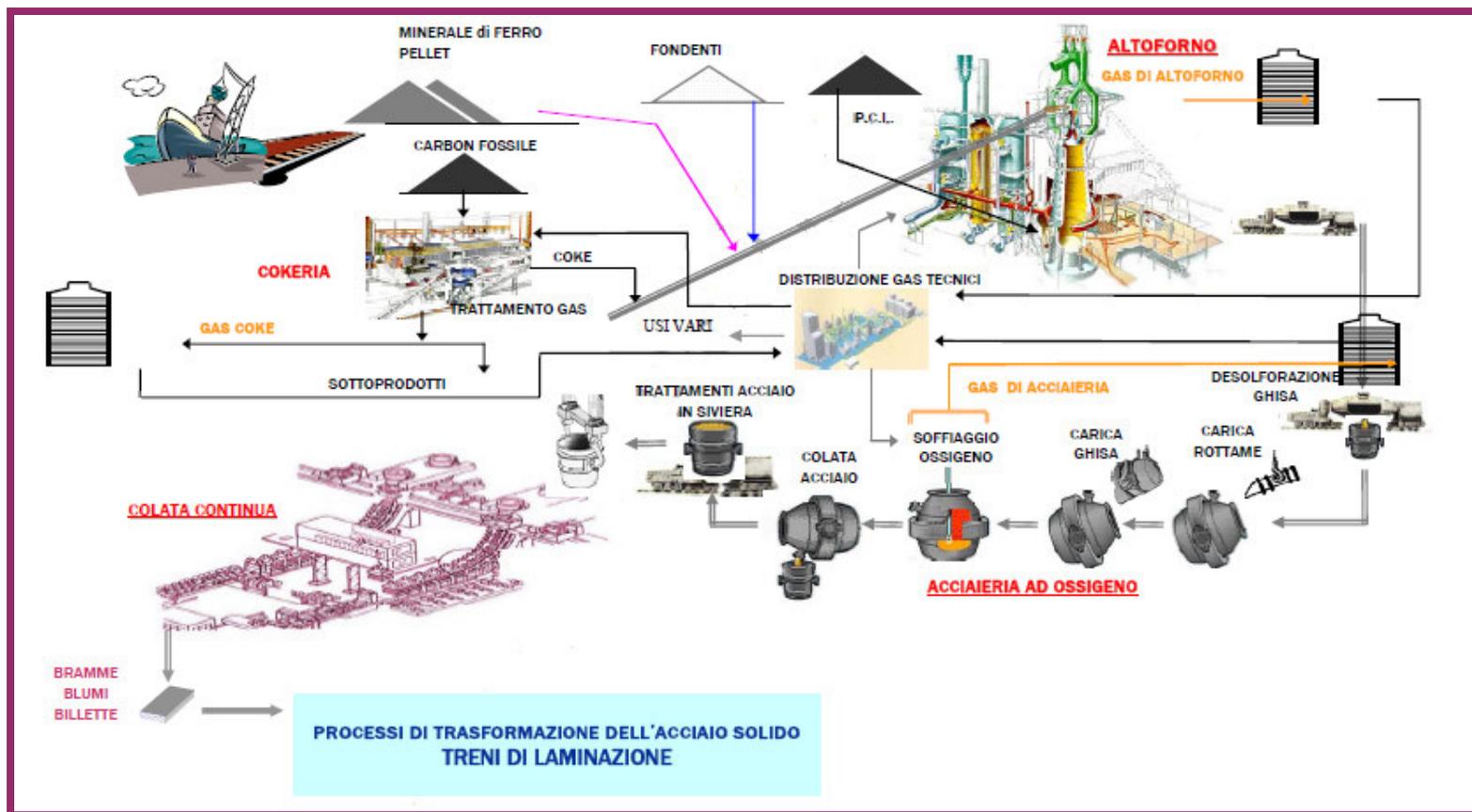
Caratteristiche di un sito industriale dismesso: i cicli produttivi



Schema di processo di un'industria metallurgica (produzione di allumina)

Il Piano della Caratterizzazione

Caratteristiche di un sito industriale dismesso: i cicli produttivi



Schema di processo di un'industria metallurgica (produzione di acciaio)

Il Piano della Caratterizzazione

Validazione dei dati pregressi

La qualità della caratterizzazione effettuata è legata alla qualità dei dati pregressi rispetto ai quali è necessario valutare:

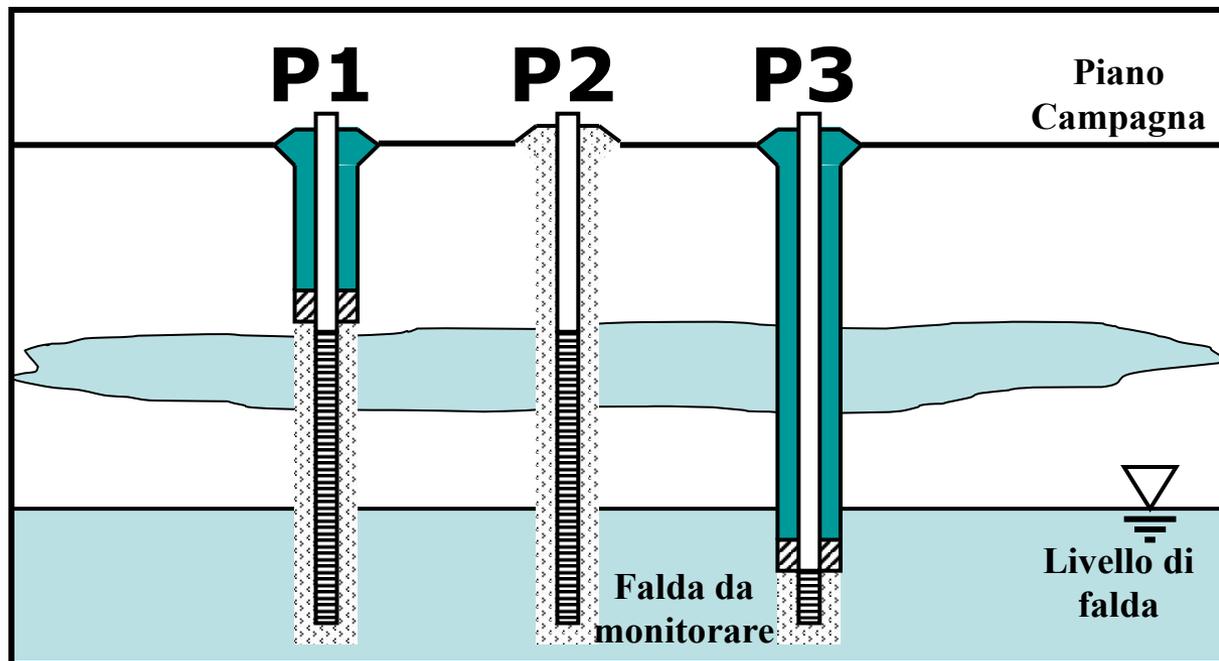
- ✓ accuratezza;
- ✓ metodiche utilizzate per la loro determinazione;
- ✓ variabilità temporale significativa;
- ✓ eventuali rielaborazioni e/o ai valori originali.

Non possiamo ritenere validi i certificati di analisi parziali, incompleti o comunque eseguiti da laboratori con procedure di campionamento non definite.



Il Piano della Caratterizzazione

Validazione dei dati pregressi: un esempio



I dati relativi ai livelli piezometrici e alle concentrazioni di Cr VI rilevate nel pozzo P1 sono disponibili.

Quali informazioni sono necessarie per l'uso di tali dati?

Il Piano della Caratterizzazione

Validazione dei dati pregressi: un esempio

Pozzo
<ul style="list-style-type: none">▪ Profondità e diametro▪ Collocazione delle sfinestrature▪ Tipologia costruttiva
Sottosuolo
<ul style="list-style-type: none">▪ Stratigrafie attraversate▪ Idrogeologia di massima
Campionamento e analisi
<ul style="list-style-type: none">▪ Modalità di campionamento▪ Utilizzo del pozzo al tempo del campionamento▪ Data ed ora esatta del campionamento▪ Metodiche di determinazione analitiche▪ Scopo delle attività di campionamento ed analisi

Il Piano della Caratterizzazione



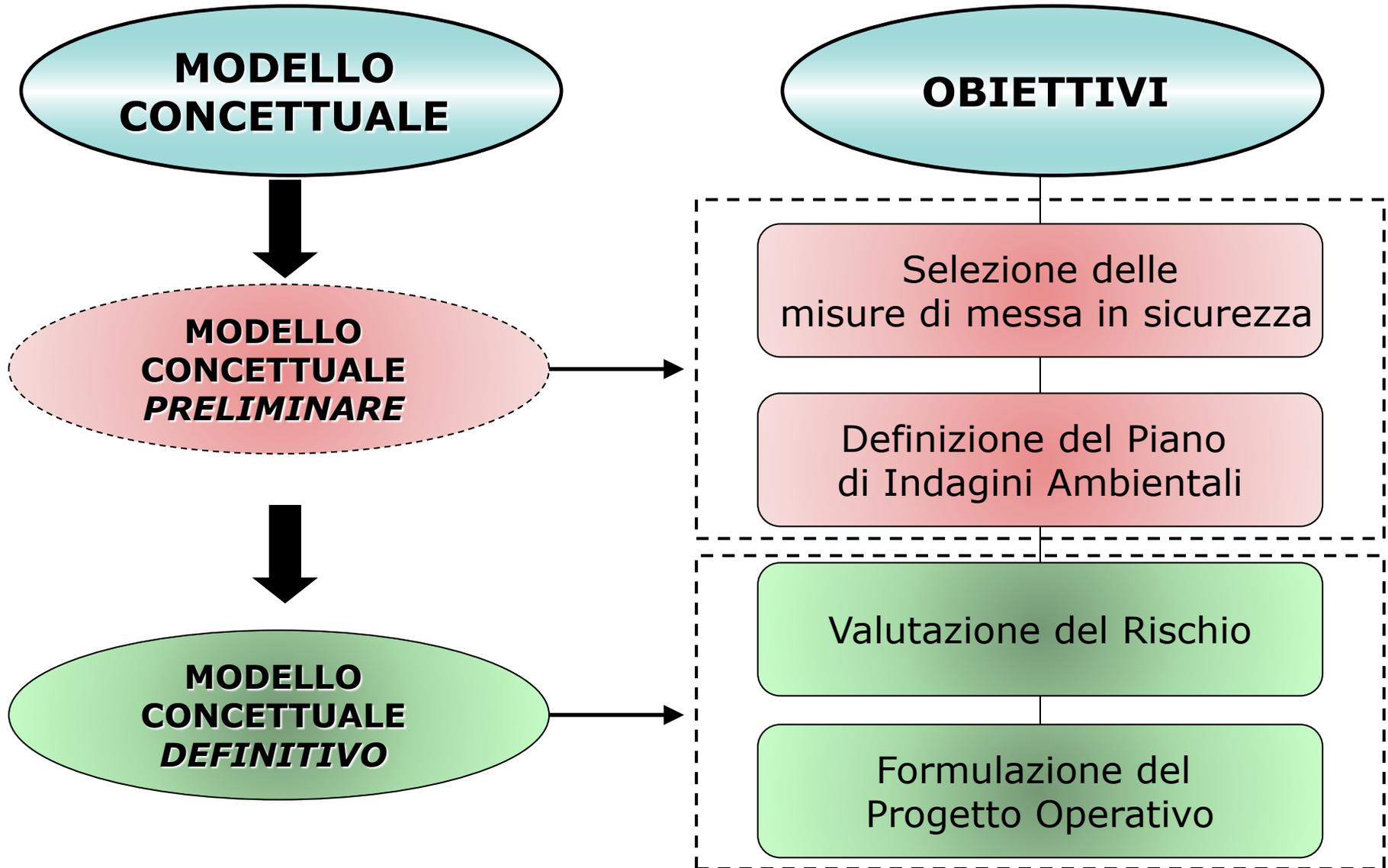
Il Modello Concettuale

Il **modello concettuale** è una schematizzazione del processo di contaminazione finalizzata alla individuazione e caratterizzazione di:

- ✓ **fonti** della contaminazione;
- ✓ **percorsi** di migrazione dalle sorgenti di contaminazione ai bersagli ambientali e alla popolazione;
- ✓ **bersagli** della contaminazione



Il Modello Concettuale

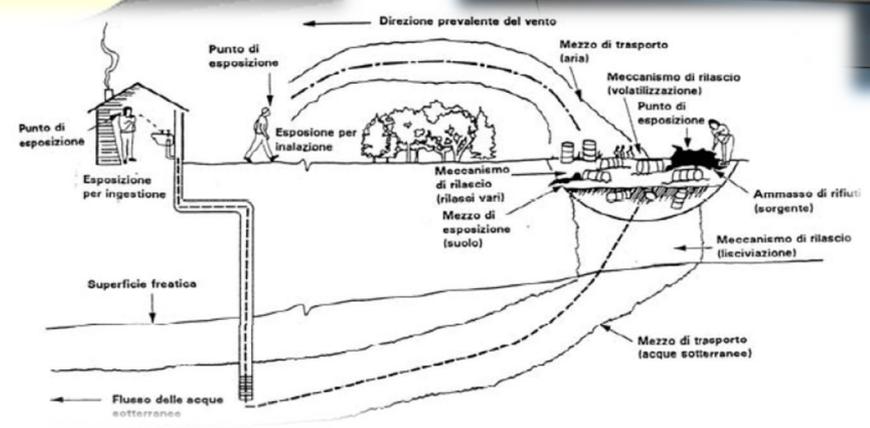
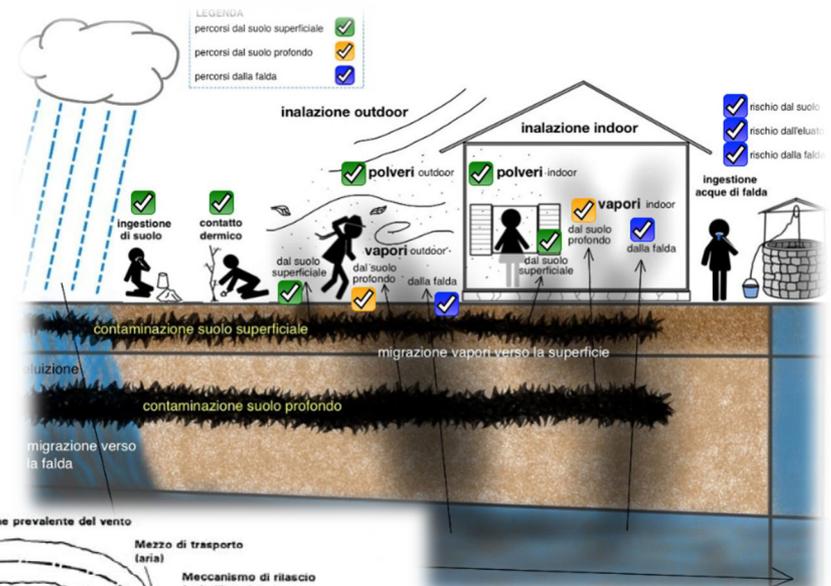
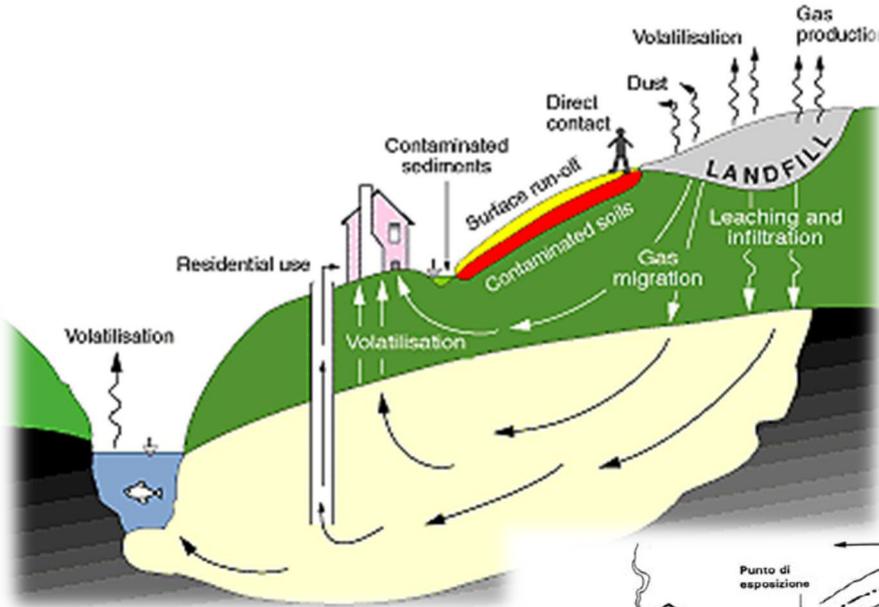


Il Modello Concettuale

- ✓ Il **modello concettuale preliminare (MCP)** ha un grado di dettaglio e significatività solo preliminare, in quanto prende origine delle **informazioni storiche** disponibili prima dell'inizio del Piano di Indagini Ambientali, nonché da **eventuali indagini condotte** nelle vari matrici ambientali nel corso della normale **gestione del sito**.
- ✓ Il **modello concettuale definitivo (MCD)** può essere elaborato solo **successivamente all'esecuzione** delle **indagini** sul sito che permettono di testare e validare le ipotesi effettuate.

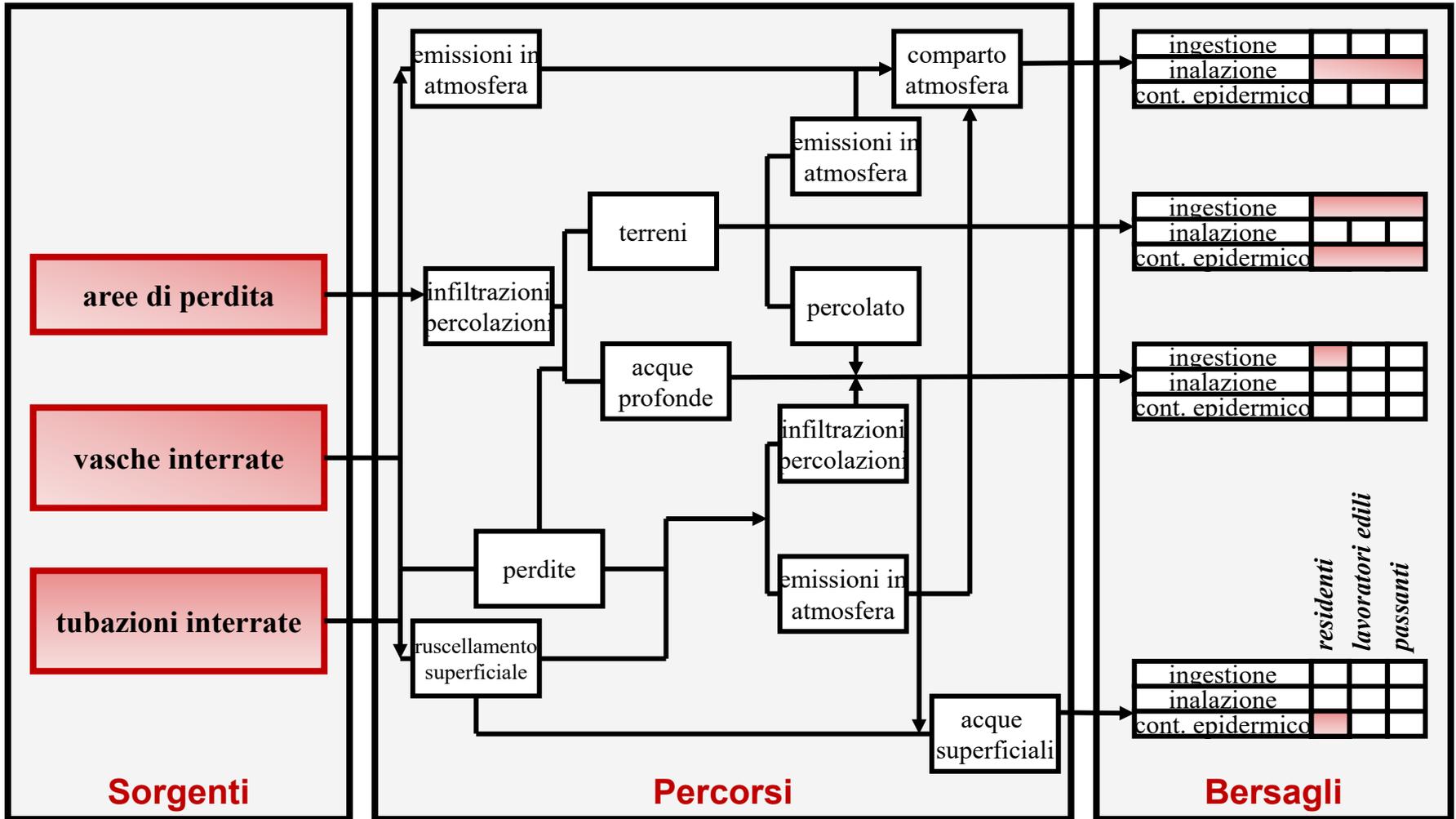
Il Modello Concettuale Preliminare

Schematizzazioni grafiche



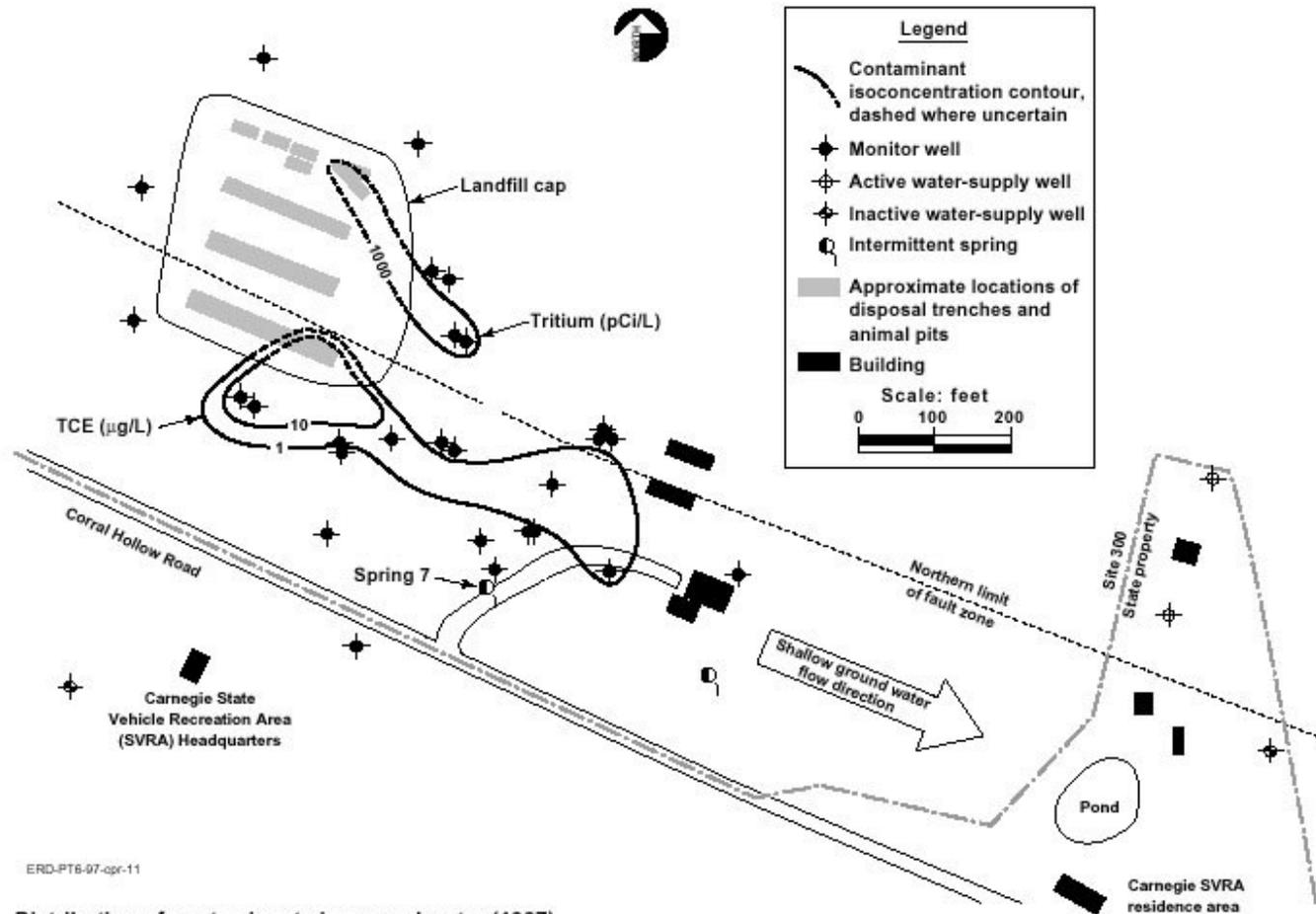
Il Modello Concettuale Preliminare

Flow chart



II Modello Concettuale Preliminare

Cartografie

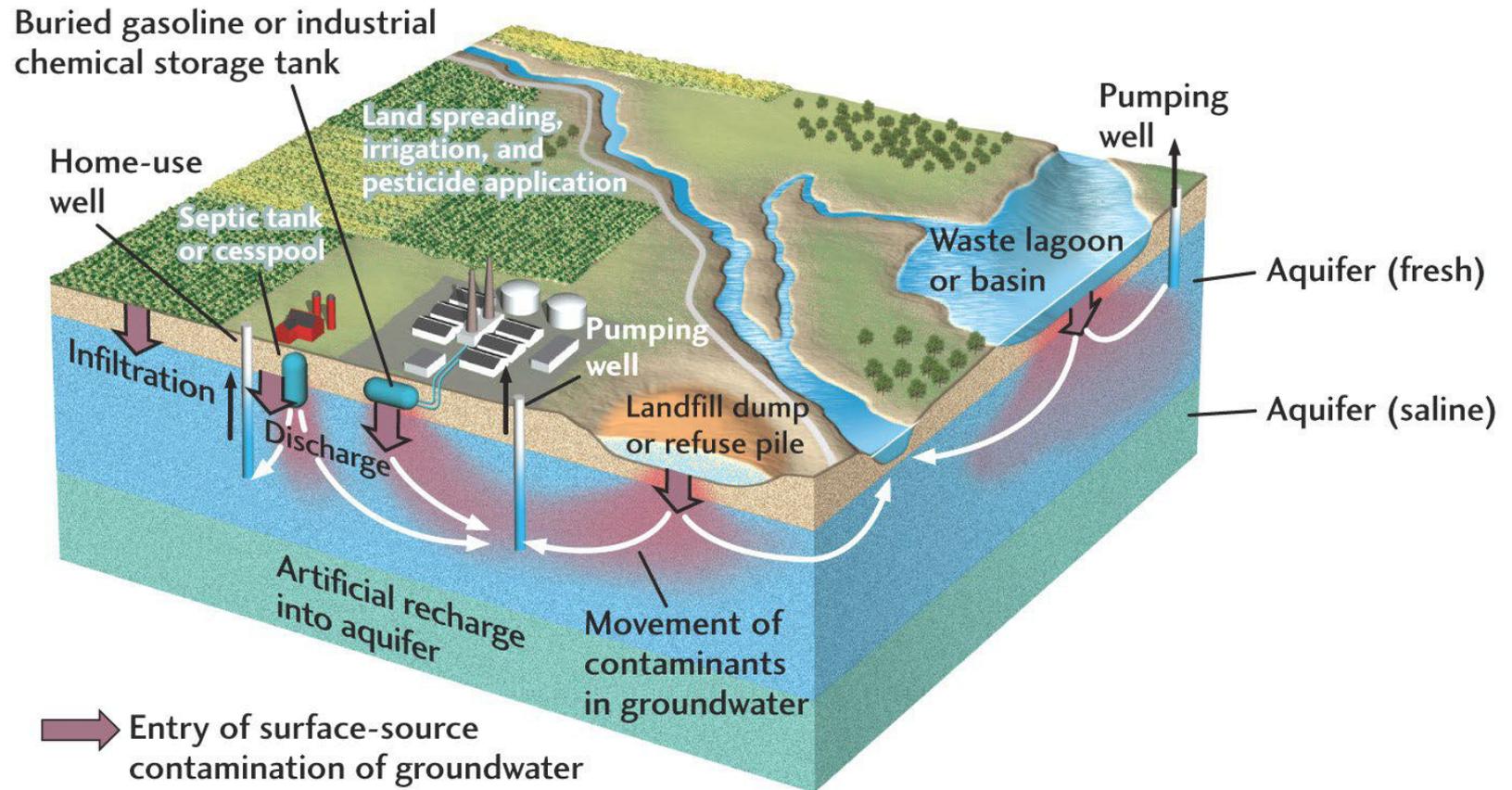


ERD-PT6-97-cpr-11

Distribution of contaminants in ground water (1997).

