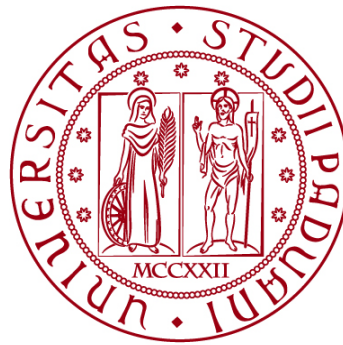


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**Modellazione agli elementi finiti dell'intrusione salina
in un acquifero costiero e dell'effetto di diverse
condizioni al contorno**

Relatore: PROF. PIETRO TEATINI

Laureando: ANGELA TURETTA

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Indice

1. Introduzione	1
2. Modello matematico	5
2.1. Equazione di flusso sotterraneo	5
2.2. Equazione di trasporto	8
2.3. Modello Density Dependent	11
2.3.1. <i>Il modello matematico</i>	11
2.3.2. <i>Applicazione del modello density-dependent al problema di “Henry”</i>	12
2.4. Soluzione analitica di Ghijben-Herzberg	16
3. Implementazione del modello sul caso di studio	19
4. Risultati	23
4.1. Scenario di riferimento	23
4.1.1. <i>Modellazione numerica</i>	24
4.1.2. <i>Soluzione analitica del modello</i>	28
4.2. Analisi di sensitività	30
4.2.1. <i>Variazione della densità dell’acqua salata</i>	30
4.2.2. <i>Variazione della dispersività longitudinale e trasversale</i>	33
4.2.3. <i>Variazione della conducibilità idraulica</i>	35
4.3. Scenari di “variazione climatica”	38
4.3.1. <i>Variazione debole del livello della falda freatica</i>	38
4.3.2. <i>Variazione significativa del livello della falda freatica</i>	42
4.4. Confronto tra i risultati	47
4.4.1. <i>Posizione A</i>	47
4.4.2. <i>Posizione B</i>	49
4.4.3. <i>Posizione C</i>	50
5. Conclusioni	53
Bibliografia	55

Indice delle immagini

Figura 1: <i>Rappresentazione grafica del problema di Henry</i>	13
Figura 2: <i>Rappresentazione grafica della soluzione del problema di Henry al tempo iniziale</i>	14
Figura 3: <i>Rappresentazione grafica della soluzione GWS del problema di Henry a $t=10\text{min}$</i>	14
Figura 4: <i>Rappresentazione grafica della soluzione GWS del problema di Henry a $t=100\text{min}$</i>	15
Figura 5: <i>Rappresentazione grafica della soluzione GWS del problema di Henry a $t=198\text{min}$</i>	15
Figura 6: <i>Rappresentazione della zona di transizione acqua dolce-salata</i>	16
Figura 7: <i>Rappresentazione grafica dell'approssimazione del principio di Badon Ghijben-Herzberg</i>	16
Figura 8: <i>Principio di Badon Ghijben-Herzberg: interfaccia tra acqua salata e dolce in una zona costiera</i>	17
Figura 9: <i>Interfaccia tra acqua dolce e salata in un acquifero non confinato con ricarica zenitale</i>	18
Figura 10: <i>Profilo di costa preso in considerazione per l'applicazione del modello agli elementi finiti</i>	19
Figura 11: <i>Rappresentazione di una parte della griglia 2D con numerazione di triangoli e nodi</i>	19
Figura 12: <i>Griglia di calcolo ad elementi finiti tetraedrici generata da Gen3D a partire dalla mesh</i>	20
Figure 13: <i>File GWS.fnames contenente la lista dei file di input e di output del simulatore GWS</i>	21
Figura 14: <i>Rappresentazione delle pressioni al contorno nello scenario di riferimento</i> ...	24

Figura 15: <i>Condizione iniziale in relazione alla concentrazione di sale nella simulazione dello scenario di riferimento</i>	24
Figura 16: <i>Concentrazione di sale dopo 8 mesi dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario di riferimento</i>	25
Figura 17: <i>Concentrazione di sale dopo 5 anni dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario di riferimento</i>	25
Figura 18: <i>Concentrazione di sale dopo 100 anni dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario di riferimento</i>	26
Figura 19: <i>Andamento della pressione nell'istante iniziale nello scenario di riferimento</i> ..	27
Figura 20: <i>Andamento della pressione in condizioni stazionarie equilibrate nello scenario di riferimento</i>	27
Figura 21: <i>Rappresentazione dell'interfaccia dolce-salata per un acquifero costiero freatico</i>	28
Figura 22: <i>Andamento dell'interfaccia acqua dolce- acqua salata per un acquifero costiero di interesse nello scenario di riferimento ottenuto dal modello analitico di Badon Ghijben-Herzberg</i>	29
Figura 23: <i>Concentrazione dopo 8 mesi dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata</i>	30
Figura 24: <i>Concentrazione dopo 5 anni dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata</i>	31
Figura 25: <i>Concentrazione dopo 100 anni dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata</i>	31
Figura 26: <i>Andamento della pressione nell'istante iniziale nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata</i>	32
Figura 27: <i>Andamento della pressione in condizioni stazionarie equilibrate nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata</i>	33
Figura 28: <i>Concentrazione dopo 8 mesi dall'applicazione della variazione di dispersività</i>	34

Figura 29: Concentrazione dopo 5 anni dall'applicazione della variazione di dispersività	35
Figura 30: Concentrazione dopo 100 anni dall'applicazione della variazione di dispersività	35
Figura 31: Concentrazione dopo 8 mesi dall'applicazione della variazione della conducibilità idraulica	36
Figura 32: Concentrazione dopo 5 anni dall'applicazione della variazione della conducibilità idraulica	36
Figura 33: Concentrazione dopo 100 anni dall'applicazione della variazione della conducibilità idraulica	37
Figura 34: Rappresentazione delle pressioni al contorno, nello scenario di livello freatico nell'acquifero e livello del mare alla stessa altezza	38
Figura 35: Concentrazione dopo 8 mesi dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica	39
Figura 36: Concentrazione dopo 5 anni dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica	39
Figura 37: Concentrazione dopo 20 anni dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica	40
Figura 38: Concentrazione dopo 45 anni dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica	40
Figura 39: Concentrazione dopo 75 anni dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica	41
Figura 40: Rappresentazione dell'andamento delle pressioni in condizioni di stabilità con variazione leggera del livello dell'acquifero	42
Figura 41: Rappresentazione delle pressioni al contorno nello scenario con livello di falda nell'acquifero inferiore al livello del mare	42
Figura 42: Concentrazione dopo 8 mesi dall'abbassamento di 2 m del livello della falda freatica	43

Figura 43: <i>Concentrazione dopo 5 anni dall'abbassamento di 2 m del livello della falda freatica</i>	43
Figura 44: <i>Concentrazione dopo 25 anni dall'abbassamento di 2 m del livello della falda</i>	44
Figura 45: <i>Concentrazione dopo 45 anni dall'abbassamento di 2 m del livello della falda freatica</i>	44
Figura 46: <i>Concentrazione dopo 75 anni dall'abbassamento di 2 m del livello della falda freatica</i>	45
Figura 47: <i>Andamento della pressione in condizioni stazionarie equilibrate nello scenario con abbassamento di 2 m del livello della falda freatica</i>	46
Figura 48: <i>Posizione dei nodi sul dominio di calcolo per i quali sono stati confrontati i risultati</i>	47
Figura 49: <i>a) Andamento temporale della concentrazione nel nodo A come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e della variazione parametri sensitività; b) Andamento temporale della concentrazione nel nodo A come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e variazione livelli di falda</i>	48
Figura 50: <i>a) Andamento temporale della concentrazione nel nodo B come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e della variazione parametri sensitività; b) Andamento temporale della concentrazione nel nodo B come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e variazione livelli di falda</i>	50
Figura 51: <i>a) Andamento temporale della concentrazione nel nodo C come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e della variazione parametri sensitività; b) Andamento temporale della concentrazione nel nodo C come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e variazione livelli di falda</i>	51

1. Introduzione

La presente tesi ha come oggetto la modellazione agli elementi finiti dell'intrusione salina in un acquifero costiero. L'intrusione salina consiste nel movimento di acqua salata dal fondo mare verso l'entroterra negli acquiferi superficiali e profondi. Avviene principalmente nelle aree costiere pianeggianti di ridotta elevazione e recentemente è aggravata dagli effetti del cambiamento climatico, con ridotti apporti meteorici e innalzamento del livello medio del mare.

Definiamo innanzitutto cosa si intende per acqua salata. Un'acqua viene detta salata se la concentrazione di cloruri presenti in essa è pari a 10000 – 20000 mgCl⁻/l; è possibile distinguere ugualmente, sempre in base alla concentrazione di cloruri, un'acqua dolce quando la concentrazione è di 30 – 150 mgCl⁻/l e un'acqua salmastra qualora 300 – 1000 mgCl⁻/l.

L'intrusione salina rappresenta, come detto, una problematica di grande interesse e sempre più presente nelle zone costiere del nostro paese. È causata da diversi fattori antropici tra i quali, un prelievo di acqua potabile dagli acquiferi sotterranei superiore alla ricarica naturale, per esempio a causa dell'intensa urbanizzazione, la cementificazione del territorio e il riscaldamento globale hanno infatti ridotto la ricarica naturale degli acquiferi sotterranei, aggravando ulteriormente la problematica. Un altro fattore "naturale" non meno importante è il cambiamento climatico che sta causando un aumento del livello medio del mare, associato a minori precipitazioni annue, che facilitano la risalita dell'acqua di mare lungo i tratti terminali dei corsi d'acqua, trovando una minore spinta del deflusso proveniente da monte. Si prenda come esempio il problema della salinizzazione nel delta del Mekong in Vietnam [1]. Il rapido riscaldamento dell'altopiano del Tibet ha causato diversi problemi ambientali, tra i quali il ritiro dei ghiacciai e la desertificazione, con gravi ripercussioni sul tratto inferiore del bacino del fiume Mekong. La zona è una pianura alluvionale con ridotta elevazione nell'ordine di 1-2 metri sul medio mare. La problematica è iniziata con l'eccessivo utilizzo della risorsa sotterranea, intensificatosi negli anni '90 successivamente ad un aumento della richiesta idrica per agricoltura, acquacoltura e industria, che ha causato un abbassamento dei livelli piezometrici

nell'acquifero facilitando l'intrusione salina. La combinazione tra la subsidenza del terreno, di origine antropica, e l'innalzamento del livello del mare amplifica la sensibilità del delta, già interessato da cicloni e tifoni. Un altro caso di interesse è la fascia costiera del South Carolina. Uno studio recente [2] ha indagato l'impatto dei cambiamenti climatici sulla contaminazione dell'acqua salata negli acquiferi costieri. I ricercatori hanno sviluppato un modello per simulare vari scenari di innalzamento del livello del mare e di variazione nella ricarica dell'acquifero. I risultati hanno mostrato che l'intrusione salina risente maggiormente della riduzione della ricarica dell'acqua dolce rispetto all'innalzamento del livello del mare.

Gli effetti della salinizzazione delle falde e dei territori costieri non sono direttamente dannosi per l'uomo, ma hanno un grave impatto sul suo stile di vita, poiché l'acqua salata insinuandosi nel terreno causa un processo di "desertificazione" e con la conseguente riduzione della produzione agricola minacciando l'economia locale.

La presente tesi si focalizza sulla simulazione dell'intrusione salina in un acquifero costiero freatico al variare delle condizioni al contorno. È stato utilizzato come profilo di riferimento il risultato di un monitoraggio altimetrico-batimetrico condotto da [3] sulla spiaggia di Casal Borsetti sud, una frazione di Ravenna in Emilia-Romagna, situato sul litorale Adriatico. La tesi ha simulato con un modello numerico diverse ipotetiche condizioni. Inoltre, è stato applicato anche il modello analitico di Ghijben-Herzberg [9] ed è stato condotto un confronto tra i risultati con i due approcci.

Le simulazioni numeriche sono state eseguite con il simulatore GWS (GroundWater Simulator) che risolve con il metodo degli elementi finiti le equazioni matematiche di flusso-trasporto Density Dependent in un acquifero a saturazione variabile. Il modello matematico deriva dall'accoppiamento dell'equazione di flusso sotterraneo (equazione di Richards) e dell'equazione di trasporto e tiene in considerazione la variazione delle proprietà dell'acqua, specificatamente la densità e la viscosità in relazione alle diverse percentuali di concentrazione di sale. Questo risulta fondamentale in quanto l'acqua dolce e salata sono fluidi che, mescolandosi, generano una fascia di transizione a densità variabile. Nella modellazione analitica di

Ghijben-Herzberg si assume invece che sia presente un'interfaccia che separa in modo netto le due zone a densità differente.

La modellazione è stata condotta sul caso di studio sopra specificato. Il profilo della costa è stato utilizzato per generare un dominio bidimensionale, ovvero una sezione verticale del sottosuolo ortogonale alla linea di riva: il dominio è stata discretizzato con una mesh triangolare 2D, e poi estrusa nella direzione parallela alla linea di riva per ottenere la griglia 3D ad elementi tetraedrici da utilizzare in input a GWS. Sono quindi state definite le condizioni iniziali e al contorno che hanno consentito la risoluzione del modello per diversi valori del livello di falda lato entroterra e delle caratteristiche del terreno.

2. Modello matematico

In questa tesi si utilizza un modello matematico che descrive l'evoluzione nel tempo e nello spazio del contenuto di sale in un acquifero costiero al variare delle condizioni al contorno. Per la risoluzione numerica si fa riferimento a un modello di flusso-trasporto "density dependent" e saturazione variabile.

2.1. Equazione di flusso sotterraneo

L'equazione di flusso in un mezzo poroso a saturazione variabile si ottiene dalla combinazione dell'equazione di continuità e della legge di Darcy, rispettivamente:

$$I - O = \nabla \cdot \mathbf{q} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_w = -\mathbf{K}_w(S_w) \cdot (\nabla \psi - \mathbf{z}) \quad (2)$$

dove:

θ = contenuto volumetrico di acqua

t = tempo

\mathbf{K}_w = tensore di conducibilità idraulica effettiva ($\mathbf{K}_w = \mathbf{K}_{sat} k_r$)

\mathbf{K}_{sat} = tensore di conducibilità idraulica in condizioni sature

k_r = coefficiente di conducibilità idraulica relativa

S_w = grado di saturazione ($\theta(t) = S_w(t)\Phi$)

Φ = porosità del terreno

∇ = operatore di gradiente

ψ = pressione in termini di colonna d'acqua

\mathbf{z} = coordinata cartesiana verticale (positiva se verso l'alto)

Dalla combinazione delle due si ottiene l'equazione di Richards [5]:

$$\text{div}[K(\psi)\overrightarrow{\text{grad}}(\psi - z)] = \frac{d\theta}{d\psi} \frac{\partial\psi}{\partial t} \quad (3)$$

dove:

$$\frac{d\theta}{d\psi} = \text{coefficiente di immagazzinamento}$$

L'equazione di Richards è un'equazione differenziale alle derivate parziali che descrive l'andamento della pressione nel tempo e nello spazio nell'acquifero considerato.

