

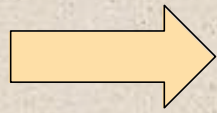
Modelli Matematici applicati al lago più contaminato del pianeta

Annamaria Mazzia

Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le
Scienze Applicate
Università di Padova

Sommario

- il luogo più contaminato del pianeta
 - impianto di Mayak
 - lago Karachai
 - villaggi contaminati
- progetto RaCos
 - obiettivi
 - simulazioni numeriche
 - strategie di protezione e recupero sul lago Karachai



Mayak

Regione di Chelyabinsk,
negli Urali del Sud,
Russia:
qui (e in altre due zone della
Russia) dopo il successo
della bomba americana su
Hiroshima e Nagasaki
fu costruita una città
chiusa, destinata alla produ-
zione di plutonio e tritio...





Città chiuse...

... città dove gli abitanti vivevano (e vivono) in relegazione forzata

... città che non appaiono sulle carte geografiche e che fino a un decennio fa erano irraggiungibili per i visitatori stranieri

... città con un nome seguito da un numero:

- Chelyabinsk-40 a 15 km da Kyshtym
- Chelyabinsk-65 altra zona militare e di forza-lavoro
- Chelyabinsk-70, laboratorio di esperimenti fisici legati alla produzione di Chelyabinsk-40.



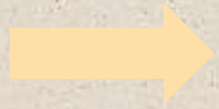
Chelyabinsk-40 è meglio nota come **MAYAK**
parola che significa FARO.

Fu costruita a partire dal 1945.

Era operativa già dal giugno del 1948.

La prima bomba atomica sovietica, fatta esplodere nell'agosto del 1949, in occasione del 70° compleanno di Stalin, fu costruita con plutonio prodotto a Mayak.

**TUTTA LA ZONA CHE CIRCONDA MAYAK È STATA DEFINITA
LA ZONA PIÙ CONTAMINATA DEL PIANETA.**

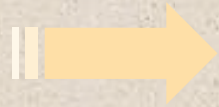


I DISASTRI DI MAYAK

- Per oltre 6 anni, fino al 1951, scorie liquide radioattive di medio e alto livello vennero sistematicamente riversate da Mayak nel fiume TECHA – unica risorsa idrica per i 24 villaggi che si affacciavano lungo il fiume, esponendo alla contaminazione radioattiva più di 100.000 abitanti della zona.
- Nei primi anni di apertura dell'impianto, non ci fu un controllo della radioattività nemmeno nelle fasi di produzione stessa. Gli operai ricevettero una dose media di radiazioni pari a 3 volte gli standards di allora (pari a 30 rem per anno – ora questi standards sono di 5 rem per anno...)

- Nel 1951, la radioattività del Techa raggiunse l'oceano Artico (anche se il 99% del materiale radioattivo rimaneva concentrato nei primi 35 km dalla centrale di Mayak). Fu allora proibito l'uso dell'acqua del fiume e dei suoi affluenti e alcuni villaggi furono evacuati. Furono costruite dighe e riserve artificiali, e gli scarichi di Mayak vennero rilasciati sempre più nel lago KARACHAI, senza sbocchi diretti nell'oceano.
- Nel 1957, un serbatoio di sedimenti radioattivi esplose, irradiando di plutonio una regione di 23.000 Km². Secondo solo a Chernobyl, è stato uno dei più gravi incidenti nucleari della storia.
- Nel 1967, il lago Karachai fu in secca: polveri radioattive, portate via dal vento, ricoprirono un'area di 2000 km².

Mayak: rilascio totale di radionuclidi nel lago Karachai	20.000.000 TBq
Attività della bomba di Hiroshima 12 ore dopo l'esplosione	5.550.000 TBq
Presente attività del lago Karachai	4.400.000 TBq
Incidente di Chernobyl del 1986	1.850.000 TBq
Incidente di Mayak del 1957	740.000 TBq
Scarico di sostanze radioattive nel fiume Techa	100.000 TBq
Polvere radioattiva sparsa dal Karachai nel 1967	22 TBq



EFFETTI DELLA RADIOATTIVITÀ

Un'ora lungo le sponde del lago Karachai basta per ricevere una dose fatale di radiazioni.



Il fiume Techa ha 400 milioni di metri cubi di acqua radioattiva a cielo aperto: un pesce pescato nel Techa è 100 volte più radioattivo del normale.



- **272.000** persone sono state esposte a radiazioni di alto livello
- risorse idriche per **124.000** abitanti sono state contaminate con isotopi radioattivi di alto livello
- aumento del **78%** di malati di leucemia e di cancro
- il **30%** dei bambini nasce con difetti e malformazioni genetiche
- il **50%** degli uomini e delle donne sono sterili



Dhenghiz Khazajev, Kunashak 2001.



September 2000 - BASHAKUL/RUSSIA



Vivere vicino a Mayak: Muslyumovo



September 2001 - MUSLOMOVO/RUSSIA



September 2001 - OLD KURMUNOVARUSSIA

GREENPEACE

A circa 40 km da Mayak, il villaggio non fu mai evacuato.
La maggior parte dei suoi abitanti ha contratto malattie legate alle radiazioni.
È un posto unico al mondo per la possibilità di studiare gli effetti delle radiazioni sulla vita umana nel corso di mezzo secolo...



September 2001 - MUSLOMOVO/RUSSIA



Mayak oggi

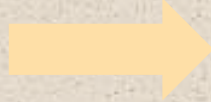


September 2001 - TECHA RIVER, MUSLOMUVO/RUSSIA

Molti reattori non sono operativi. Ma Mayak è ancora un centro per riprocessare scorie atomiche, per trattare scorie radioattive e per produrre combustibile MOX.