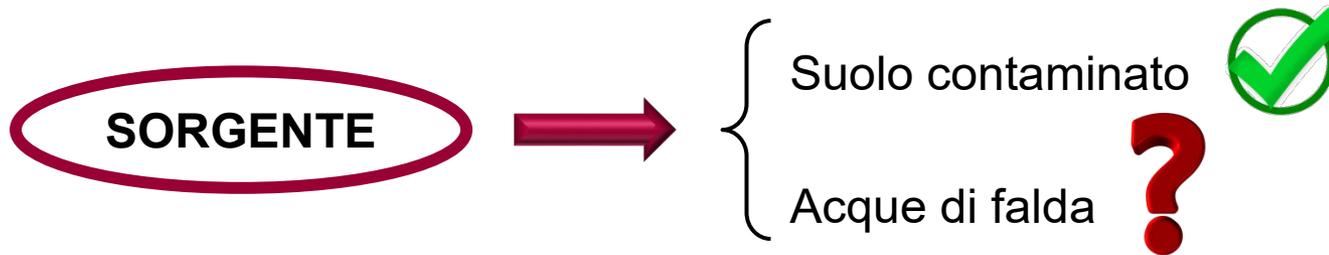
Il Modello Concettuale Preliminare

Rappresentazioni tridimensionali



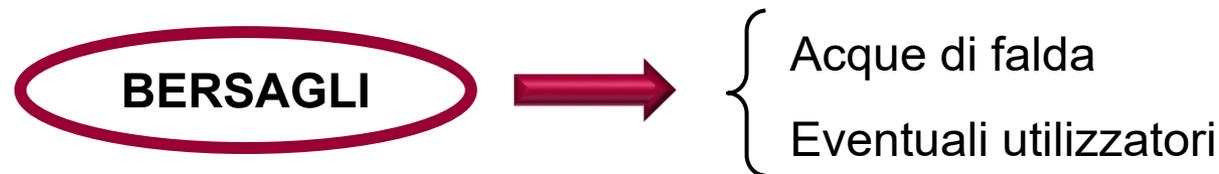
Il Modello Concettuale Preliminare

Il caso studio di Piazza Castello

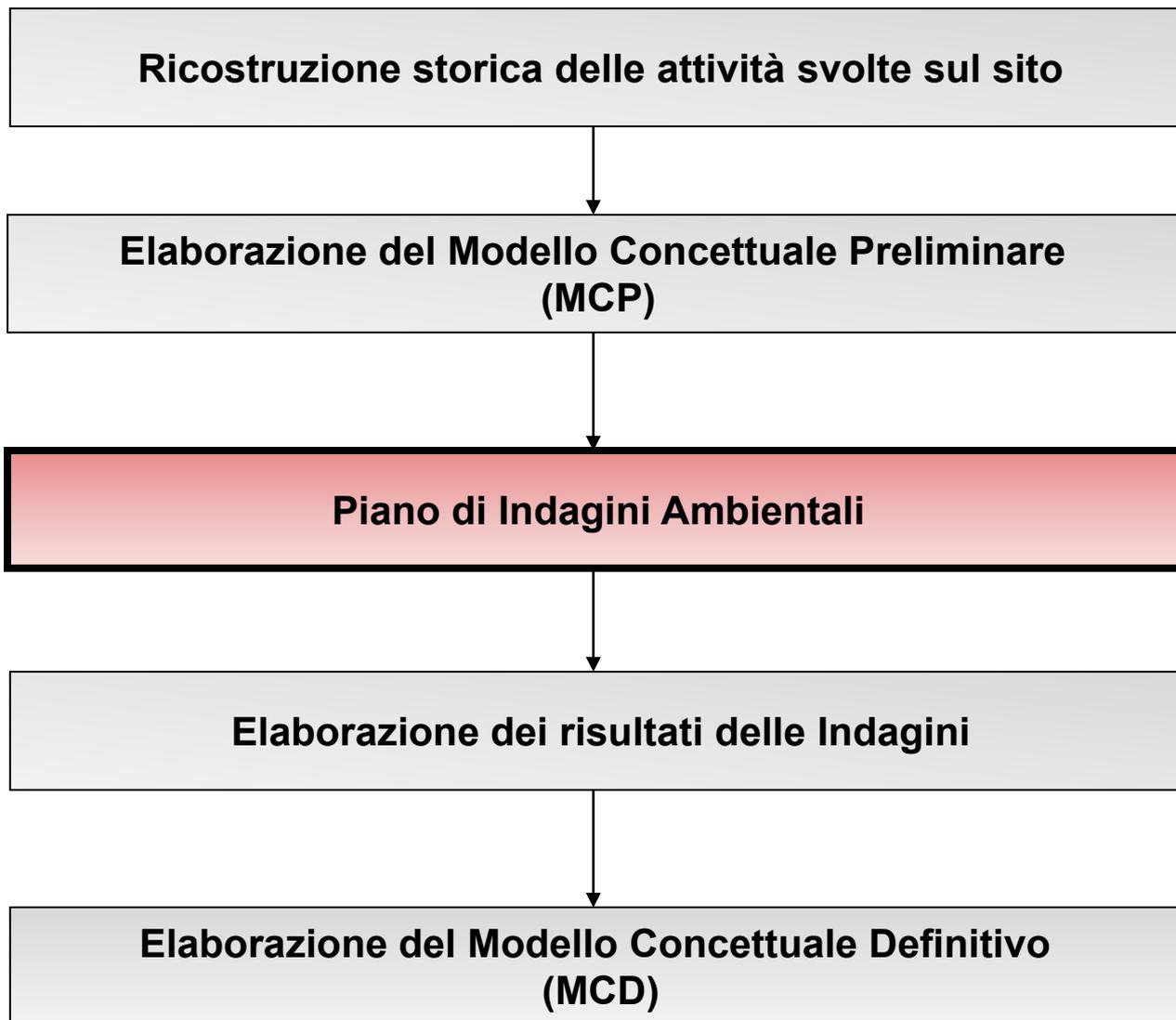


PERCORSI

Percorso	Stato di potenziale attività
Contatto dermico ed ingestione di rifiuti e terreno contaminato	Inattivo
Contatto dermico ed ingestione di acque profonde contaminate	Da considerare
Erosione eolica e dispersione atmosferica	Inattivo
Volatilizzazione e dispersione in atmosfera	Inattivo
Lisciviazione e dispersione nell'ambiente	Da considerare
Dissoluzione per contatto diretto con la falda	Inattivo
Migrazione di acqua sotterranea contaminata	Da considerare
Migrazione di acque superficiali contaminate	Inattivo
Erosione e trasporto ad opera di acque di ruscellamento e dispersione in acque superficiali	Inattivo



Il Piano della Caratterizzazione



Il Piano di Indagini Ambientali

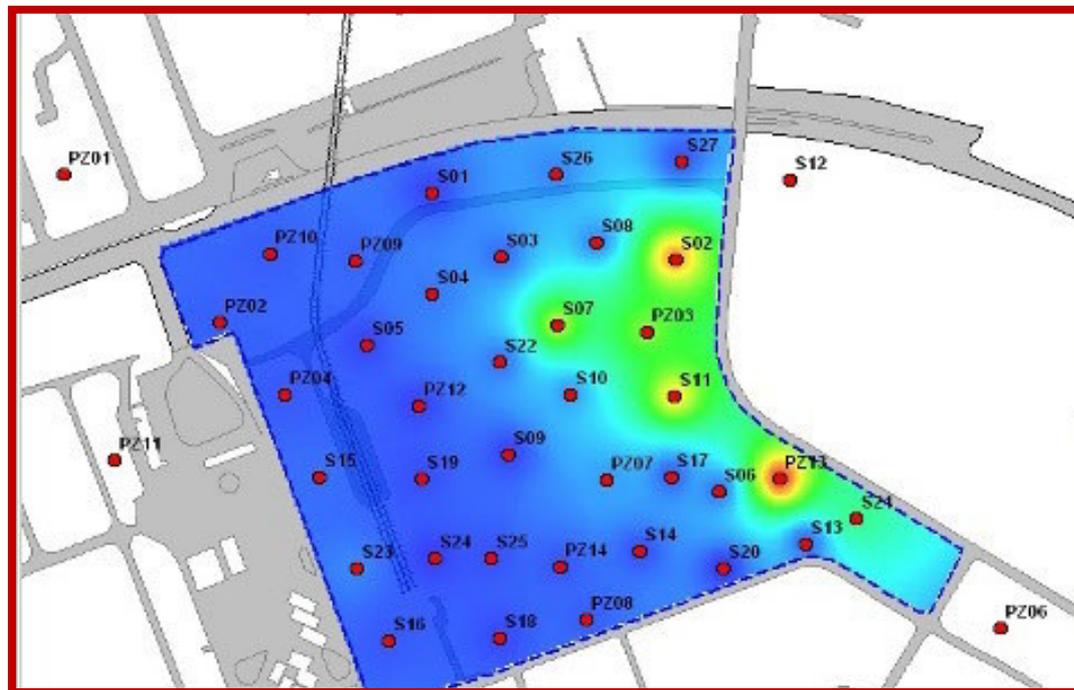
- ✓ Ai sensi dell'all. 2 al Titolo V, Parte IV del D. Lgs. 152/2006, il **Piano di indagini ambientali** contiene una dettagliata descrizione delle attività che saranno svolte in campo ed in laboratorio per la caratterizzazione ambientale del sito
- ✓ Tali attività hanno lo scopo di:
 - Ricostruire le **caratteristiche geologiche** ed **idrogeologiche** dell'area al fine di sviluppare il modello concettuale definitivo del sito.
 - Individuare le possibili **vie di** dispersione e **migrazione** degli inquinanti dalle fonti verso i potenziali ricettori.
 - Verificare l'**esistenza dell'inquinamento** di suolo, sottosuolo e acque sotterranee
 - Definire il **grado** e l'**estensione** volumetrica dell'inquinamento e delimitare le aree di interrimento di rifiuti
 - Individuare i possibili ricettori
 - Ottenere i **parametri** necessari per condurre nel dettaglio l'**analisi del rischio** sito- specifica

Il Piano di Indagini Ambientali

I contenuti

Nel Piano di Indagine occorre, quindi, definire:

- ✓ l'ubicazione e la tipologia delle **indagini** da svolgere sia di **tipo diretto**, quali sondaggi e piezometri, che **indiretto**;
- ✓ il piano di **campionamento** di suolo, sottosuolo rifiuti e acque sotterranee;
- ✓ il piano di **analisi** chimico-fisiche e le metodiche analitiche;
- ✓ la profondità delle perforazioni, assicurando la protezione degli acquiferi profondi ed evitando il rischio di contaminazione indotta dal campionamento;
- ✓ le metodologie di **interpretazione** e restituzione dei **risultati**.



Le Indagini Ambientali

Si distinguono:

- ✓ Indagini **dirette**, che vengono realizzate mediante prelievi e analisi di campioni ovvero attraverso misure sperimentali in situ.
- ✓ Indagini **indirette**, basate su tecniche non invasive della geofisica che permettono la caratterizzazione indiretta del sottosuolo



Le Indagini Ambientali

Tipo di indagine	Vantaggi	Svantaggi
Dirette	<ul style="list-style-type: none">▪ Le informazioni ottenute risultano caratterizzate da un'elevata precisione	<ul style="list-style-type: none">▪ Stima puntuale della qualità delle matrici ambientali;▪ Difficile rappresentazione dell'eterogeneità del fenomeno di contaminazione.
Indirette	<ul style="list-style-type: none">▪ Caratterizzazione spaziale e tridimensionale del sottosuolo e del fenomeno di contaminazione.▪ Consentono di limitare al minimo indispensabile il numero di campionamenti e di analisi da effettuare.▪ Riduzione dei costi e dei tempi di indagine	<ul style="list-style-type: none">▪ Non forniscono una stima quantitativa delle concentrazioni di contaminante.▪ L'applicabilità dipende dalle caratteristiche del sottosuolo e del contaminante da rilevare.

Le Indagini Ambientali

Caratterizzazione	Obiettivo	Tipologia di indagine
Sorgenti contaminanti	Individuazione materiali sepolti, liquidi dispersi e plume contaminante	Analisi geofisiche
	Estensione dei volumi interrati di liquidi e solidi	Prelievo campioni da sondaggi
	Potenziale contaminante	Prelievo campioni
	Livello di stabilizzazione	Monitoraggio in sito, prelievo campioni e test respirometrici

Le Indagini Ambientali

Caratterizzazione	Obiettivo	Tipologia di indagine
Geologia, idrogeologia e aspetti geotecnici	Stratigrafia e continuità stratigrafiche	Sondaggi geognostici (carotaggi) e analisi geofisiche
	Piezometria e caratteristiche delle falde	Istallazione piezometri e misure di livello
	Permeabilità e conducibilità	Prove di pompaggio, prelievo campioni e prove di laboratorio
	Granulometria	Prelievo campioni
	Proprietà meccaniche	Prove penetrometriche, metodi geofisici, prelievo campioni

Il campionamento

L'ubicazione dei punti di indagine



Localizzazione dei punti di campionamento

Riferimenti normativi

- ✓ Il D.Lgs 152/2006 **non fornisce** alcuna indicazione circa la **densità aerea** dei punti di campionamento; al contrario, il DM 471/99 riportava il **numero minimo di sondaggi** da effettuare in funzione dell'estensione del sito da investigare e del tipo di matrice da campionare
- ✓ Il D.Lgs 152/2006 si limita a definire le **strategie** adottabili per selezionare l'ubicazione dei punti di sondaggio e prelievo delle matrici ambientali (suolo, sottosuolo, acque sotterranee);
- ✓ Nella scelta dei punti di indagine bisogna tenere conto della diversità tra **aree dismesse e/o libere da impianti** e **aree occupate da impianti**, collocando i punti di campionamento in corrispondenza dei punti di criticità.

Localizzazione dei punti di campionamento

Il DM 471/99

✓ *Suolo, sottosuolo e materiali di riporto*

Nel caso in cui si proceda con una disposizione a griglia, il lato di ogni maglia deve essere compreso tra 25 e 100 m.

< 10.000 m ²	Almeno 5 punti
10.000-50.000 m ²	Da 5 a 15 punti
50.000-250.000 m ²	Da 15 a 60 punti
250.000-500.000 m ²	Da 60 a 120 punti
> 500.000 m ²	Almeno 2 punti ogni 10.000 m ²

Localizzazione dei punti di campionamento

II DM 471/99

✓ **Acque sotterranee**

Le linee guida per l'installazione dei piezometri sono riportate in tabella. Deve essere installato almeno *un piezometro a monte e uno a valle* del sito (in senso idrogeologico) per ogni acquifero.

< 50.000 m ²	Almeno 4
50.000-100.000 m ²	Almeno 6
100.000-250.000 m ²	Almeno 8
> 250.000 m ²	Almeno 1 ogni 25.000 m ²

✓ **Acque superficiali**

È necessaria una caratterizzazione chimica e ambientale *a monte del sito, nel tratto mediano e a valle*, lungo il senso di scorrimento del corpo idrico. Nel caso di laghi, lagune o mare si deve operare la disposizione a transetto, con almeno *tre prelievi verticali per ogni punto*.

Localizzazione dei punti di campionamento

Il D.Lgs. 152/2006: criteri di campionamento terreno

- ✓ Ottenere la determinazione della concentrazione delle sostanze inquinanti per **strati omogenei** dal punto di vista **litologico**;
- ✓ Prelevare separatamente i materiali che si distinguono per **evidenze di inquinamento** o per **caratteristiche organolettiche, chimico-fisiche e litologico-stratigrafiche** (in aggiunta ai campioni previsti per il sondaggio).
- ✓ I campioni relativi a **particolari evidenze** o **anomalie** sono formati per spessori superiori ai 50 cm;
- ✓ Ogni campione è suddiviso in **due aliquote** (una per l'analisi da condurre ad opera dei soggetti privati, una per archivio a disposizione dell'ente di controllo), cui si può aggiungere un'eventuale terza aliquota.

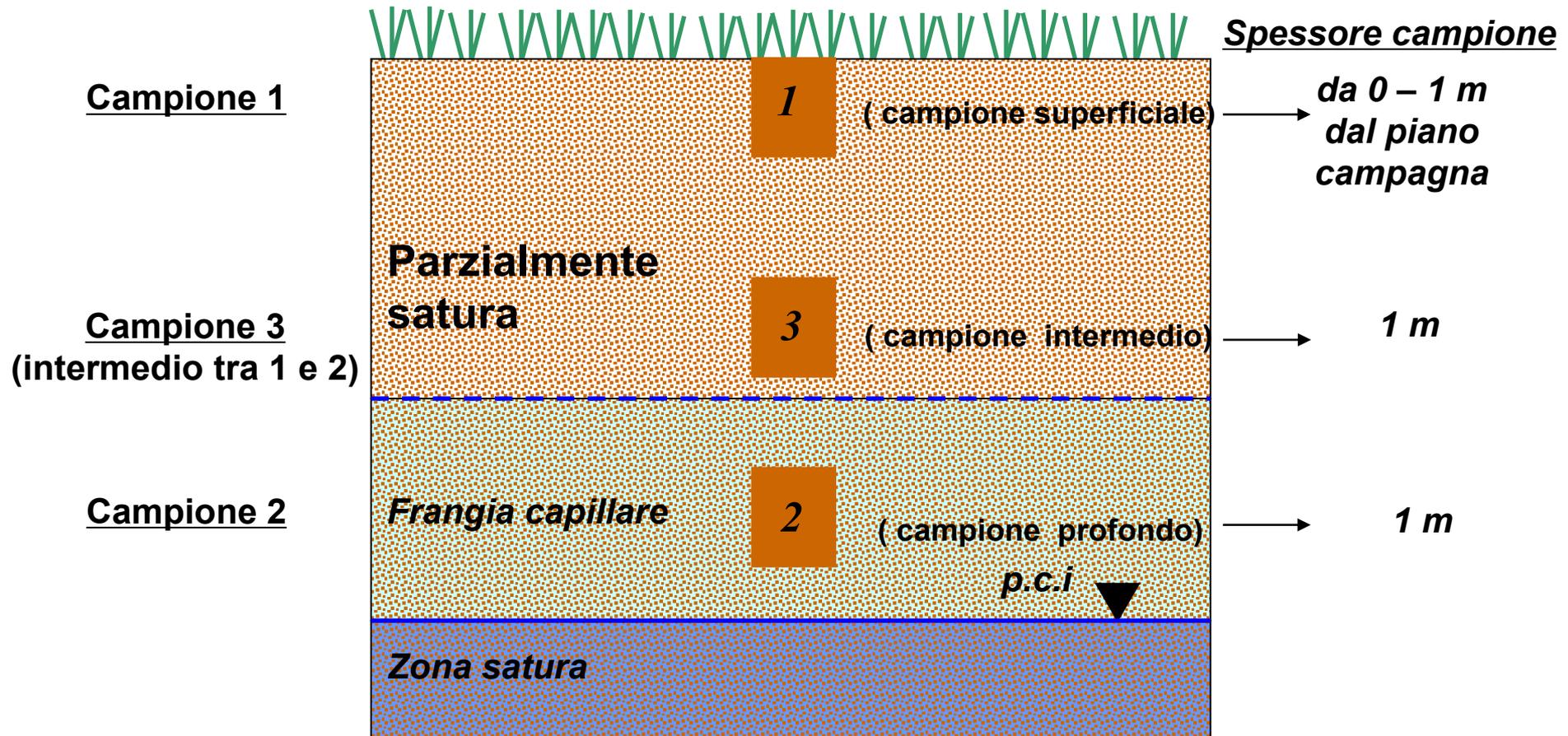
Localizzazione dei punti di campionamento

Criteri di campionamento acque sotterranee D.Lgs.152/2006

- ✓ Il **campionamento dinamico** è da intendersi come campionamento rappresentativo della composizione delle acque sotterranee;
- ✓ Il ***campionamento statico*** può essere utilizzato qualora debba essere prelevata solamente la fase separata di sostanze non miscibili oppure si sia in presenza di acquiferi poco produttivi;
- ✓ Il ***campionamento selettivo*** è, infine, necessario qualora sia rinvenuto nei piezometri del prodotto surnatante in fase libera.

Localizzazione dei punti di campionamento

Il D.Lgs. 152/2006: criteri di campionamento terreno

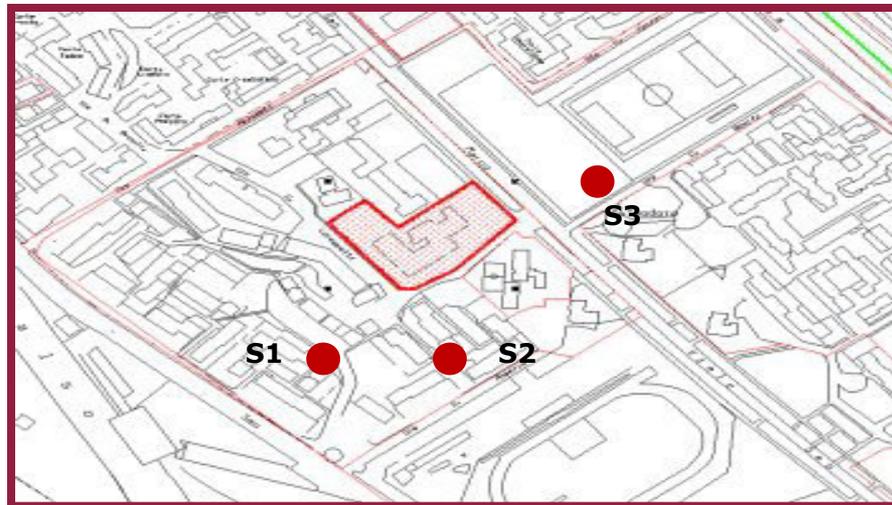


Numero minimo di campioni da prelevare da ciascun sondaggio

Localizzazione dei punti di campionamento

Il D.Lgs. 152/2006: campioni di fondo

Il D.Lgs 152/06 prevede la possibilità di prelevare campioni nelle **aree adiacenti al sito** al fine di definirne la qualità delle matrici ambientali (**valori di fondo**).



Nel caso in cui il sito potenzialmente contaminato sia ubicato in un'area interessata da fenomeni naturali che abbiano determinato il superamento di una o più CSC tabellari, si assume:

$$\mathbf{CSC = C_{FONDO}}$$

Localizzazione dei punti di campionamento

Numero minimo di campioni di fondo ...???

- ✓ Anche in questo caso ***non viene fornita*** alcuna indicazione sulla ***densità aerea*** dei campioni, ma il D.Lgs. 152/2006 si limita a specificare che per la determinazione dei valori di fondo: “*nel caso di campionamento di suoli, la profondità ed il tipo di terreno da campionare deve corrispondere, per quanto possibile, a quelli dei campioni raccolti nel sito*”.
- ✓ Al contrario, il DM 471/99, indicando i campioni di fondo come quelli prelevati da aree adiacenti al sito ove si ha la certezza di ***assenza di contaminazione*** derivante dal sito o da altre attività antropiche, suggerisce che il numero minimo di tali campioni ***non dovrebbe essere inferiore a 3*** per matrice.

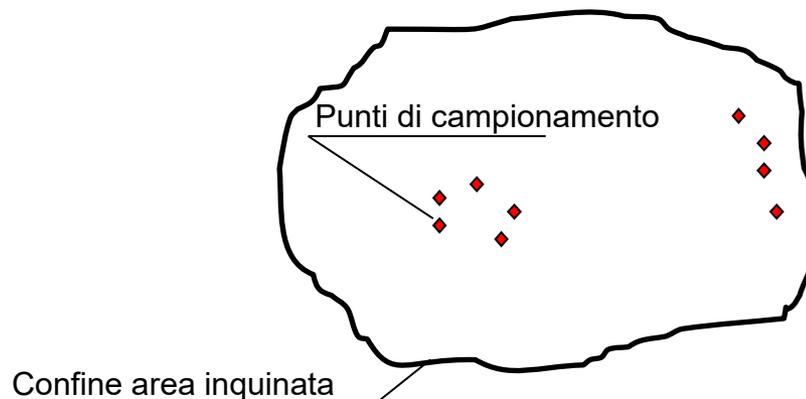
Strategie di campionamento

- ✓ Campionamento ragionato
- ✓ Campionamento casuale semplice
- ✓ Campionamento sistematico o su griglia regolare
- ✓ Campionamento stratificato
- ✓ Campionamento a cluster adattativo
- ✓ Campionamento combinato
- ✓ Campionamento composito

Strategie di campionamento

Campionamento ragionato

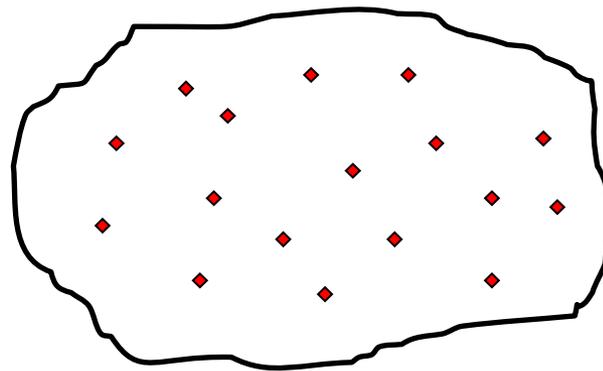
- ✓ La scelta dell'ubicazione dei punti di campionamento è basata sull'esame dei **dati storici** a disposizione e su tutte le **informazioni** sintetizzate nel **modello concettuale preliminare** e deve essere mirata a verificare le ipotesi formulate nel suddetto modello in termini di presenza, estensione e potenziale diffusione della contaminazione.
- ✓ Questa scelta è da preferirsi per i **siti complessi** qualora le informazioni storiche e impiantistiche a disposizione consentano di prevedere la localizzazione delle aree più vulnerabili e delle più probabili fonti di contaminazione.



Strategie di campionamento

Campionamento casuale semplice

- ✓ I punti di campionamento vengono disposti **casualmente** nell'area da investigare.
- ✓ Il metodo risulta efficace in presenza di **caratteristiche ambientali omogenee** in cui possano essere esclusi punti ad elevata criticità.



Strategie di campionamento

Campionamento sistematico o su griglia regolare

- ✓ Qualora siano disponibili *limitate informazioni*, tale metodo consente, fissata casualmente la posizione del primo punto di campionamento, di procedere individuando sul sito in esame una *maglia regolarmente distribuita*.
- ✓ Una semplice indicazione per l'individuazione di una maglia di campionamento quadrata sul sito, consiste nella ricerca della distanza tra due linee successive della griglia. Tale distanza può, ad esempio, essere calcolata come:

$$G = \sqrt{A/n}$$

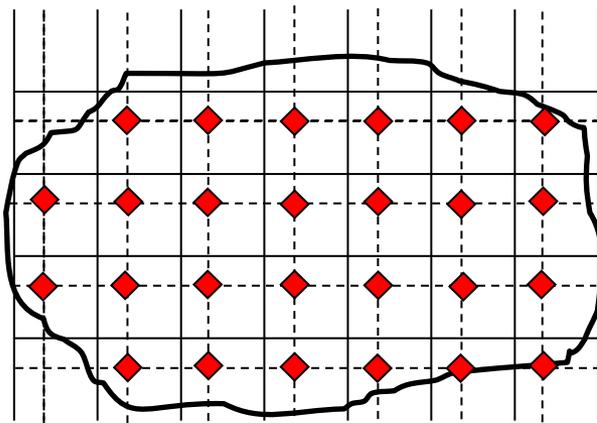
G è la distanza cercata;

A è l'area del sito in esame;

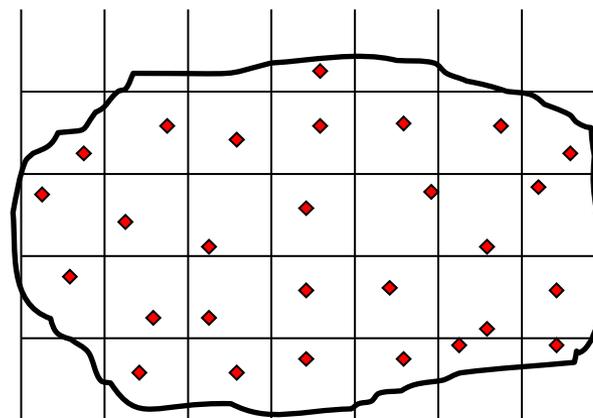
n è il numero di campioni da prelevare.

Strategie di campionamento

Campionamento sistematico o su griglia regolare



**Ubicazione sistematica a
griglia**

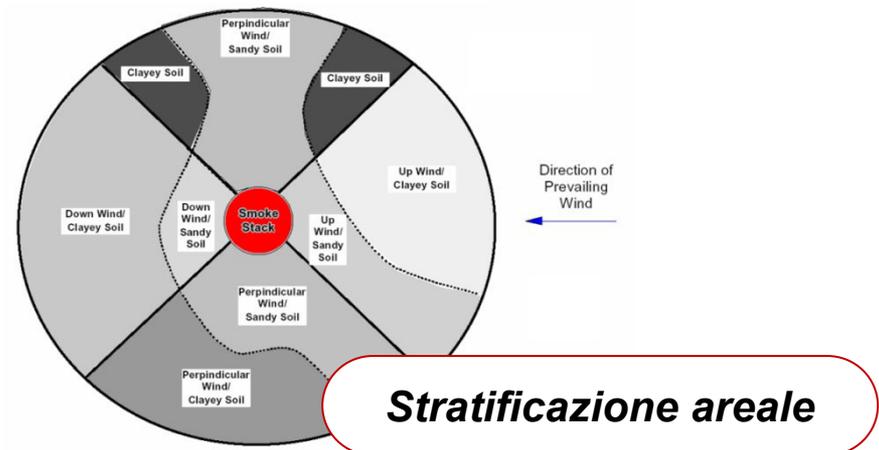
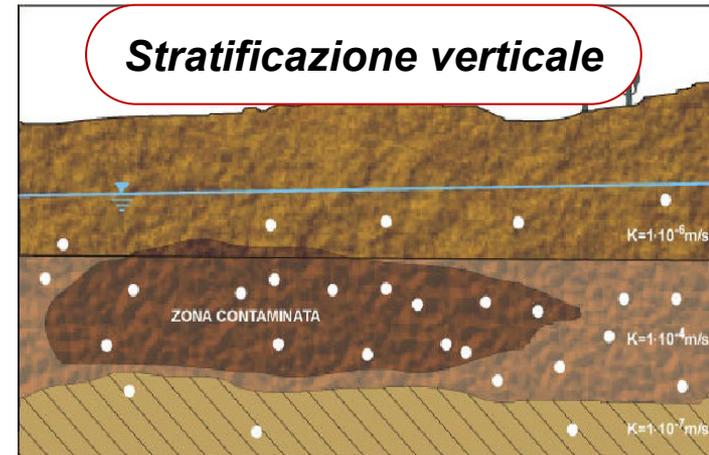


**Ubicazione sistematica
casuale**

Strategie di campionamento

Campionamento stratificato

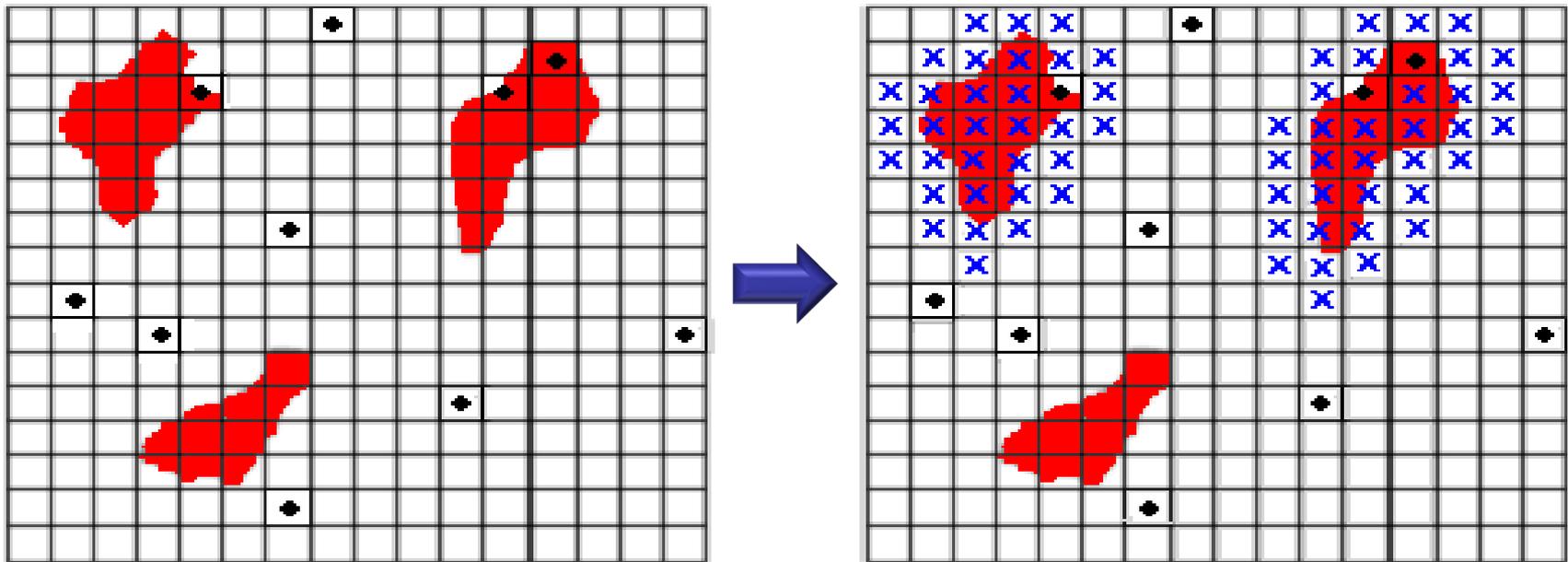
- ✓ L'intera area in esame viene suddivisa in **sub-aree** individuate attraverso il criterio della maggiore omogeneità rispetto ad un parametro scelto e, all'interno di ciascuna sub-area, si provvede ad una **distribuzione casuale o sistematica** dei punti di campionamento.
- ✓ Il metodo permette la **strutturazione delle informazioni** rilevate ma risulta di difficile applicazione in presenza di situazioni complesse.



Strategie di campionamento

Campionamento a cluster adattivo

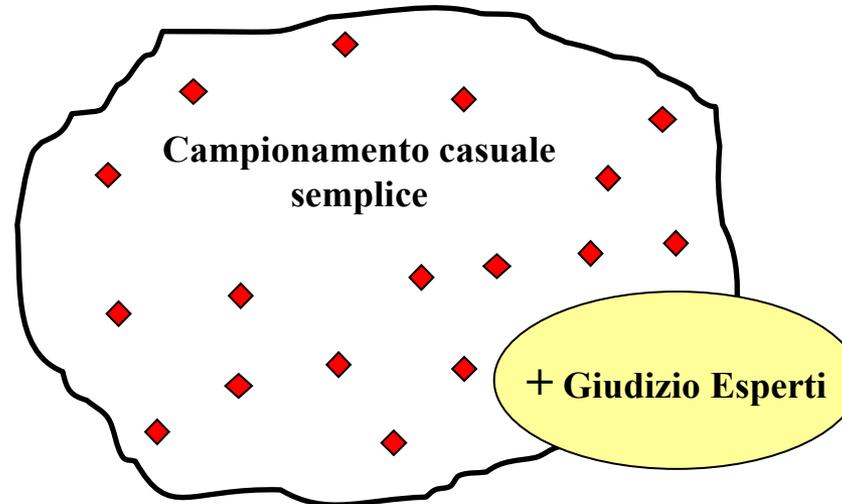
- ✓ Si configura come un sistema efficace ed economico per delineare lo sviluppo dei **pennacchi di inquinamento** in un sito di interesse.
- ✓ A partire dai risultati di un campionamento casuale (nel quale sia stata fissata la dimensione del campione), tale metodo di campionamento consente, attraverso analisi successive, di determinare con maggiore dettaglio i valori di concentrazione che superano una prefissata soglia.