Negli anni sono state sviluppate alcune relazioni che collegano le caratteristiche del terreno con il contenuto dell'acqua. Una relazione frequentemente utilizzata è stata sviluppata da Van Genuchten [6] definendo:

$$\vartheta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 - (\alpha\psi)^n]^m} \quad (4)$$

$$K(\theta) = K_{sat} \vartheta^{1/2} [1 - (1 - \vartheta^{1-m})^m]^2 \quad (5)$$

dove:

ϑ = saturazione effettiva

θ_r = contenuto d'acqua residuo

θ_s = contenuto d'acqua in condizioni sature

α = parametro empirico

ψ = pressione capillare

n, m = parametri empirici con $m = 1 - 1/n$

Per risolvere l'equazione di Richards risulta necessario imporre delle condizioni iniziali e al contorno, ovvero il valore della nell'intero dominio di calcolo al tempo $t = 0$ e la pressione (condizione di Dirichlet) o il flusso (condizione di Neumann) lungo i contorni del dominio durante l'intero intervallo temporale coperto dalla simulazione:

$$\psi(\mathbf{x}, 0) = \psi_0(\mathbf{x}) \quad (6)$$

$$\psi(\mathbf{x}, t) = \psi_p(\mathbf{x}) \quad (7)$$

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = -q_n(\mathbf{x}, t) \quad (8)$$

dove:

ψ_0 = pressione iniziale al $t = 0$

ψ_p = pressione imposta nel contorno di Dirichlet

q_n = portata imposta nel contorno di Neumann

2.2. Equazione di trasporto

Il trasporto di contaminante in un acquifero è governato da diversi processi, quali l'avvezione, ovvero il movimento del contaminante causato dal il moto dell'acqua, e la diffusione meccanica, ovvero la miscelazione tra soluto (il contaminante) e solvente (l'acqua), generata dal gradiente di concentrazione di concentrazione.

L'equazione di trasporto generale viene scritta come segue [4]:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (C V_i) + \frac{(C-C')W}{n_e b} - R_d \lambda C \quad (9)$$

dove:

R_d = fattore di ritardo

C = concentrazione soluto

D_{ij} = tensore di dispersione idrodinamica con $i, j = x, y, z$

V_i = velocità effettiva dell'acqua nel mezzo poroso

C' = concentrazione del soluto alla sorgente

$W(x, y, z, t)$ = termine generale di sorgente o prelievo

n_e = porosità effettiva

b = spessore saturo dell'acquifero

λ = costante di decadimento del soluto

L'equazione può essere semplificata se si assume che il trasporto sia di un soluto conservativo, ovvero che non generi reazioni chimiche e non sia radioattivo ($R_d = 1$ e $\lambda = 0$):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (C V_i) + \frac{(C-C')W}{n_e b} \quad (10)$$

L'equazione (10) descrive come varia la concentrazione del soluto nel tempo ed è composta da tre fattori che rappresentano rispettivamente il processo di dispersione

idrodinamica, di avvezione e di rimozione/aggiunta del soluto dovuto alla presenza di estrazione o iniezione di acqua.

Il tensore di dispersione idrodinamica, D_{ij} , deriva dalla combinazione di due processi differenti, ovvero la diffusione molecolare e la dispersione meccanica, quest'ultima è generata dal movimento del fluido attraverso lo spazio poroso che provoca una miscelazione tra soluto e solvente. Scheidegger (1961) [7] lo definisce come:

$$D_{ij} = \alpha_{ijmn} \frac{V_m V_n}{|V|} \quad (11)$$

dove:

α_{ijmn} = tensore di dispersività geometrica con $i, j = x, y, z$

V_m, V_n = componenti delle velocità reali

$|V|$ = norma euclidea della velocità reale

Per un acquifero isotropo, come nel caso oggetto di questo studio, il tensore si riduce a due componenti:

$$D_L = \alpha_L |V| \quad (12)$$

$$D_T = \alpha_T |V| \quad (13)$$

dove:

α_L = dispersività longitudinale dell'acquifero

α_T = dispersività trasversale dell'acquifero

Per la risoluzione dell'equazione di trasporto (10) è necessario imporre le condizioni iniziali e al contorno. In questo caso possono essere utilizzate tre tipologie di condizioni al contorno ovvero, una concentrazione fissata sul contorno di Dirichlet, un flusso di contaminante per sola dispersione sul contorno di Neumann e un flusso di contaminante per dispersione e avvezione sul contorno di Cauchy:

$$C(x_i, 0) = C_0(x_i) \quad (14)$$

$$C(x_i, t) = C \quad (15)$$

$$D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} n_i = q_c^D \quad (16)$$

$$\left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} - v_i c \right) n_i = q_c^T \quad (17)$$

dove:

$C_0(x_i)$ = concentrazione iniziale a $t = 0$

C = concentrazione imposta nel contorno di Dirichlet

q_c^D = portata valutando la dispersione attraverso il contorno di Neumann

q_c^T = portata valutando avvezione e dispersione attraverso il contorno di Cauchy

2.3. Modello Density Dependent

2.3.1. *Il modello matematico*

Il modello di flusso-trasporto density-dependent combina le equazioni di flusso e trasporto sopra riportate nel caso in cui la concentrazione del contaminante sia così elevata da modificare le proprietà dell'acqua (peso specifico e viscosità). Infatti, nel caso di un contaminante naturale come il sale che raggiunge concentrazioni anche molto elevate la dipendenza delle proprietà dell'acqua da pressione, temperatura e concentrazione di contaminante giocano un ruolo importante nel movimento del soluto stesso. In genere, per acquiferi superficiali (come gli acquiferi freatici in connesione idraulica con il mare), l'influenza della pressione su parametri dell'acqua può essere considerata minima (le variazioni di pressione nel dominio sono limitate); analogamente anche l'influenza della temperatura è limitata e certamente minore dell'effetto della concentrazione di soluto disciolto nel fluido.

Per condizioni isoterme e un intervallo di concentrazione tra il valore nullo e massimo pari a quello del mare, la relazione tra densità e concentrazione è lineare:

$$\rho = \rho_0(1 + \epsilon c) \quad (18)$$

con

$$\epsilon = \frac{\rho_{s,max} - \rho_0}{\rho_0} \quad (19)$$

Dove

ρ = densità corrispondente alla concentrazione attuale

ρ_0 = densità dell'acqua dolce

c = concentrazione normalizzata $0 < c < 1$

$\rho_{s,max}$ = densità corrispondente alla massima concentrazione di soluto

La viscosità dinamica dell'acqua in funzione della concentrazione di soluto è espressa dalla relazione lineare:

$$\mu = \mu_0(1 - \epsilon' c) \quad (20)$$

con

$$\epsilon' = \frac{\mu_{s,max} - \mu_0}{\mu_0} \quad (21)$$

dove

μ = viscosità dinamica corrispondente alla concentrazione attuale

μ_0 = viscosità dinamica dell'acqua dolce

$\mu_{s,max}$ = viscosità dinamica corrispondente alla massima concentrazione di soluto

Il modello Density Dependent e si ricava dall'accoppiamento dell'equazione di flusso e dell'equazione di trasporto adeguatamente aggiornate per tener conto della densità e viscosità dinamica variabile [8]:

$$\mathbf{V} = -K_s \frac{1+\epsilon c}{1+\epsilon' c} K_r (\nabla \psi + (1 + \epsilon c) \mathbf{z}) \quad (22)$$

$$\sigma \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot \left[K_s \frac{1+\epsilon c}{1+\epsilon' c} K_r (\nabla \psi + (1 + \epsilon c) \mathbf{z}) \right] \quad (23)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (c V_i) + \frac{(c-c')W}{n_e b} \quad (24)$$

2.3.2. Applicazione del modello density-dependent al problema di "Henry"

Per familiarizzare con il simulatore, GWS è stato inizialmente applicato al classico "problema di Henry", che descrive l'intrusione di acqua salata in una falda acquifera confinata isotropa, inizialmente dolce. Le condizioni al contorno, costanti nel tempo sono le seguenti: un flusso di acqua dolce entra in falda con portata costante attraverso il confine dal confine interno; lato mare, è presente una distribuzione idrostatica della pressione e la concentrazione corrisponde a quella dell'acqua di mare. L'acqua salata entra da destra fino al raggiungimento di un nuovo equilibrio in cui l'acqua dolce fluisce al di sopra di uno strato salato di spessore variabile.

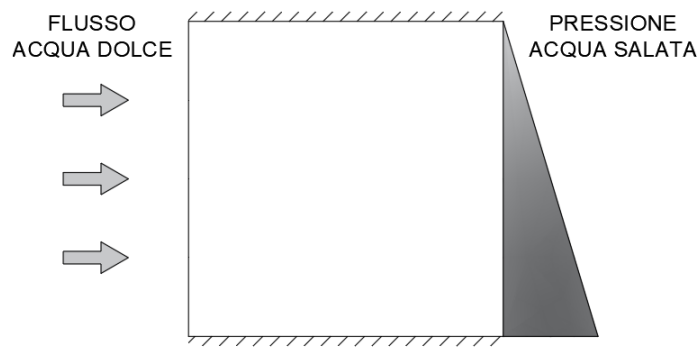


Figura 1: Rappresentazione grafica del problema di Henry

Le proprietà dell'acquifero e i parametri del modello sono i seguenti:

$$q = 8.333 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Compressibilità} = 1 * 10^{-12}$$

$$K = 0.01 \text{ m/s}$$

$$\Phi = 0.35$$

$$\epsilon = 0.025$$

$$D_0 = 2.381 * 10^{-5}$$

$$\alpha_L = \alpha_T = 0$$

$$\Delta T = 60 \text{ s}$$

I risultati dell'applicazione modellistica in termini di distribuzione della concentrazione a diversi istanti temporali sono forniti in Figura 2 - Figura 5.

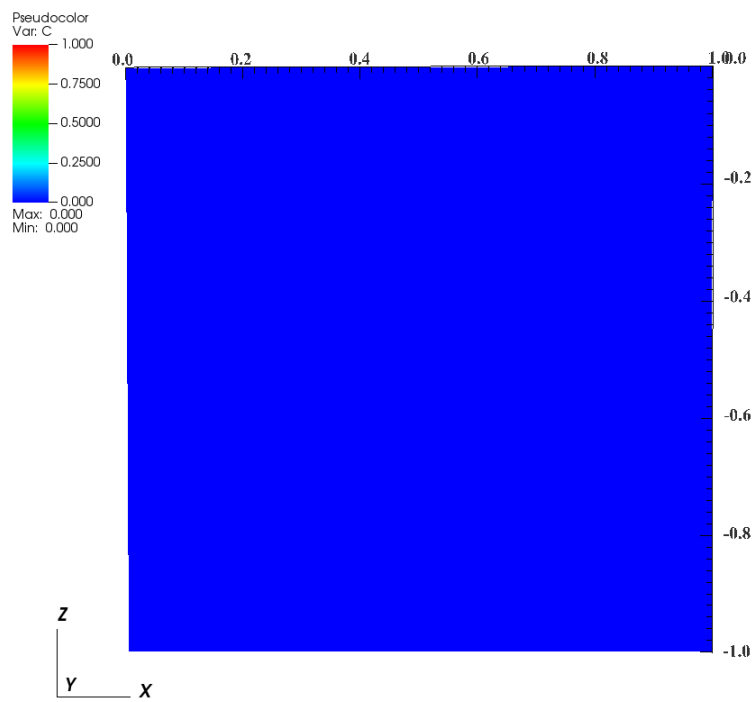


Figura 2: Rappresentazione grafica della soluzione del problema di Henry al tempo iniziale

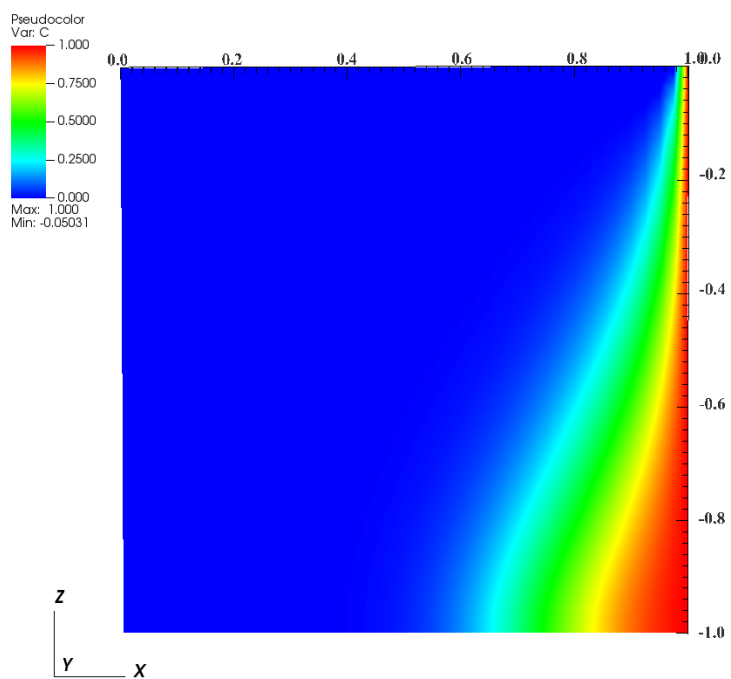


Figura 3: Rappresentazione grafica della soluzione GWS del problema di Henry a $t=10\text{min}$

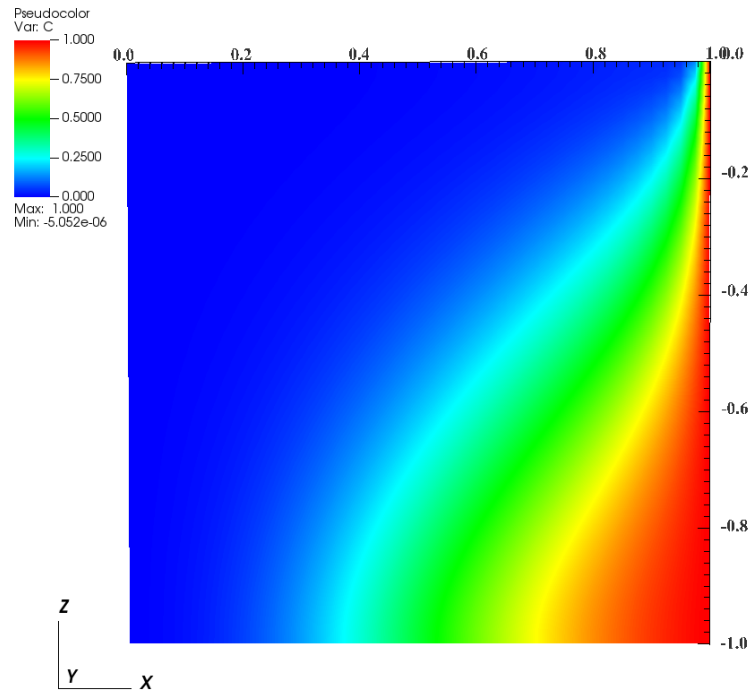


Figura 4: Rappresentazione grafica della soluzione GWS del problema di Henry a $t=100\text{min}$