Nel 2001, il ministro dell'Industria Atomica Russa (MINATOM) ha offerto la centrale di Mayak come luogo di scarico di scorie e rifiuti radioattivi provenienti da paesi stranieri – 20 milioni di tonnellate di combustibile nucleare esaurito per 20 miliardi di dollari.

A fine maggio 2002, questo progetto è stato respinto dal corpo regolatore della Russia per la sicurezza nucleare.



Progetto RaCos

Radionuclide Contamination of Soil and Groundwater at the Lake Karachai Waste Disposal Site (Russia) and the Chernobyl Accident Site (Ukraine): Field Analysis and Modelling Study

Inizio del progetto: aprile 1997

Chiusura dei lavori: giugno 2001

Finanziamenti: 310,000 euro

Collaboratori

Dip. Metodi e Modelli per le Scienze Applicate - Padova

Centro Studi e Ricerche CRS4 - Cagliari

Università Tecnologica di Delft

Istituto di Geologia Ambientale dell'Accademia delle Scienze Russa – San Pietroburgo

Centro Ricerche e Sviluppo di Studi Radioecologici - Kyiv



Obiettivi (con particolare riferimento al lago Karachai)

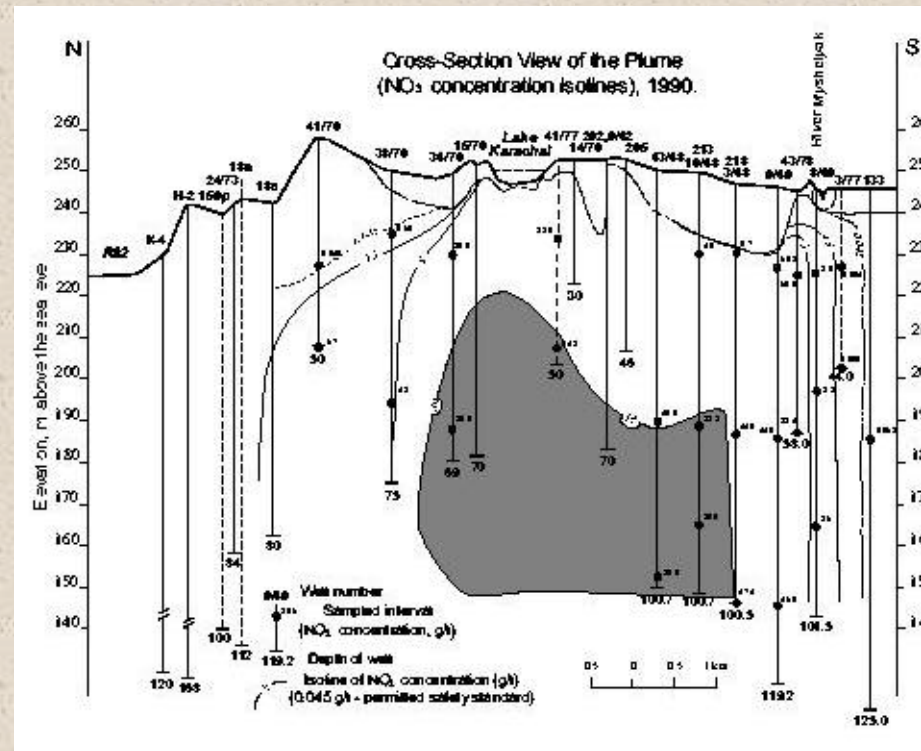
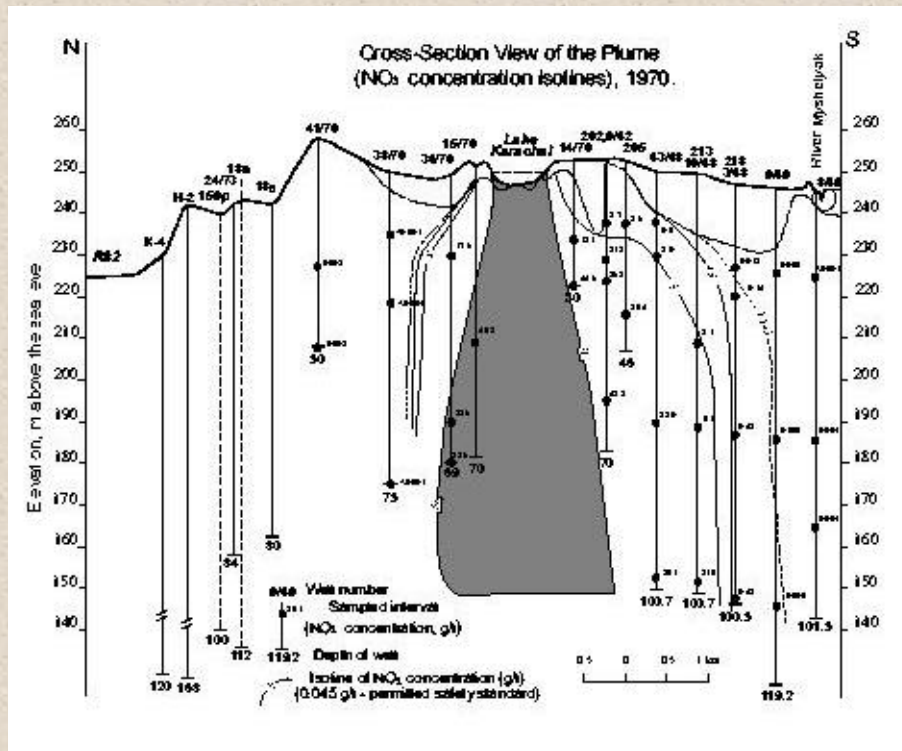
- caratterizzazione del sito contaminato
- sviluppi teorici e modellizzazione numerica dei più rilevanti processi chimici e fisici
- scelta di codici e software (calibrati, validati e testati) da applicare ai modelli numerici in modo da
 - ❖ valutare lo spostamento del pennacchio radioattivo
 - ❖ determinare l'impatto sulla qualità delle acque sotterranee
 - ❖ determinare un'analisi di strategie di protezione e di recupero del lago Karachai