Strategie di campionamento

Campionamento combinato

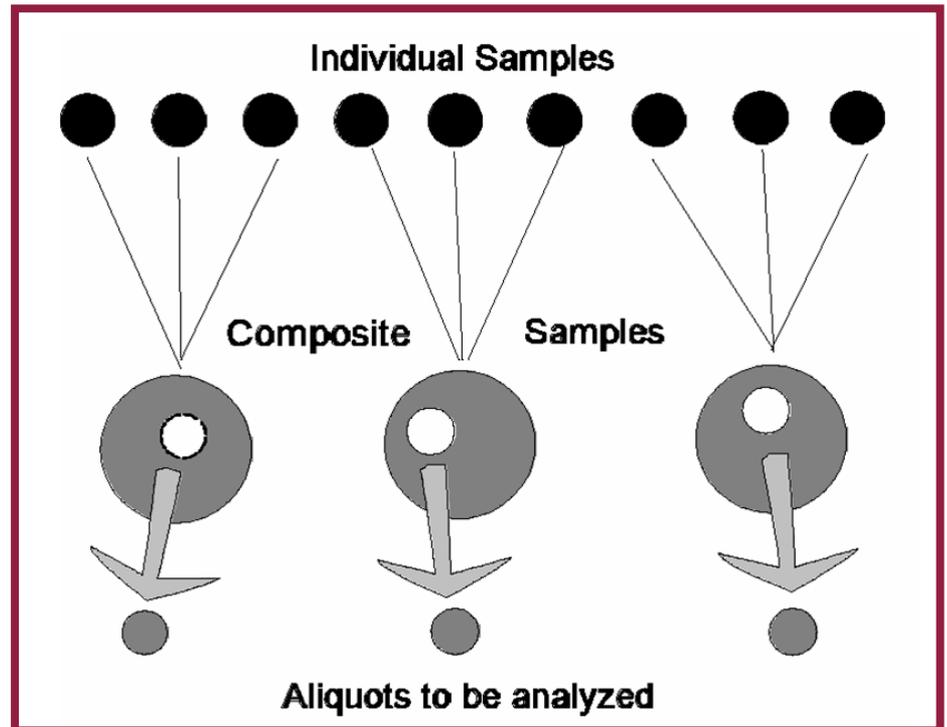
Prevede la combinazione della tecnica di ***campionamento casuale semplice*** con le ***conoscenze ed il giudizio degli esperti***, al fine di selezionare campioni rappresentativi del fenomeno e minimizzare il numero di campioni prelevati ed esaminati.



Strategie di campionamento

Campionamento composito

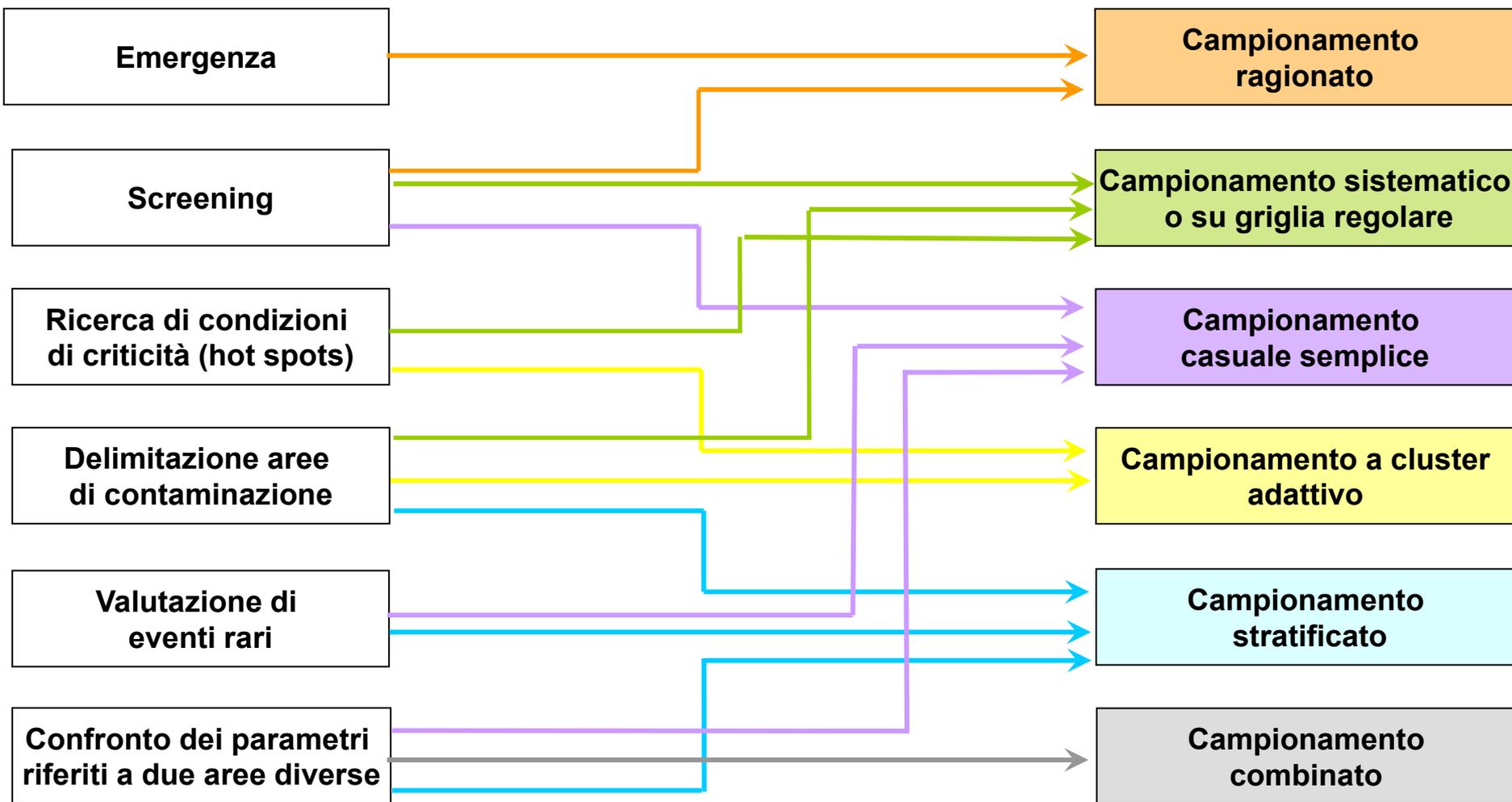
- ✓ Consiste nel ***miscelare*** fisicamente diversi volumi di materiale campionato al fine di costruire un solo campione omogeneo.
- ✓ Tale metodo può essere impiegato solo nei casi in cui l'effetto della ***miscelazione non induca a distorsioni delle misure*** (perdita delle frazioni volatili di un inquinante).
- ✓ Consigliabile nei casi in cui i ***costi di analisi*** risultano particolarmente ***elevati*** rispetto quelli di campionamento.



[USEPA, 2000]

Strategie di campionamento

Criteri di selezione della strategia



[US-EPA, 2000]

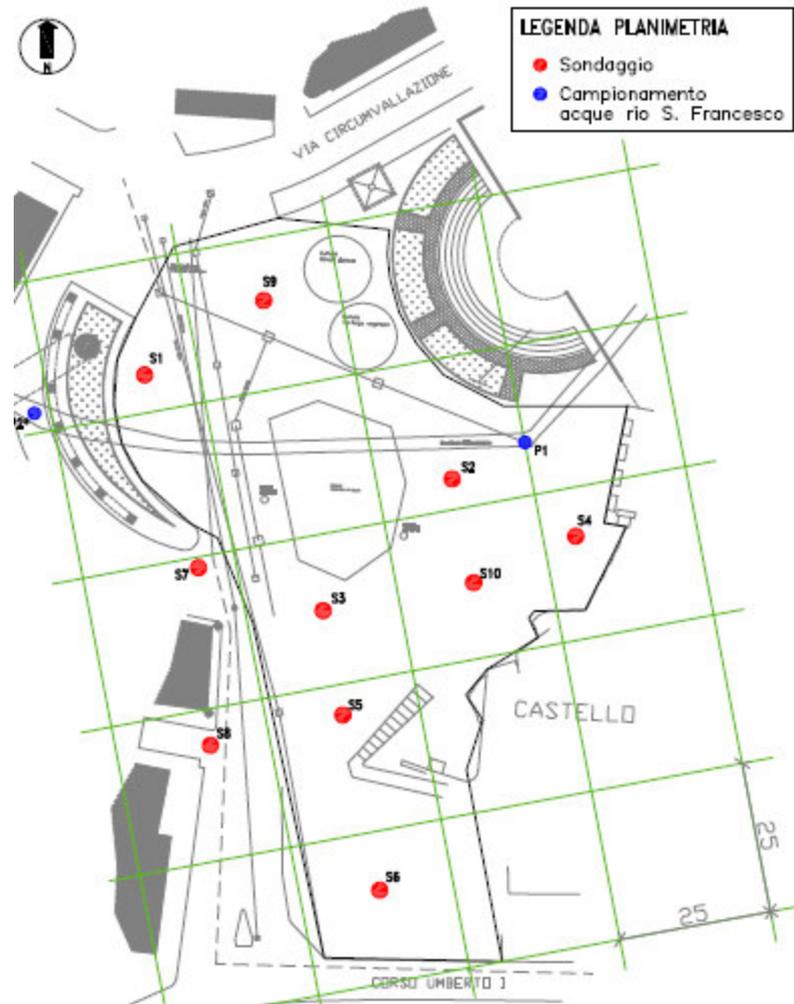
Strategie di campionamento

Criteri di selezione della strategia

OBIETTIVO	STRATEGIA DI CAMPIONAMENTO						
	Casuale	Sistematica	Sistematica casuale	Combinata	Casuale stratificata	A cluster adattivo	Soggettiva
Identificazione sorgente	Meno adatta	Possibile	Poco adatta	Possibile	Possibile	Poco adatta	Adatta
Delimitazione estensione	Poco adatta	Adatta	Adatta	Adatta	Poco adatta	adatta	Meno adatta
Analisi di rischio	Meno adatta	Possibile	Poco adatta	Poco adatta	Poco adatta	Possibile	Adatta
Studio per la bonifica	Poco adatta	Possibile	Possibile	Possibile	Più adatta	Possibile	Poco adatta
Controllo bonifica	Accettabile	Adatta	Adatta	Adatta	Poco adatta	Adatta	Meno adatta

Ubicazione dei punti di indagine

Il caso studio di PiazzaCastello



Le indagini dirette

- ✓ Le ***indagini geognostiche*** consistono in prove in sito o in laboratorio che si propongono di:
 - definire il profilo stratigrafico;
 - definire le proprietà fisico-meccaniche dei terreni;
 - misurare la pressione neutra;
 - valutare la permeabilità dei terreni.

- ✓ Le ***indagini di caratterizzazione della contaminazione*** consistono in prove in sito o in laboratorio finalizzate alla valutazione dello stato di contaminazione delle varie matrici ambientali.

Indagini geognostiche

Gli scavi

Tipi e caratteristiche

- ✓ trincee (con scavo a mano o con mezzi meccanici, profondità 2-4 m),
- ✓ gallerie e cunicoli (con armature o murature di sostegno), pozzi (con armature o murature di sostegno).

Vantaggi:

- ✓ osservazione diretta del sottosuolo
- ✓ possibilità di eseguire prove in sito e prelevare campioni di grandi dimensioni;
- ✓ possibilità di eseguire sopralluoghi anche in seguito alla fine dello scavo.

Svantaggi:

- ✓ difficoltà di ripristino delle condizioni originarie;
- ✓ pericolo di cedimenti;
- ✓ lunghi tempi esecutivi e costi elevati;
- ✓ possibilità di cross-contamination e necessità di smaltire il terreno scavato.

Indagini geognostiche

Gli scavi



Indagini geognostiche

I sondaggi

Vantaggi

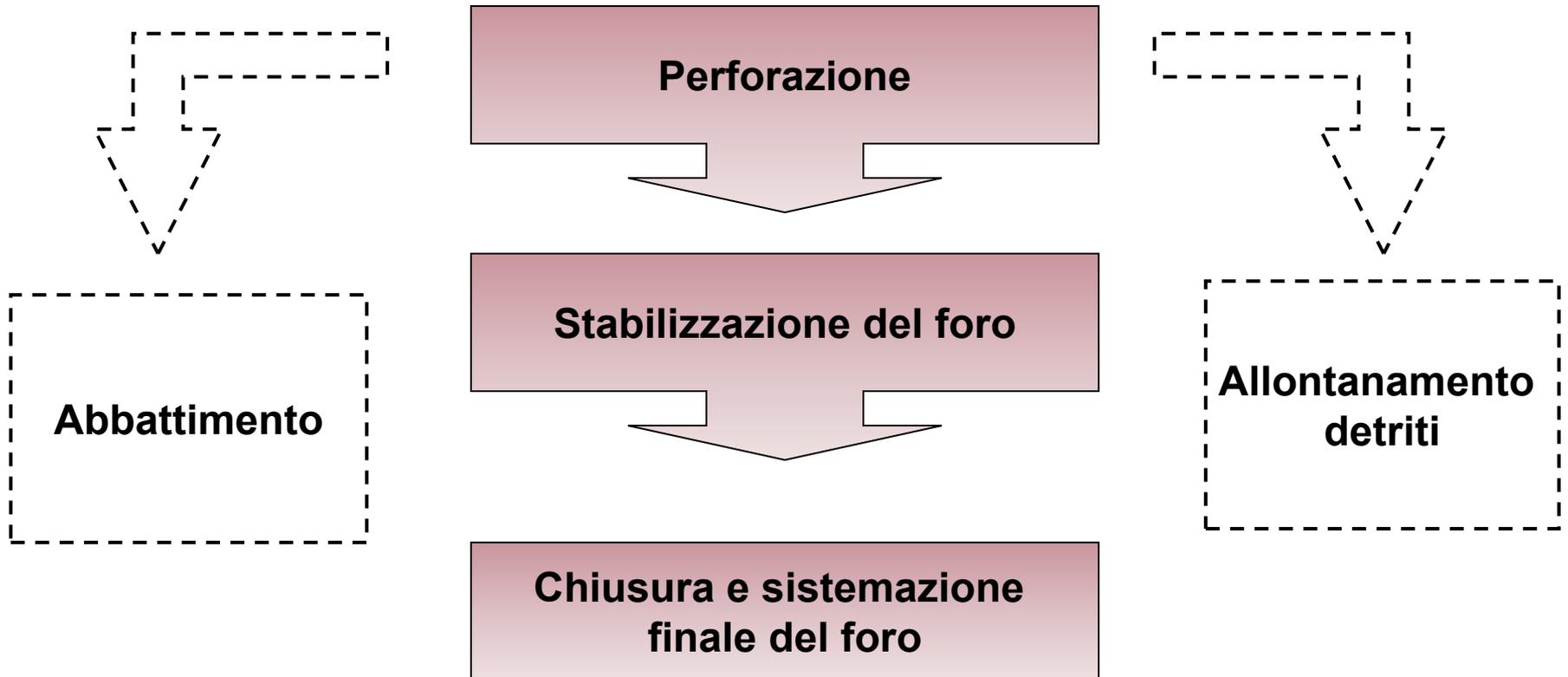
- ✓ possibilità di attraversare qualunque terreno anche a grande profondità e sotto il livello di falda;
- ✓ possibilità di eseguire indagini anche sotto il fondo di fiumi e mari;
- ✓ tempi di esecuzione relativamente brevi;
- ✓ facilità delle operazioni di occlusione e ripristino del terreno.

Svantaggi

- ✓ pericolo di non riconoscere eventuali strati di piccolo spessore;
- ✓ difficoltà di campionamento in terreni incoerenti a grana grossa;
- ✓ possibile caduta di detriti sul fondo;
- ✓ possibile penetrazione nel terreno del fluido di perforazione, con conseguente disturbo dei campioni prelevati;
- ✓ possibile dilavamento del terreno a causa dell'acqua immessa nel foro o proveniente dalla falda;
- ✓ impossibilità di eseguire prove in sito a grande scala.

Indagini geognostiche

I sondaggi: tecniche di esecuzione



La perforazione può essere realizzata mediante sistemi a percussione, a rotazione o con trivelle

Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a percussione

✓ **Principio**

L'utensile di perforazione viene infisso nel terreno per caduta dello strumento stesso o tramite massa battente. Sono economici e semplici da eseguire.

✓ **Tipi di terreno**

L'impiego di questo metodo è di regola limitato alle perforazioni nei terreni non coesivi a grana grossa.

✓ **Qualità dei campioni prelevati**

La perforazione a percussione disturba i terreni per una discreta profondità oltre il fondo foro, impedendo il prelievo di campioni di classe Q4 e Q5.

✓ **Utensili usati**

- curretta;
- scalpello;
- escavatore a benna.

Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a percussione

- ✓ La **curetta** (o sonda a valvola) è un tubo pesante di grosso spessore, dotato di tagliente all'estremità inferiore e di valvola a sportello per la ritenzione del detrito.
- ✓ I diametri usati variano da 150-300 mm e si possono raggiungere profondità di 60 m.
- ✓ Per facilitare il riempimento della curetta e l'avanzamento della perforazione il foro è mantenuto pieno d'acqua.



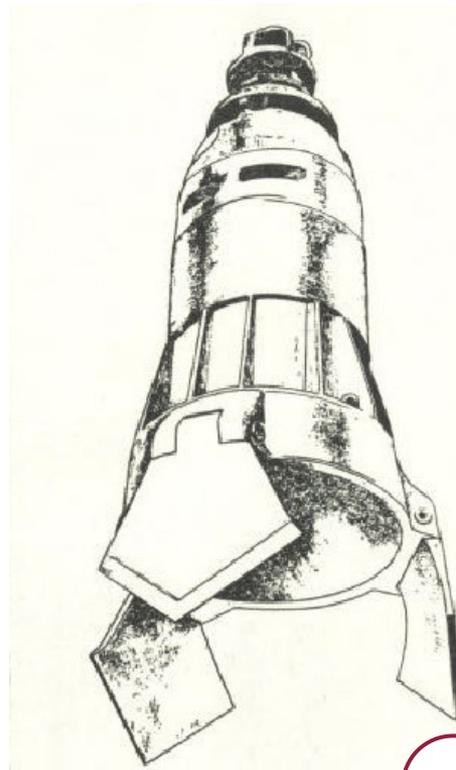
Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a percussione

- ✓ Lo **scalpello** è utilizzato per l'avanzamento a distruzione di strati lapidei o cementati.
- ✓ L'estrazione del detrito viene eseguita mediante **benna**.



Scalpello



Benna

Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a rotazione

✓ **Principio**

La perforazione è eseguita mediante un utensile che ruota sul fondo del foro staccando frammenti di materiale.

✓ **Tipi di terreno**

Si può attraversare, con questo metodo, qualsiasi tipo di terreno.

✓ **Qualità dei campioni prelevati**

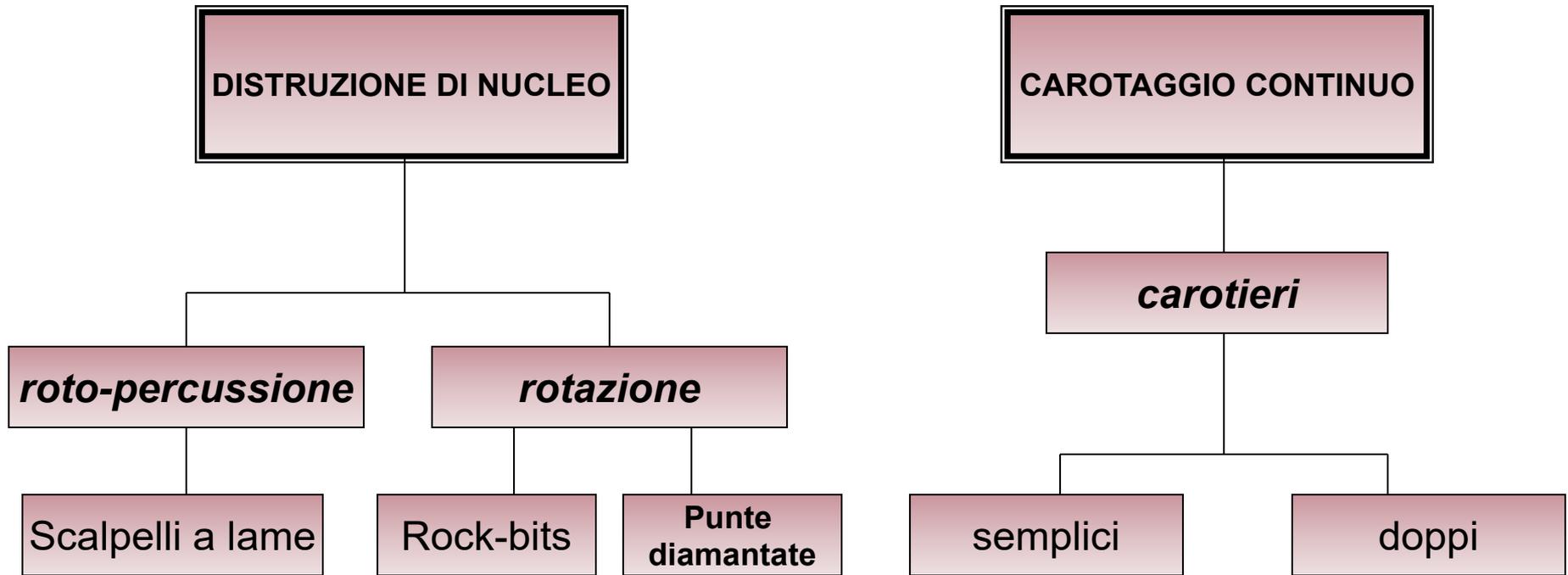
La qualità del campione è legata all'utensile (fino a Q4, con l'uso del carotiere doppio)

✓ **Utensili usati**

- carotiere semplice o doppio;
- scalpelli;
- rock bits.

Indagini geognostiche

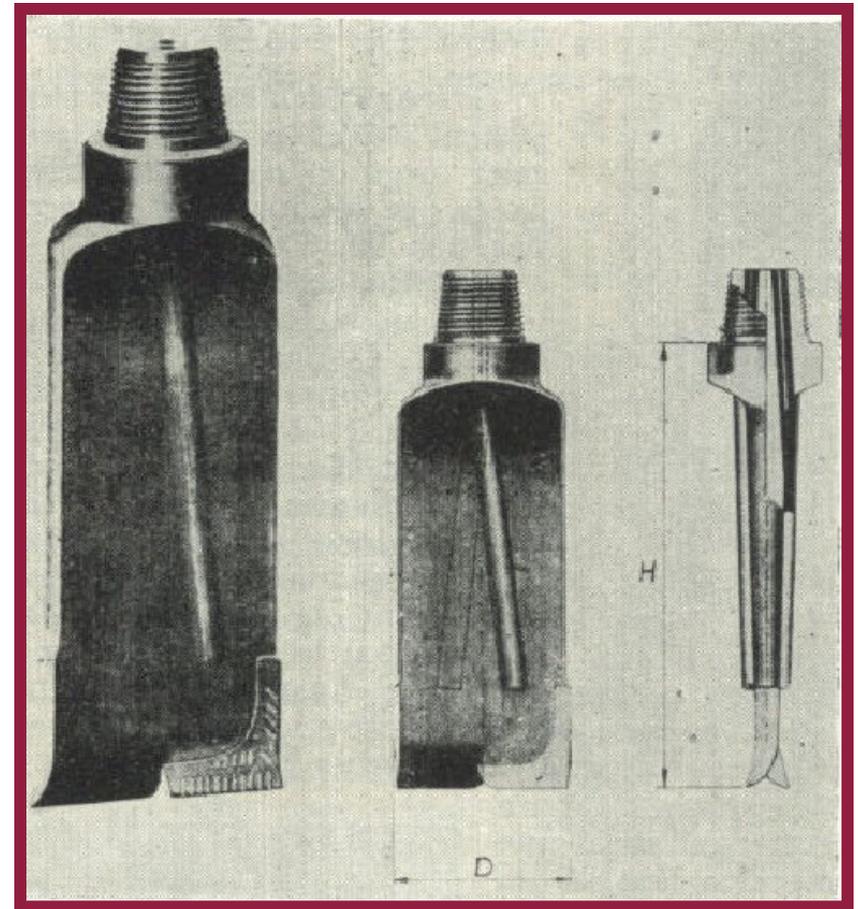
I sondaggi: perforazione a rotazione



Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a roto-percussione

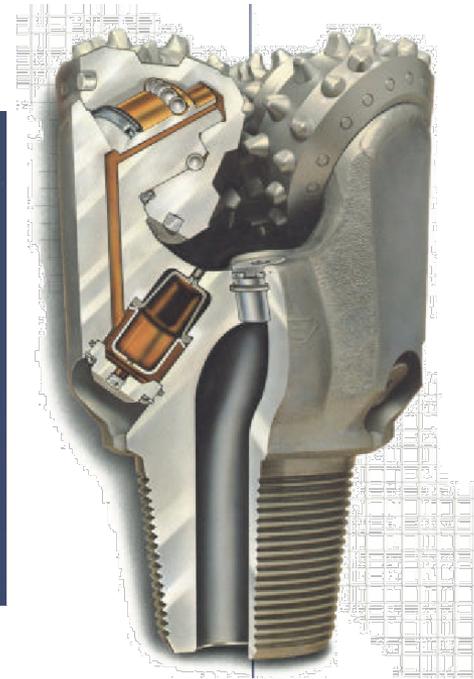
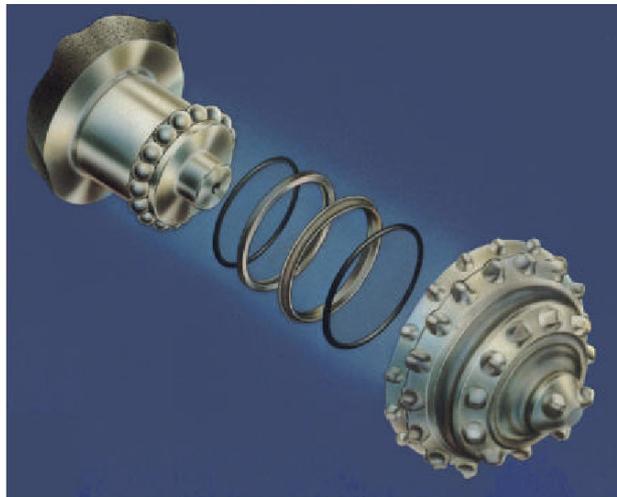
- ✓ La perforazione a roto-percussione si basa sulla combinazione dei seguenti meccanismi:
 - *Percussione*. L'impatto ripetitivo prodotto dal pistone genera delle onde di compressione che sono trasmesse allo scalpello
 - *Rotazione*. Con questo movimento, lo scalpello è ruotato così da cambiare la posizione di impatto.



Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a rotazione

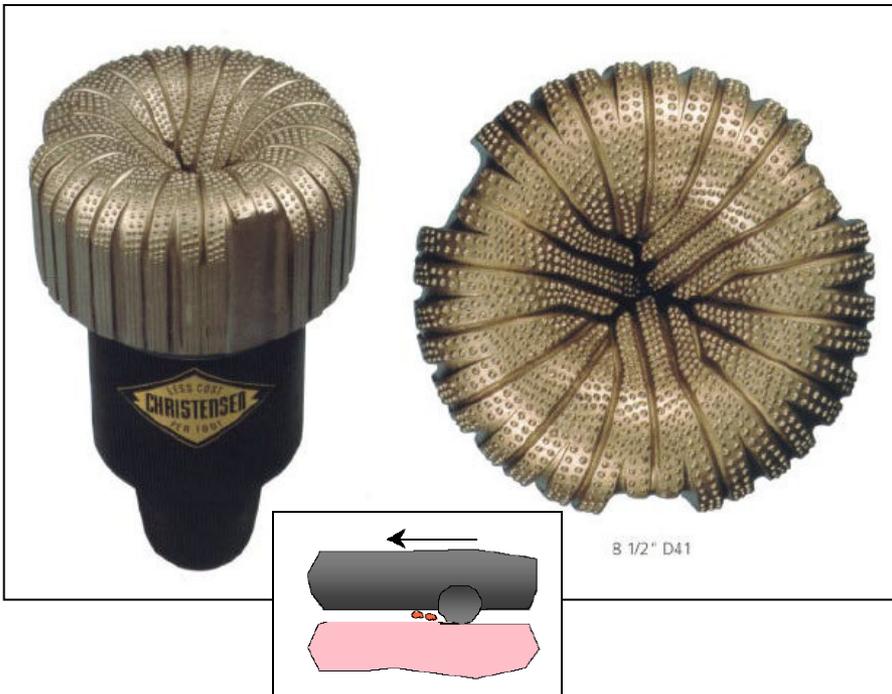
Durante l'esecuzione possono essere prelevati campioni del detrito uscente dal foro, mediante i quali potrà essere ricostruita una approssimativa identificazione dei terreni attraversati.



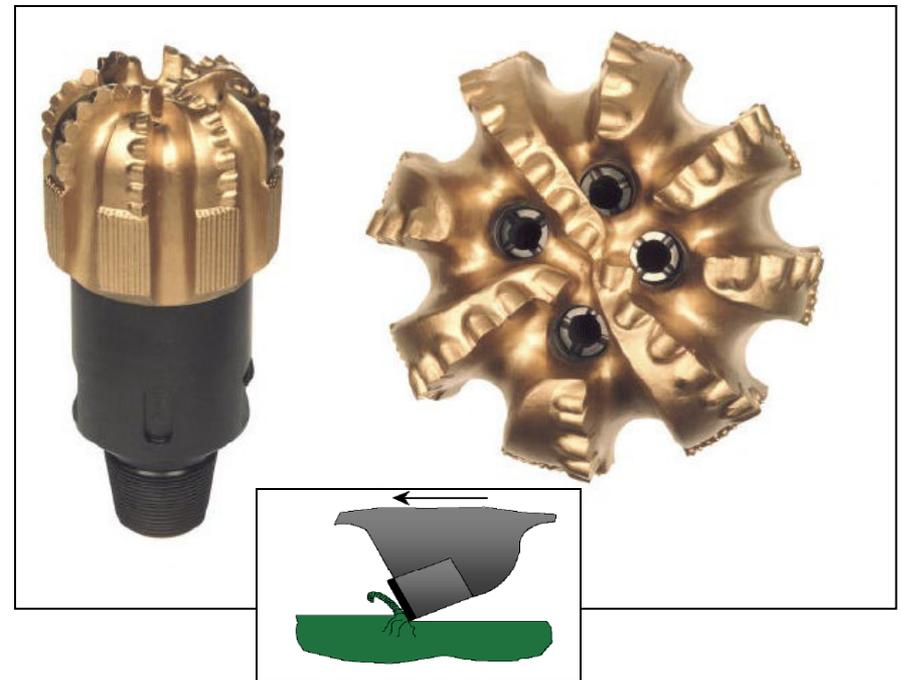
Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a rotazione

“Natural diamond bit”



A diamanti sintetici



Rock bits diamantati

Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a rotazione

- ✓ Il **carotiere** è un tubo di acciaio, la cui estremità inferiore è munita di una corona tagliente provvista di elementi di metallo duro.
- ✓ Nella perforazione con carotaggio continuo, il fluido di circolazione disturba il campione di terreno prelevato all'interno del carotiere (carota). Per ridurre tale disturbo, si realizzano i sondaggi a secco.
- ✓ Il *carotiere semplice* dà risultati soddisfacenti in terreni coesivi consistenti.



Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a rotazione



Perforazione mediante carotaggio continuo a secco con carotiere semplice

Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione con trivelle

✓ **Principio**

La perforazione è eseguita mediante un utensile che ruota asportando con taglio continuo il terreno dalla sezione del foro.

✓ **Tipi di terreno**

Si possono attraversare, con questo metodo, terreni di media resistenza senza blocchi o strati cementati.

✓ **Qualità dei campioni prelevati**

I campioni prelevati sono fortemente disturbati.