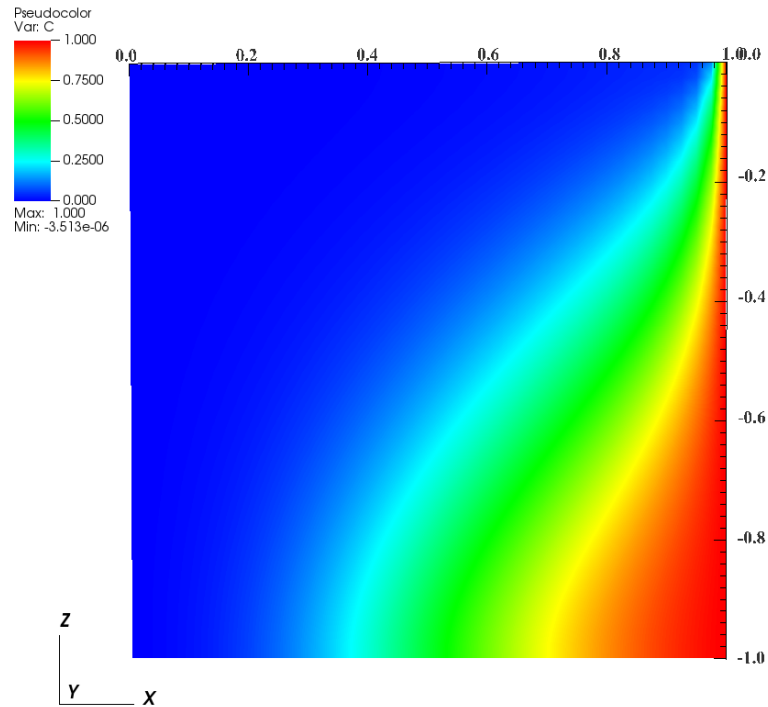


Figura 5: Rappresentazione grafica della soluzione GWS del problema di Henry a $t=198\text{min}$

2.4. Soluzione analitica di Ghijben-Herzberg

Un approccio analitico semplificato per la definizione dell'intrusione salina in falda è stato proposto da Badon Ghijben-Herzberg [9]. Il principio considera che in molti casi pratici la zona di transizione acqua dolce- acqua salata (Figura 6) è caratterizzata da dimensioni ridotte rispetto al dominio del flusso, e quindi è possibile sostituirla con un'interfaccia ben definita a spessore nullo (Figura 7).

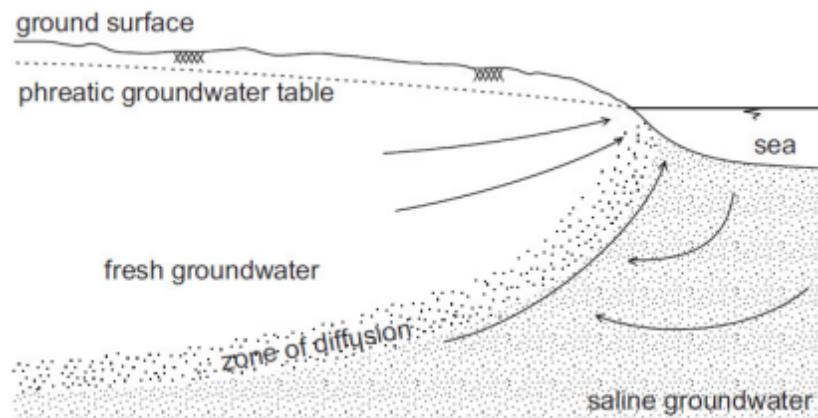


Figura 6: Rappresentazione della zona di transizione acqua dolce-salata

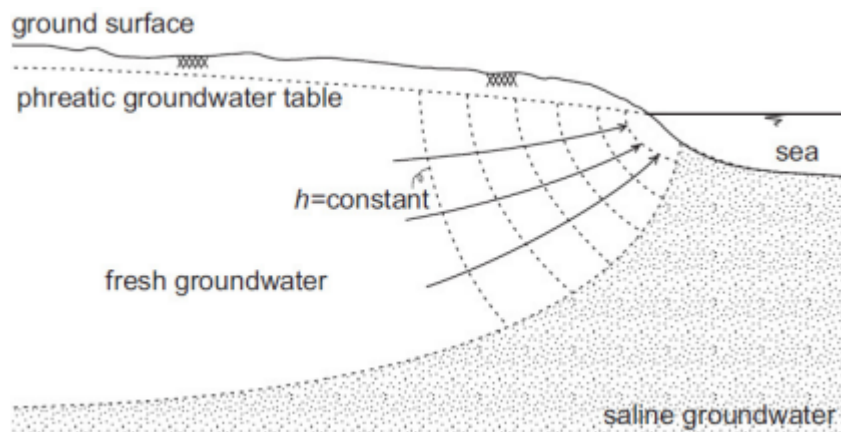


Figura 7: Rappresentazione grafica dell'approssimazione del principio di Badon Ghijben-Herzberg

Il principio che descrive la posizione dell'interfaccia tra l'acqua dolce e salata (Figura 8) è che su di essa deve valere:

$$\textit{pressione acqua dolce} = \textit{pressione acqua salata}$$

Con riferimento alle grandezze di Figura 8, l'eguaglianza sopra riportata si traduce matematicamente in:

$$\rho_s H g = \rho_f (H + h) g \leftrightarrow \rho_s H = \rho_f H + \rho_f h$$

$$h = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} H \leftrightarrow h = \alpha H \quad (25)$$

La formula vale nelle seguenti ipotesi semplificative:

- falda acquifera omogenea;
- dispersione idrodinamica trascurabile;
- flusso orizzontale nella falda acquifera e flusso verticale trascurabile

Tali assunzioni si verificano raramente in natura e quindi l'equazione (25) comporta l'introduzione di errori, soprattutto in corrispondenza alla zona in cui l'acqua dolce fuoriesce sulla battigia. Tuttavia, l'equazione fornisce la posizione dell'interfaccia con un'approssimazione accettabile ed è di assai semplice utilizzo.

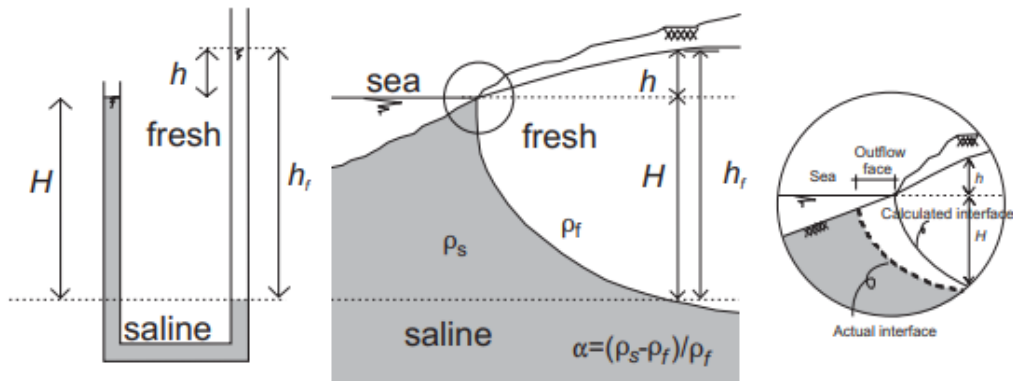


Figura 8: Principio di Badon Ghijben-Herzberg: interfaccia tra acqua salata e dolce in una zona costiera

Per rendere meglio il concetto consideriamo un acquifero freatico con ricarica zenitale (Figura 9). Le equazioni che governano il moto dell'acqua dolce e la posizione dell'interfaccia sono:

$$\text{Darcy: } q = -k(H + h) \frac{dh}{dx} \quad (26)$$

$$\text{Continuità: } dq = f dx \quad (27)$$

$$\text{BGH: } h = \alpha H \quad (28)$$

dove:

q = portata per unità di lunghezza

H = profondità interfaccia acqua dolce-salata rispetto al livello del mare

f = ricarica naturale dell'acquifero

h = altezza piezometrica di acqua dolce rispetto al livello del mare

Combinando le tre equazioni (26)-(27) si ottiene:

$$dq = f dx \leftrightarrow q = fx + C_1$$

$$-k(H + h) \frac{dh}{dx} = fx + C_1 \leftrightarrow -k(H + \alpha H) \alpha \frac{dH}{dx} = fx + C_1$$

$$H dH = -\frac{fx + C_1}{k(1+\alpha)\alpha} dx \leftrightarrow \frac{1}{2} H^2 = \frac{-\frac{1}{2} f x^2 - C_1 x + C_2}{k(1+\alpha)\alpha}$$

Risolvendo in termini di H si ottiene:

$$H = \sqrt{\frac{-f x^2 - 2C_1 x + 2C_2}{k(1+\alpha)\alpha}} \quad (29)$$

$$h = \alpha H \quad (30)$$

$$q = fx + C_1 \quad (31)$$

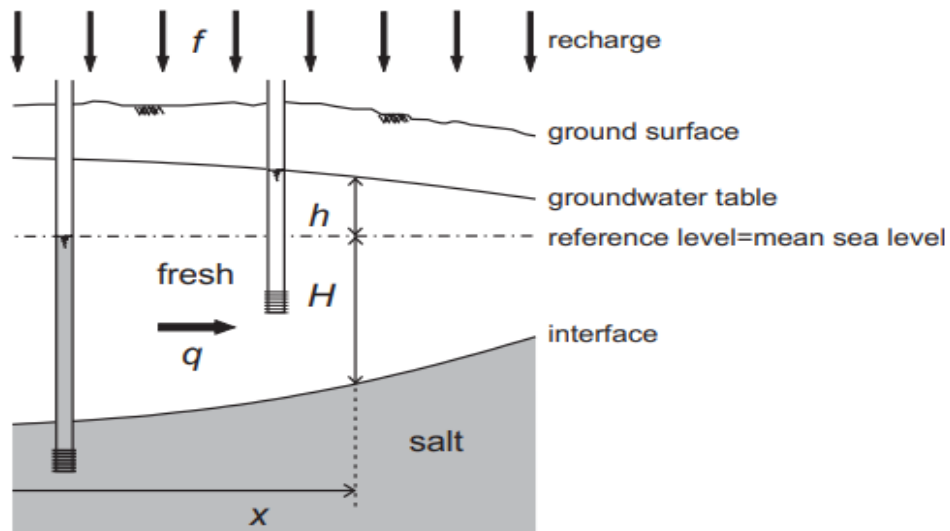


Figura 9: Interfaccia tra acqua dolce e salata in un acquifero non confinato con ricarica zenitale

3. Implementazione del modello sul caso di studio

Il dominio di calcolo è costituito da una sezione verticale del litorale in corrispondenza a Casal Borsetti, una frazione del comune di Ravenna, Emilia-Romagna, situata sul litorale Adriatico. Il profilo topo-batimetrico, rappresentato in Figura 10 e derivato da [3], è caratterizzato da un andamento che dolcemente collega la parte emersa a quella al di sotto del medio mare ubicato a quota 0 m s.l.m.. Il dominio di è caratterizzato da un'altezza decrescente, con elevazione massima pari a 4.0 m s.l.m e minima di -1.0 m s.l.m.. La lunghezza complessiva è pari circa 100 m e il bottom è posto a una quota di -10.0 m s.l.m..

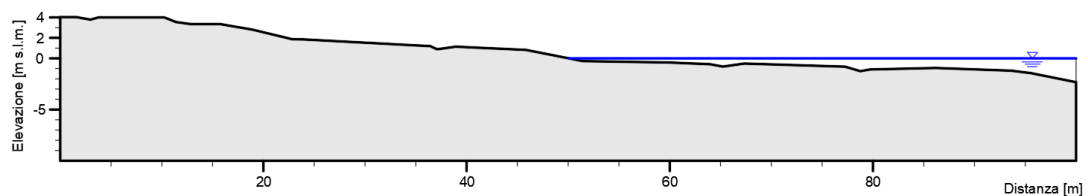


Figura 10: Profilo di costa preso in considerazione per l'applicazione del modello agli elementi finiti

Successivamente all'individuazione del profilo, il dominio è stato discretizzato in elementi triangolari, utilizzando il software ArgusONE. La griglia è costituita da 15808 elementi triangolari e 8191 nodi. Di particolare interesse è la dimensione dell'elemento in quanto più la griglia risulta raffinata più la simulazione sarà accurata, in questo caso si è definita una dimensione media degli elementi pari a 0,4 m (Figura 11).

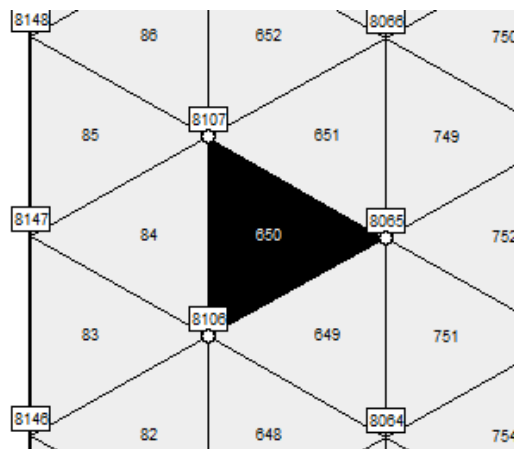


Figura 11: Rappresentazione di una parte della griglia 2D con numerazione di triangoli e nodi

Poiché GWS è un simulatore che lavora su domini tridimensionali, la griglia 2D è stata estrusa lungo la terza direzione (parallela alla linea di riva) tramite il programma Gen3D (Figura 12).