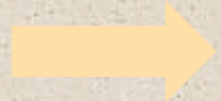
Maggiori difficoltà incontrate

- ✓ recupero, analisi e organizzazione delle informazioni disponibili
- ✓ *performance* di appropriati esperimenti
- ✓ selezione, calibrazione e confronto di codici per la risoluzione numerica del modello matematico
- ✓ simulazione degli scenari più "probabili" per una corretta predizione della migrazione dei radionuclidi


Descrizione del processo di migrazione dei radionuclidi




Basato sul monitoraggio dei nitrati di sodio.
Il pennacchio va sul fondo dell'aquifero e migra lateralmente.
La frontiera del pennacchio si muove a sud e nord del bacino alla
velocità di 70, 80 m/anno.

 Il modello matematico di flusso e trasporto

$$S \frac{\partial y}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left[K_s \frac{1+e c}{1+e' c} K_r (\vec{\nabla} y + (1+e c) h_z) \right] - j S_w e \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{r}{r_0} q^* + q$$

flusso 

$$\vec{v} = -K_s \frac{1+e c}{1+e' c} K_r (\vec{\nabla} y + (1+e c) h_z)$$

velocità di Darcy 

$$j \frac{\partial S_w c}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\mathbf{D} \vec{\nabla} c) - \vec{\nabla} \cdot (c \vec{v}) + q c^* + f$$

trasporto 

Simulazioni numeriche 3D

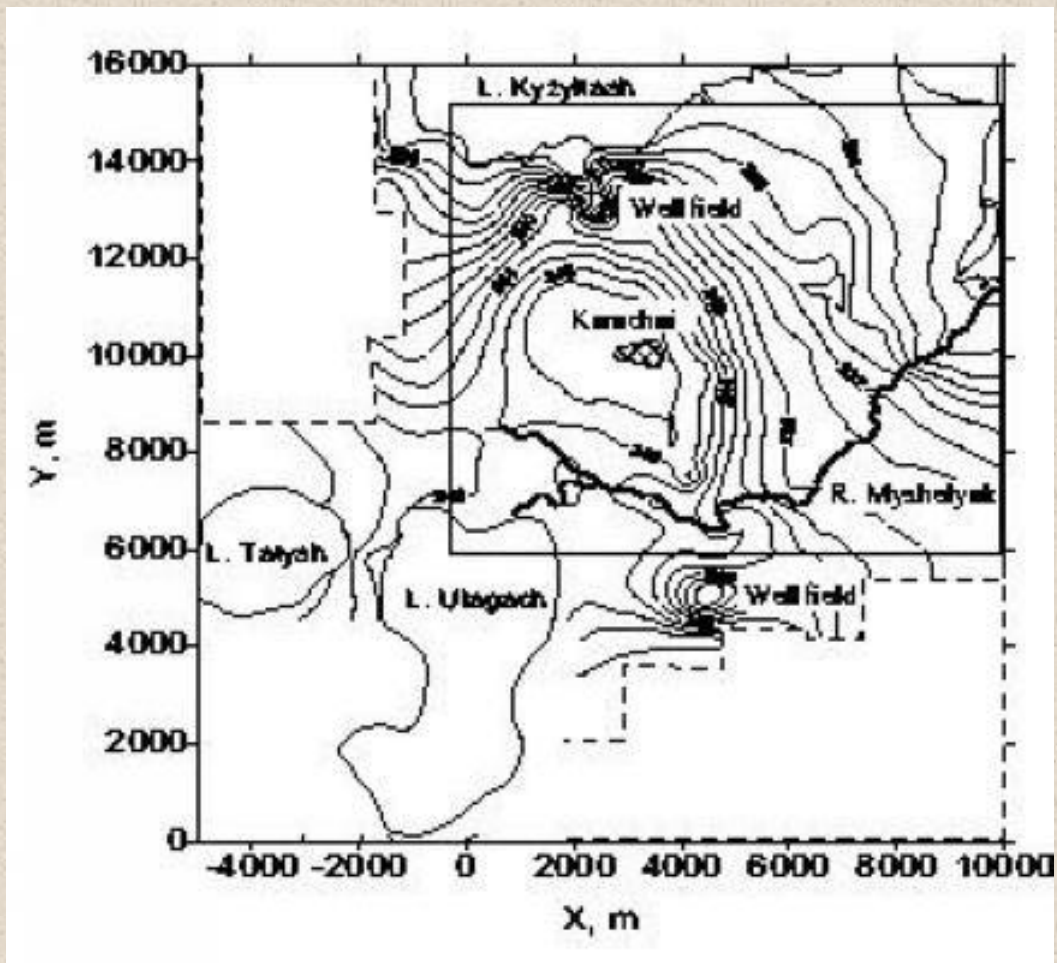
Sono stati utilizzati vari software 3D basati sulla formulazione agli Elementi Finiti di Galerkin delle equazioni alle derivate parziali che descrivono il flusso e il trasporto delle sostanze dissolte:

- METROPOL
- CODESA-3D
- DENSFLOW
- TOUGH2

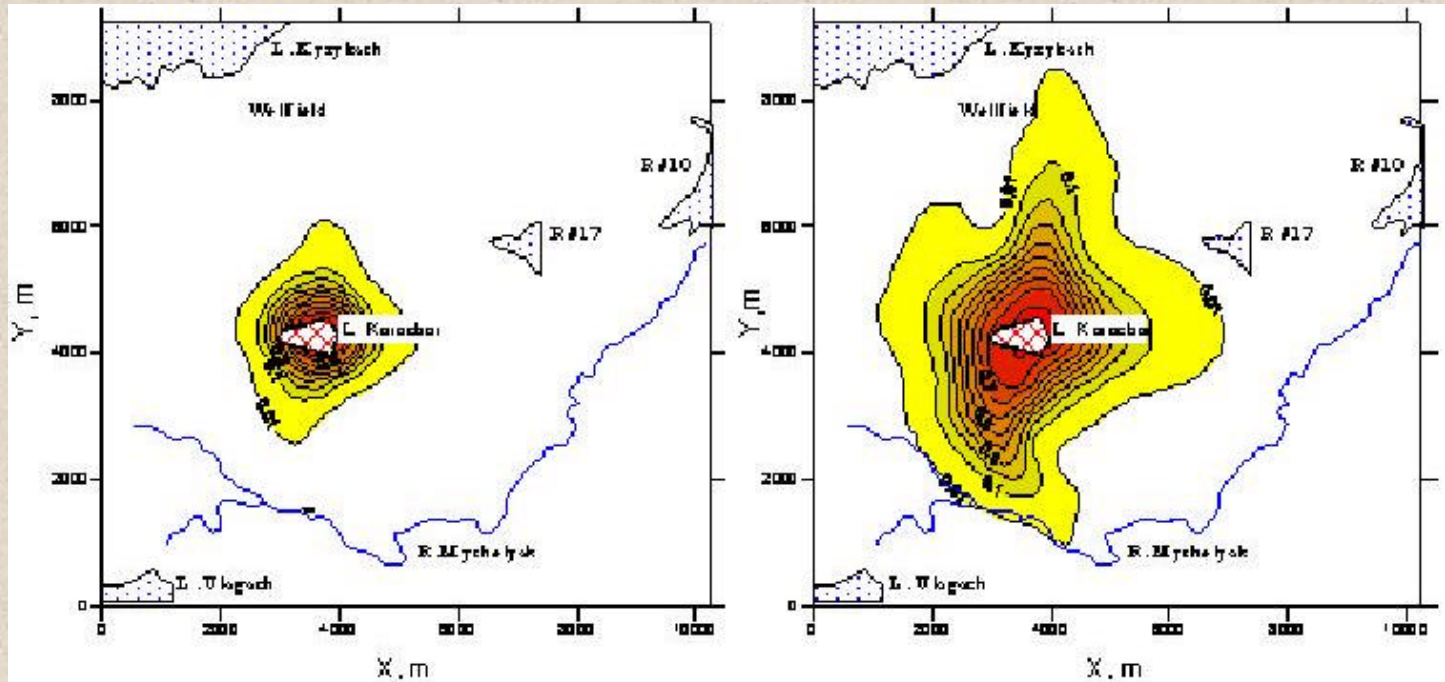
Simulazioni numeriche 2D

Approccio basato su una tecnica agli Elementi Finiti Misti e ai Volumi Finiti, altamente accurato e robusto, al fine di verificare l'accuratezza dei modelli 3D nella simulazione del movimento del contaminante radioattivo su sezioni verticali 2D.