✓ **Utensili usati**

- vite senza fine



Indagini geognostiche

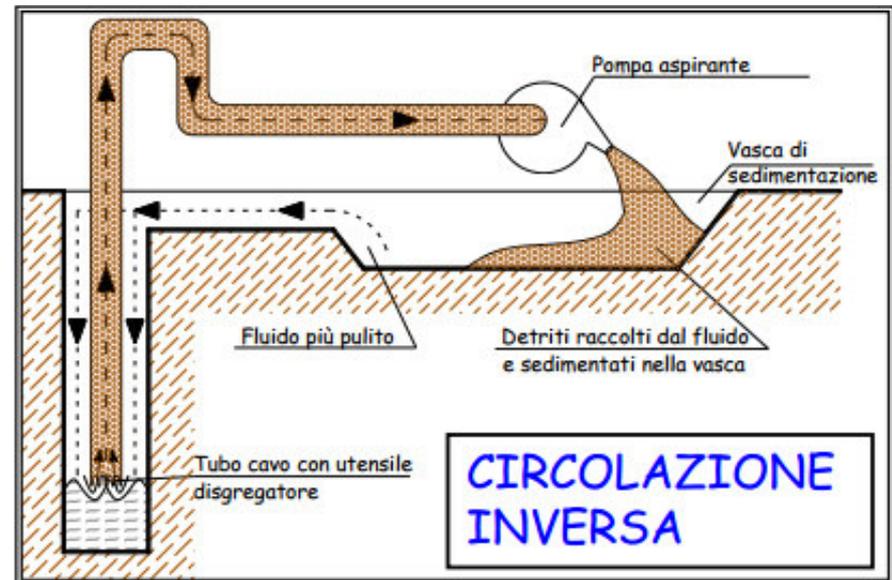
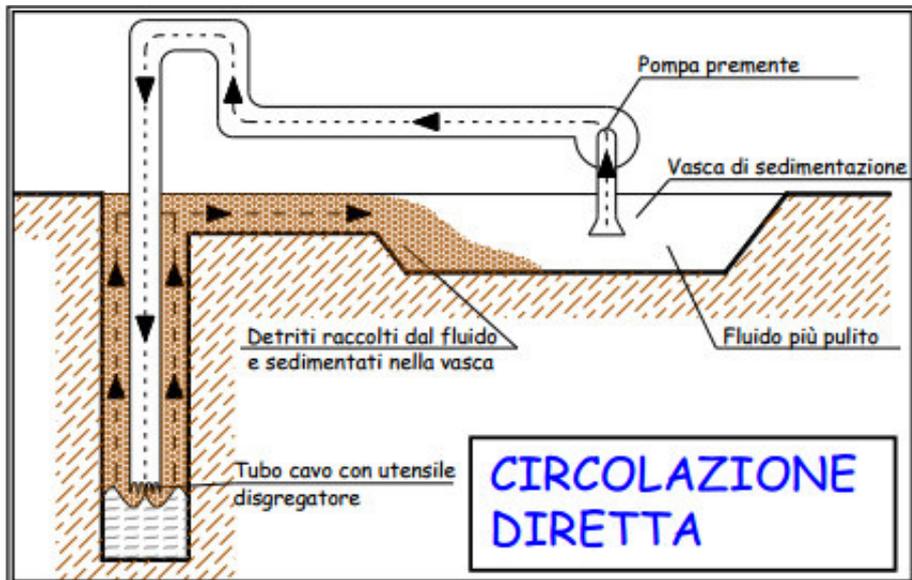
I sondaggi: scelta dei metodi di perforazione

Metodo di perforazione	Utensile di perforazione	Diametro usuale (mm)	Profondità usuale (m)	Idonea per tipo di terreno	Non idoneità per tipo di terreno	Qualità dei campioni ottenibili direttamente	Classe di qualità corrispondente
PERCUSSIONE	Sonda a valvola	150-600	60	Ghiaia, sabbia, limo	Rocce e terre coesive	Disturbati, dilavati	Q1 (Q2)
	Scalpello	150-600	60	Tutti i terreni	Rocce ad alta resistenza	Disturbati, dilavati, frantumati	Q1
ROTAZIONE	Tubo carotiere semplice	75-150	50-150	Tutti i terreni	Terre a grana grossa	Discreta	Q2 (Q3) a secco Q1 (Q2) con circolazione
	Tubo carotiere doppio	75-150	50-150			Buona	Q2 (Q3-Q4)
	Scalpelli a distruzione	60-300	Illimitata			Solo frammenti	
TRIVELLAZIONE	Spirale a vite senza fine	Manuale 50-150 Meccanica a 100-300	Manuale 10 Meccanica 40	Da coesivi a poco coesivi	Terre a grana grossa Rocce	Disturbati, a volte dilavati sotto falda	Q1

Indagini geognostiche

I sondaggi: allontanamento dei detriti

- ✓ L'allontanamento dei detriti può essere garantito mediante l'uso sistemi meccanici o idraulici.
- ✓ Nel secondo caso, l'immissione del fluido di perforazione può essere per ***circolazione diretta***, se il fluido scende nelle aste interne, o per ***circolazione inversa*** (meno frequente) se il fluido scende lungo le pareti del foro.



Indagini geognostiche

I sondaggi: stabilizzazione del foro

La stabilizzazione delle pareti e del fondo foro è sempre necessaria a meno di non effettuare perforazioni poco profonde.

✓ Stabilizzazione con **tubi di rivestimento**:

Le pareti del foro vengono sostenute con un tubo di rivestimento provvisorio che segue l'avanzamento dell'utensile di perforazione. E' consigliata nel caso in cui si debbano eseguire misure e controlli sulle acque sotterranee.

✓ Stabilizzazione **con fanghi**:

Vengono utilizzati fanghi bentonitici che formano un sottile strato impermeabile sulle pareti del foro. La tecnica è consigliata se è necessario stabilizzare anche il fondo del foro (terreni che tendono a rifluire) ma è sconsigliata quando è necessario controllare le acque sotterranee.

✓ Stabilizzazione **con carico d'acqua**:

In assenza di gas o falde artesiane, la stabilità può essere assicurata mantenendo il livello dell'acqua nel foro al di sopra del livello di falda freatica.

Indagini geognostiche

I sondaggi: chiusura e sistemazione finale del foro

- ✓ Ultimata l'indagine, ogni foro di sondaggio deve essere richiuso, procedendo ad un sistematico intasamento dal fondo verso la superficie.
- ✓ Nei fori tubati l'intasamento deve esser svolto in concomitanza con l'estrazione dei tubi di rivestimento provvisorio.
- ✓ A seconda dei casi l'intasamento dei fori sarà attuato con:
 - iniezione di malte cementizie
 - iniezione di malte cementizie addizionate con bentonite o argilla;
 - immissione di sabbia ($d_{\max} 1 \text{ mm}$) agevolata con flusso d'acqua;
 - con materiali di risulta (in assenza di controindicazioni).
- ✓ L'utilizzo di sabbia nel caso di terreni contaminati è sconsigliabile in quanto il materiale potrebbe determinare la fuga del contaminante.

Indagini geognostiche

I sondaggi: scheda di catalogazione

- ✓ Il **profilo stratigrafico** è la rappresentazione della successione dei terreni, identificati nell'ambito delle classi geotecniche.
- ✓ Il **profilo geotecnico** è la rappresentazione di tutte le informazioni provenienti dalle indagini condotte

Profondità	Simbologia stratigrafica	DESCRIZIONE LITOLOGICA	Recupero % di carotaggio	Metodo di perforazione	Rivestimento	Prelievi	Prove in situ	NOTE
		Da m 0.00 a m 0.40 ghiaia e sabbia con limo e argilla, di color grigio nocciola, sfatta secca		Carotaggio continuo con $\Phi = 101$ mm	Rivestimento $\Phi = 127$ mm	1	1,75 2,00 ○	Da m 12.00 a m 12.50 presenza di odore di idrocarburo
		Da m 0.40 a m 5.40 ghiaia e sabbia con limo e argilla, e locale presenza di ciottoli e frammenti di color grigio nocciola, sfatta secca ecc.				2		
		Da m 5.40 a m 12.00 ghiaia e sabbia con ciottoli e frammenti fino a 10 cm color grigio chiaro, sfatta, secca, sgretolabile ecc.				3		
		Da m 12.00 a m 16.00 argilla limo di colore marrone compatta debolmente plastica, con inglobata sabbia e ghiaia ecc.				4		
		Da m 16.00 a m 18.00 ghiaia e ciottoli con limo e argilla, di color nocciola, male assortita ecc				5		
20		FINE PENETRAZIONE m. 18						Non è stata riscontrata acqua durante la perforazione
								LEGENDA ○ Pocket pen (kg/cm ²) □ Prova di permeabilità

Indagini geognostiche

I sondaggi: grado di qualità dei campioni estratti

Caratteristiche determinabili	Grado di qualità				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
a) Profilo stratigrafico	X	X	X	X	X
b) Composizione granulometrica		X	X	X	X
c) Contenuto d'acqua naturale			X	X	X
d) Peso dell'unità di volume				X	X
e) Caratteristiche meccaniche					X
	Campioni disturbati o rimaneggiati			A disturbo limitato	Indisturbati

Campionamento

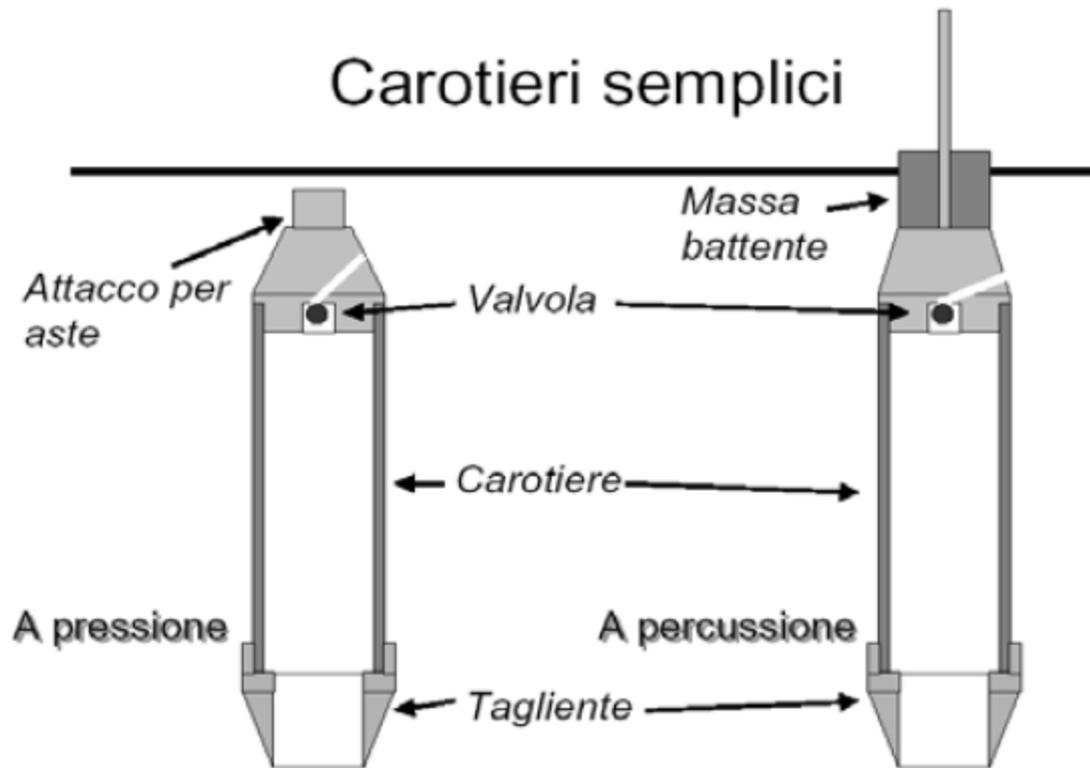
Classificazione dei campionatori

- A rotazione
- A percussione
- A pressione



Campionamento

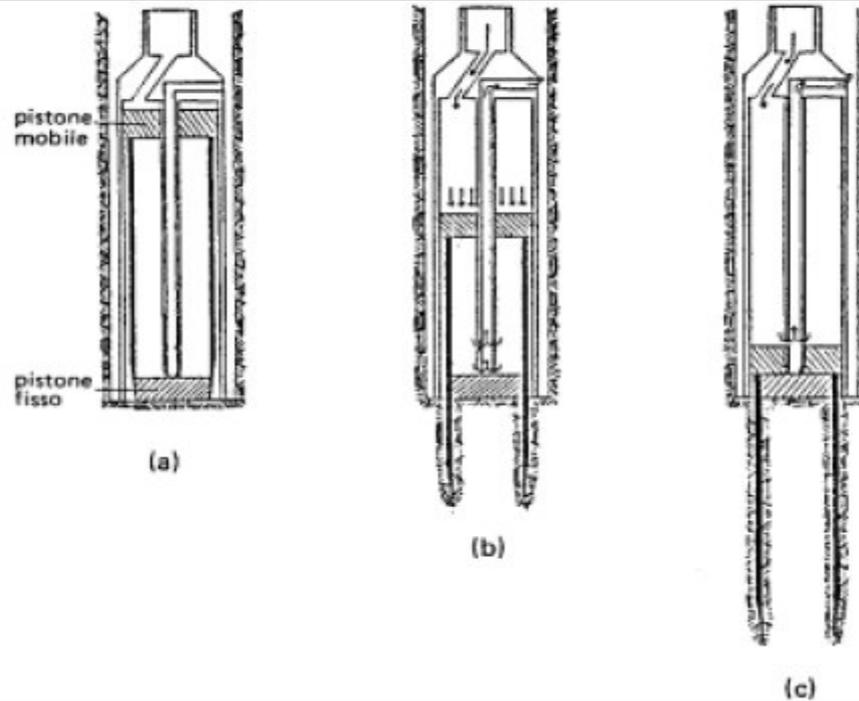
Campionatori a pressione/percussione



Campionamento

Campionatori a pressione

Campionatori a doppio pistone

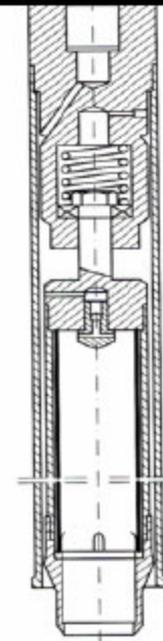
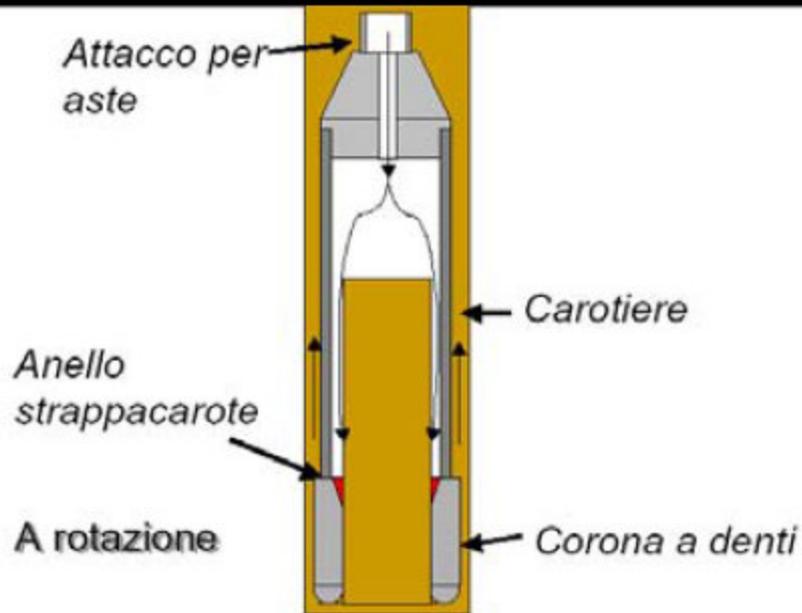


Campionamento

- **Campionatori a rotazione**

Semplice

A doppia parete



Campionamento

- Raccolta e catalogazione del campione



Caratterizzazione della contaminazione

Si tratta di indagini volte a verificare l'esistenza, il grado e l'estensione volumetrica dell'inquinamento nelle varie matrici ambientali.

Mezzo non saturo	<ul style="list-style-type: none">- Terreno- Acque interstiziali- Gas interstiziali
Mezzo saturo	<ul style="list-style-type: none">- Acque di falda

Il **D.Lgs 152/06** prevede il campionamento di terreno in zona satura solo nel caso di accumulo di rifiuti interrati.

Caratterizzazione della contaminazione

Selezione degli analiti

Secondo le indicazioni dell'Allegato 2 al Titolo V - Parte IV del **D. Lgs. 152/2006**, la selezione dei parametri dovrà avvenire essenzialmente sulla base del seguente processo logico.



Caratterizzazione della contaminazione

Il campionamento delle matrici ambientali: suolo e sottosuolo

- ✓ Le tecniche di campionamento per il suolo non si differenziano di molto da quelle in uso per il campionamento geotecnico, presentando tuttavia maggiori precauzioni per garantire la rappresentatività del campione.
- ✓ L'obiettivo primario dell'operazione di campionamento del terreno, nell'ambito della caratterizzazione della contaminazione, consiste nel prelievo di un campione che sia il più rappresentativo possibile delle caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche degli orizzonti attraversati ed indicatore dell'eventuale presenza di sostanze inquinanti.
- ✓ Un corretto approccio al problema, pertanto, deve prendere in considerazione tanto l'operazione di recupero quanto quella di perforazione, essendo indispensabile intervenire con tecniche che minimizzino l'alterazione del campione da recuperare.

Caratterizzazione della contaminazione

Il campionamento delle matrici ambientali: suolo e sottosuolo

- ✓ Il **D.Lgs 152/2006** stabilisce che:
 - I **sondaggi** saranno eseguiti, per quanto possibile, mediante carotaggio continuo a infissione diretta, rotazione/rotopercussione a secco, utilizzando un carotiere di idoneo diametro ed evitando fenomeni di surriscaldamento;
 - I **sondaggi da attrezzare a piezometro** saranno realizzati, per quanto possibile, a carotaggio continuo a rotazione/rotopercussione a secco, utilizzando un carotiere di diametro idoneo.
- ✓ I metodi a secco utilizzati nel campionamento del terreno non saturo sono:
 - la perforazione con rotazione in assenza di fluidi;
 - le tecniche penetrometriche o direct push per prelievi in profondità;
 - i campionatori manuali per il top soil.

Il campionamento nel mezzo insaturo: terreno

I sondaggi

- ✓ La perforazione può essere eseguita:
 - per **infissione**, mediante un utensile (curetta) dotato di un bordo tagliente all'estremità inferiore e di una valvola a sportello per la ritenzione del detrito
 - a **rotazione**, mediante un utensile (carotiere semplice o doppio, rick bits) che ruota sul fondo del foro staccando frammenti di materiale;
 - a **roto-percussione**. In questo caso, l'impatto ripetitivo prodotto da un pistone genera delle onde di compressione che sono trasmesse a un utensile (scalpello), che viene ruotato così da cambiare la posizione di impatto.
- ✓ I sondaggi a rotazione con carotiere doppio consentono di prelevare campioni di buona qualità (fino a Q4)

Indagini geognostiche

I sondaggi: perforazione a rotazione



Perforazione mediante carotaggio continuo a secco con carotiere semplice

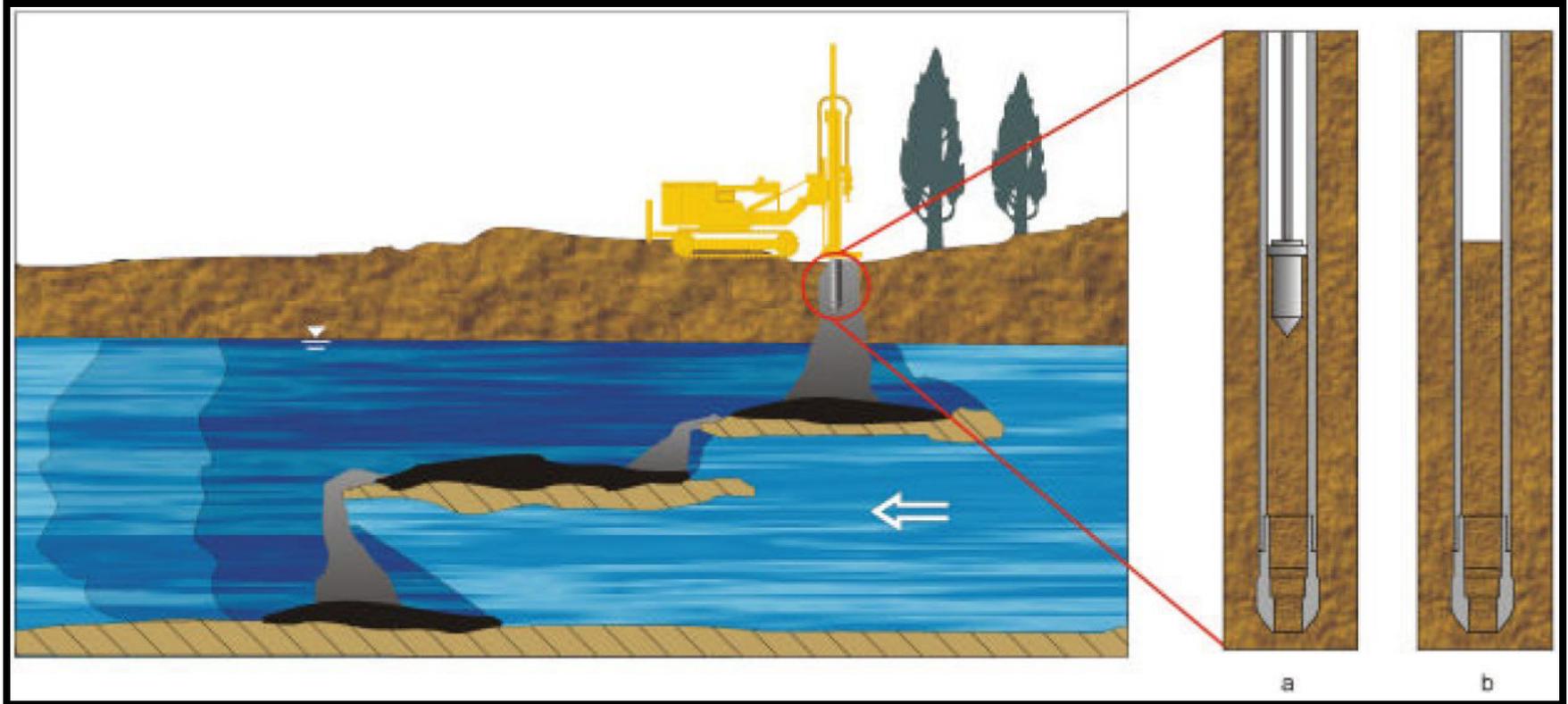
Il campionamento nel mezzo insaturo: terreno

Direct push

- ✓ Questi sistemi (Geoprobe, Enviprobe, ecc) utilizzano strumentazioni a percussione con avanzamento a secco, che permettono il campionamento discreto – oltre che del terreno - anche dei gas interstiziali nel mezzo non saturo, e dell'acqua di falda nel mezzo saturo.
- ✓ Il principio di funzionamento dei sistemi direct-push è simile a quello dei penetrometri utilizzati in campo geotecnico: un martello spinge alla profondità voluta un'asta, al termine della quale è presente un campionatore adeguato alla matrice da prelevare.
 - Il recupero di carote di terreno avviene mediante l'utilizzo di campionatori aperti o a pistone, che vengono fatti avanzare nel terreno a percussione.
 - In fase di perforazione è possibile utilizzare aste di rivestimento per evitare che il campione venga contaminato per effetto della migrazione di inquinanti da orizzonti superiori o dal piano campagna.
 - Il contatto del campione con l'atmosfera e con agenti esterni viene minimizzato grazie alla chiusura della fustella mediante appositi tappi.

Il campionamento nel mezzo insaturo: terreno

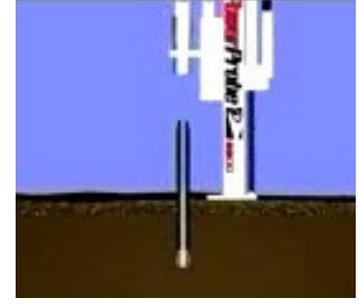
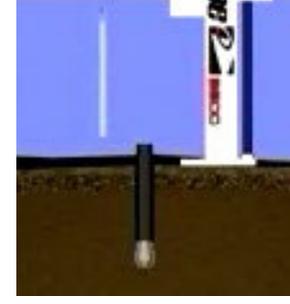
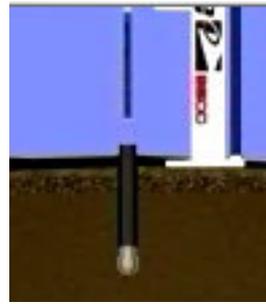
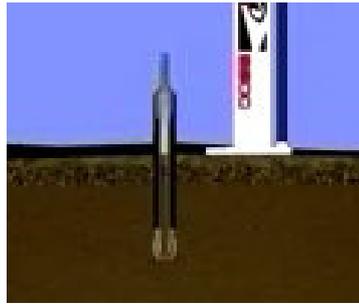
Direct push



Il campionamento nel mezzo insaturo: terreno

Direct push

Le fasi di campionamento con sistema a tubo aperto



Le componenti del sistema "direct push"



Fustella



The new standard size MC[®] Cutting Shoe (22922) with the beefier threads (left) is compared to its predecessor (9034).

Particolare sistema a tubo aperto



Punta (sistema a tubo chiuso)

Il campionamento nel mezzo insaturo: terreno

Campionatori manuali

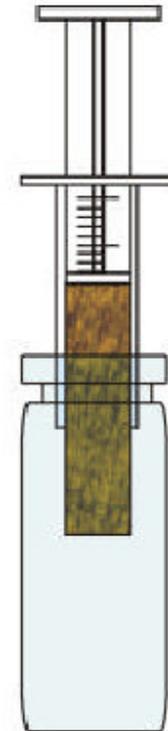


Il campionamento nel mezzo insaturo: terreno

Composti organici volatili (COV)

Per il campionamento di terreni contenenti VOC si preferisce l'utilizzo di un sub-campionatore (sub-corer) costituito da una sorta di siringa in plastica priva della guarnizione in gomma con la quale:

- prelevare una piccola aliquota di terreno dalla carota immediatamente dopo il recupero in superficie;
- trasferire immediatamente la porzione di terreno così ottenuta all'interno di una vial appositamente preparato con metanolo (estrazione con metanolo) o con acqua (ripartizione in fase vapore) e chiusa con un tappo con setto in Teflon.



[Molfetta e Sethi ,2002]

Il campionamento nel mezzo insaturo: terreno

Composti organici volatili (COV)



Caratterizzazione della contaminazione

Il campionamento delle matrici ambientali: gas interstiziale

Il campionamento dei gas interstiziali è particolarmente rilevante nei casi di:

- discariche di rifiuti (mappatura delle fughe di biogas);
- presenza di composti organici volatili, che risultano in elevate concentrazioni nella fase gassosa, nella quale peraltro sono molto più facilmente identificabili.

*Il D.Lgs 152/06 prevede il campionamento dei gas interstiziali **solo** ai fini di una migliore ubicazione dei punti di indagine relativi alla matrice suolo e acque sotterranee.*

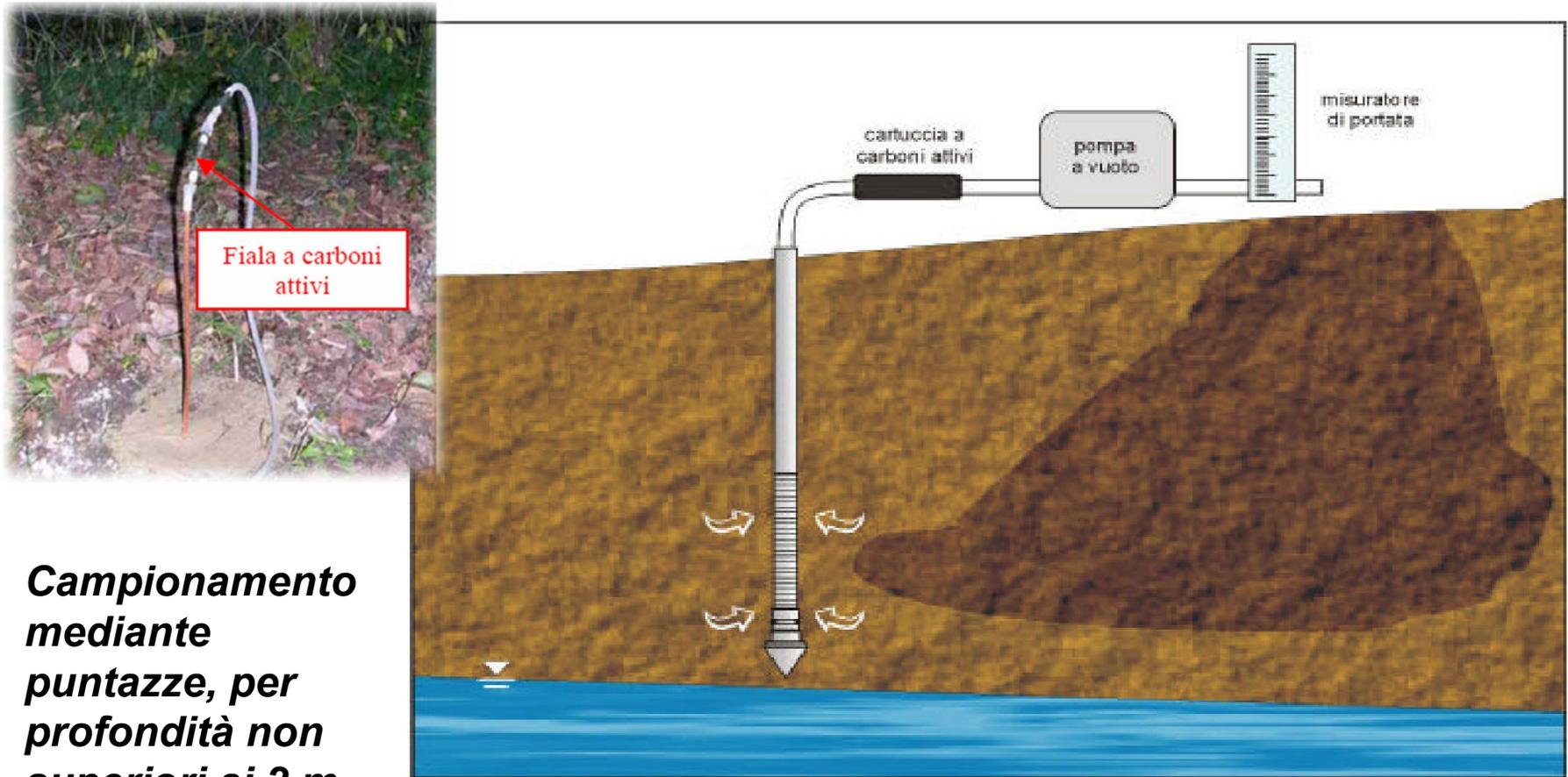
Il campionamento nel mezzo insaturo: gas interstiziale

Tecniche di campionamento

- ✓ Si distinguono tecniche di campionamento:
 - **attivo**, in cui l'estrazione del gas avviene attraverso pompe a vuoto che applicano una depressione in testa alle sonde di estrazione, precedentemente infisse nel terreno. Prima di procedere al campionamento è necessario operare la verifica delle perdite e lo spurgo.
 - **passivo**, in cui l'estrazione del gas è basata sul flusso naturale del contaminante nel suolo verso un sistema di campionamento costituito da un materiale adsorbente.
- ✓ La scelta della tecnica di campionamento dipende:
 - dalle caratteristiche di volatilità del contaminante;
 - dalle caratteristiche del suolo in termini di umidità e presenza di orizzonti a bassa permeabilità.

Il campionamento nel mezzo insaturo: gas interstiziale

Tecniche di campionamento attivo

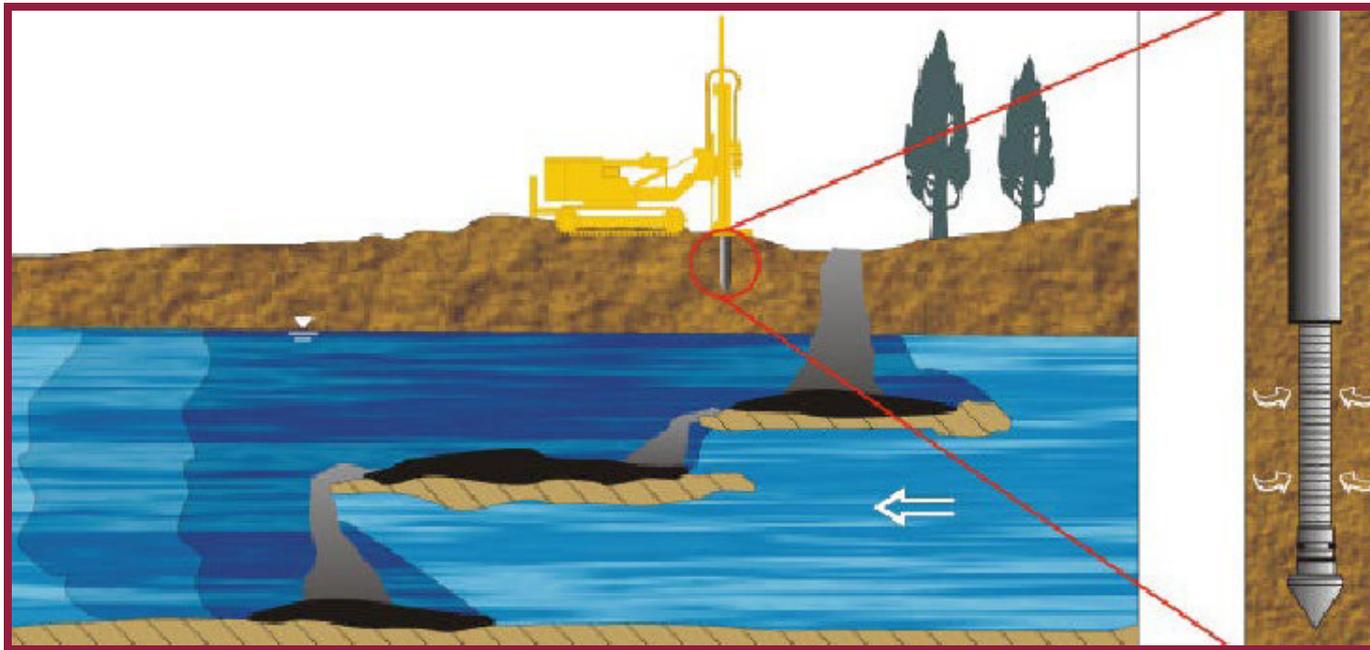


**Campionamento
mediante
puntazze, per
profondità non
superiori ai 2 m**

[Molfetta e Sethi ,2002]

Il campionamento nel mezzo insaturo: gas interstiziale

Tecniche di campionamento attivo



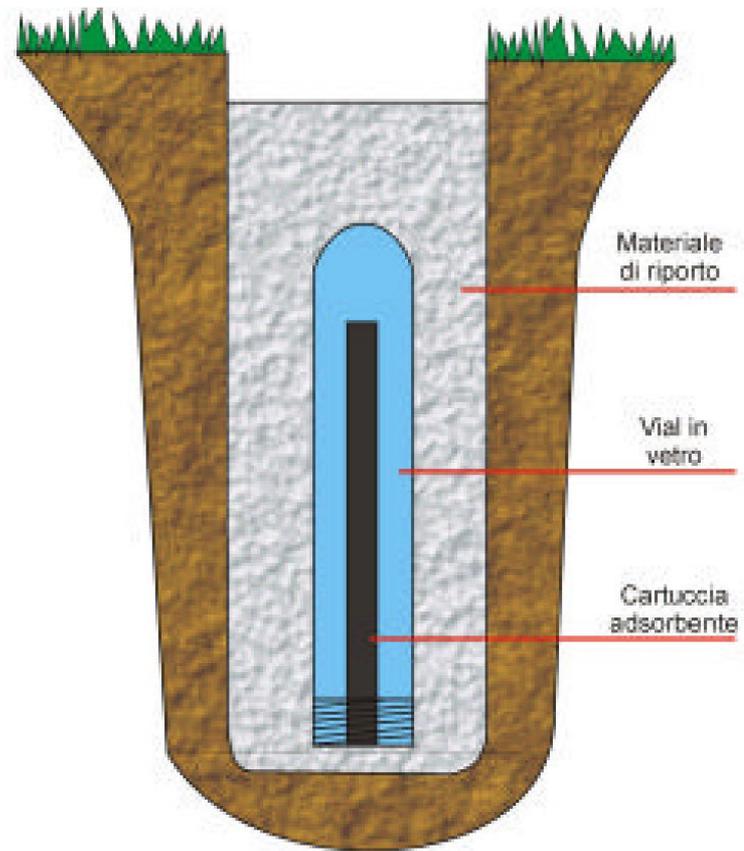
Campionamento mediante direct push, con punte campionatrici che giungono fino a 30 m di profondità.