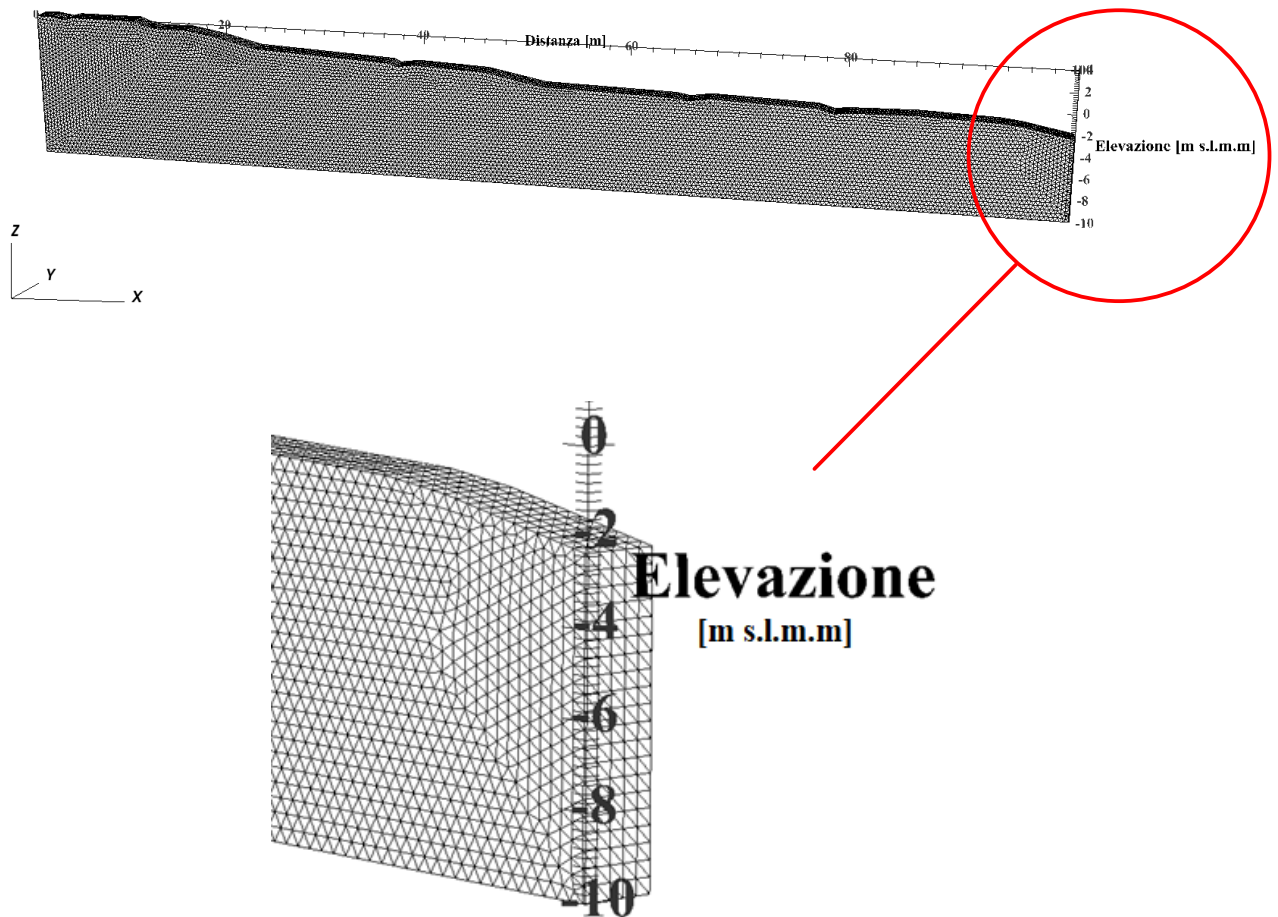


Figura 12: Griglia di calcolo ad elementi finiti tetraedrici generata da Gen3D a partire dalla mesh 2D

La griglia di calcolo è quindi costituita da 237120 elementi tetraedrici e 49146 nodi. Durante la procedura di estrusione mesh2D → mesh3D è stata posta particolare cura nel produrre elementi tetraedrici pressoché equilateri, ovvero con dimensioni simili lungo le tre direzioni, in modo da ottenere un'accurata soluzione numerica delle equazioni density-dependent.

L'ultimo passaggio prima dell'applicazione del simulatore consiste nella definizione delle condizioni iniziali e al contorno. Le condizioni al contorno imposte sono le seguenti:

- il carico piezometrico sui nodi nel contorno laterale verticale lato campagna e lato mare e sui nodi di superficie ubicati al di sotto del livello del mare;
- flusso nullo sulla parte emersa nel contorno superiore posti a quota superiore a 2 m s.l.m.;
- condizione di seepage-face (ovvero flusso uscente con pressione nulla, cioè pressione atmosferica) sui nodi di superficie compresi tra le quote 2 m e 0 m s.l.m. Nel caso di una falda lato campagna a quota superiore rispetto al medio mare, ciò permette all'acqua dolce che si muove verso mare di uscire dal dominio di calcolo.
- concentrazione (normalizzata rispetto a quella dell'acqua di mare) pari a 0 sui nodi del contorno laterale lato campagna e pari a 1 su quelli lato mare e sui nodi di superficie al di sotto del livello del mare;
- flusso di contaminante nullo sul fondo del dominio e sulla spiaggia emersa.

In relazione alle condizioni iniziali, per il trasporto è stata imposta $c = 0$ per la porzione di modello al di sotto della zona emersa e $c = 1$ per la zona situata al di sotto del livello del mare. Per l'equazione di flusso, è stata imposta una pressione corrispondente ad una falda dolce posta a quota 1.0 m s.l.m.. Tali condizioni sono state selezionate in modo da facilitare il processo di convergenza del simulatore non essendo troppo "lontane" da una soluzione equilibrata. I file delle condizioni iniziali e al contorno sono stati costruiti grazie all'implementazione di un codice in Fortran.

Gli altri file in input richiesti da GWS sono costituiti dalle coordinate dei nodi, la topologia della mesh, le caratteristiche del terreno e del fluido, e i parametri della simulazione quali tempo finale di calcolo e time step, inizialmente scelti di dimensioni ridotte per poi aumentarli una volta quasi raggiunta la nuova condizione di equilibrio.

```

'./INPUT/param'           ! I_unit 11 : simulation parameters
'./INPUT/solver_FLOW'    ! I_unit 12 : parameters of flow solver
'./INPUT/solver_TRAN'    ! I_unit 13 : parameters of transport solver
'./INPUT/coord'          ! I_unit 14 : node coordinates
'./INPUT/topol'          ! I_unit 15 : mesh topology
'./INPUT/mat_SOIL'       ! I_unit 16 : soil properties
'./INPUT/mat_FLOW'       ! I_unit 17 : flow parameters for each material
'./INPUT/mat_TRAN'       ! I_unit 18 : transport parameters for each material
'./INPUT/tablist_SOIL'   ! I_unit 19 : soil table (depth - cm - eff.stress)
'./INPUT/ic_FLOW0'       ! I_unit 22 : initial conditions for the flow
'./INPUT/ic_TRANMIX'     ! I_unit 23 : initial conditions for the transport
'./INPUT/bcdir_FLOW'    ! I_unit 24 : bc dirichlet for the flow
'./INPUT/bcneu_FLOW'    ! I_unit 25 : bc neumann for the flow
'./INPUT/bcspg_FLOW'    ! I_unit 26 : bc seepage for the flow
'./INPUT/bcatm_FLOW'    ! I_unit 27 : bc atmosferic for the flow
'./INPUT/bcdir_TRAN'    ! I_unit 28 : bc dirichlet for the transport
'./INPUT/print_time_FLOW' ! I_unit 30 : printing times for the flow
'./INPUT/print_time_TRAN' ! I_unit 31 : printing times for the transport
'./INPUT/print_vol_FLOW' ! I_unit 32 : lista nodi per stampe di volumi per il flusso
'./INPUT/print_list_nod_FLOW' ! I_unit 34 : node list for printing flow solution (at each timestep)
'./INPUT/print_list_nod_TRAN' ! I_unit 35 : node list for printing transport solution (at each timestep)
'./INPUT/print_list_ele_FLOW' ! I_unit 36 : element list for printing flow parameters

'./OUTPUT/debug'        ! O_unit 51 : debug
'./OUTPUT/hw_nod'       ! O_unit 52 : nodal pressure head at requested times
'./OUTPUT/hw_ele'       ! O_unit 53 : element pressure head at requested times
'./OUTPUT/c_nod'        ! O_unit 54 : node relative concentration
'./OUTPUT/c_ele'        ! O_unit 55 : element relative concentration
'./OUTPUT/vol_FLOW'    ! O_unit 56 : fluxes and volumes from the flow
'./OUTPUT/pro_ele_FLOW' ! O_unit 58 : element properties from the flow
'./OUTPUT/hw_nod_list'  ! O_unit 60 : pressure head on requested nodes
'./OUTPUT/c_nod_list'   ! O_unit 61 : relative concetration on requested nodes
'./OUTPUT/pro_ele_list_FLOW' ! O_unit 62 : parameters on the requested elements

```

Figure 13: File GWS.fnames contenente la lista dei file di input e di output del simulatore GWS

Per visualizzare i risultati del simulatore è stato utilizzato il software free VisIt (<https://visit-dav.github.io/visit-website/releases-as-tables/> - latest) che permette la visualizzazione dei risultati, ossia l'evoluzione della concentrazione e il carico piezometrico nel tempo all'interno del dominio 3D.

4. Risultati

In questo capitolo sono presentati i risultati delle simulazioni condotte con il modello GWS. È stato inizialmente individuato e simulato uno scenario “attuale” di riferimento, ovvero caratterizzato da valori tipici dei parametri del terreno e da condizioni al contorno tipiche dello stato attuale in corrispondenza al sito di studio. Lo scenario di riferimento è stato quindi utilizzato per confrontare i risultati del modello (in termini di distribuzione della concentrazione salina e della pressione) ottenuti al variare di alcuni parametri fisici, come ad esempio la densità dell’acqua salata, la conducibilità idraulica del terreno o la dispersività longitudinale e trasversale dell’acquifero, e di alcune condizioni al contorno in modo da analizzare possibili condizioni che, connesse al cambiamento climatico, potrebbero aver luogo in futuro come, ad esempio, un livello della falda più basso a causa della ridotta ricarica dell’acquifero da monte e un il livello del mare più elevato, causato, come noto, dagli effetti dell’incremento della temperatura.

Le simulazioni sono state condotte in regime transitorio per un intervallo temporale di cento anni così da permettere l’instaurarsi di una nuova condizione stazionaria modificata rispetto a quella iniziale e individuare la posizione dell’intrusione salina con una buona approssimazione.

4.1. Scenario di riferimento

Lo scenario di riferimento è stato individuato attraverso i seguenti valori dei parametri di input:

$$q = 0.00 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$K_x = K_y = K_z = 0.10 \text{ m/g}$$

$$h_{falda} = 1.0 \text{ m s.l.m.}$$

$$\alpha_{long} = 1.00 \text{ m}$$

$$h_{mare} = 0.0 \text{ m s.l.m.}$$

$$\alpha_{trasv} = 0.10 \text{ m}$$

$$\Phi = 0.35$$

$$D_0 = 1.0 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

La falda lato campagna è quindi ubicata alla quota di 1 m rispetto al livello del medio mare (Figura 14), instaurando un flusso di acqua dolce dall'entroterra verso la linea di riva

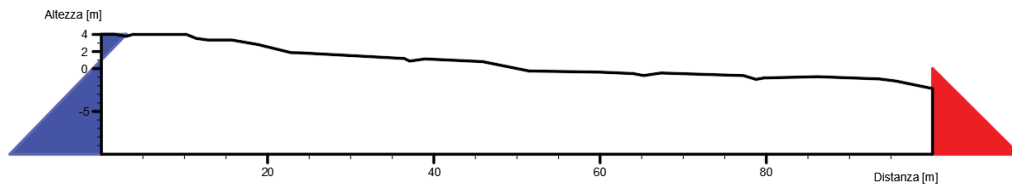


Figura 14: Rappresentazione delle pressioni al contorno nello scenario di riferimento

4.1.1. Modellazione numerica

La soluzione è stata inizialmente ottenuta attraverso il simulatore GWS che utilizza il metodo degli elementi finiti per integrare il sistema di equazioni alle derivate parziali (22), (23), (24). Le immagini che seguono mostrano il risultato ottenuto da GWS in termini di concentrazione per alcuni istanti temporali significativi, a partire dalla condizione iniziale di Figura 15 ($c = 0$ per la zona interessata dall'acquifero e $c = 1$ per la zona situata sotto il livello del mare) fino al raggiungimento di una condizione stazionaria equilibrata (utilizzata come condizione iniziale nelle simulazioni successive).

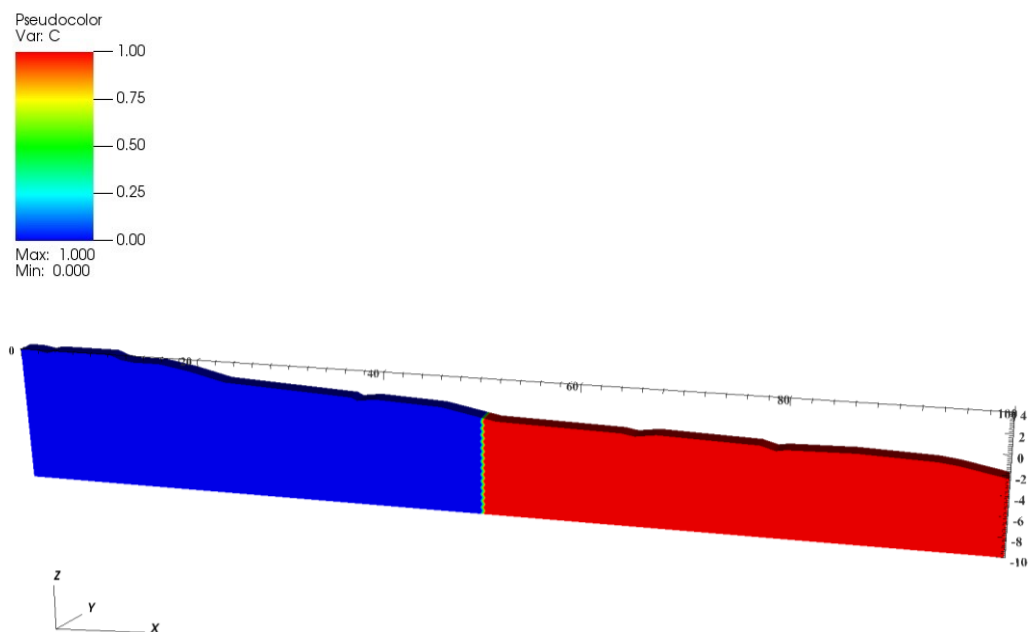


Figura 15: Condizione iniziale in relazione alla concentrazione di sale nella simulazione dello scenario di riferimento