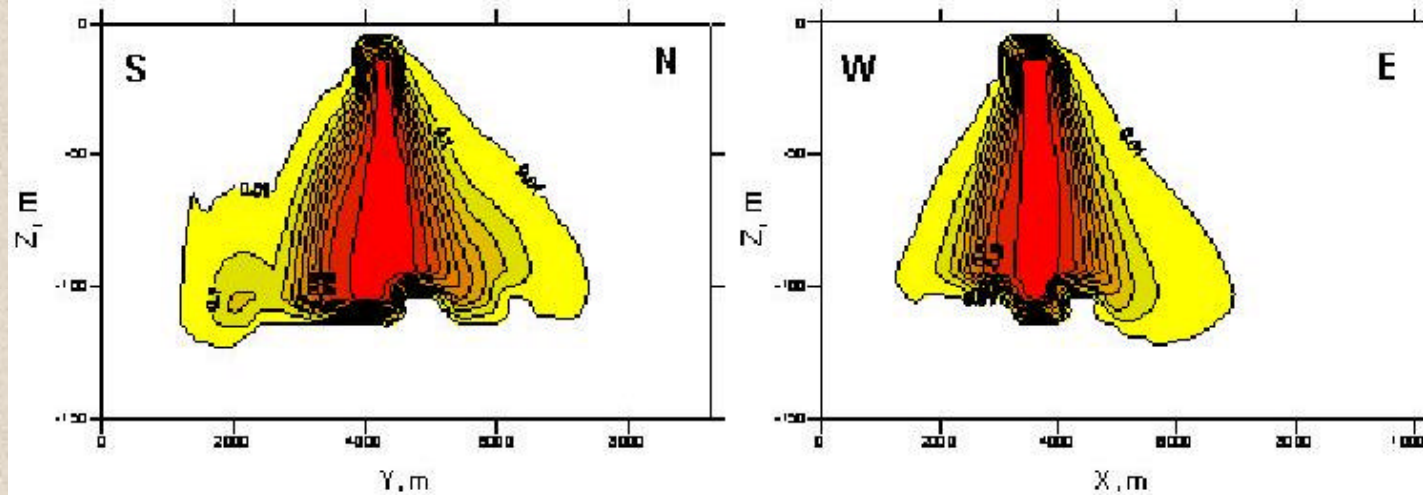
Modello regionale del lago Karachai



Simulazione ottenuta con il codice TOUGH2 al tempo finale di 40 anni

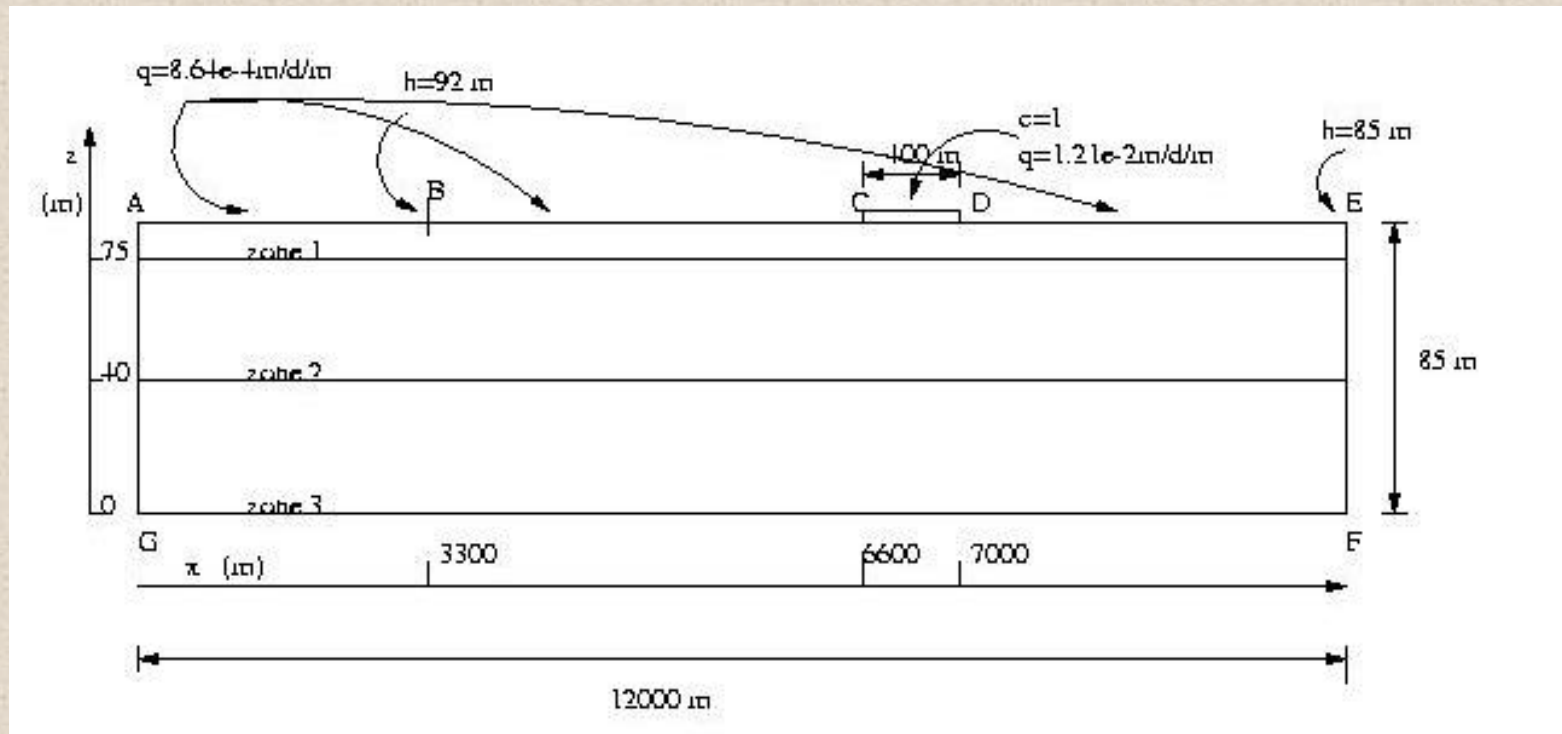


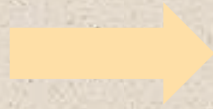
profondità:
15 m
(sinistra)
90m
(destra)



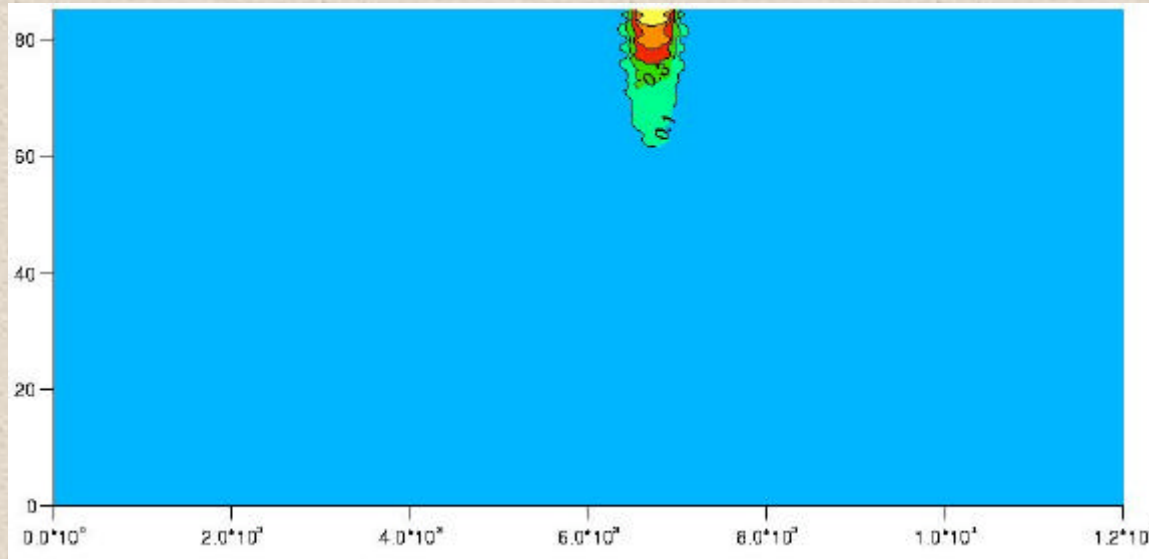
sezioni
verticali:
Nord-Sud
(sinistra)
Est-Ovest
(destra)