[Molfetta e Sethi, 2002]

Il campionamento nel mezzo insaturo: gas interstiziale

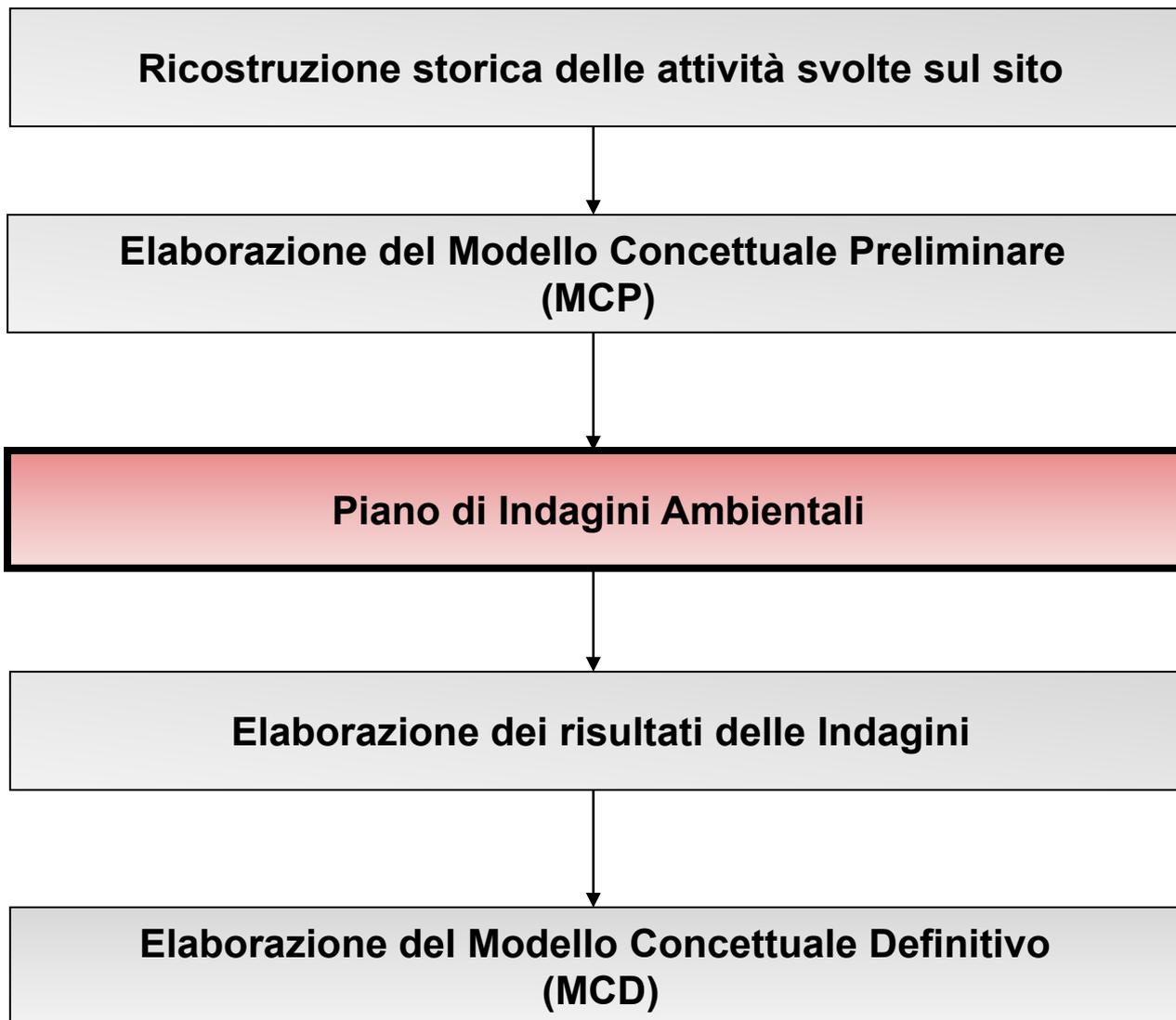
Tecniche di campionamento passivo

- ✓ Il campionamento passivo è basato sul flusso naturale del contaminante nel suolo verso un sistema costituito da materiale adsorbente (generalmente carboni attivi).
- ✓ E' possibile fino a profondità di 2 m e richiede tempi sufficientemente lunghi (2-30 giorni).



[Molfetta e Sethi, 2002]

Il Piano della Caratterizzazione



Caratterizzazione della contaminazione

Il campionamento delle matrici ambientali: acqua interstiziale

✓ **Campionamento in situ**

- utilizza lisimetri a suzione e campionatori a punta filtrante (BAT);
- consente il recupero di campioni rappresentativi del liquido trattenuto dal suolo a pressioni inferiori a 60 kPa.

✓ **Campionamento mediante estrazione in laboratorio**

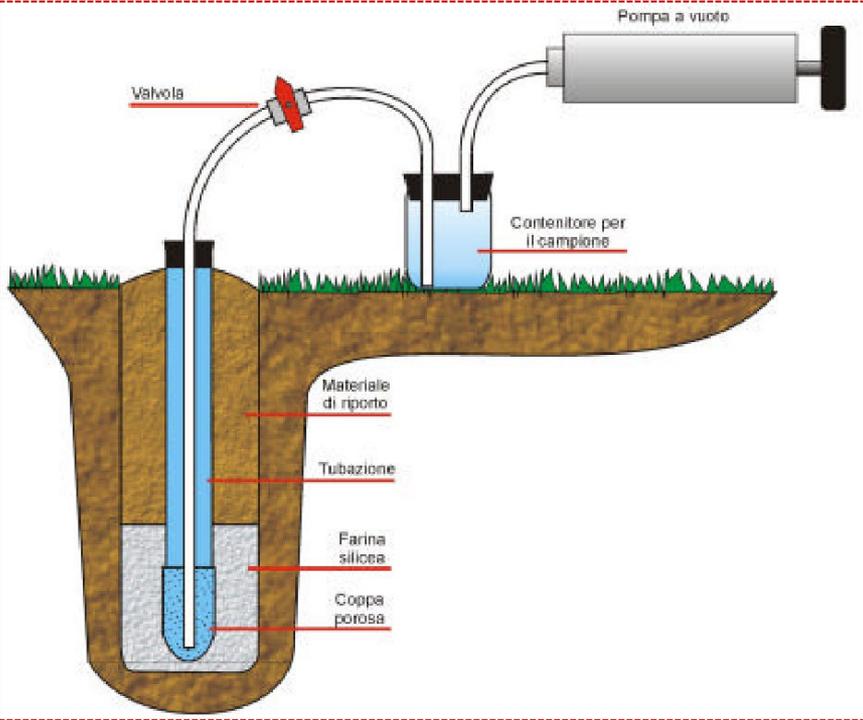
- impiega la centrifugazione o l'estrazione sotto pressione;
- consente il recupero del liquido trattenuto dal suolo anche a pressioni maggiori di 60 kPa.

✓ **Criticità:**

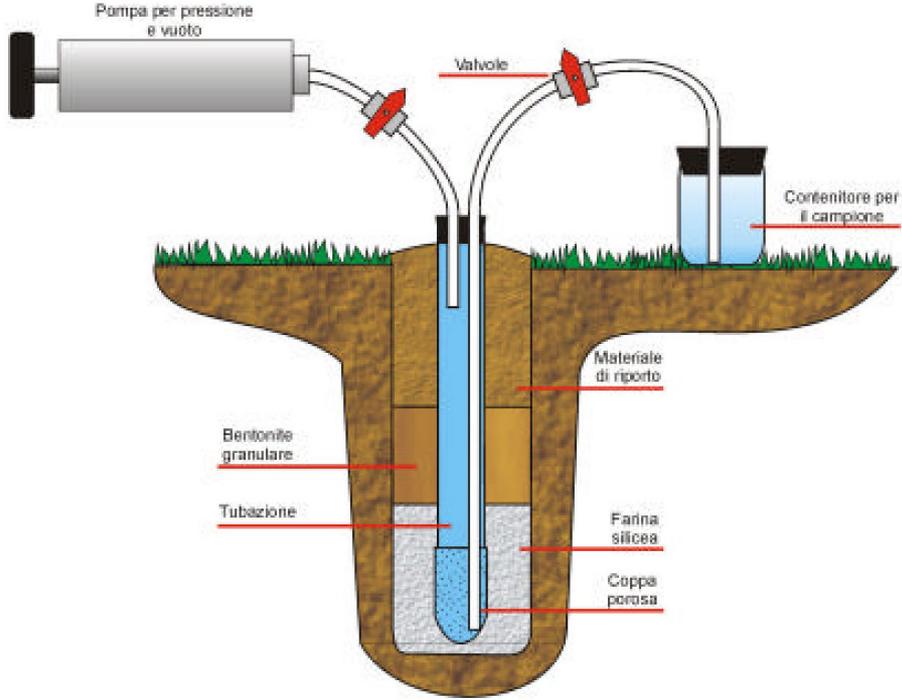
- recupero di COV;
- interazione tra contaminanti e campionatori;
- campionamenti selettivi.

Il campionamento nel mezzo insaturo: acqua interstiziale

Campionamento in situ mediante lisimetri



Lisimetro a vuoto

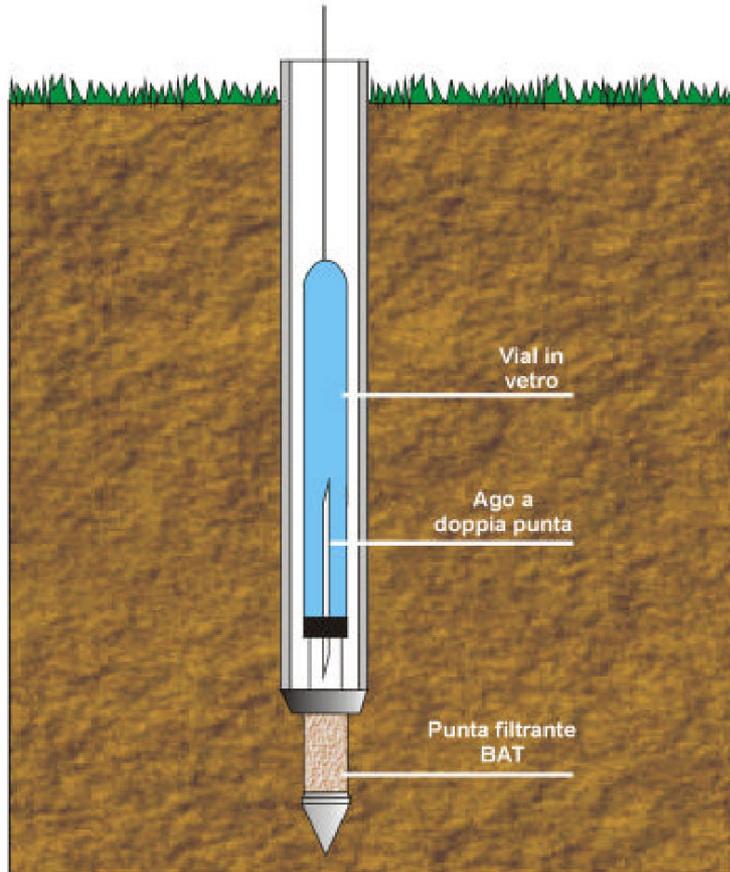


Lisimetro a pressione e vuoto

[Molfetta e Sethi ,2002]

Il campionamento nel mezzo insaturo: acqua interstiziale

Campionamento in situ mediante punta filtrante (BAT)



- ✓ Nei campionatori a punta filtrante il campione viene raccolto per effetto del richiamo esercitato da una fiala all'interno della quale viene creato il vuoto prima del campionamento
- ✓ La fiala calata dalla superficie tramite un cavo zavorrato, il cui peso permette la perforazione del setto di chiusura della fiala da parte di un ago solidale con la punta filtrante del campionatore
- ✓ Il limite di questa tecnica è nei lunghi tempi di recupero del campione.

[Molfetta e Sethi, 2002]

Caratterizzazione della contaminazione

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

- ✓ Il campionamento dell'acqua di falda utilizza sistemi di indagine come piezometri e pozzi.
- ✓ La metodologia di campionamento, che può essere realizzato con diverse tecniche, prevede le seguenti fasi:
 - realizzazione della perforazione;
 - spurgo;
 - raccolta e conservazione del campione.

Caratterizzazione della contaminazione

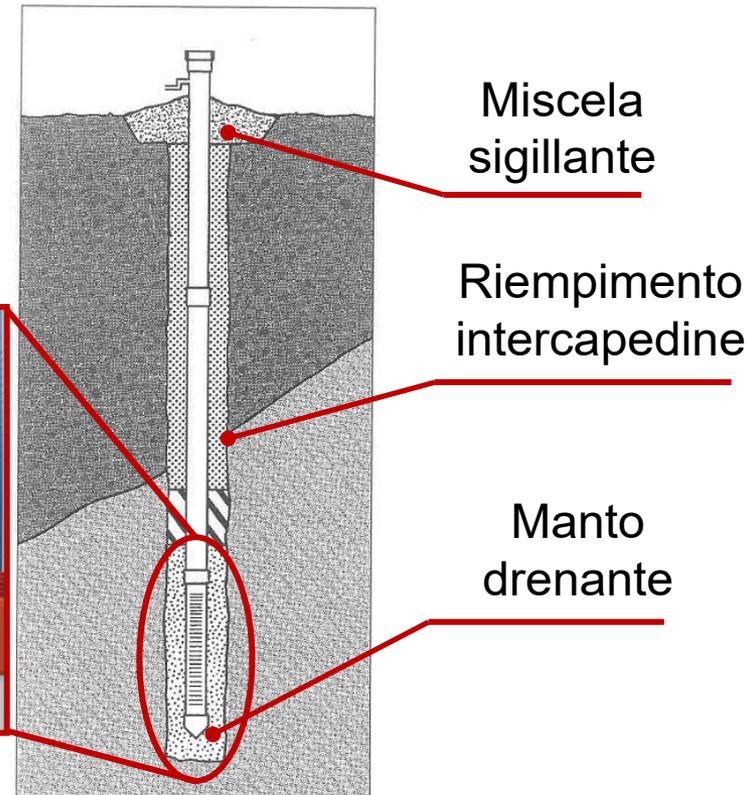
Il campionamento nel mezzo saturo: D. Lgs. 152/06

- ✓ Il **campionamento dinamico** è da intendersi come campionamento rappresentativo della composizione delle acque sotterranee;
- ✓ Il **campionamento statico** può essere utilizzato qualora debba essere prelevata solamente la fase separata di sostanze non miscibili oppure si sia in presenza di acquiferi poco produttivi;
- ✓ Il **campionamento selettivo** è, infine, necessario qualora sia rinvenuto nei piezometri del prodotto surnatante in fase libera.

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

I piezometri

- ✓ Il piezometro è un pozzo di osservazione che consente di ricostruire la superficie piezometrica della falda, ossia la superficie lungo la quale la pressione dell'acqua è pari a quella atmosferica.
- ✓ È costituito da un tubo, sfinestrato nella parte terminale, in modo da consentire l'ingresso dell'acqua.
- ✓ L'ampiezza delle sfinestrature è funzione della granulometria dell'acquifero.



Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

I pozzi

- ✓ Un pozzo è una perforazione verticale nel terreno che raggiunge la falda penetrando al di sotto della quota piezometrica ma senza oltrepassare il limite inferiore dell'acquifero.
- ✓ La sezione filtrante è dotata di un filtro per le particelle fini, circondato da sabbia per consentire il drenaggio.
- ✓ Le caratteristiche comuni dei filtri sono le seguenti:
 - lunghezza pari ad almeno 70-80% dello spessore di acquifero
 - porosità del filtro pari ad almeno il doppio di quella dell'acquifero

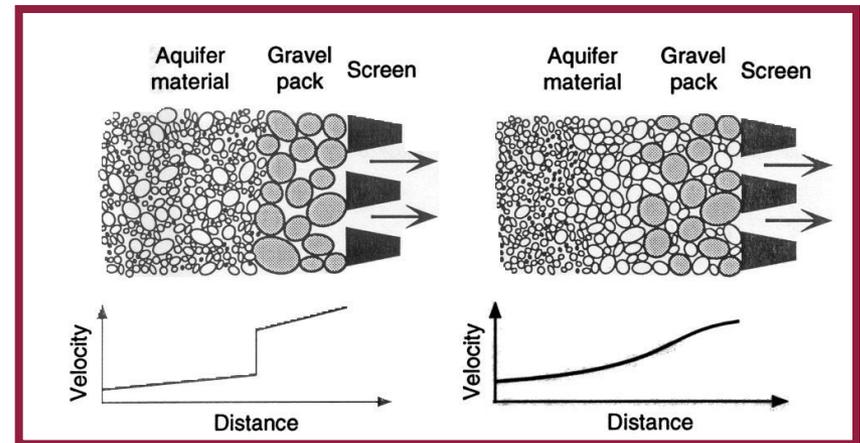
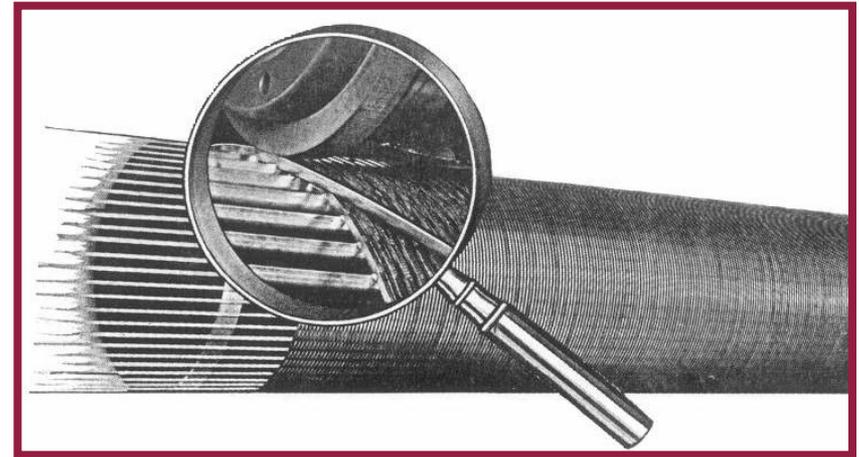


Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

I pozzi

Filtro tipo Johnson

- Il tubo filtrante è costruito in acciaio, con un filo a sezione a V saldato a spirale su dei montanti verticali.
- Il dreno in ghiaietto è utile in formazioni a grana fine in quanto minimizza il trasporto solido e permette di usare filtri a luce maggiore.



Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Tecniche di campionamento

Qualora lo spessore dell'acquifero sia considerevole o ci si trovi in presenza di composti non miscibili con l'acqua, risulta utile la ricostruzione verticale della contaminazione.

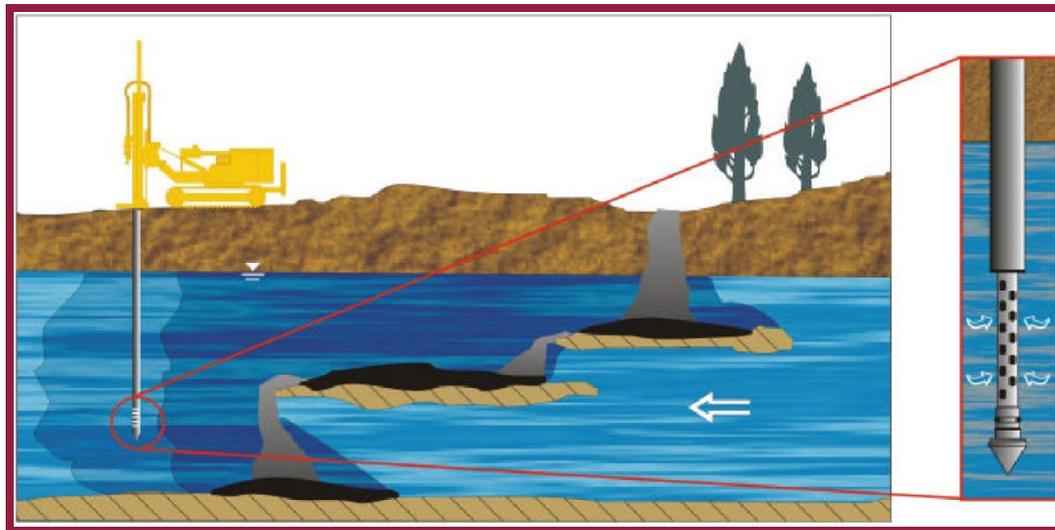
In questo caso, i possibili approcci sono:

- ✓ tecniche puntuali direct push;
- ✓ installazione di piezometri multilivello;
 - doppio packer;
 - cluster di piezometri in fori separati;
 - cluster di piezometri in un singolo foro;
 - sistemi multilivello.

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Tecniche puntuali di direct push

- ✓ Consentono campionamenti discreti e istantanei di acqua;
- ✓ Impiegano un dispositivo di campionamento costituito da un tubo sfinestrato ($d = 30\text{-}40\text{ cm}$) in acciaio inossidabile, infisso nella formazione acquifera;
- ✓ Richiedono l'identificazione di punti di indagine specifici (quota e posizione).



[Molfetta e Sethi, 2002]

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Tecniche puntuali di direct push

<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
<ul style="list-style-type: none">▪ velocità di campionamento;▪ costi contenuti;▪ assenza di fluidi e di residui di perforazione;▪ campionamento diretto con spurgo minimo;▪ campionamento stratificato lungo la verticale;▪ possibilità di installare cluster di piezometri in perfori separati.	<ul style="list-style-type: none">▪ profondità di prelievo, che in genere non può superare i 30-40 m;▪ impossibilità di ripetere nel tempo le analisi nel medesimo punto;▪ impossibilità di effettuare misure piezometriche di precisione.

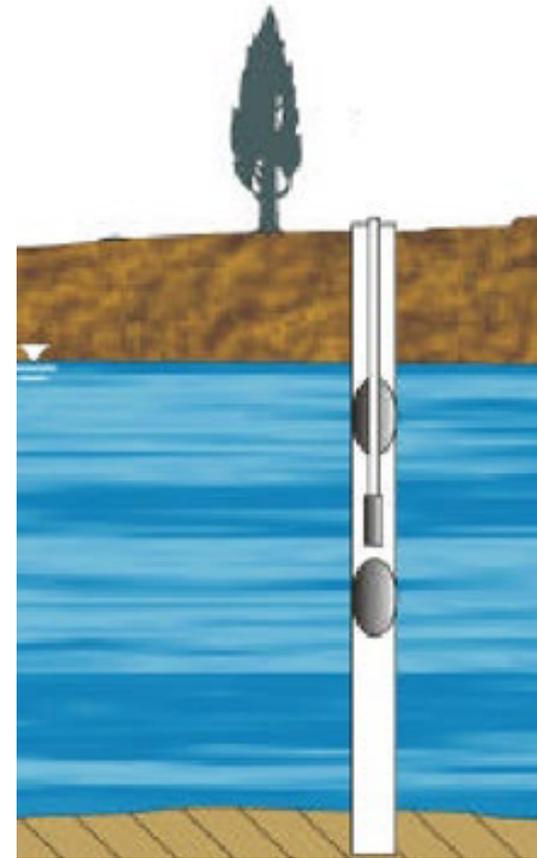
Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Il doppio packer

- ✓ Si tratta di una tecnica che consente di isolare una porzione di acquifero, mediante l'introduzione di una coppia di **packer** all'interno di un piezometro appositamente predisposto.



- ✓ Richiede operazioni lente e laboriose e può determinare fenomeni di cross-contaminazione e di circolazione all'interno del dreno.

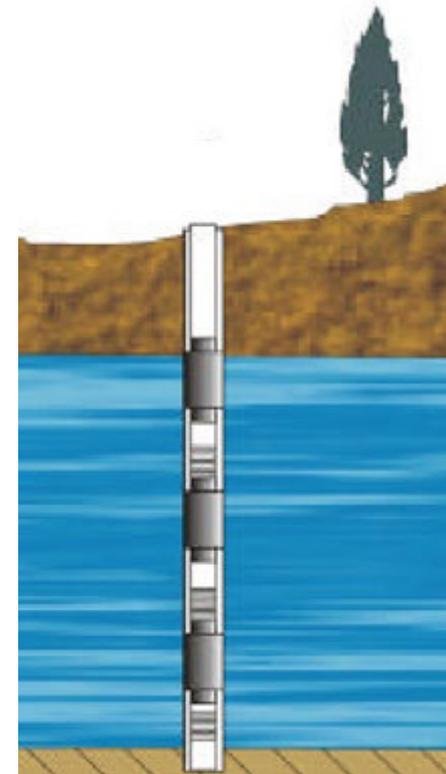


[Molfetta e Sethi, 2002]

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Sistema multilivello

- ✓ Sono generalmente costituiti da una colonna equipaggiata di packer e in alcuni casi di pompe sommerse in grado di portare l'acqua in superficie.
- ✓ Possono essere rimossi con relativa facilità dal piezometro in cui vengono calati ed hanno il vantaggio di richiedere volumi di spurgo minimi.
- ✓ Tra gli svantaggi figurano gli elevati costi di realizzazione.

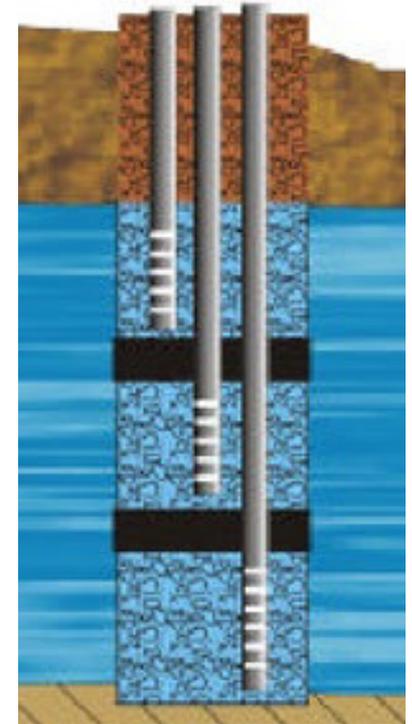
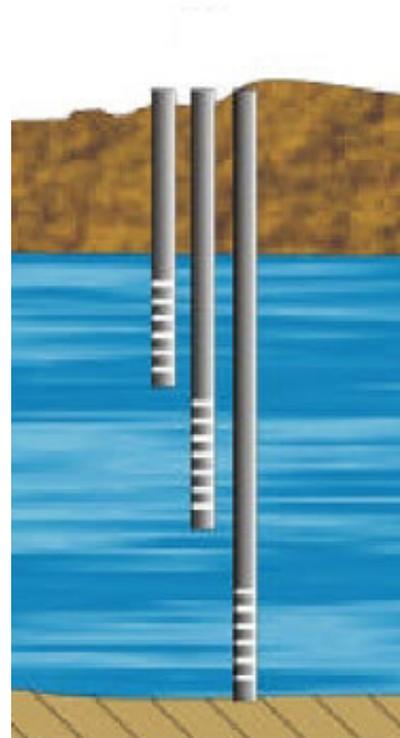


[Molfetta e Sethi ,2002]

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Cluster di piezometri

- ✓ Consiste nella disposizione ravvicinata di una serie di piezometri di piccolo diametro sfenestrati a profondità differenti.
- ✓ Si può realizzare in fori separati o in un unico foro.
- ✓ Oltre agli elevati costi di realizzazione, nel caso in cui i piezometri siano sistemati in un unico foro, i sigilli bentonitici potrebbero non garantire un perfetto isolamento idraulico e la durata dell'operazione di spurgo potrebbe essere eccessiva a causa del grosso diametro del dreno circostante la colonna piezometrica.



[Molfetta e Sethi, 2002]

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Lo spurgo

- ✓ L'operazione di spurgo consiste nell'eliminazione del volume di acqua che staziona all'interno del piezometro e serve a prelevare un campione rappresentativo delle condizioni chimico-fisiche della falda eliminando le influenze di:
 - operazioni di scavo;
 - interazione con il rivestimento;
 - interazione con l'aria atmosferica;
 - ristagno d'acqua.

- ✓ I fattori che definiscono il sistema di spurgo sono il **volume** da spurgare e la **portata** di emungimento (pochi litri al secondo): portate troppo basse comporterebbero tempi di campionamento eccessivi; portate troppo alte creerebbero:
 - incremento della torbidità del campione;
 - prosciugamento del piezometro;
 - richiamo di prodotto surnatante;
 - diluizione del campione.

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Lo spurgo

- ✓ La scelta del sistema di spurgo è indirizzata da:
 - possibilità di utilizzo della strumentazione di spurgo anche per il campionamento;
 - diametro del sistema di campionamento (piezometro o pozzo);
 - soggiacenza della falda;
 - semplicità delle operazioni di disassemblaggio e decontaminazione;
 - facilità di trasporto;
 - necessità di fonti esterne di energia;
 - costi.

- ✓ I volumi e i tempi di spurgo sono valutati in base ai seguenti criteri:
 - criterio basato sul volume del pozzo;
 - criterio legato alla stabilizzazione dei parametri chimico-fisici;
 - criterio basato sull'immagazzinamento del pozzo;
 - low-flow purging.

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Modalità di spurgo

Critério basato sul volume del pozzo

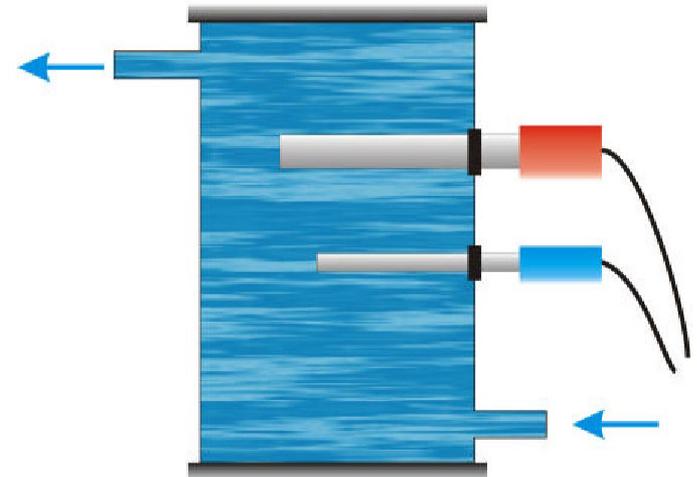
- ✓ Per volume del pozzo si intende la quantità d'acqua presente in condizioni statiche all'interno del pozzo (escluso il dreno);
- ✓ Tale criterio prevede che sia spurgata una quantità di liquido compresa tra 1 e 20 volte il volume del pozzo.
- ✓ **Vantaggi:** semplicità di esecuzione.
- ✓ **Svantaggi:** tempi elevati nel caso di piezometri di grosse dimensioni.