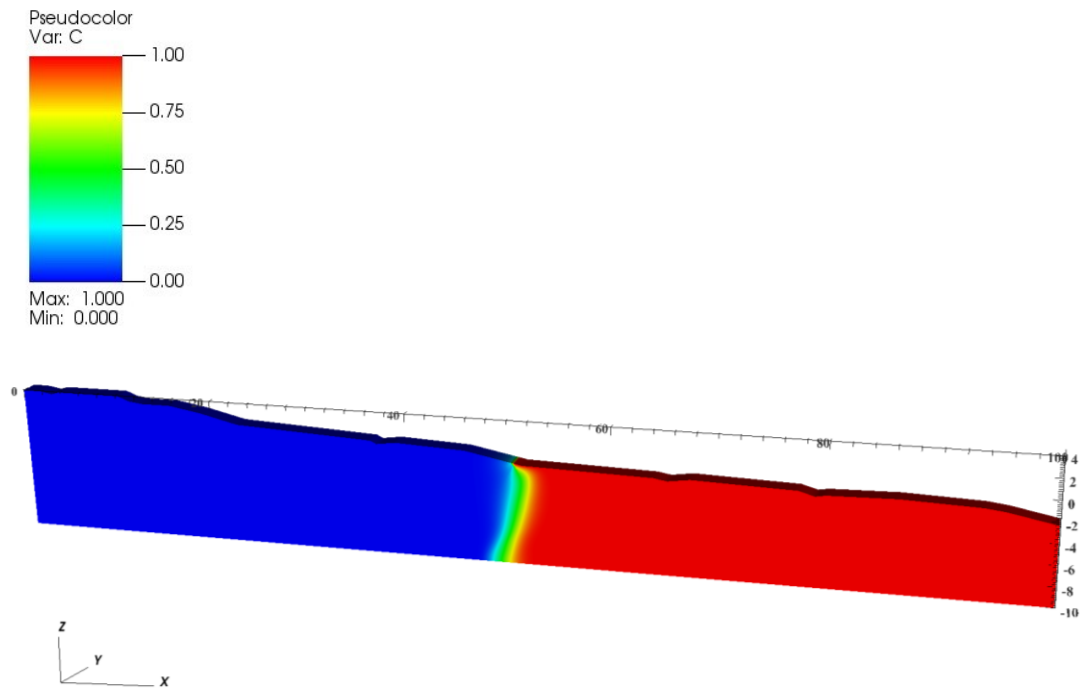


Figura 16: Concentrazione di sale dopo 8 mesi dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario di riferimento

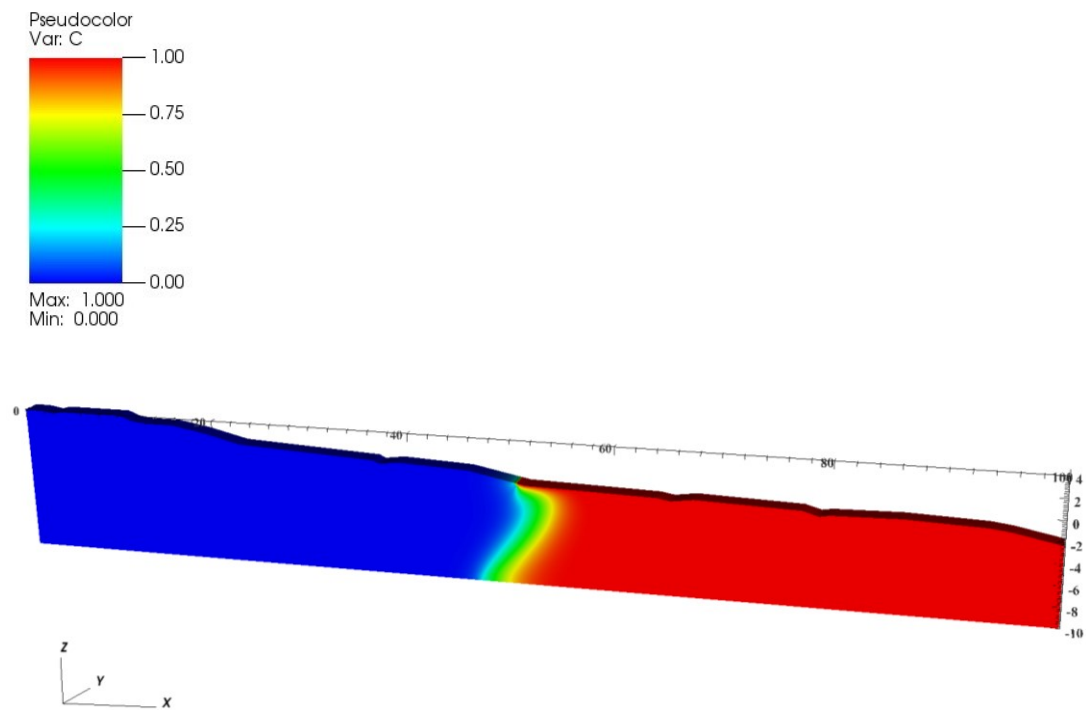


Figura 17: Concentrazione di sale dopo 5 anni dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario di riferimento

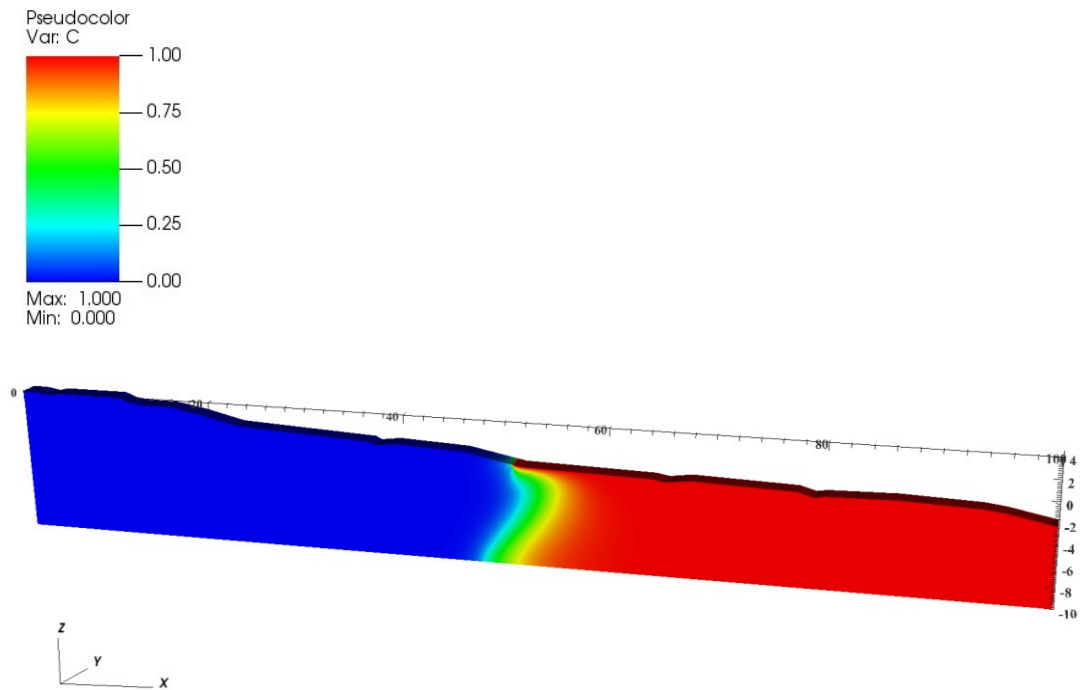


Figura 18: Concentrazione di sale dopo 100 anni dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario di riferimento

Figura 16 - Figura 18 forniscono i risultati della simulazione dopo 8 mesi, 5 e 100 anni. La situazione stazionaria equilibrata, ovvero quando non si ha più movimento del gradiente di concentrazione, si raggiunge circa 40 anni dall'inizio della simulazione.

Si fa notare l'evidente spinta dell'acquifero che, in prossimità della linea di riva, dove i tiranti d'acqua salata sono limitati, risulta maggiore rispetto a quella del mare. Ciò avviene anche a causa del posizionamento del carico piezometrico a +1.0 m s.l.m. a una distanza relativamente vicina, pari a circa 50 m, alla linea di riva.

La Figura 19 e Figura 20 rappresentano l'andamento delle linee di eguale pressione rispettivamente nell'istante iniziale e nel momento in cui il cuneo salino si stabilizza. Si fa notare come la pressione aumenta nella zona di spiaggia prossima al livello del mare, proprio per l'effetto della spinta dell'acqua dolce.

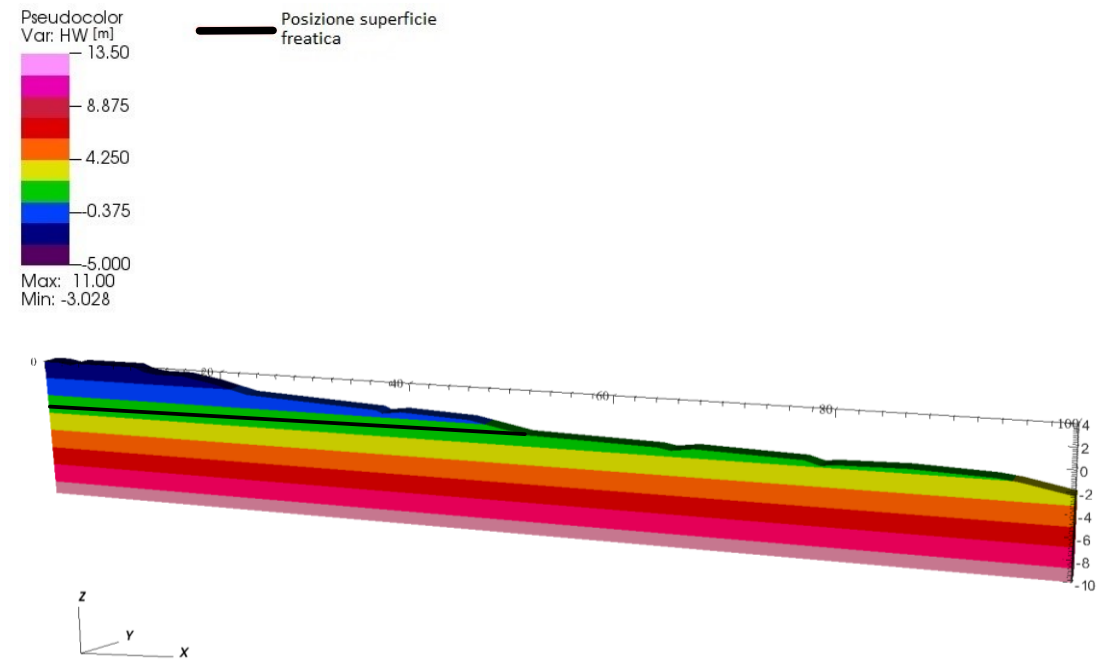


Figura 19: Andamento della pressione nell'istante iniziale nello scenario di riferimento

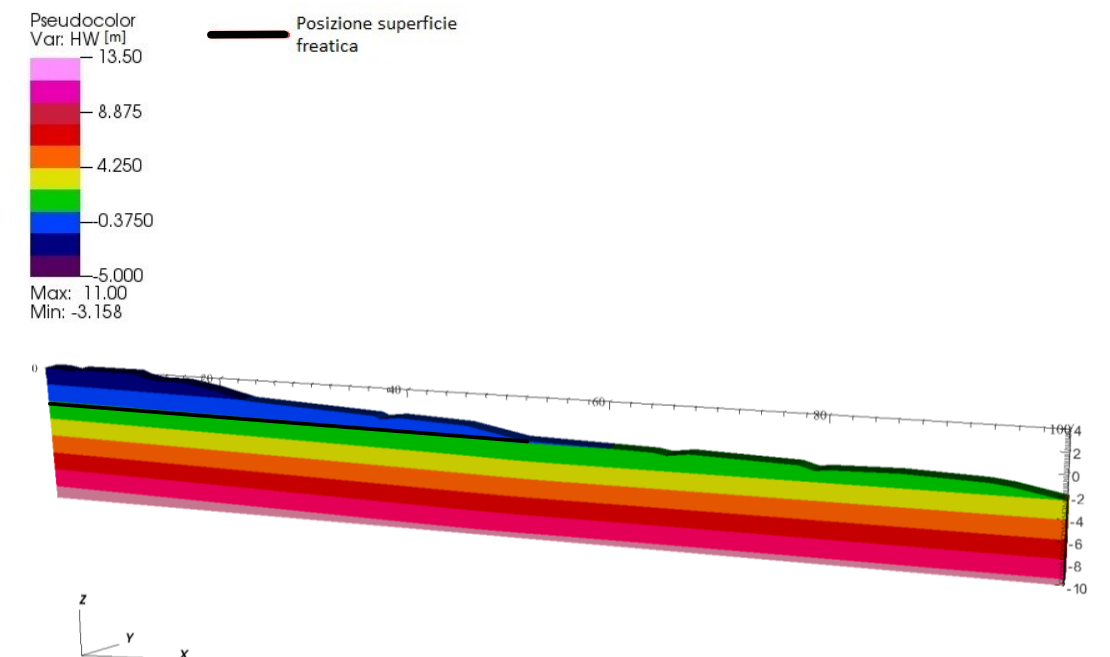


Figura 20: Andamento della pressione in condizioni stazionarie equilibrate nello scenario di riferimento

4.1.2. Soluzione analitica del modello

La soluzione analitica è ricavata applicando il metodo precedentemente illustrato di Badon Ghijben-Herzberg. Il caso di studio è simile a quello di Figura 21 in cui la ricarica zenitale f risulta nulla.

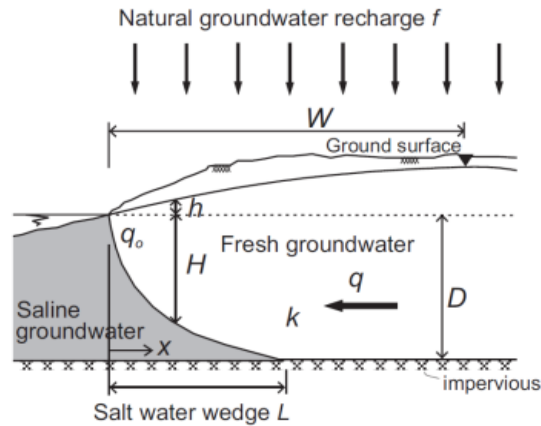


Figura 21: Rappresentazione dell'interfaccia dolce-salata per un acquifero costiero freatico

Le equazioni che permettono di descrivere l'andamento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata e la sua massima ingressione in corrispondenza alla base dell'acquifero sono le seguenti:

$$H = \sqrt{\frac{-2q_0x}{K(1+\alpha)\alpha}}$$

$$q_0 = -jK(h+D)$$

$$j = \frac{h}{W}$$

$$L = \frac{H^2K(1+\alpha)\alpha}{2q_0x}$$

Avendo ricarica zenitale nulla, la quantificazione del flusso nell'acquifero da terra verso mare q_0 si ottiene individuando il gradiente idraulico j (livello della falda al boundary entroterra rispetto al medio mare diviso la distanza tra il boundary e la posizione della linea di riva), e moltiplicandolo per il valore K e lo spessore dell'acquifero. Per trovare H si utilizza la formula (30), per L invece la si inverte imponendo $H = D$ (profondità massima dell'acquifero rispetto al livello del mare).

Confrontando la soluzione analitica riportata in Figura 22 con i risultati del modello numerica (Figura 18) si osserva una differenza significativa. L'intrusione è più pronunciata nella soluzione analitica (quindi l'acquifero dolce esercita una "spinta" minore) in quanto il contorno del modello numerico è posto ad una distanza relativamente limitata dalla linea di riva, Nel modello analitico, invece, l'acquifero è considerato infinitamente esteso portando a una soluzione del tipo riportato in Figura 22.