Sezione verticale 2D del lago Karachai

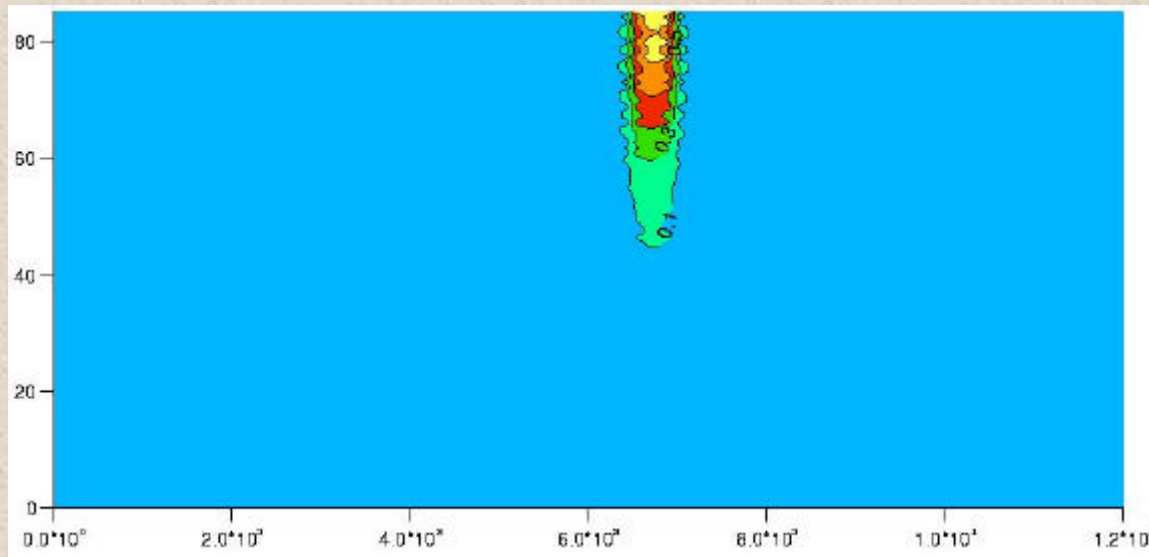




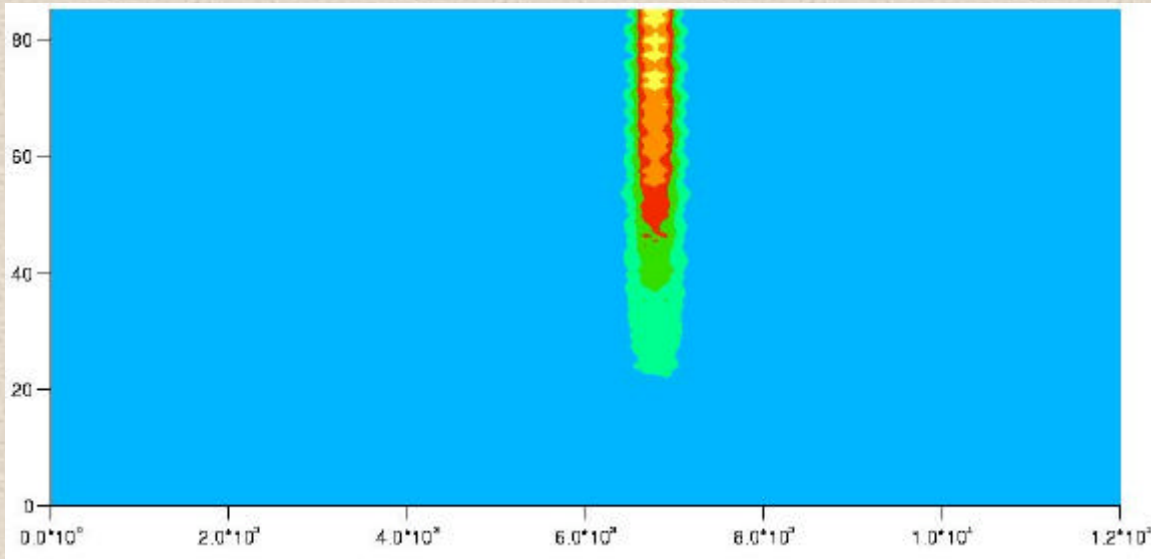
Simulazioni 2D



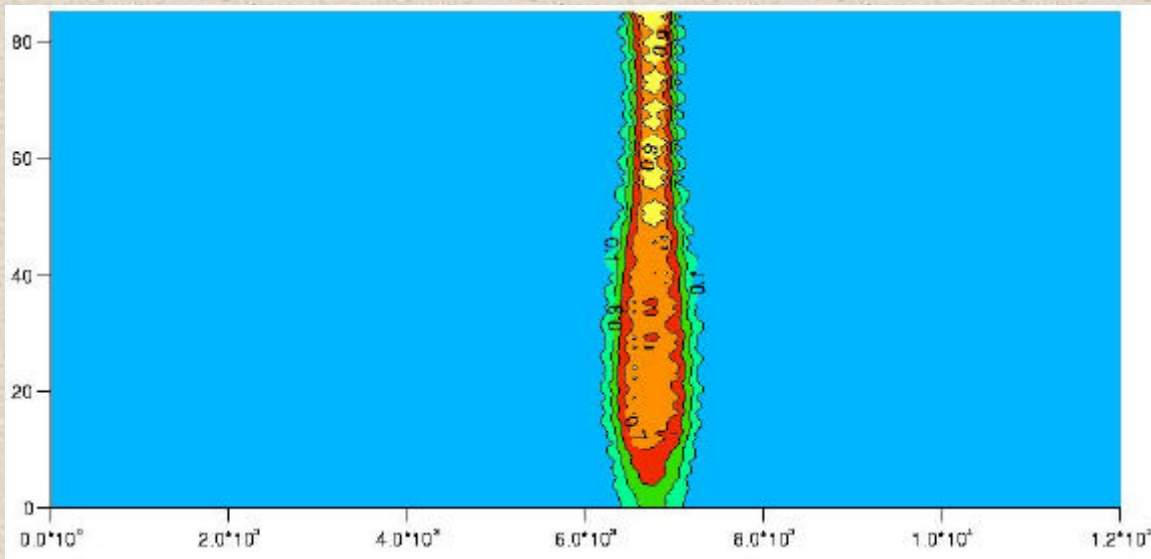
dopo 1 anno



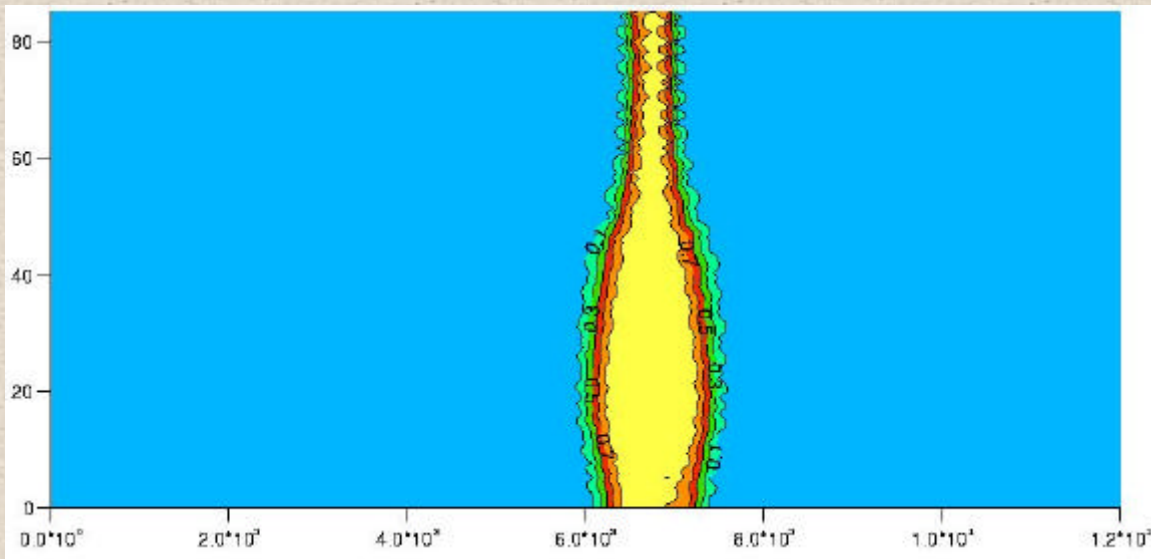
dopo 2 anni



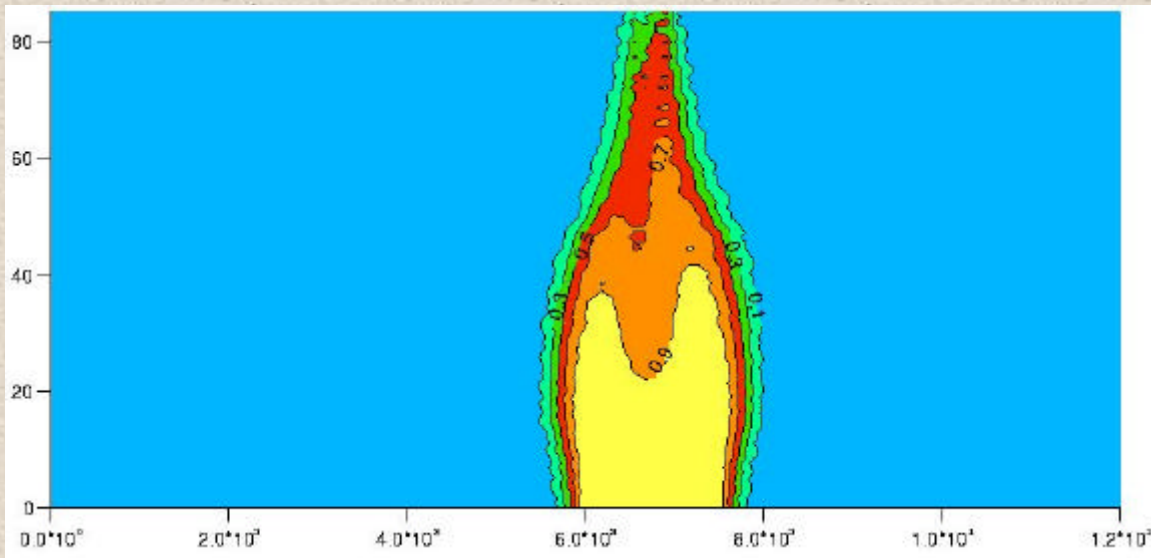
dopo 4 anni



dopo 8 anni



dopo 10 anni



dopo 15 anni

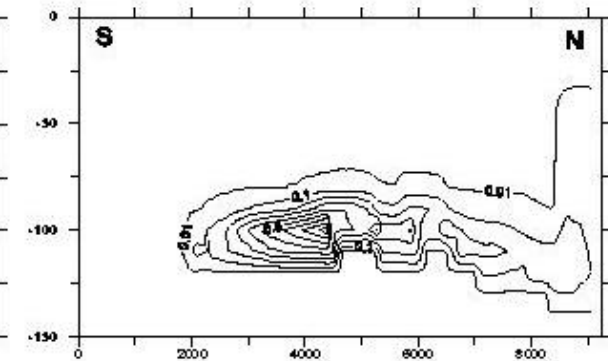
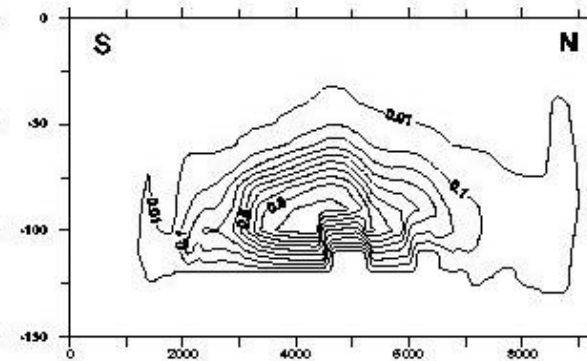
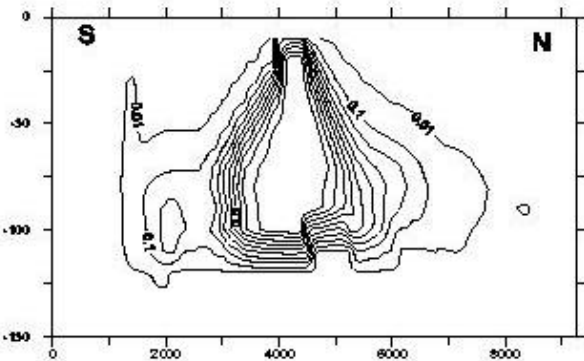
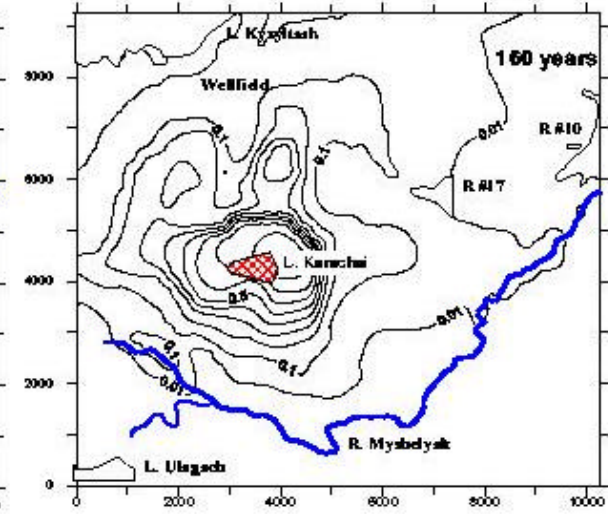
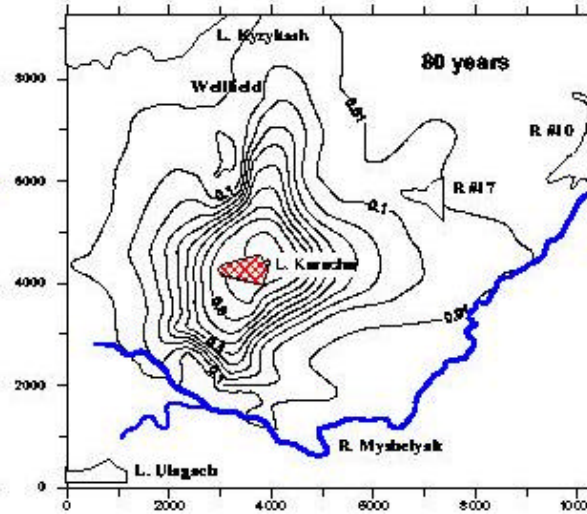
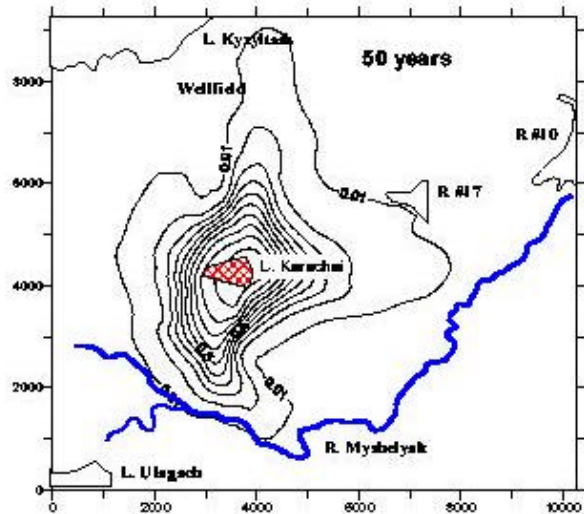
Strategie di contenimento