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Modalità di spurgo

Criterio legato alla stabilizzazione dei parametri chimico-fisici

- ✓ Lo spurgo del pozzo viene effettuato monitorando in continuo con celle di flusso parametri quali conducibilità, temperatura, DO, pH, Pot. redox, fino alla loro stabilizzazione.
- ✓ Particolare attenzione va prestata alla scelta del parametro indice: in genere DO e conducibilità sono molto affidabili; pH e temperatura meno (tendono a stabilizzarsi rapidamente).

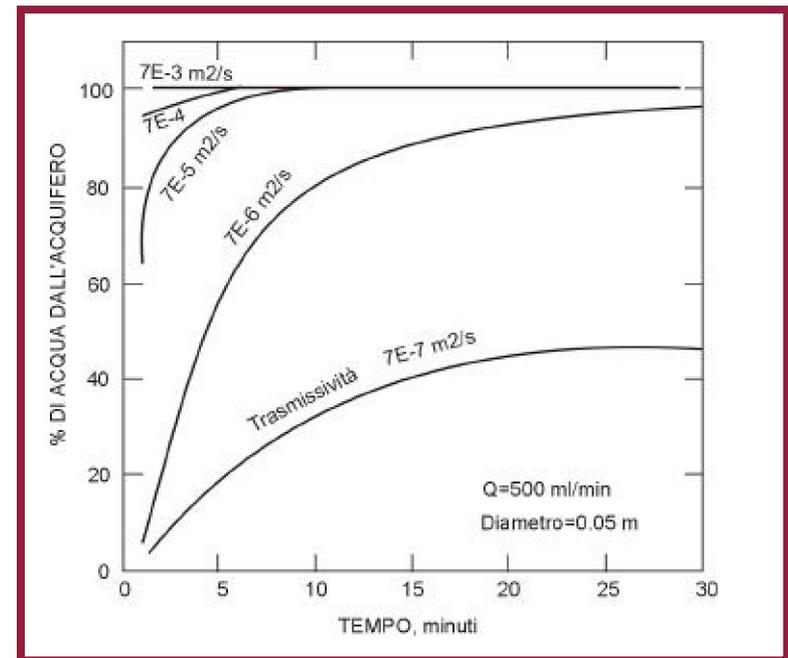


Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Modalità di spurgo

Criterio basato sull'immagazzinamento del pozzo

- ✓ La percentuale di acqua che proviene dal sistema acquifero dipende da:
 - tempo di pompaggio
 - coefficiente di immagazzinamento del pozzo
 - caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero.
- ✓ Nota la trasmissività della formazione, il diametro del pozzo e la portata di spurgo, è quindi possibile calcolare il tempo di spurgo richiesto per l'ottenimento di campioni significativi.



Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Modalità di spurgo

Low-flow purging e stabilizzazione dei parametri chimico-fisici

- ✓ Tale metodo prevede che solo il volume d'acqua al di sopra delle sfenestrature sia stagnante e, dunque, si spurga a portate estremamente basse (meno di 0,5 l/min) in modo da prelevare l'acqua direttamente dall'acquifero. A tal fine:
 - si cala una pompa all'interno del piezometro, disponendola in posizione centrale rispetto al tratto sfenestrato
 - si avvia il low-flow purging fino alla stabilizzazione dei parametri chimico-fisici.
- ✓ Si tratta di un metodo particolarmente efficace in piezometri di piccolo diametro e caratterizzati da brevi tratti finestrati.
- ✓ Consente di minimizzare i volumi di spurgo, il disturbo al sistema acquifero, lo stripping dei contaminanti, la mobilizzazione dei solidi sospesi.

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Attrezzature di prelievo

<i>Campionatori puntuali</i>		Bailer
		A siringa
<i>Pompe a pressione positiva</i>	Centrifughe	Centrifughe sommerse
	Volumetriche	Bladder pumps
		A gas o aria
		A pistone
	A ingranaggio	
<i>Pompe aspiranti</i>	Centrifughe	Centrifughe esterne
	Volumetriche	Peristaltiche
<i>Pompe inerziali</i>		Con valvole di non ritorno

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

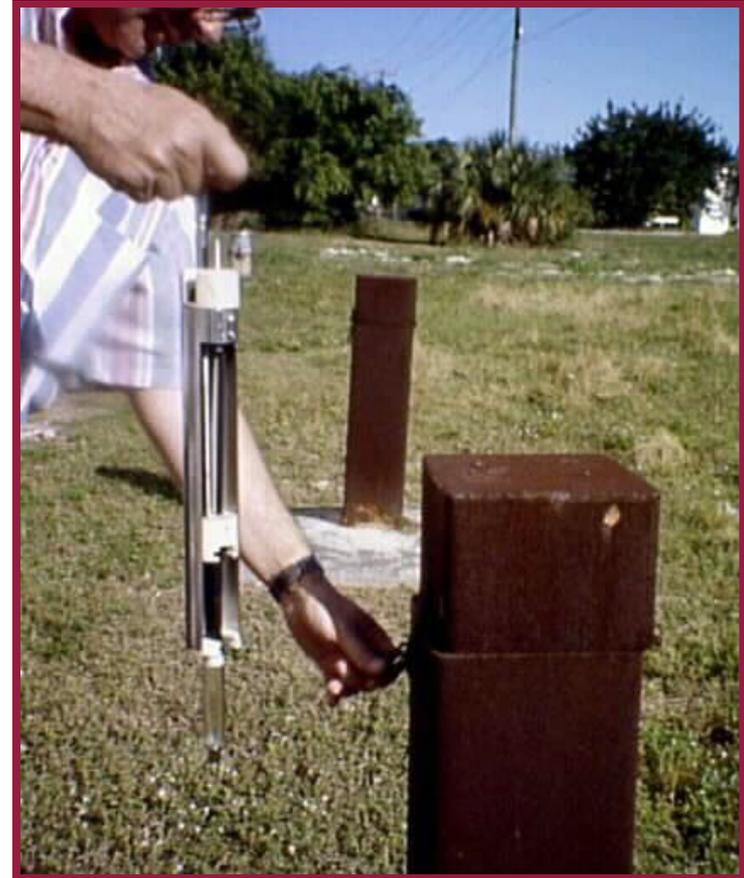
Campionatori puntuali: bailer

- ✓ Recipienti cilindrici, anche monouso, legati ad un cavo da immergere direttamente all'interno del pozzo, di lunghezza generalmente pari a 1-2 m.
- ✓ Sono costituiti da materiali ad elevata inerzia chimica, quali acciaio inox, PVC oppure materiali fluorocarburi.
- ✓ I bailer sono economici e semplici da usare per il prelievo dell'acqua di falda, ma sconsigliabili per lo spurgo
- ✓ La capacità dell'operatore nell'utilizzo è fondamentale per assicurare la qualità del campione prelevato e per minimizzare le eventuali perdite di COV



Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Campionatori puntuali: siringhe



Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Pompe centrifughe sommerse

Vantaggi

- ✓ a basse portate il campione risulta di alta qualità;
- ✓ alcuni modelli permettono la regolazione della portata;
- ✓ hanno elevate capacità di sollevamento;
- ✓ possono realizzare l'operazione di spurgo;
- ✓ permettono la filtrazione in linea del campione.

Svantaggi

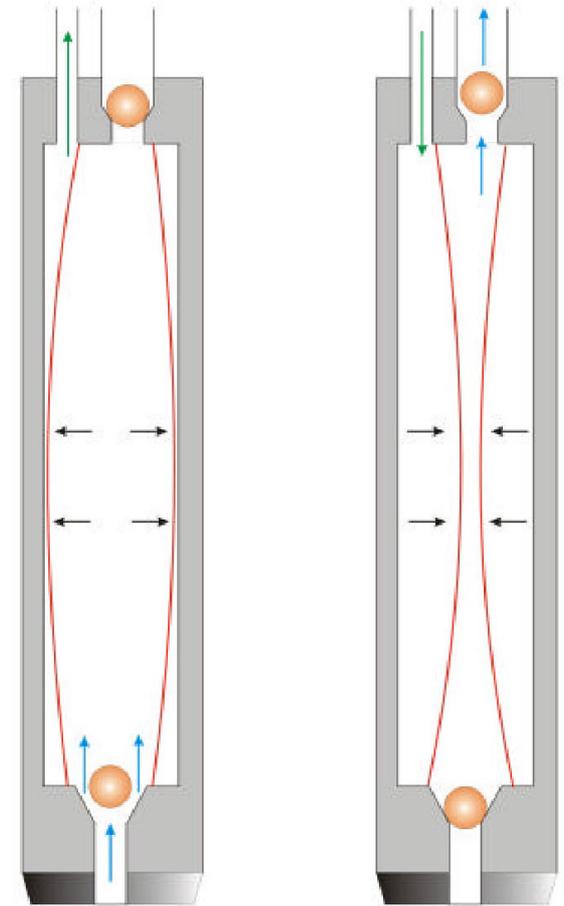
- ✓ richiedono una sorgente esterna di energia;
- ✓ il processo di decontaminazione può essere complesso;
- ✓ tutto il sistema è generalmente ingombrante e pesante.



Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Bladder pumps

- ✓ Le bladder pumps sono pompe volumetriche a immersione, tra le più efficaci per il campionamento di metalli in traccia e di COV.
- ✓ Il funzionamento della pompa bladder avviene in due tempi: nella prima fase si ha il riempimento della camera per effetto della pressione idrostatica attraverso una valvola al fondo della pompa.
- ✓ Non appena la pompa è piena, la valvola di fondo si chiude e comanda l'iniezione di gas tra il corpo della pompa e la camera contenente l'acqua.



Il campionamento nel mezzo insaturo: acqua di falda

Bladder pumps

Vantaggi

- ✓ nessun contatto tra campione e parti meccaniche;
- ✓ la camera flessibile è realizzata in materiale inerte;
- ✓ è possibile variare la portata di pompaggio;
- ✓ permettono la filtrazione in linea del campione;
- ✓ non si danneggia nel caso in cui vada a secco;
- ✓ hanno elevate capacità di sollevamento;
- ✓ sono molto efficaci nel campionamento di VOC;
- ✓ semplice processo di decontaminazione.

Svantaggi

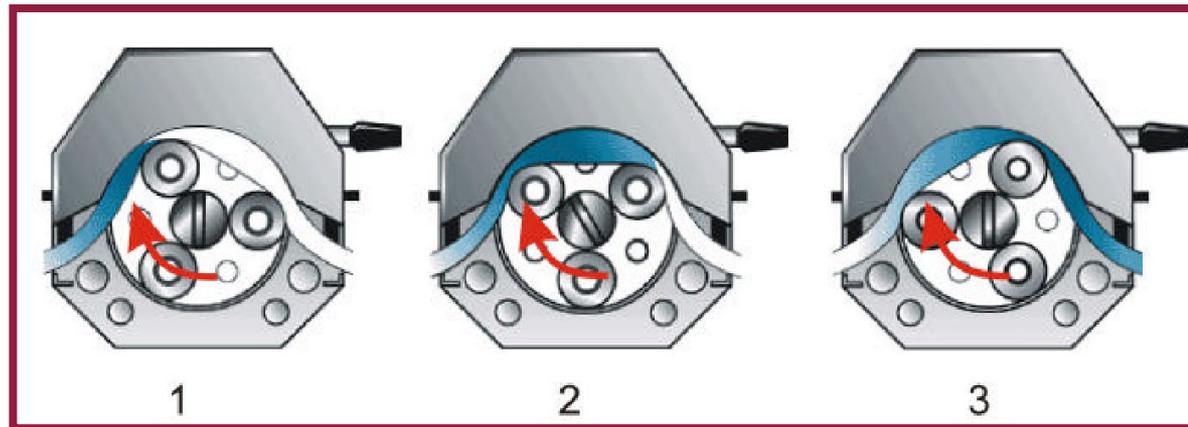
- ✓ lo spurgo può risultare eccessivamente lento;
- ✓ richiedono personale addestrato al prelievo;
- ✓ tutto il sistema è generalmente ingombrante e pesante.



Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Pompe peristaltiche

Sono costituite da una tubazione di mandata in gomma calata nel piezometro e collegata ad un rotore che, mediante dei cilindretti, comprime la tubazione stessa creando una pressione negativa capace di richiamare acqua dal piezometro.



Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Pompe peristaltiche

Vantaggi

- ✓ permettono di effettuare in maniera rapida la filtrazione in linea;
- ✓ portatili e semplici da utilizzare;
- ✓ la tubazione può avere elevata inerzia chimica;
- ✓ funzionamento a portata variabile;
- ✓ utilizzabili in pozzi di qualsiasi diametro;
- ✓ semplici da decontaminare.

Svantaggi

- ✓ la depressione generata può portare alla volatilizzazione dei VOC;
- ✓ non è in genere possibile superare dislivelli maggiori di 8 m.



Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

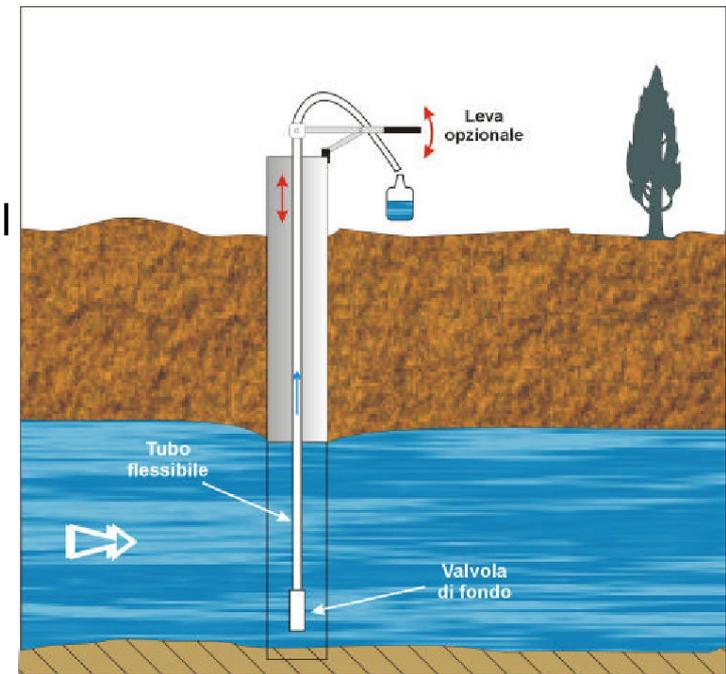
Pompe inerziali con valvola di non ritorno

Vantaggi

- ✓ possono essere costruite in differenti materiali;
- ✓ economiche ed eventualmente monouso;
- ✓ di facile funzionamento;
- ✓ nessuna limitazione a causa del diametro del pozzo;
- ✓ portatili e leggere;
- ✓ non richiedono fonti di energia esterne.

Svantaggi

- ✓ possibile aumento di torbidità;
- ✓ non adatte a pozzi profondi;
- ✓ non adatte per lo spurgo di grossi volumi d'acqua;
- ✓ complicazioni nel processo di filtrazione in linea.



[Molfetta e Sethi ,2002]

Il campionamento nel mezzo saturo: acqua di falda

Raccolta del campione

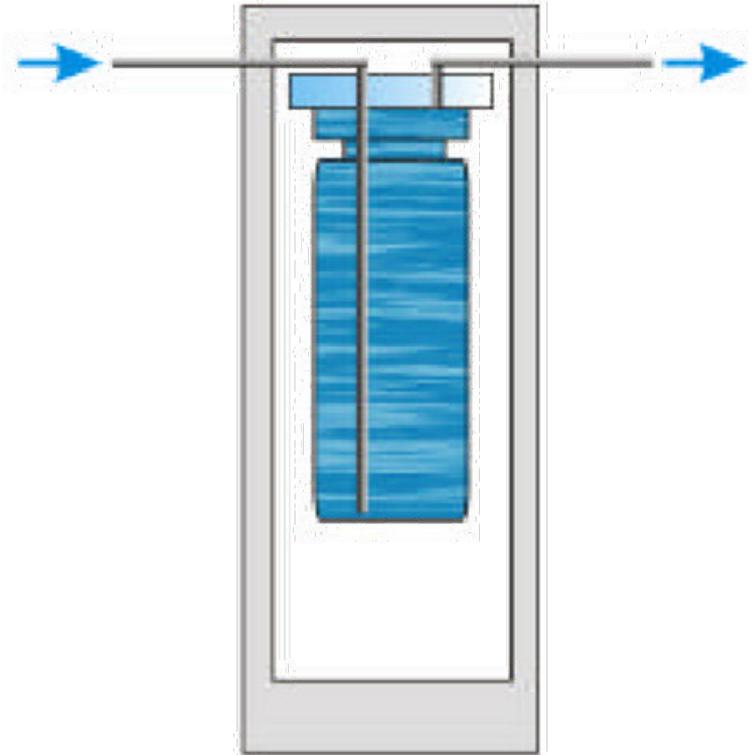
La fase di raccolta e trasporto del campione è molto delicata. È, pertanto, opportuno:

- controllare l'assenza di potenziali sorgenti di contaminazione nell'area (motori in funzione, presenza di scarichi) prima di aprire il contenitore;
- aprire il contenitore solo subito prima del campionamento;
- minimizzare turbolenza, agitazione, volatilizzazione, esposizione all'atmosfera, riscaldamento dell'acqua;
- nel caso di analisi di COV, riempire completamente il contenitore minimizzando lo spazio di testa (a meno che non si predisponga il campione per l'analisi in spazio di testa);
- tappare ermeticamente il contenitore.

Il campionamento nel mezzo insaturo: acqua di falda

Raccolta del campione

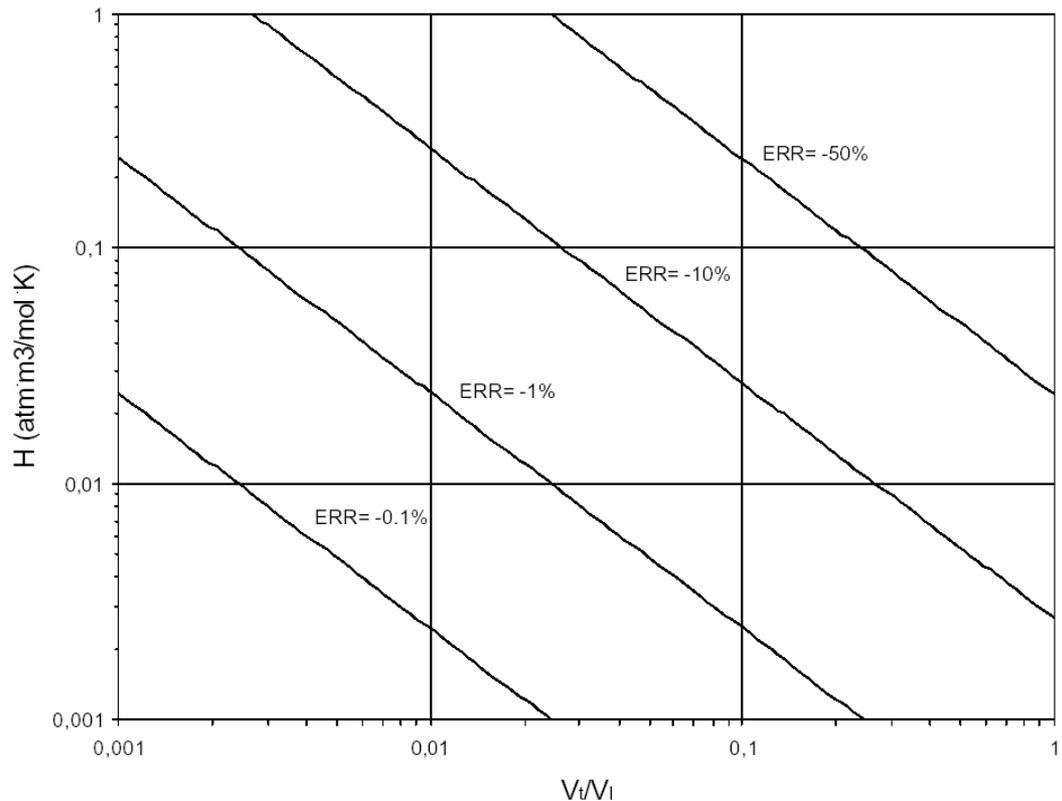
- ✓ Al fine di minimizzare il contatto del campione con l'atmosfera, è possibile prevedere un **campionamento in linea**, che consiste nel riempimento di un recipiente di campionamento mediante una tubazione immersa nel liquido; una seconda tubazione consente di eliminare il liquido in eccesso
- ✓ Tale tecnica consente il monitoraggio in continuo per la definizione della fine dell'attività di spurgo.



Il campionamento nel mezzo insaturo: acqua di falda

Raccolta del campione

- ✓ Qualora si vogliono analizzare COV è necessario minimizzare la presenza dello spazio di testa o di bolle d'aria all'interno del contenitore.
- ✓ A tal proposito il **diagramma di Pankow** fornisce l'errore percentuale di valutazione dei VOC in funzione dello spazio di testa e della costante di Henry del contaminante



Caratterizzazione della contaminazione

Campionamento di rifiuti

- ✓ Nella scelta dell'apparecchiatura di campionamento vanno prese in considerazione alcune informazioni di base, come:
 - la pericolosità del rifiuto e la relativa procedura di sicurezza da adottare;
 - lo stato fisico del rifiuto;
 - dove e come il rifiuto è conservato;
 - la dimensione del campione di laboratorio da prelevare.
- ✓ Rifiuti liquidi e semiliquidi :può essere utilizzata l'apparecchiatura normalmente dedicata alla raccolta dei campioni di acque.
- ✓ Rifiuti solidi: vengono generalmente utilizzate trivelle, pale, perforatori, campionatori.



Norma Uni 10802

Rifiuti. Campionamento manuale e preparazione ed analisi degli eluati

Campionamento di rifiuti

Il caso studio di Piazza Castello



**Campionamento di rifiuti da
fori di sondaggio**

Campionamento di rifiuti in cumulo



Le Indagini indirette

- ✓ Le **indagini geofisiche** (indirette) sono meno invasive di quelle geognostiche (dirette), e non prevedono scavi o movimentazione di terreno, riducendo il rischio di fughe e diffusione di contaminanti.
- ✓ Esse si basano sulle diverse risposte offerte dai terreni quando vengono investiti da campi elettrici e/o magnetici.
- ✓ Costituiscono un valido strumento per la determinazione di:
 - struttura del sottosuolo (unità litologiche differenti, discontinuità, eterogeneità ed anisotropia del mezzo investigato);
 - localizzazione e mappatura della contaminazione, in particolare nel caso di discariche dismesse e/o abusive in quanto l'ammasso di rifiuti si presenta come un corpo avente caratteristiche chimiche e fisiche differenziabili dalla struttura geologica di contesto

Le Indagini indirette

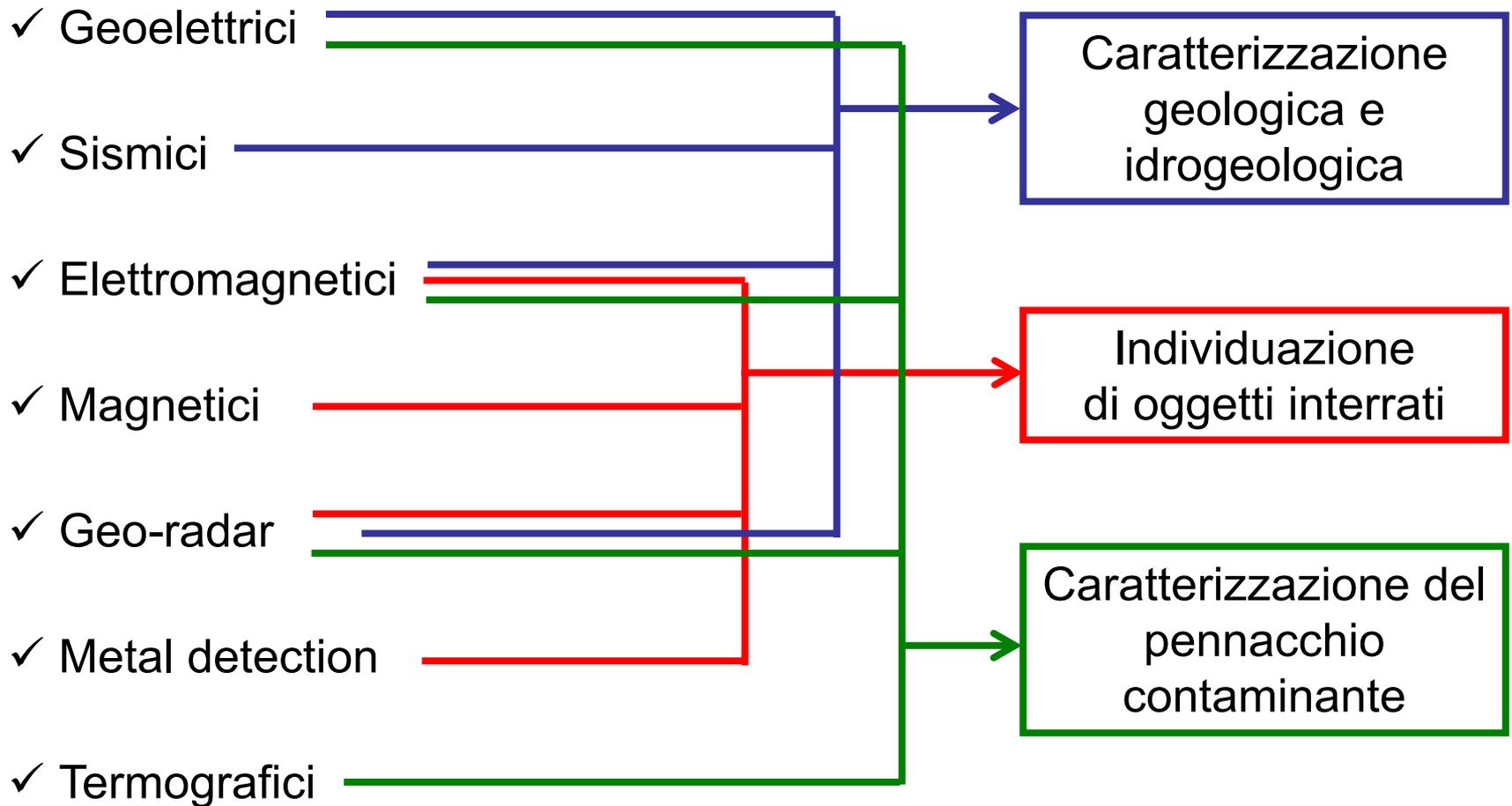
Applicazioni

Tali tecniche di investigazione risultano indispensabili nel caso in cui i dati raccolti, tramite indagini dirette, non permettano di disporre di una ricostruzione del modello fisico del sottosuolo e/o del grado di estensione della contaminazione.



Le Indagini indirette

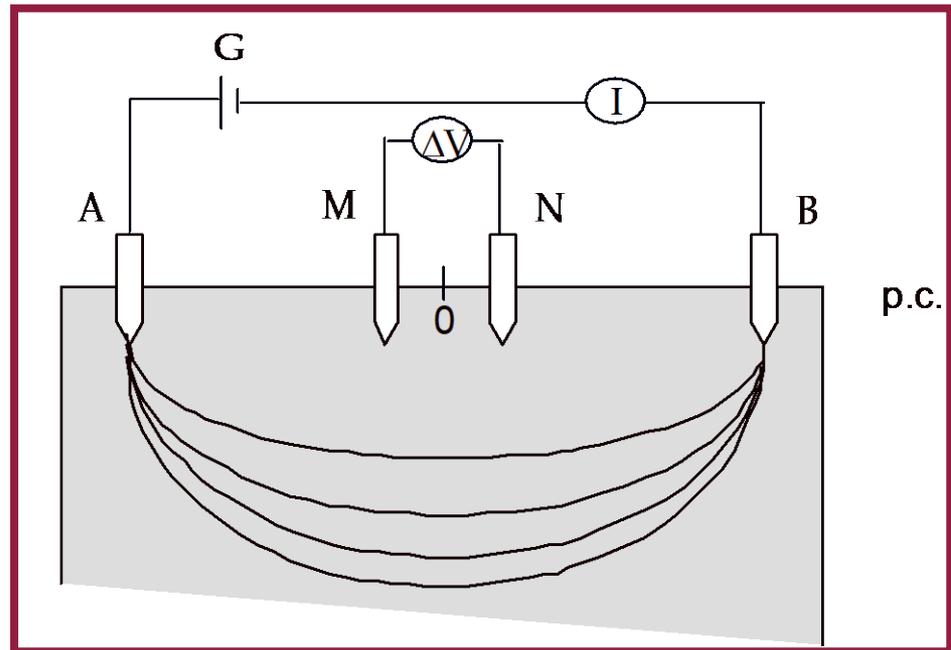
Metodi di indagine



Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici

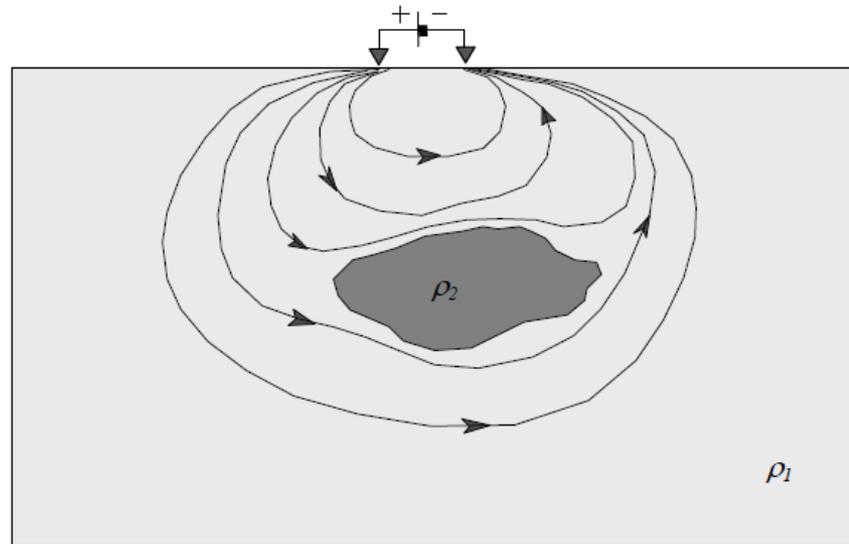
- ✓ Le indagini geoelettriche si fondano sulla misura della variazione dei parametri elettrici del mezzo indagato e, in particolare della **resistività elettrica** del terreno.
- ✓ Tale parametro viene misurato immettendo nel terreno corrente elettrica continua o alternata a bassa frequenza, attraverso 2 appositi punti sorgente e rilevando la differenza di potenziale elettrico tra 2 punti di misura, provocata dalla circolazione della corrente nel sottosuolo.



Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici

- ✓ Il percorso delle linee di corrente generate è funzione delle disomogeneità elettriche presenti nel terreno, come corpi o porzioni del sottosuolo aventi diversa capacità di condurre l'elettricità
- ✓ Lo scopo dei metodi geoelettrici è, dunque, quello di ottenere informazioni sulla natura litologica e sulle caratteristiche strutturali delle formazioni costituenti il sottosuolo.
- ✓ Trovano ampia applicazione in problemi specifici di suoli contaminati quali monitoraggio della falda, caratterizzazione del plume di contaminante, individuazione di siti di stoccaggio di rifiuti industriali e pericolosi, percolato da discarica.



Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici: la resistività

Qualora il conduttore sia rappresentato dal terreno, la **resistività** viene espressa dalla seguente formula:

Resistività apparente $\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$

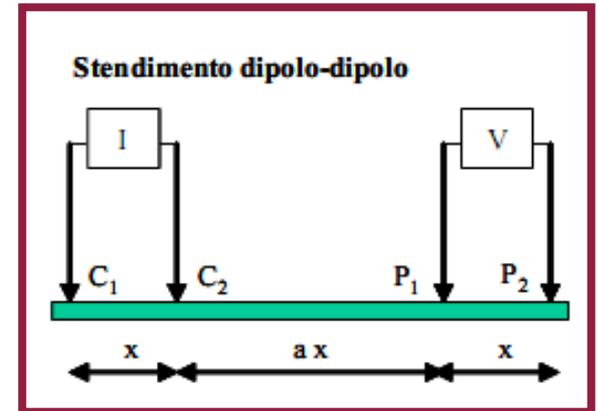
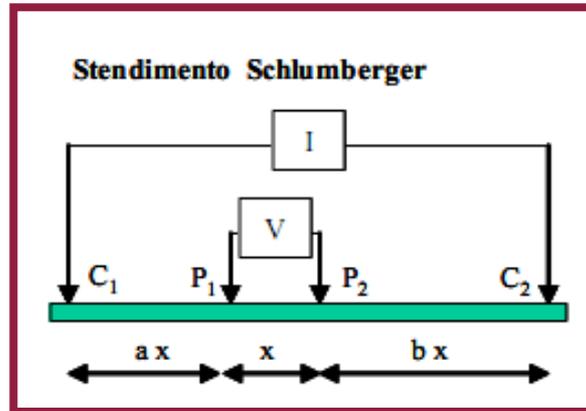
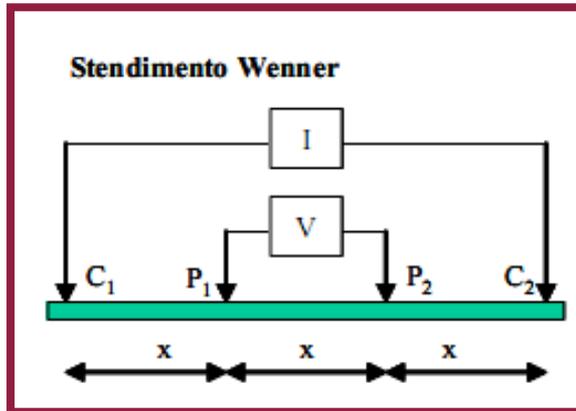
dove **K** [m] rappresenta un “**fattore geometrico**” dipendente dalla disposizione geometrica dei quattro elettrodi (**stendimento**).