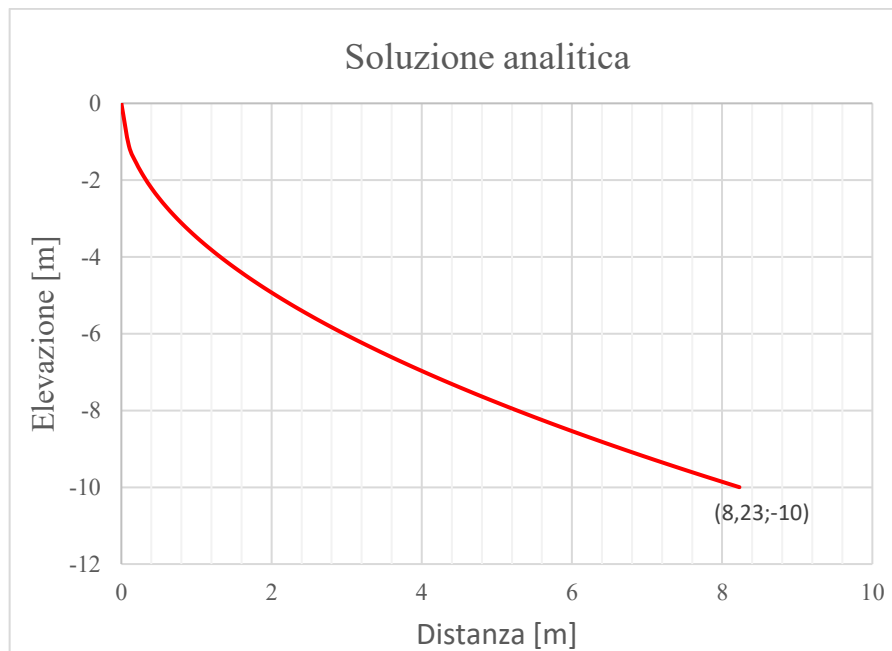


Figura 22: Andamento dell'interfaccia acqua dolce- acqua salata per un acquifero costiero di interesse nello scenario di riferimento ottenuto dal modello analitico di Badon Ghijben-Herzberg

4.2. Analisi di sensitività

In questo paragrafo viene analizzato come il cuneo salino cambia con la variazione del valore di alcuni dei parametri del modello. Nell'ordine sono state fatte variare la densità dell'acqua salata (ρ_s), la dispersività longitudinale e trasversale ($\alpha_{long}, \alpha_{trasv}$) e la conducibilità idraulica (K).

4.2.1. *Variazione della densità dell'acqua salata*

Le densità dell'acqua utilizzate per la soluzione dello scenario di riferimento erano $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_s = 1035 \text{ kg/m}^3$, per questa analisi la densità dell'acqua salata è stata aumentata ad un valore pari a $\rho_s = 1350 \text{ kg/m}^3$. Si noti che le condizioni iniziali per la pressione dipendono dalla densità dell'acqua; ora, avendo variato quest'ultima, sia le condizioni iniziali che le condizioni al contorno devono essere aggiornate rispetto allo scenario di riferimento. In questo nuovo caso la concentrazione normalizzata c rappresenta un valore diverso da quello dello scenario precedente ($c = 1$ in questo scenario indica $\rho_s = 1350 \text{ kg/m}^3$).

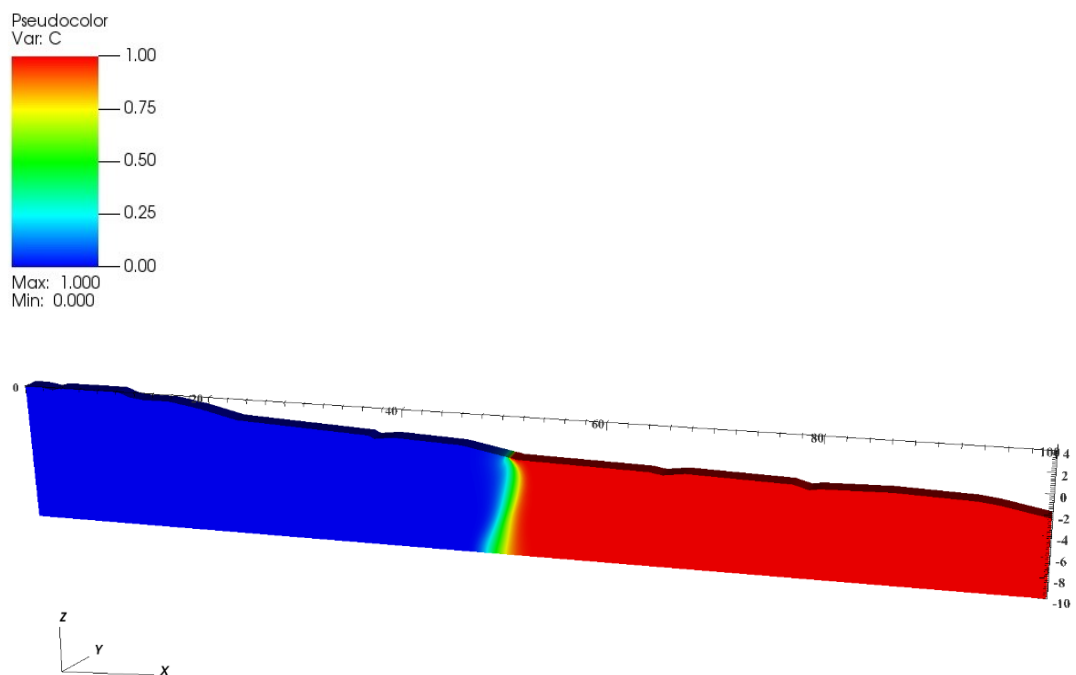


Figura 23: Concentrazione dopo 8 mesi dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata

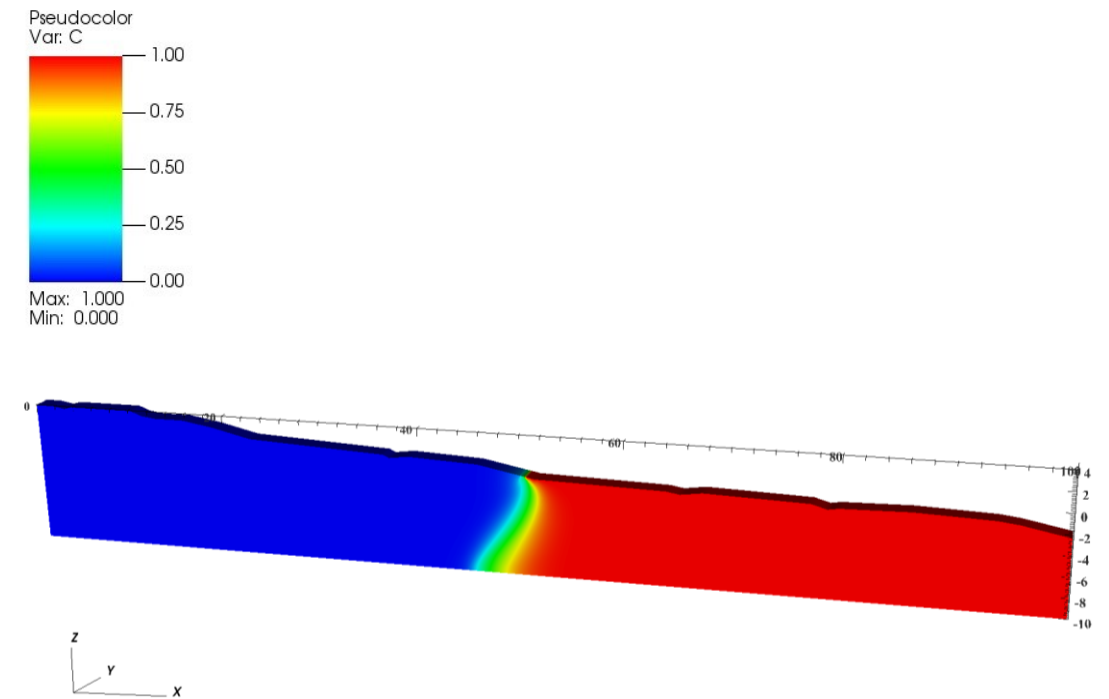


Figura 24: Concentrazione dopo 5 anni dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata

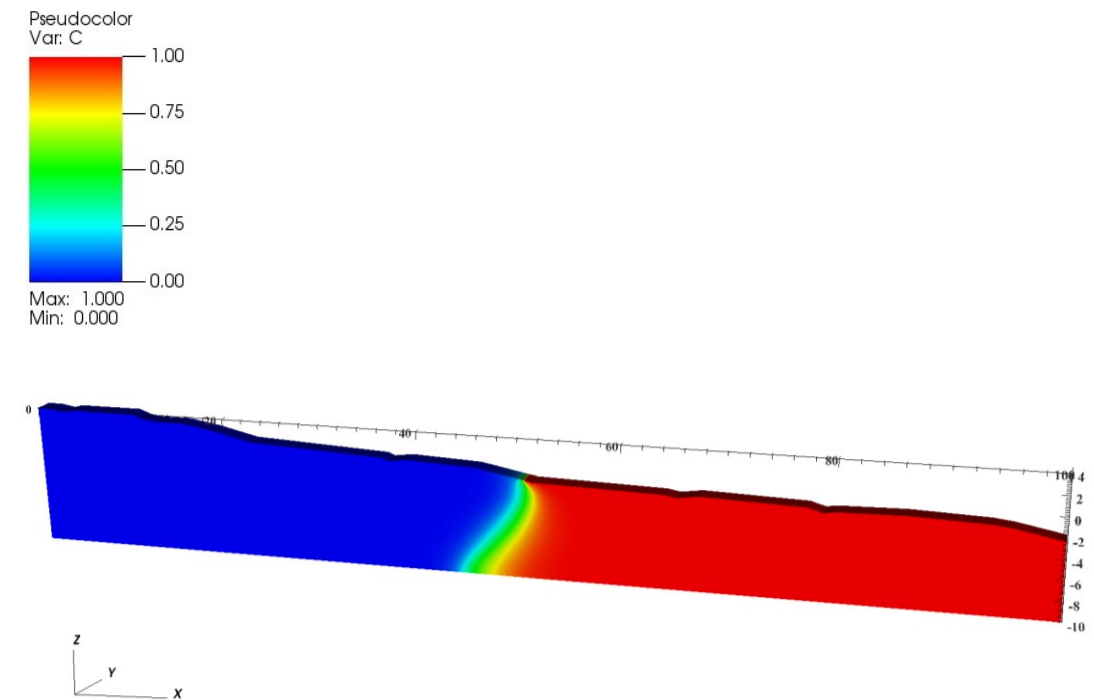


Figura 25: Concentrazione dopo 100 anni dall'inizio dell'intrusione salina nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata

I risultati in termini di distribuzione della concentrazione sono riportati Figura 23 - Figura 25 per alcuni istanti temporali. Anche per questo caso si raggiunge una situazione stazionaria equilibrata nell'intervallo temporale coperto dalla simulazione, nello specifico dopo 15 anni dall'inizio dell'intrusione. Confrontando il risultato con quello dello scenario di riferimento si nota una intrusione più marcata a causa del carico idrostatico maggiore lato mare (in quando l'acqua salata è più pesante in questo scenario rispetto a quello di riferimento) permettendo all'acqua salata di contrastare maggiormente la spinta dell'acqua dolce.

Per quanto riguarda l'andamento della pressione (Figura 26 e Figura 27), si osservano valori maggiori nel lato mare a seguito della maggiore densità dell'acqua salata (rispetto allo scenario di riferimento).

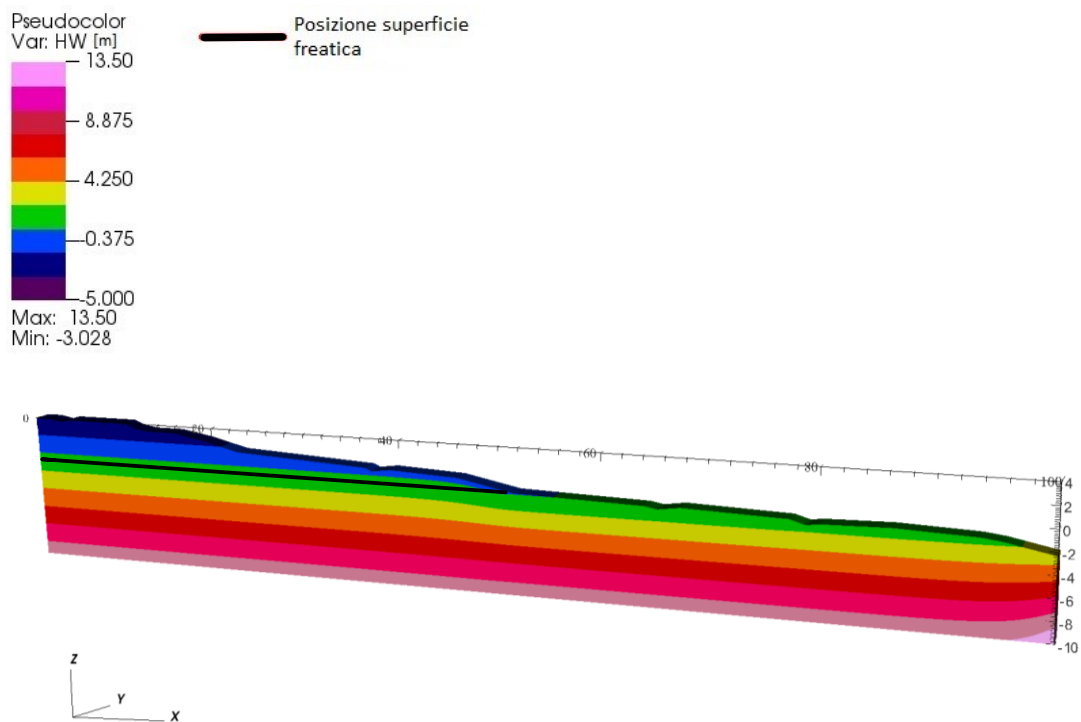


Figura 26: Andamento della pressione nell'istante iniziale nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata

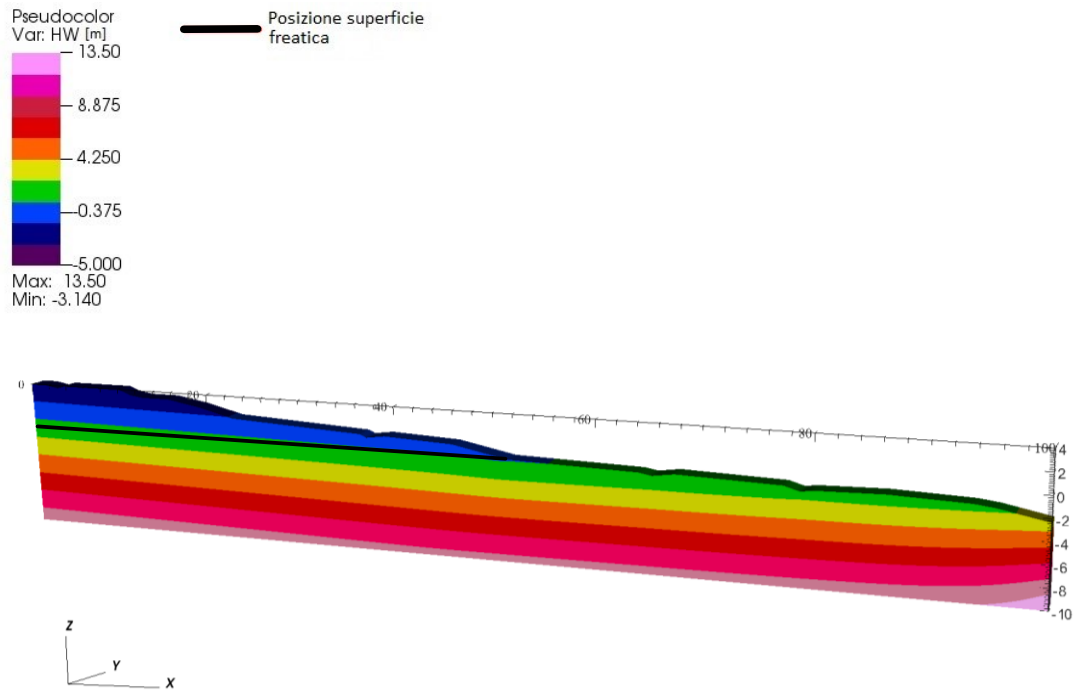


Figura 27 : Andamento della pressione in condizioni stazionarie equilibrate nello scenario con densità dell'acqua salata più elevata

4.2.2. Variazione della dispersività longitudinale e trasversale

Il parametro variato in questo scenario è la dispersività longitudinale e trasversale. Tali valori sono stati aumentati di un ordine di grandezza rispetto a quelli dello scenario di riferimento, ovvero $\alpha_{long} = 10.0$ m e $\alpha_{trasv} = 1.0$ m. Per la simulazione si è utilizzata come condizione iniziale il risultato finale equilibrato prodotto dallo scenario di riferimento ottenuto precedentemente (Figura 18).

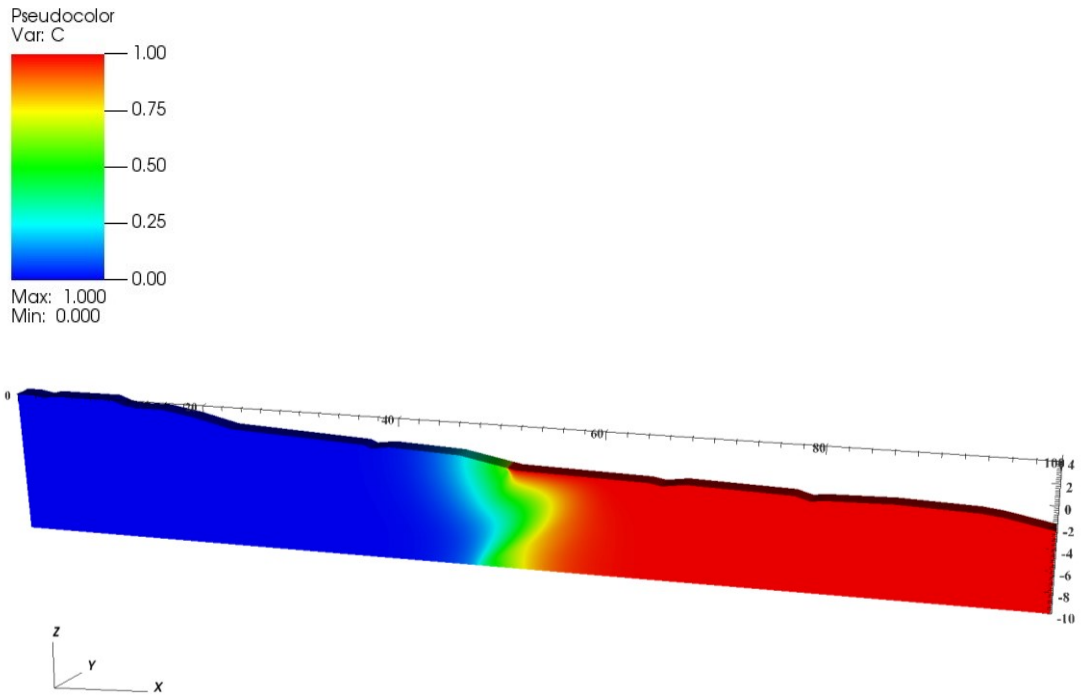


Figura 28: Concentrazione dopo 8 mesi dall'applicazione della variazione di dispersività

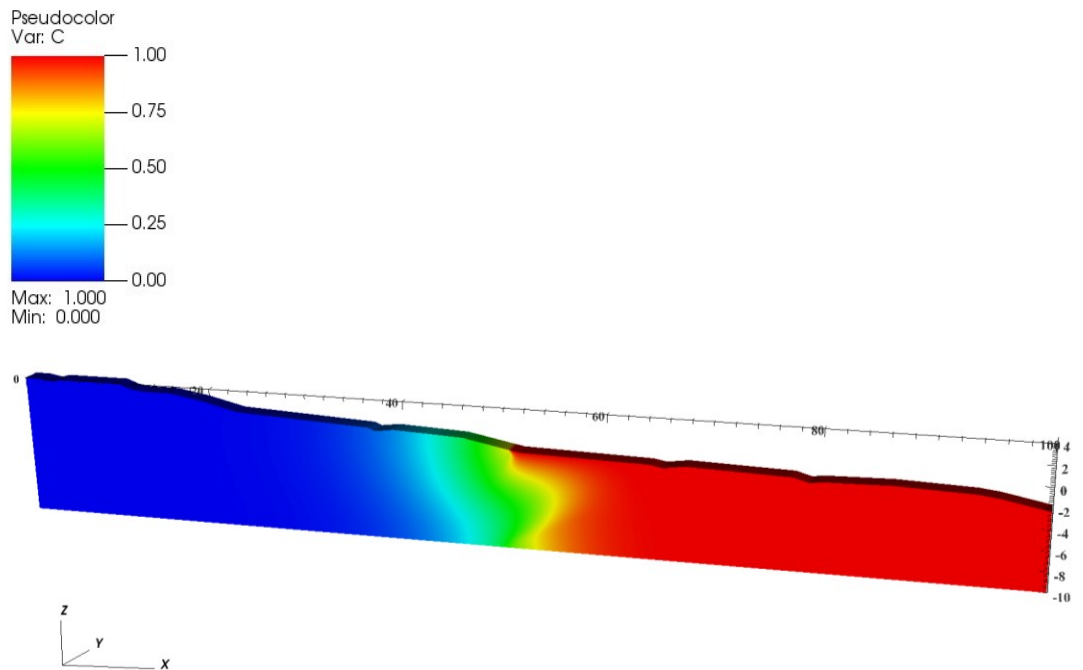


Figura 29 : Concentrazione dopo 5 anni dall'applicazione della variazione di dispersività

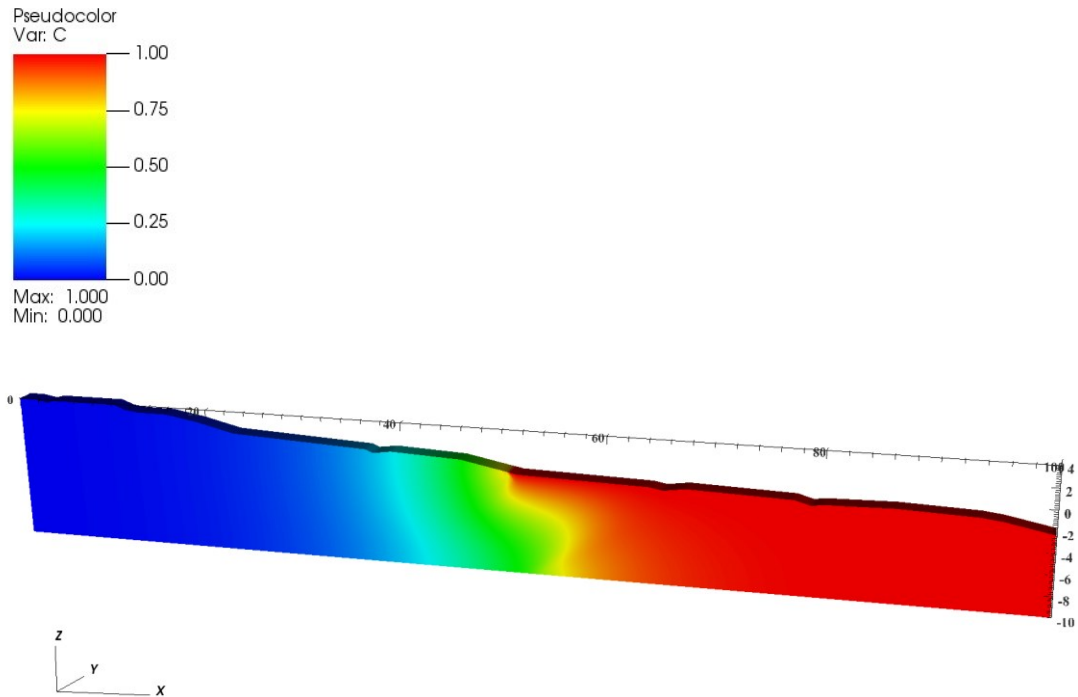


Figura 30: Concentrazione dopo 100 anni dall'applicazione della variazione di dispersività

Come era prevedibile la zona di transizione in questo scenario risulta più ampia (Figura 28 - Figura 30) di quella dello scenario di riferimento perché nell'equazione di trasporto (10) il gradiente di concentrazione salina è proporzionale alla dispersività.

In relazione alla distribuzione della pressione, non essendoci particolari variazioni delle condizioni al contorno non si evidenziano evidenti differenze rispetto ai risultati dello scenario di riferimento (Figura 19 - Figura 20).

4.2.3. *Variazione della conducibilità idraulica*

Come per lo scenario precedente, anche la conducibilità idraulica è stata aumentata di un ordine di grandezza rispetto ai valori utilizzati per lo scenario di riferimento ottenendo $K_x = K_y = K_z = 1.0$ m/giorno. La condizione iniziale rimane la soluzione finale del caso di riferimento (Figura 18).

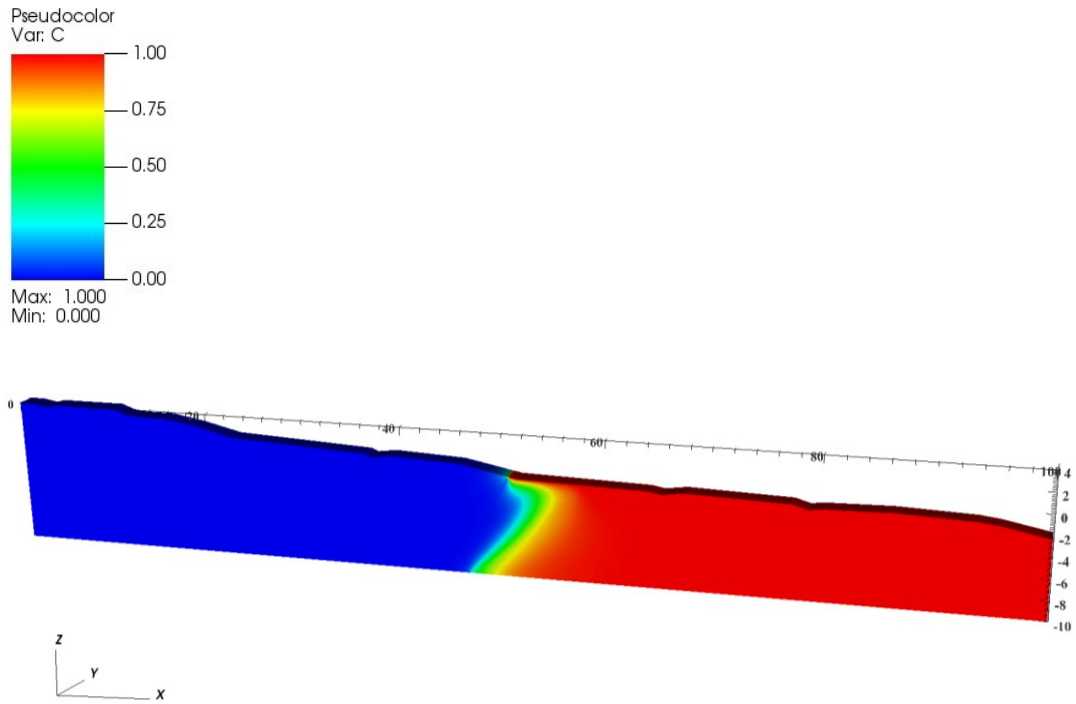


Figura 31 : Concentrazione dopo 8 mesi dall'applicazione della variazione della conducibilità idraulica

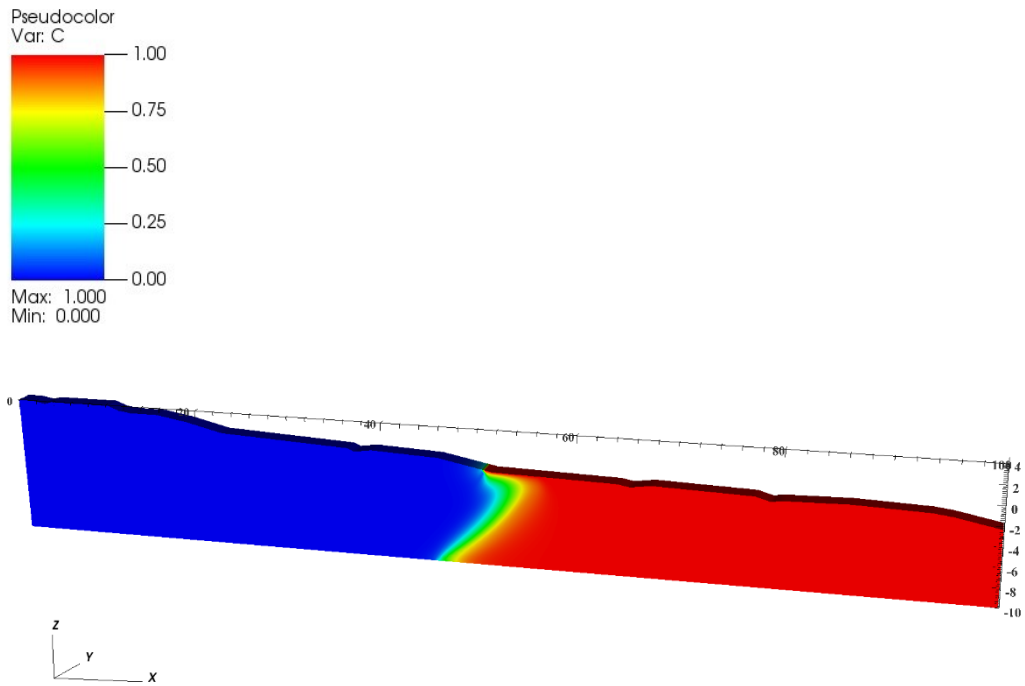


Figura 32: Concentrazione dopo 5 anni dall'applicazione della variazione della conducibilità idraulica