I risultati delle modellizzazioni e simulazioni numeriche non lasciano ottimisti sulle concentrazioni di radionuclidi che andranno a contaminare, dal lago Karachai, il fiume Mishelyak... Vari **scenari** per attenuare il fenomeno possono essere presi in considerazione (supponendo che il lago non sia più usato come discarica di rifiuti radioattivi):

- Iniettare acqua non contaminata in punti strategici in modo tale da forzare i contaminanti radioattivi a espandersi nella parte bassa dell'aquifero senza avvicinarsi al fiume Mishelyak;
- Pompare acqua contaminata dall'aquifero in modo da ridurre il potenziale del trasporto dei nitrati radioattivi;
- Operare un drenaggio lungo il lato del fiume Mishelyak in modo da controllare lo scarico dei contaminanti dal lago Karachai.



Scenario: pompare acqua non contaminata





Possibile realizzazione di misure di contenimento della contaminazione dal lago Karachai

- complicazioni tecniche
- necessità di avere più dati di quelli a disposizione
- tempi di "recupero" lunghi
- necessità di un'economia più solida e capace di operare adeguatamente sul lago Karachai:

TUTTO CIÒ RENDE PIÙ REALISTICO E REALIZZABILE L'APPROCCIO DELLA NATURALE ATTENUAZIONE DEL FENOMENO – OPERANDO MAGGIORI CONTROLLI E RESTRIZIONI PERCHÈ TUTTI I FIUMI CONTAMINATI O A RISCHIO DI CONTAMINAZIONE NON SIANO UTILIZZATI.