Data le caratteristiche di anisotropia del terreno, si parla di **resistività apparente**, ovvero un valore rappresentativo di un volume la cui estensione, e quindi anche lo spessore ispezionato, dipendono dalla configurazione assunta dagli elettrodi.

Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici: le configurazioni

- ✓ In relazione alla risoluzione desiderata, è possibile utilizzare diverse configurazioni di elettrodi o di “stendimenti” (arrays)
- ✓ Le più note sono: Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo.

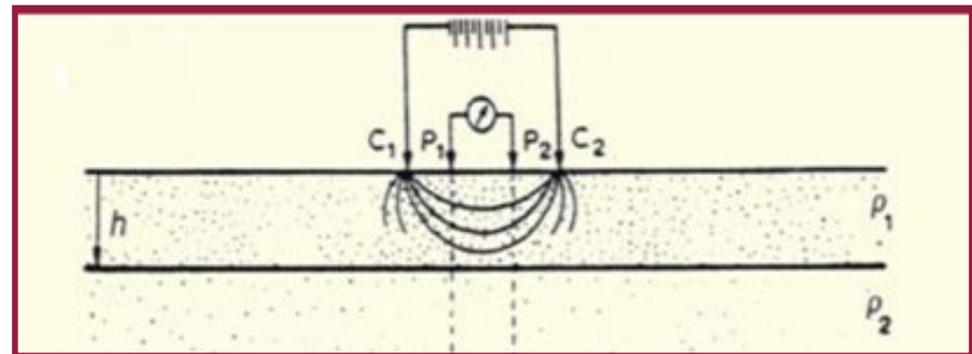
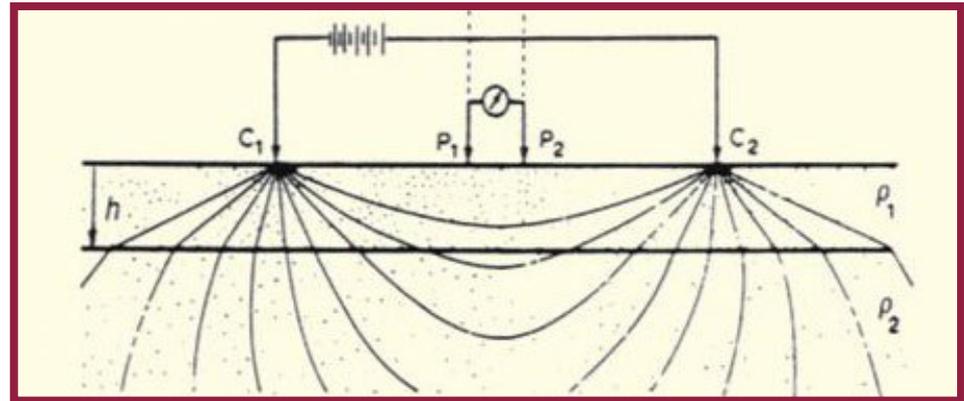


Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici: le configurazioni

Le indagini geo-elettriche possono essere applicate per eseguire:

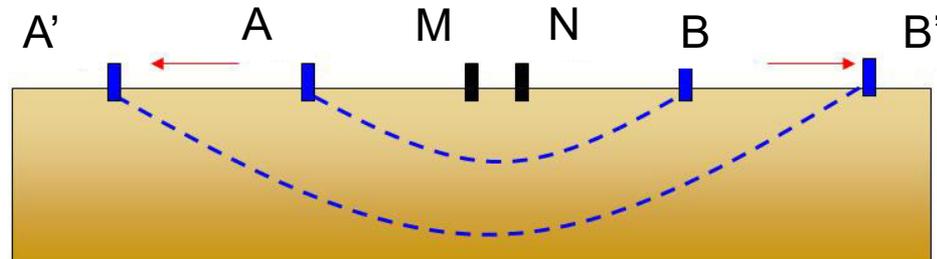
- ✓ **Sondaggi Elettrici Verticali (SEV)**, con i quali si cerca di valutare le variazioni di resistività con la profondità.
- ✓ **Sondaggi Elettrici Orizzontali (SEO)**, con lo scopo di evidenziare le variazioni laterali della resistività.



Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici: sondaggi elettrici verticali (SEV)

- ✓ I sondaggi elettrici verticali vengono eseguiti distanziando via via i quattro elettrodi e mantenendo invariato il centro del quadripolo



- ✓ Spesso si adotta l'ipotesi semplificativa che la **profondità di investigazione (z)** sia esattamente **pari alla distanza tra gli elettrodi di corrente (AB)**
- ✓ La relazione **profondità/distanza** risulta essere correttamente espressa dalla formula:

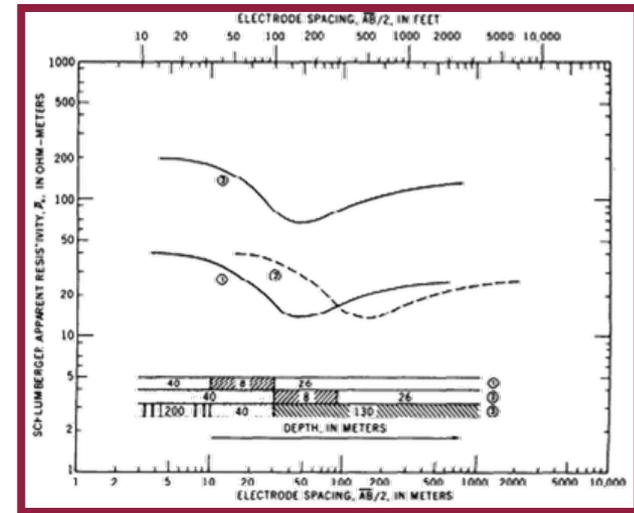
$$I_z/I_t = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(2z/\overline{AB}),$$

dove I_z è la corrente confinata tra il piano campagna e la profondità z ;
 I_t è la corrente totale immessa nel suolo

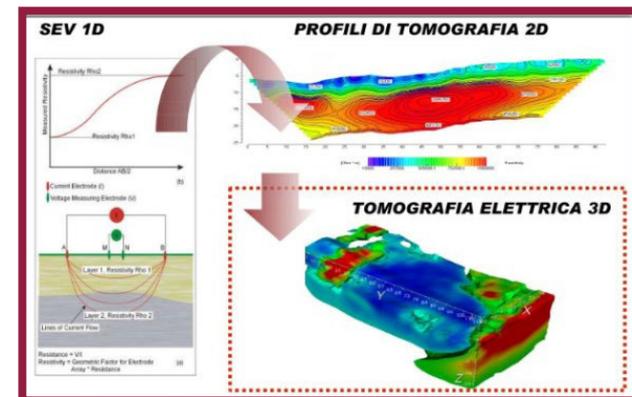
Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici: sondaggi elettrici verticali (SEV)

- ✓ I valori di **resistività apparente (ρ)** vengono diagrammati in funzione della distanza tra gli elettrodi di corrente (a) (espressa in scala logaritmica).
- ✓ Aumentando la distanza tra gli elettrodi aumenta la profondità di investigazione, che varia tra $1/4 - 1/5$ della lunghezza dello stendimento.
- ✓ La rappresentazione grafica (b) avviene grazie a software specifici per il confronto delle curve sperimentali con curve di resistività teoriche (**tomografie elettriche**).



(a)



(b)

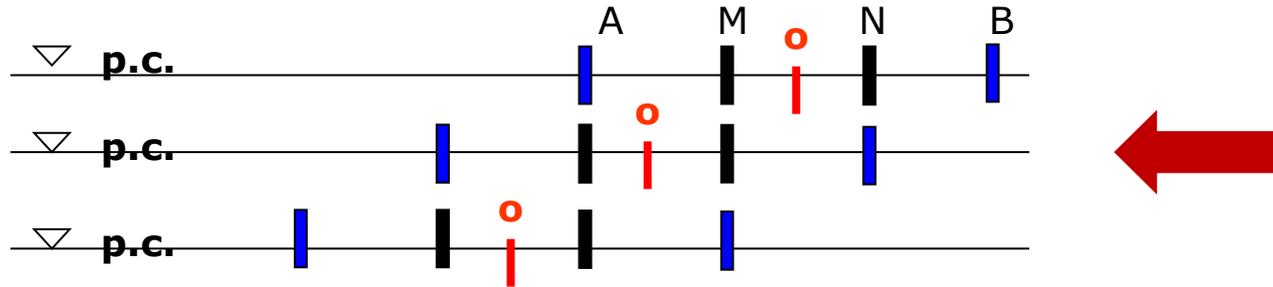
Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici: sondaggi elettrici orizzontali (SEO)

I **SEO** vengono realizzati spostando gli elettrodi lungo una linea direttrice.

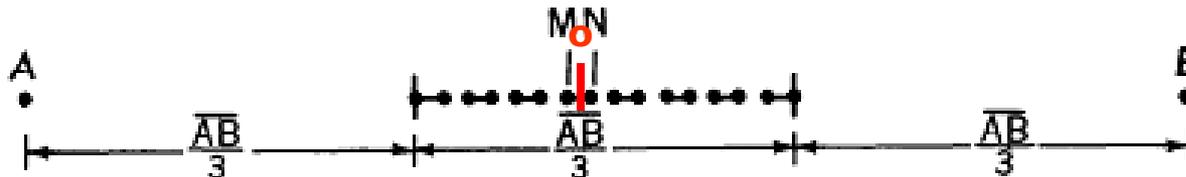
Stendimento di Wenner:

I quattro elettrodi vengono spostati in blocco lungo una determinata direttrice.



Stendimento di Schlumberger:

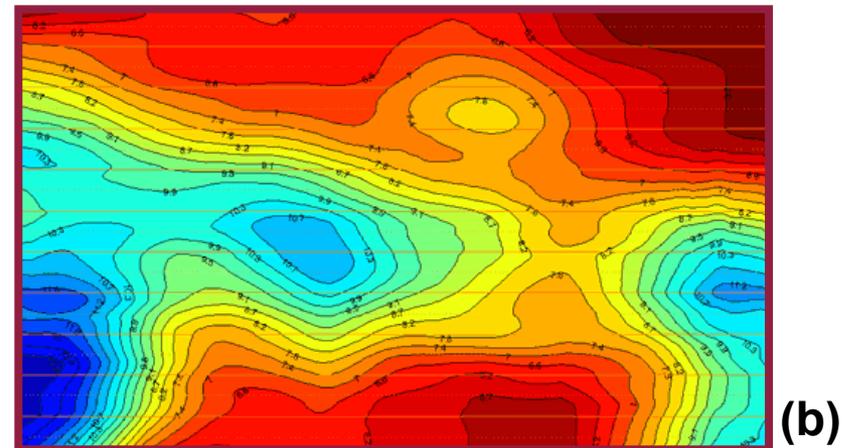
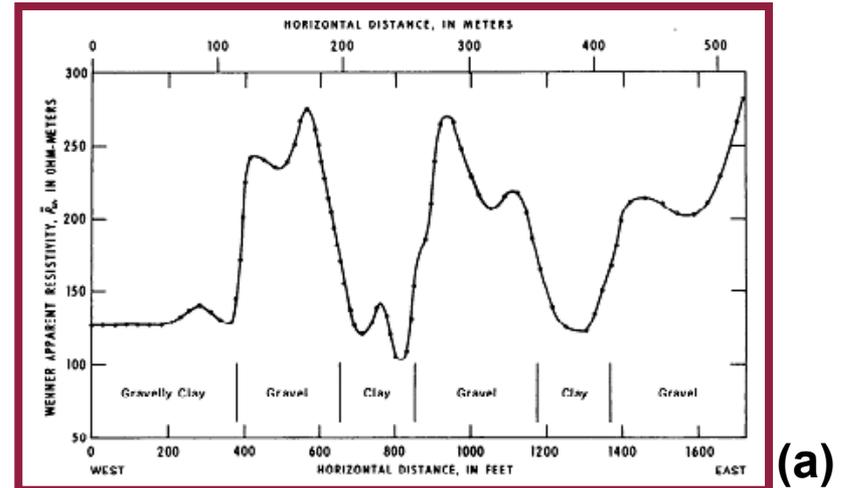
Si mantengono fissi a distanza relativamente elevata gli elettrodi di corrente A e B e si muovono solamente quelli di potenziale M e N lungo una determinata direttrice.



Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici: sondaggi elettrici orizzontali (SEO)

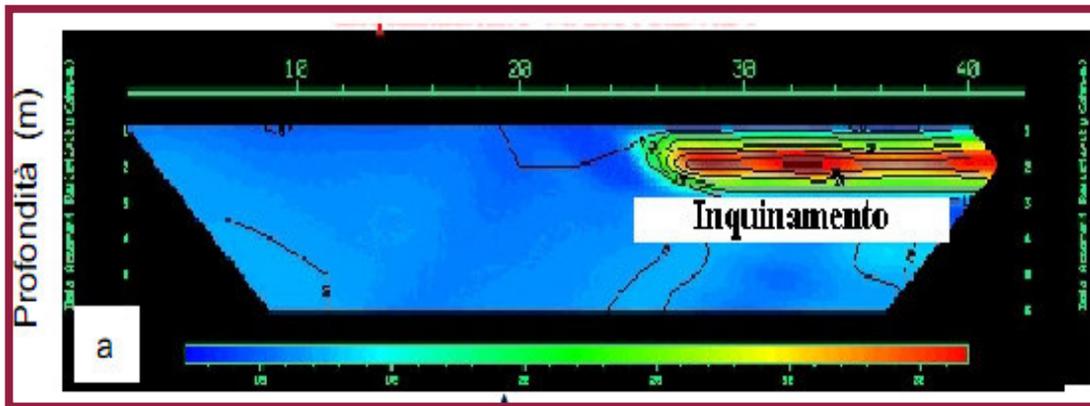
- ✓ I risultati dei sondaggi SEO vengono presentati diagrammando il valore di “resistività apparente” (ρ) in funzione della distanza tra il “centro geometrico” dello stendimento (0) ed un punto stabilito (a).
- ✓ La rappresentazione grafica (b) avviene nello stesso modo dei sondaggi SEV (tomografie elettriche).



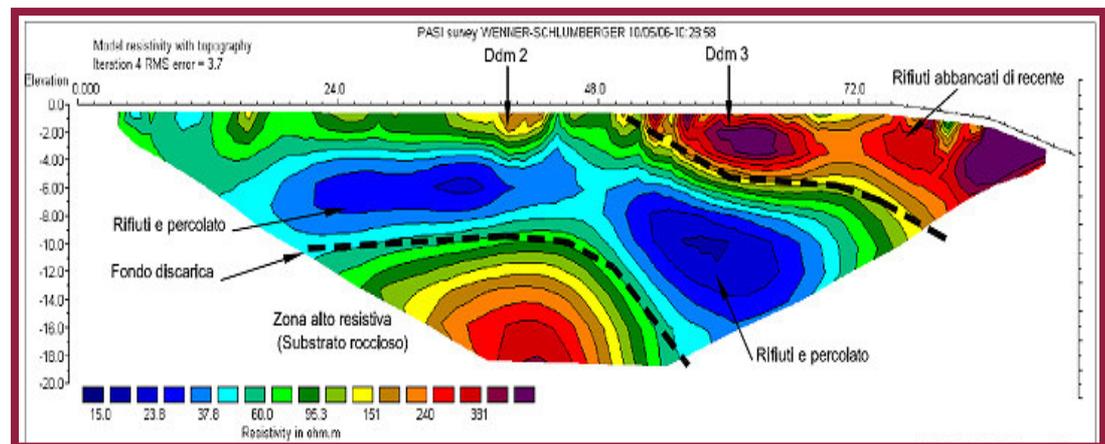
Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici: esempi applicativi

I fluidi organici (idrocarburi, percolato) che aderiscono alle pareti dei pori aumentano la resistività naturale del terreno.



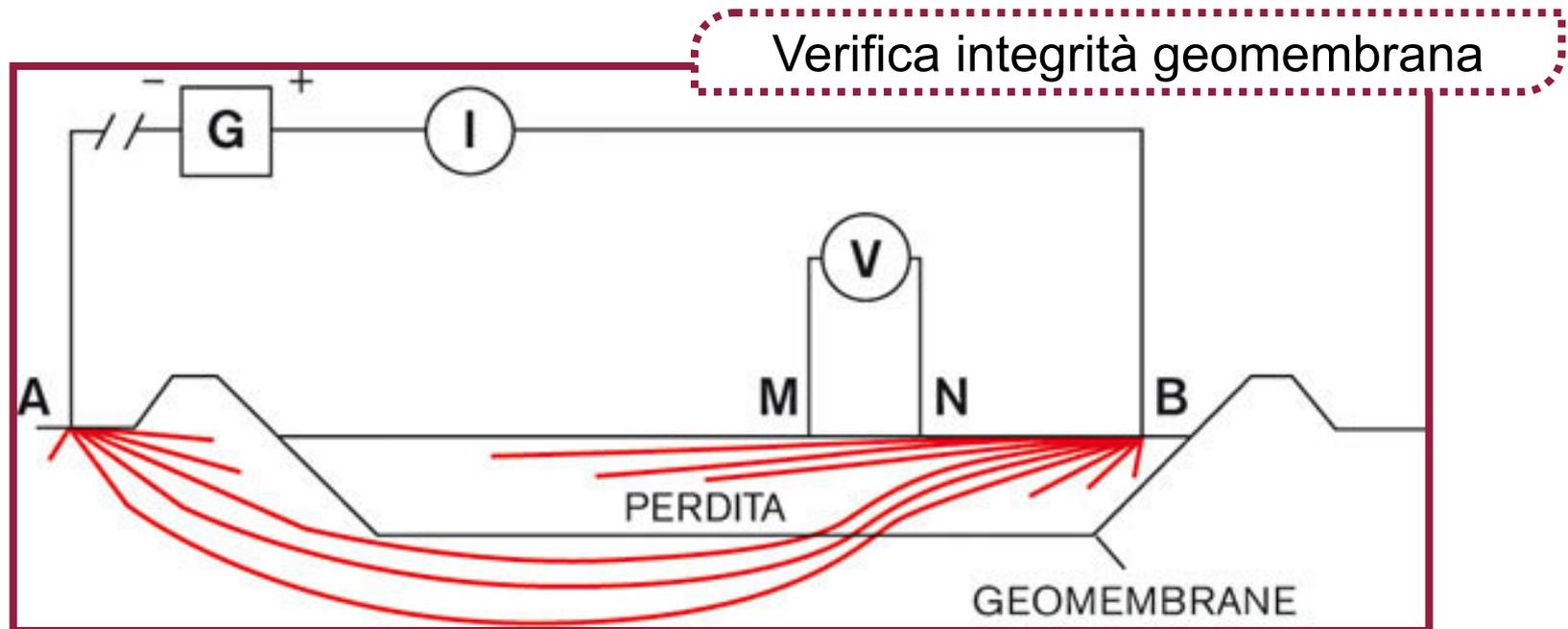
Distributore di carburante



Discarica

Le Indagini indirette

Metodi geoelettrici: esempi applicativi

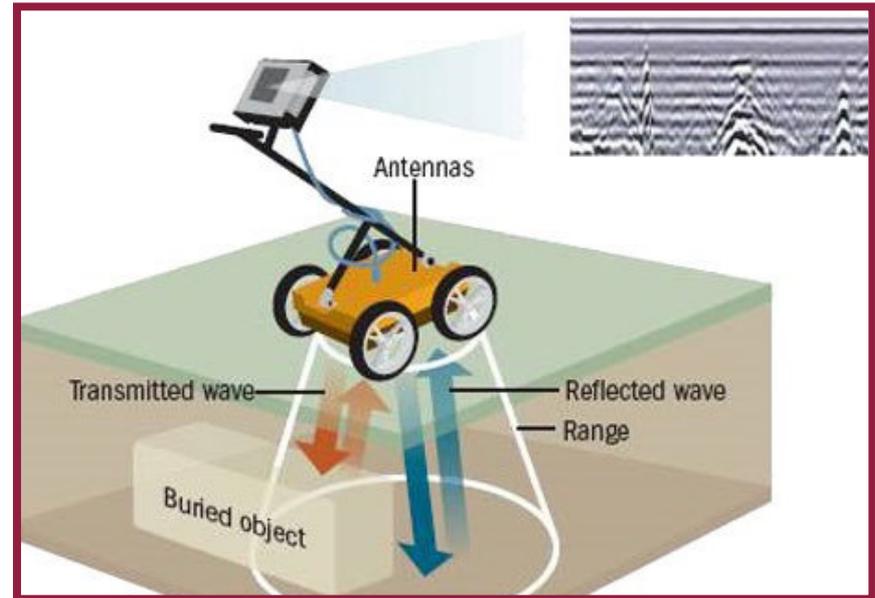


Il polietilene ad alta densità (HDPE) è caratterizzato da un'elevata resistività elettrica. In corrispondenza di aperture del telo in HDPE (fori millimetrici, lesioni, saldature aperte) il gradiente di resistività risulta accentuato a causa del passaggio di corrente elettrica.

Le Indagini indirette

Georadar

- ✓ Il **georadar** o **GPR** (Ground Penetrating Radar) permette di identificare i corpi sepolti di qualsiasi natura (rifiuti, contaminazioni,...) in grado di modificare i caratteri elettromagnetici del sottosuolo.
- ✓ Il GPR, infatti, utilizza **onde elettromagnetiche ad alta frequenza** emesse da una antenna che quando colpiscono un oggetto vengono in parte riflesse e intercettate da una antenna ricevente.



Le Indagini indirette

Georadar

Il parametro misurato è il **tempo** (t_r) impiegato dall'onda per ritornare in superficie come onda riflessa.

$$t_r = \frac{2h}{v} = \frac{2h}{c} \sqrt{\epsilon_r}$$

dove

- **h** è la profondità della discontinuità;
- **v** è la velocità dell'impulso radar;
- **c** la velocità della luce;
- **ϵ_r** è la costante dielettrica relativa del mezzo attraversato.

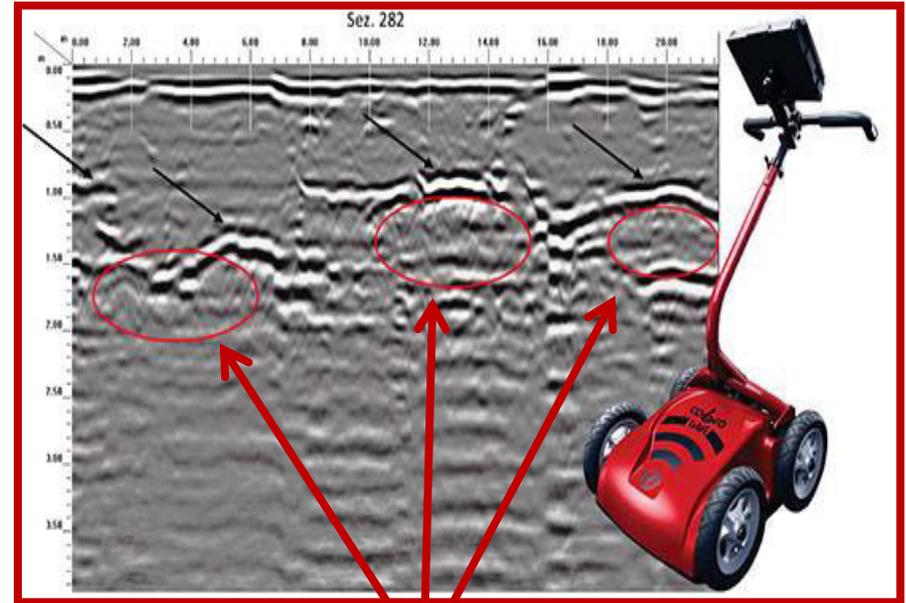
Conoscendo la velocità dell'impulso radar si riesce a trasformare i tempi doppi sopra descritti in misure di profondità.

Le Indagini indirette

Georadar: la restituzione dei risultati



**Presenza
tubazione**



**Deformazione
campo
elettromagnetico**

Le Indagini indirette

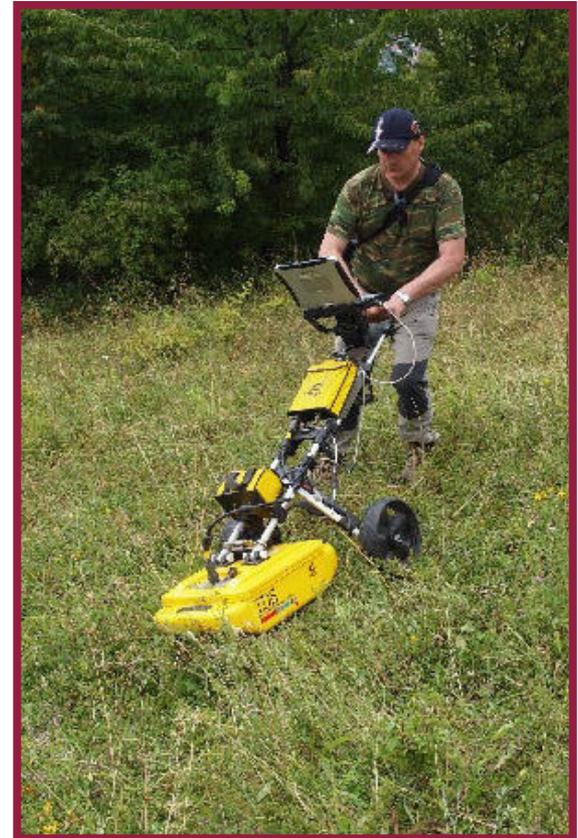
Georadar

Vantaggi

- ✓ Metodo completamente non invasivo.
- ✓ Rapidità di acquisizione di dati di elevato dettaglio.
- ✓ Sezioni continue in tempo reale del sottosuolo.
- ✓ Possibilità di indagine in luoghi chiusi.

Svantaggi

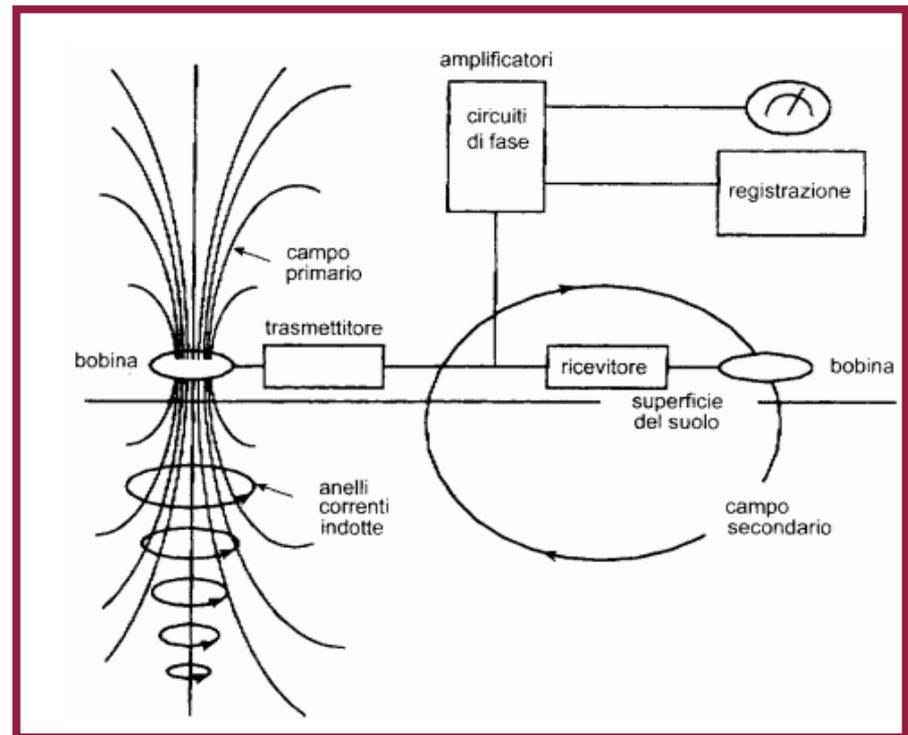
- ✓ Perdita di dettaglio all'aumentare della profondità.
- ✓ Profondità di indagine condizionata dalla presenza di terreni saturi d'acqua e banchi di argilla (in tal caso la max profondità = 0,5-1 m).



Le Indagini indirette

Metodi elettromagnetici

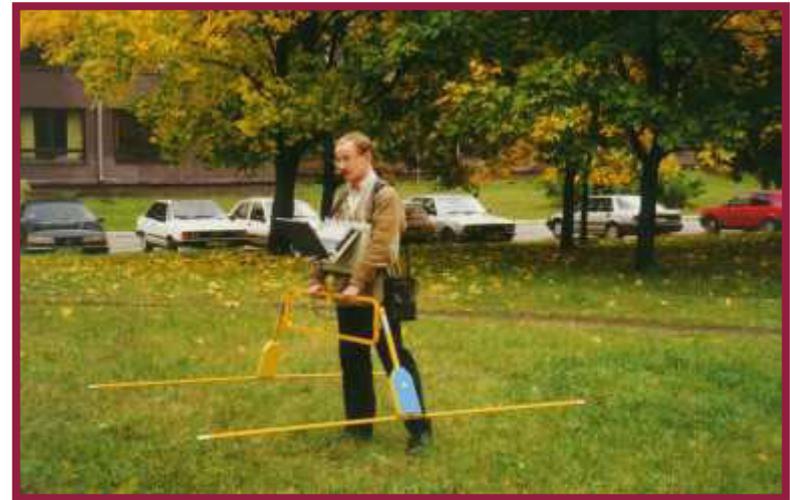
- ✓ Forniscono indicazioni sulla presenza nel sottosuolo di materiali con differenti proprietà elettromagnetiche; vengono applicati per ricercare **corpi o inquinanti conduttivi in tutti i tipi di terreno**.
- ✓ Il metodo utilizza la generazione di un **campo elettromagnetico primario**, detto **primario** che induce nel terreno la circolazione di una corrente.
- ✓ La corrente indotta originerà a sua volta un **campo elettromagnetico secondario**, la cui intensità è proporzionale alla conduttività del materiale.



Le Indagini indirette

Metodi elettromagnetici

- ✓ Il parametro misurato nei metodi elettromagnetici è la **conduttività** elettrica del mezzo, ossia l'inverso della resistività.
- ✓ La conduttività elettrica dei materiali geologici è fortemente dipendente dal contenuto di acqua e dalla concentrazione degli elettroliti disciolti.
- ✓ L'argilla e il limo hanno, tipicamente, elevati valori di conducibilità elettrica dato il loro elevato contenuto di ioni liberi.
- ✓ La sabbia e la ghiaia, dato il minore contenuto di ioni liberi, hanno conduttività minori.



Le Indagini indirette

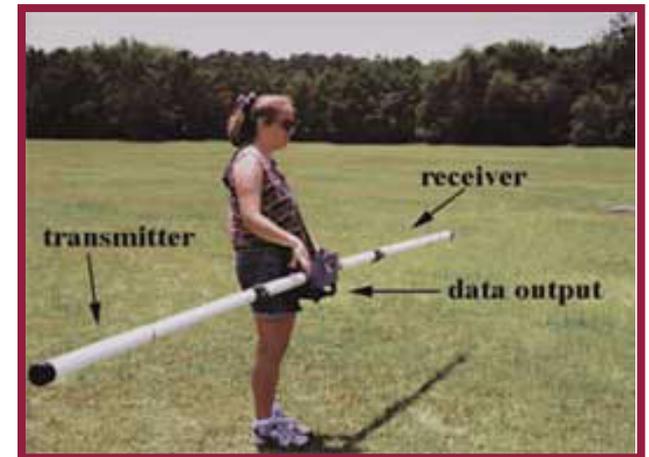
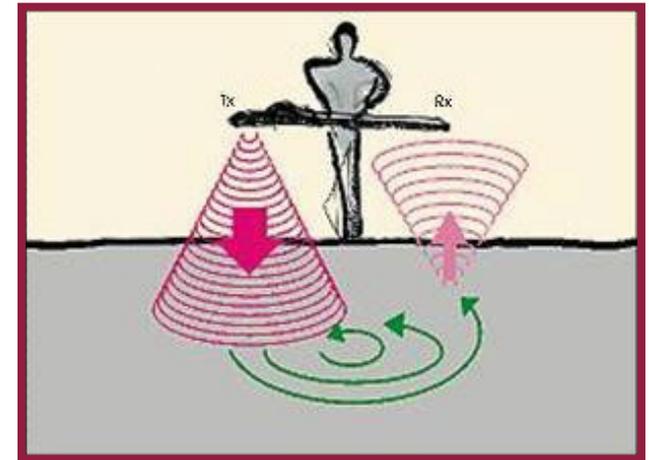
Metodi elettromagnetici

Vantaggi

- ✓ Velocità di applicazione.
- ✓ Precisione nell'individuazione dei corpi conduttivi.
- ✓ Elevata capacità di evidenziare discontinuità a forte sviluppo verticale.
- ✓ Costi contenuti.

Svantaggi

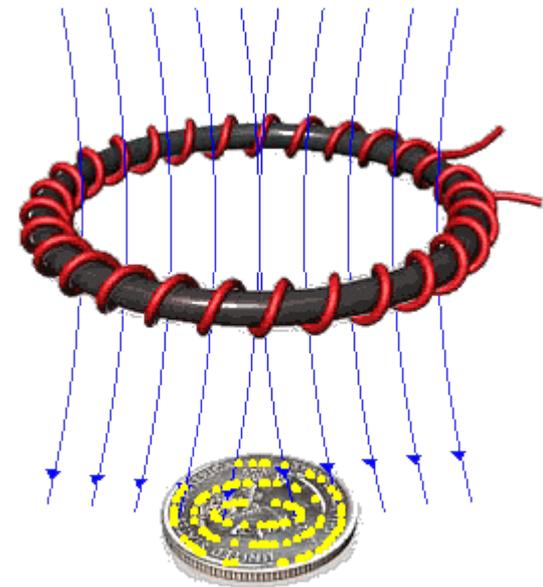
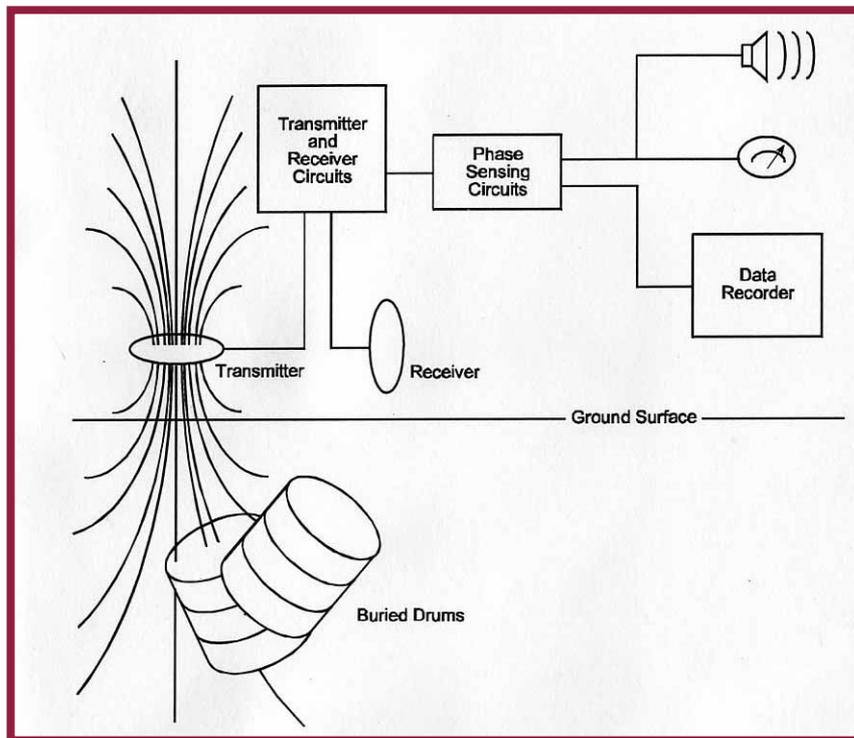
- ✓ Potenziale influenza sui risultati di interferenze prodotte in presenza di cavi elettrici e corpi metallici in profondità
- ✓ Limitata applicazione in presenza di contaminanti poco conduttivi



Le Indagini indirette

Metal detection

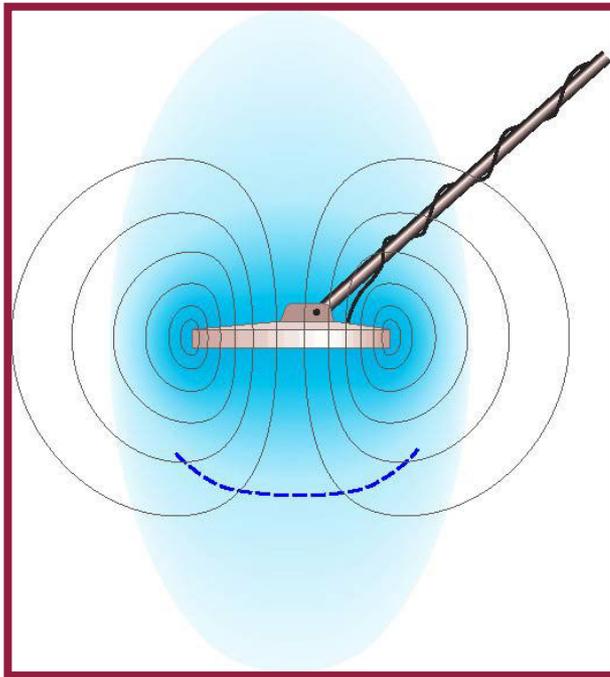
I **metal detector (MD)** operano secondo lo stesso principio dei metodi elettromagnetici e sono ampiamente utilizzati per la localizzazione di **oggetti metallici (ferrosi e non ferrosi)** interrati.



Le Indagini indirette

Metal detection

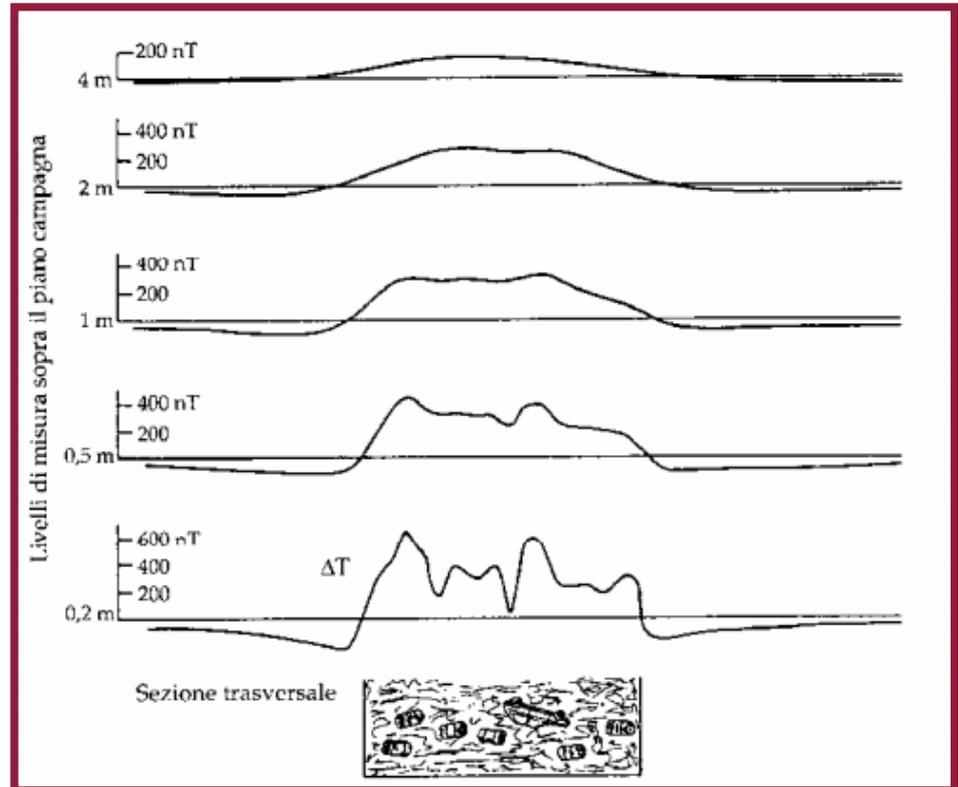
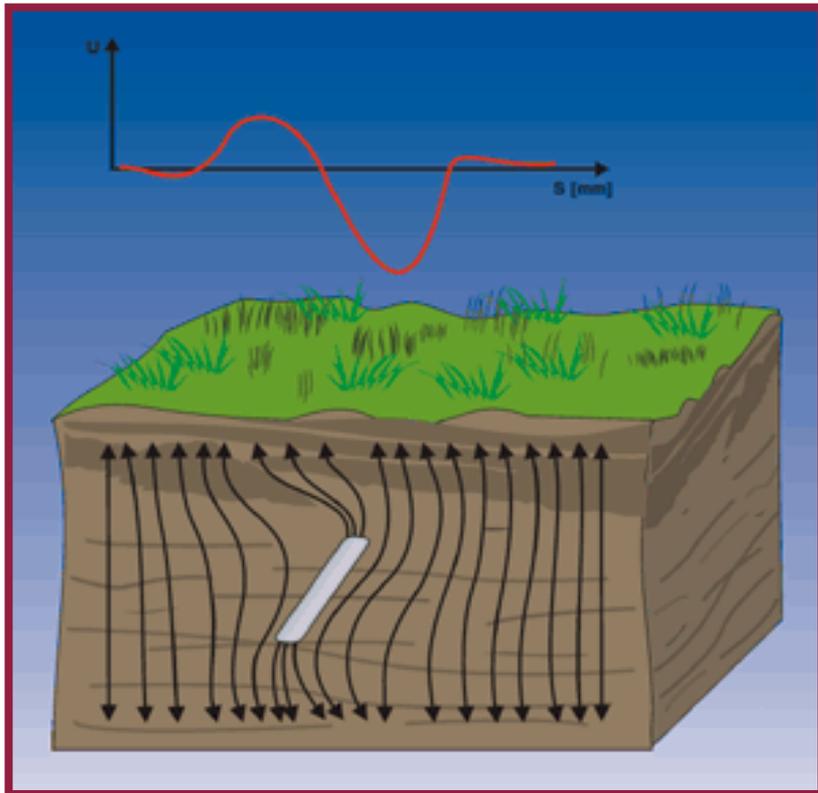
I **MD** forniscono un segnale **direttamente proporzionale alla sezione trasversale** dell'oggetto indagato e **inversamente proporzionale alla sesta potenza della sua distanza dalla superficie**, pertanto non sono adatti quando le profondità di indagine superano i 2-3 metri.



Le Indagini indirette

Metodi magnetici

I **magnetometri** valutano la distorsione locale del campo magnetico terrestre [Tesla], consentendo di individuare **posizioni e dimensioni degli oggetti ferromagnetici** interrati.



Le Indagini indirette

Metodi magnetici

Limiti di rilevabilità tramite magnetometria di fusti cilindrici metallici interrati in funzione delle loro dimensioni.

Fusto cilindrico		Profondità limite di rilevabilità (m)
Diametro (m)	Lunghezza (m)	
0.07	0.21	1.40
0.14	0.42	2.30
0.28	0.84	3.80
0.70	2.10	7.50
1.40	4.20	12.60
2.80	8.40	21.20

Le Indagini indirette

Metodi magnetici

Vantaggi

- ✓ Strumentazione maneggevole e adatta a qualsiasi tipo di terreno accidentato.
- ✓ Il metodo è facilmente applicabile anche per indagini su bacini idrici attraverso l'impiego di un'imbarcazione.

Svantaggi

- ✓ L'indagine è limitata esclusivamente all'individuazione di materiali ferrosi (ferromagnetici).
- ✓ Limitazioni notevoli dovute alla interferenza con tubazioni, recinzioni o altri oggetti di ferro eventualmente presenti nell'area, linee dell'alta tensione.



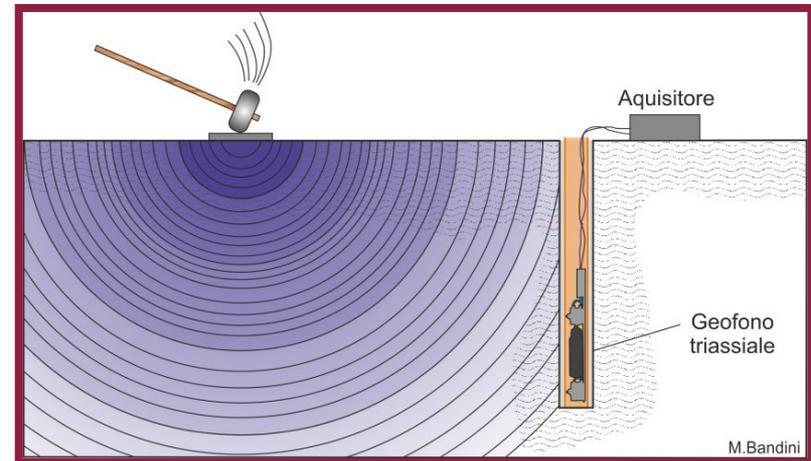
Le Indagini indirette

Metodi sismici

Le **indagini sismiche** sfruttano la proprietà dei terreni di lasciarsi attraversare, a diverse velocità, dalle **onde sismiche**.

Tali indagini vengono utilizzate per **valutare**:

- ✓ andamento stratigrafico del sottosuolo;
- ✓ differente densità del mezzo investigato potenzialmente dovuta a masse sepolte.



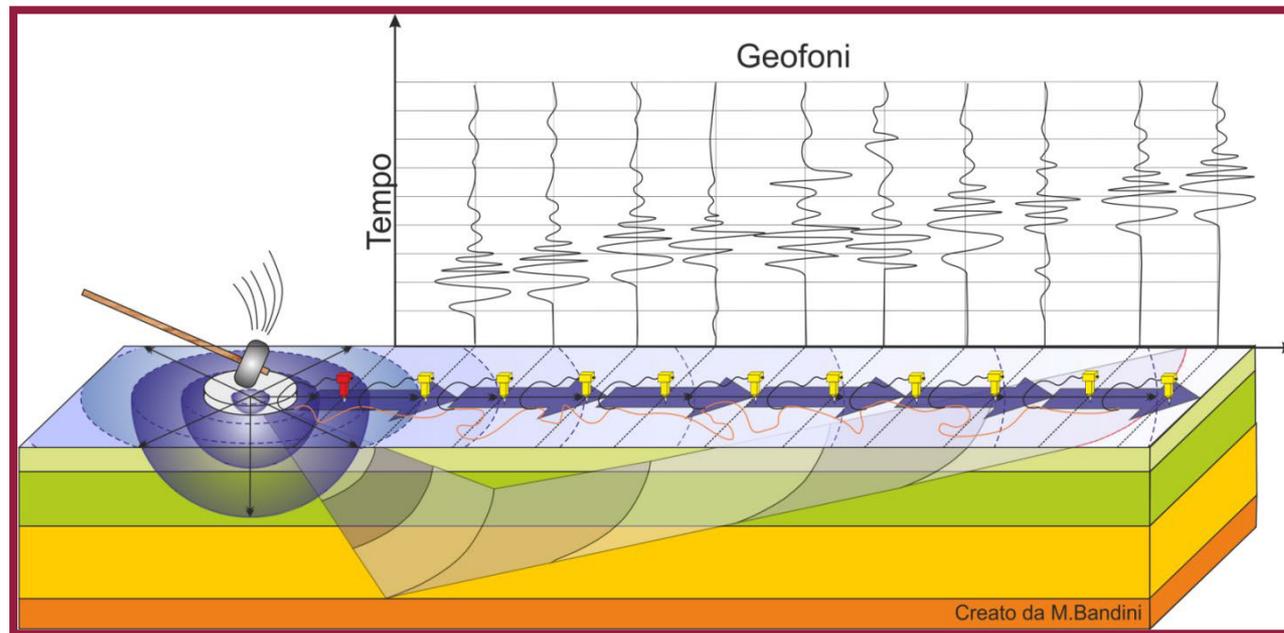
I metodi sismici consistono nella misura della **velocità**, v [m/s], delle **onde sismiche** di compressione prodotte dall'energizzazione del terreno mediante una **sorgente sonora**.

Le Indagini indirette

Metodi sismici

La **sorgente sonora** può essere costituita da:

- ✓ una piccola carica esplosiva;
- ✓ una massa battente sul terreno.



L'onda sismica riflessa viene registrata in superficie attraverso dei **ricevitori (geofoni)**.

Le Indagini indirette

Metodi sismici

I **metodi di misura** adoperati nelle prospezioni sismiche possono essere di due tipi:

- ✓ **a rifrazione**: misura il tempo impiegato dalle onde sonore a percorrere l'interfaccia di due strati caratterizzati da differenti velocità sonore;
- ✓ **a riflessione**: misura il tempo di riflessione delle onde, in riferimento alle onde sonore riflesse dall'interfaccia tra due strati.



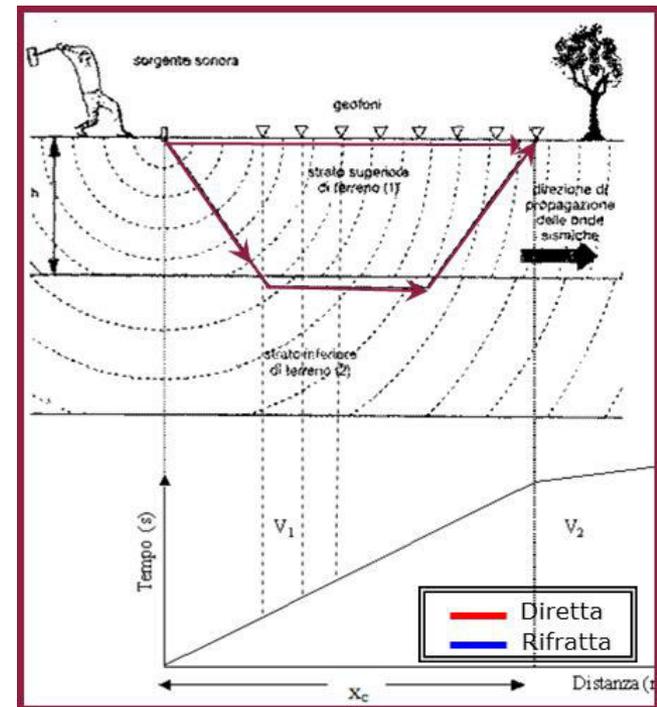
Le Indagini indirette

Metodi sismici a rifrazione

- ✓ Si utilizza **una sorgente sonora** e una serie di geofoni allineati.
- ✓ Vengono quindi misurati **l'istante di energizzazione** del terreno ed **i tempi di arrivo** delle onde ai vari geofoni.
- ✓ Note le distanze tra sorgente sonora e ciascun geofono, e i tempi di arrivo delle onde, è possibile costruire un **diagramma distanza-tempo (dromocrona)**.
- ✓ Note le velocità di arrivo delle onde rifratte, è possibile determinare la **profondità di rifrazione**:

$$h_1 = \frac{x_c \sqrt{v_2 - v_1}}{2 \sqrt{v_1 + v_2}}$$

con x_c distanza a cui onda diretta e rifratta arrivano insieme al geofono



Le Indagini indirette

Metodi sismici

Vantaggi

- ✓ Metodo relativamente semplice ed economico

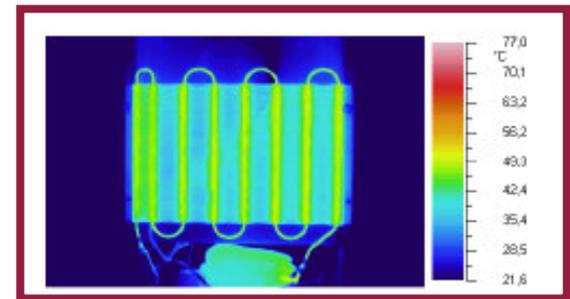
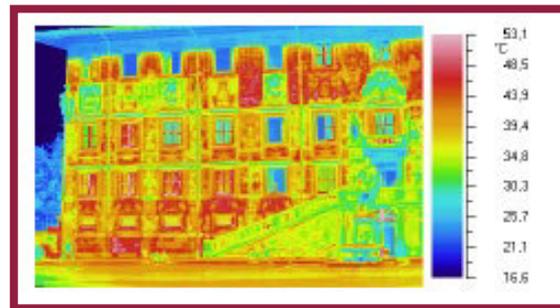
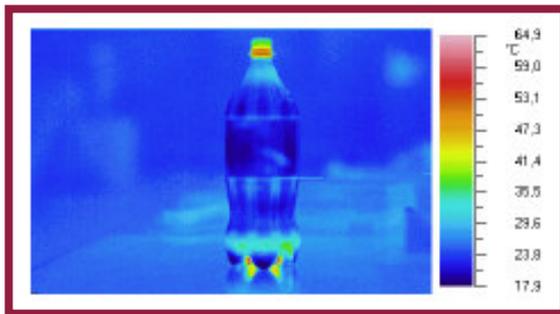
Svantaggi

- ✓ Ampi spazi per il posizionamento della linea di geofoni (almeno 5 volte la profondità da ispezionare);
- ✓ Strati diversi ma con stessa velocità di propagazione delle onde sonore non possono essere individuati;
- ✓ Gli strati sottili sono difficilmente individuabili;
- ✓ Il metodo è molto sensibile al rumore e alle vibrazioni ambientali.

Le Indagini indirette

Metodi termografici

- ✓ Ogni corpo emette uno spettro di **radiazioni elettromagnetiche**, la cui intensità dipende dalla **temperatura**: è quindi possibile rivelare differenze di temperatura da misure spettrografiche.
- ✓ L'applicazione del metodo termografico in campo ambientale è basata sul rilevamento delle **variazioni locali di temperatura** dovute:
 - alla presenza di corpi sepolti, caratterizzati da conducibilità termica differente rispetto ai materiali circostanti;
 - dalla presenza di reazioni chimiche esotermiche.



Le Indagini indirette

Metodi termografici

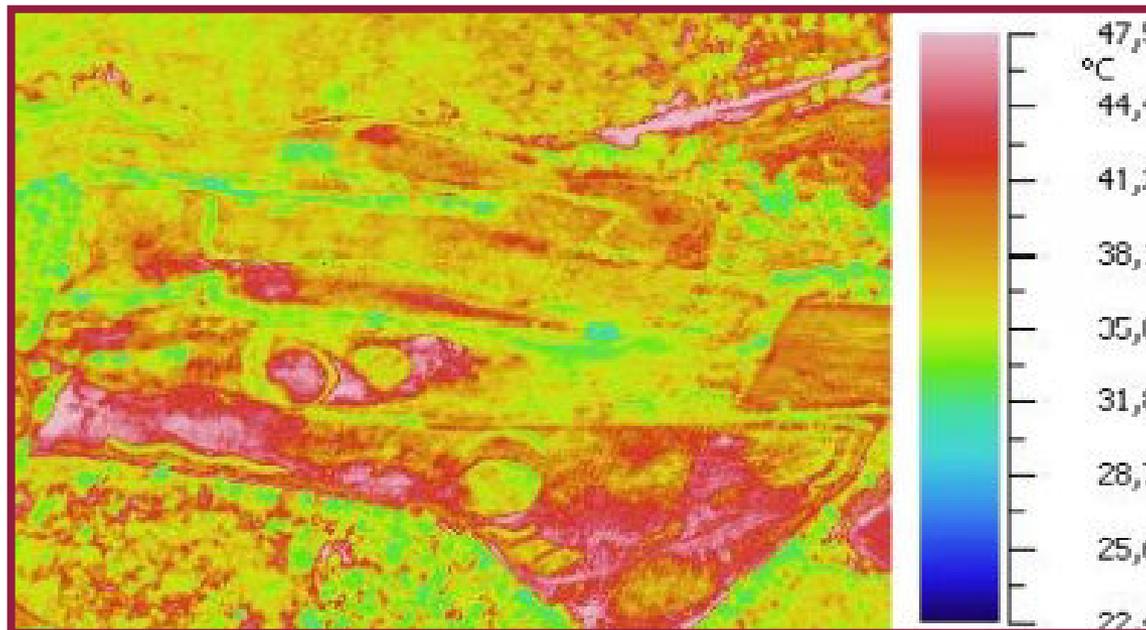
- ✓ L'apparecchiatura è costituita da uno **scanner all'infrarosso termico** che registra le lunghezze d'onda emesse da una porzione ristretta del suolo.
- ✓ Il **sensore** è tenuto circa 0,5 m sopra la superficie del suolo e registra la radiazione totale del corpo che sta "inquadrando".
- ✓ Queste misure forniscono la **temperatura dello strato superficiale**.
- ✓ Le **condizioni ambientali richieste** sono un ridotto carico solare (le misure dovrebbero essere preferibilmente eseguite nella tarda nottata o prima dell'alba) e un tempo asciutto.



Le Indagini indirette

Metodi termografici: individuazione di rifiuti sepolti

Il riconoscimento di **discariche abusive di materiali organici** è piuttosto **immediato** perché, durante la loro decomposizione, si raggiungono temperature di 40-50° C. L'individuazione di **discariche di rifiuti industriali** a basso contenuto organico risulta invece **più complessa** perché la loro presenza non sempre è accompagnata da fenomeni di esotermia.

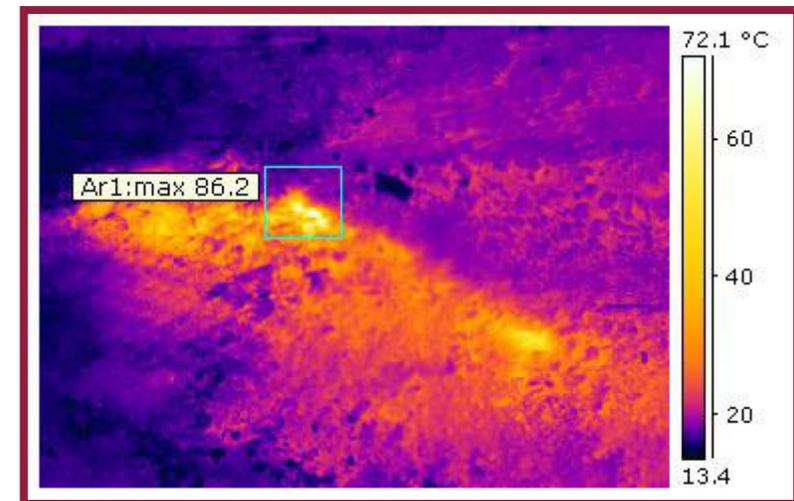
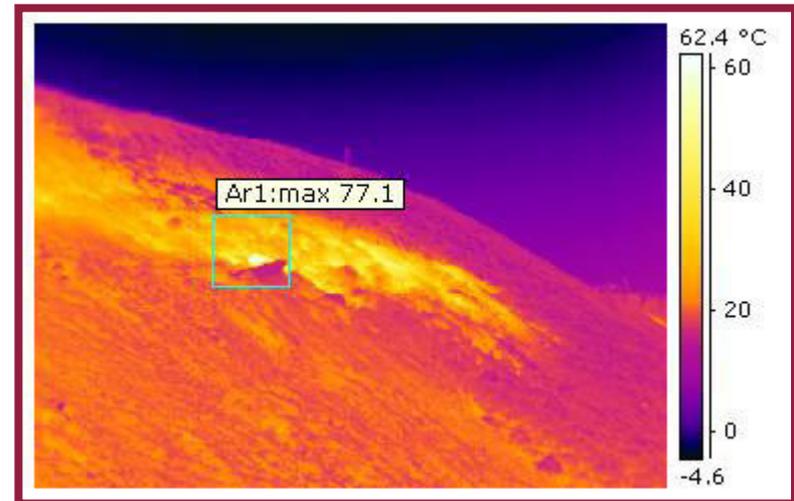


Le Indagini indirette

Metodi termografici: individuazione di discariche di RSU

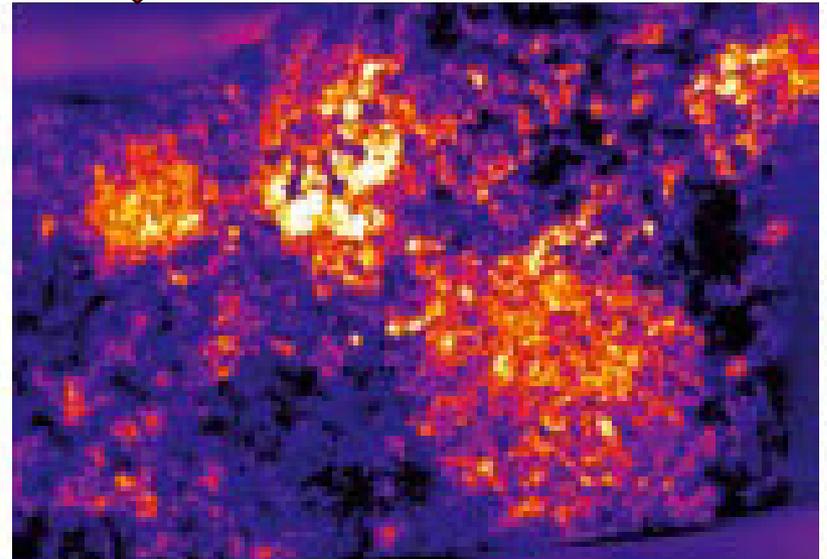
La **Termografia ad Infrarossi** permette di monitorare, in totale sicurezza, le discariche individuando:

- ✓ perdite di **percolato** verso i terreni circostanti;
- ✓ presenza di eccessive sacche di **biogas** con attività negli strati inferiori che potrebbero compromettere la sicurezza dell'abbanco.



Le Indagini indirette

Metodi termografici: rilevamento di incendi in depositi di rifiuti



Le Indagini indirette

Metodi geofisici per la valutazione delle condizioni geologiche e idrogeologiche

	Rifrazione sismica	Metodi elettromagnetici	Georadar	Geoelettrica
Profondità di indagine	> 30 m	> 30 m	0,9-4,5 m (fino a 27 m per ghiaia e sabbia pulita)	> 30 m
Strutture individuate	Spessore sedimento, roccia, fratture, faglie, falda	Distribuzione sabbia e argilla, roccia, fratture, faglie, falda	Spessore sedimento, roccia, fratture, faglie, falda (raramente)	Distribuzione sabbia e argilla, roccia, fratture, faglie, falda
Interferenze antropiche	Rumore urbano, calcestruzzo	Superfici metalliche, trasmettitori radio, linee elettriche, condotte e cavi interrati	Armature metalliche	Calcestruzzo e superfici metalliche
Interferenze naturali	Suoli gelati		Suoli conduttivi	Suoli molto conduttivi
Risoluzione	0,6-0,9 m	variabile	< 0,3 m	1,5 (verticale e orizzontale)
Dati utilizzabili in campo	Se richiesto	Dipende dal metodo specifico	Si	No
Tempo	Lento-moderato	Moderato-veloce	Lento-veloce	Lento-moderato
Costo	Moderato-alto	Basso-moderato	Basso-moderato	Moderato-alto

[US-EPA, 1997]

Le Indagini indirette

Metodi geofisici per la localizzazione di oggetti interrati

	Metal detection	Metodi elettromagnetici	Georadar	Magnetometrica
Obiettivo	Riconoscimento	Riconoscimento	Indagine mirata	Riconoscimento
Profondità di indagine	3-3,6 m (fusti da 0,21 m ³)	2,4-3 m	0,9-4,5 m	3-4,5 m
Materiali individuati	Metalli	Metalli e non metalli	Metalli e non metalli	Materiali ferrosi
Interferenze antropiche	Superfici metalliche e linee elettriche	Superfici metalliche e linee elettriche	Armature metalliche	Superfici metalliche e linee elettriche
Interferenze naturali	Suoli mineralizzati	Suoli salini e molto conduttivi	Suoli conduttivi	Suoli mineralizzati e depositi ferrosi
Risoluzione	20% (orizzontale e verticale)	1,2-3,6 m in verticale 1,2 in orizzontale	0,03-1,2 m	10-15% (verticale e orizzontale)
Dati utilizzabili in campo	Si	Si	Si	Si
Tempo	Moderato-veloce	Moderato-veloce	Lento-moderato	Veloce
Costo	Basso-moderato	Basso-moderato	Basso-moderato	Basso-moderato

[US-EPA, 1997]

Le Indagini indirette

Metodi geofisici per la caratterizzazione del pennacchio inquinante

	Metodi elettromagnetici	Georadar	Geoelettrica
Profondità di indagine	1-5 m	0,9-4,5 m	3-4,5 m
Interferenze antropiche	Superfici metalliche trasmissioni radio, linee elettriche, cavi e condotte interrate	Armature metalliche	Calcestruzzo e superfici metalliche
Interferenze naturali		Suoli conduttivi, variazioni geologiche laterali	Suoli conduttivi, variazioni geologiche laterali
Risoluzione	Variabile	< 0,3 m	1,5 (verticale e orizzontale)
Dati utilizzabili in campo	Dipende dal metodo specifico	Si	No
Tempo	Moderato-veloce	Lento-veloce	Lento-moderato
Costo	Basso-moderato	Basso-moderato	Moderato-alto

[US-EPA, 1997]