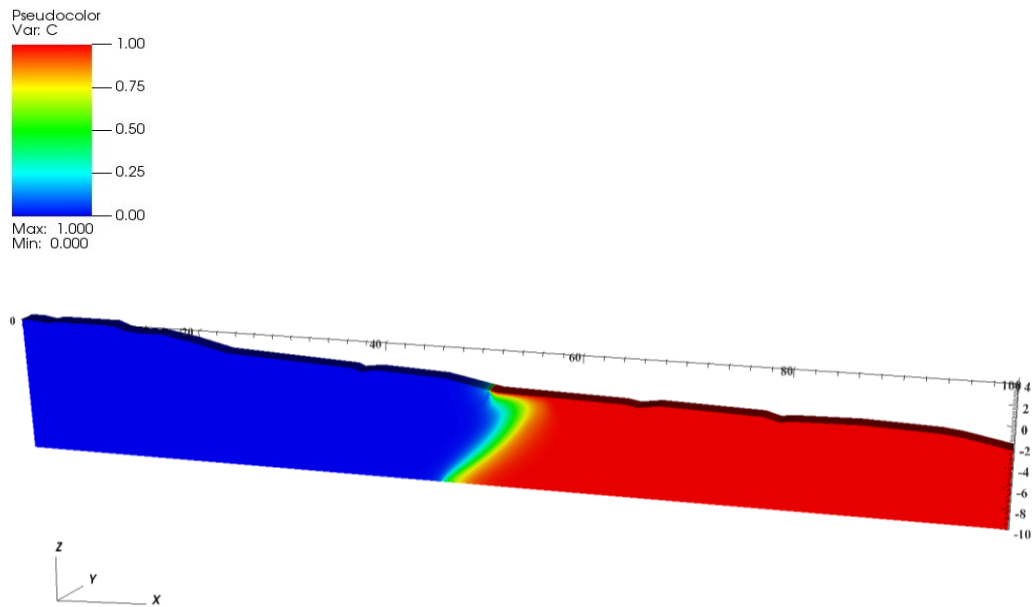


Figura 33: Concentrazione dopo 100 anni dall'applicazione della variazione della conducibilità idraulica

Le Figura 31 - Figura 33 riportano i risultati in termini di concentrazione; rispetto al caso di riferimento la zona di transizione risulta più compatta in quanto la componente avvertiva del flusso risulta più forte rispetto a quella dispersiva data la maggiore velocità di filtrazione a parità di gradiente idraulico.

In relazione alla distribuzione della pressione, non essendoci particolari variazioni delle condizioni al contorno non si evidenziano evidenti differenze rispetto ai risultati dello scenario di riferimento (Figura 19 - Figura 20).

4.3. Scenari di “variazione climatica”

Nei paragrafi seguenti sono presentati alcuni scenari in cui le condizioni al contorno sono in qualche modo riferibili agli effetti del cambiamento climatico. Nello specifico, si è ipotizzato che il livello dell’acquifero freatico lato entroterra sia inferiore a seguito di una minore ricarica naturale. Sono stati analizzati due casi con la superficie della falda che ha lo stesso livello del medio mare ($h_f = h_s = 0$ m s.l.m.) e successivamente che la falda risulti ancora più depressa ($h_f = -1.0$ m s.l.m.). Le simulazioni sono state inizializzate utilizzando la soluzione finale dello scenario di riferimento, ciò ha consentito di evidenziare l’effetto di tali modifiche entro la fine del secolo corrente.

4.3.1. *Variazione debole del livello della falda freatica*

Si è ipotizzata un abbassamento della falda freatica di 1 m rispetto allo scenario di riferimento ($h_f = h_s = 0$ m s.l.m.), tenendo invariati tutti i parametri (Figura 34).

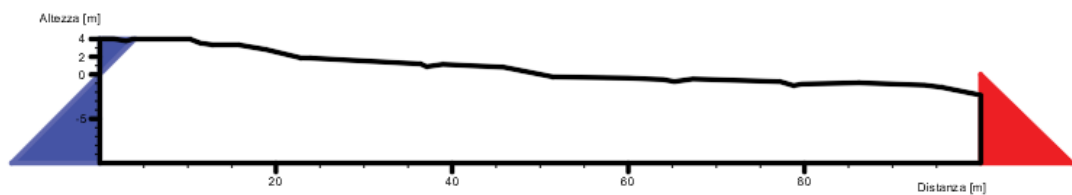


Figura 34: Rappresentazione delle pressioni al contorno, nello scenario di livello freatico nell’acquifero e livello del mare alla stessa altezza

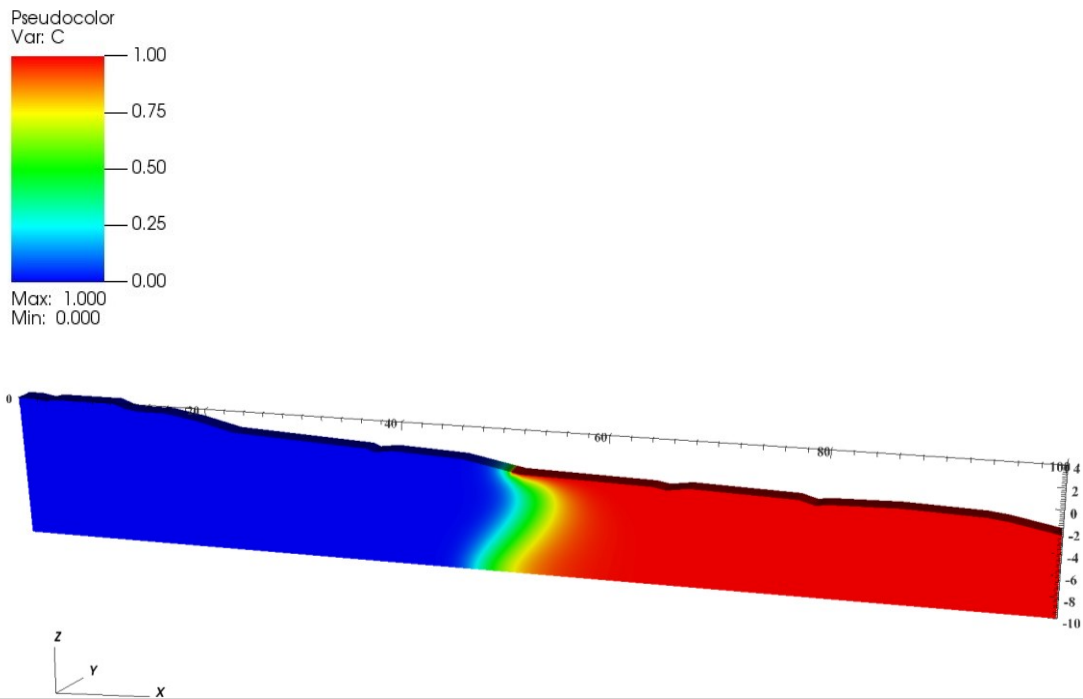


Figura 35: Concentrazione dopo 8 mesi dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica

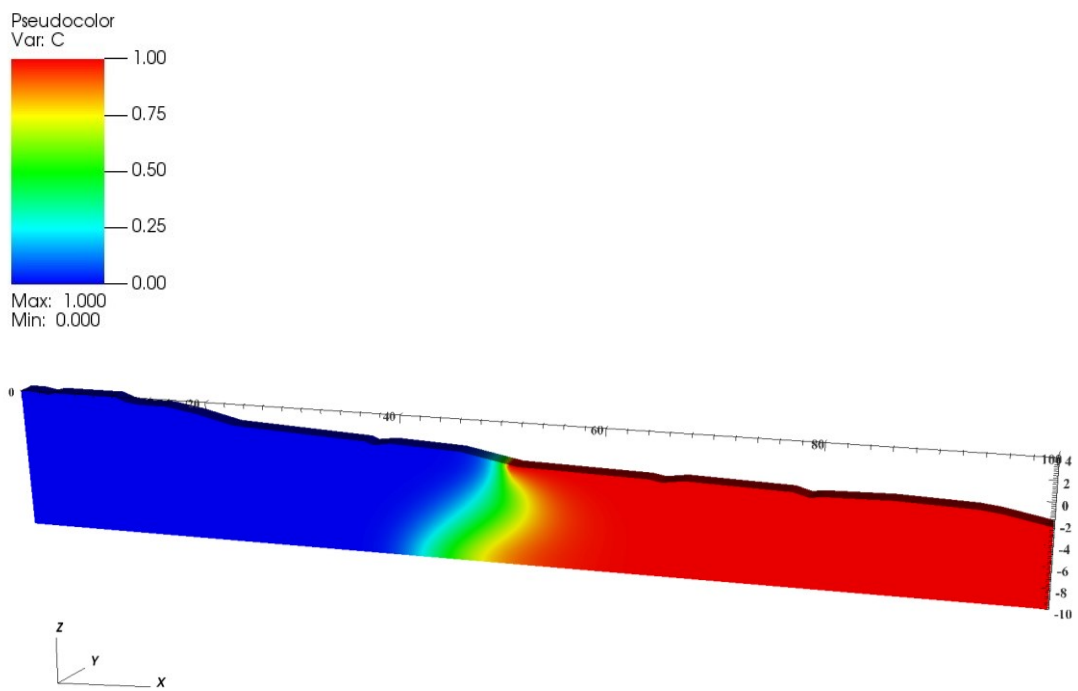


Figura 36: Concentrazione dopo 5 anni dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica

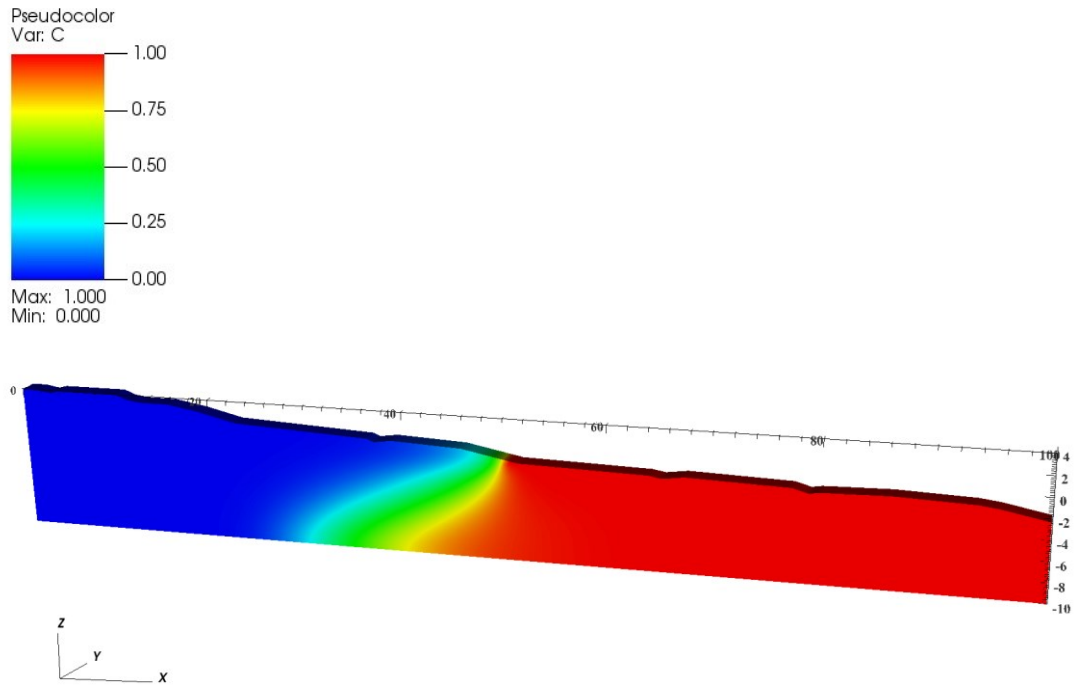


Figura 37: Concentrazione dopo 20 anni dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica

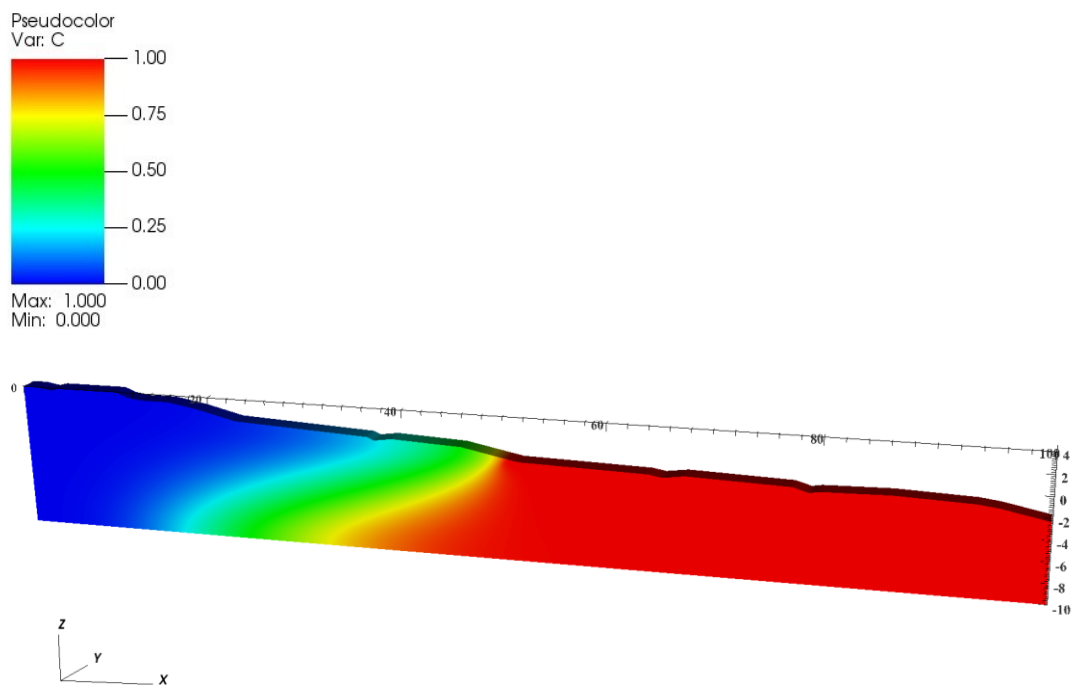


Figura 38: Concentrazione dopo 45 anni dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica

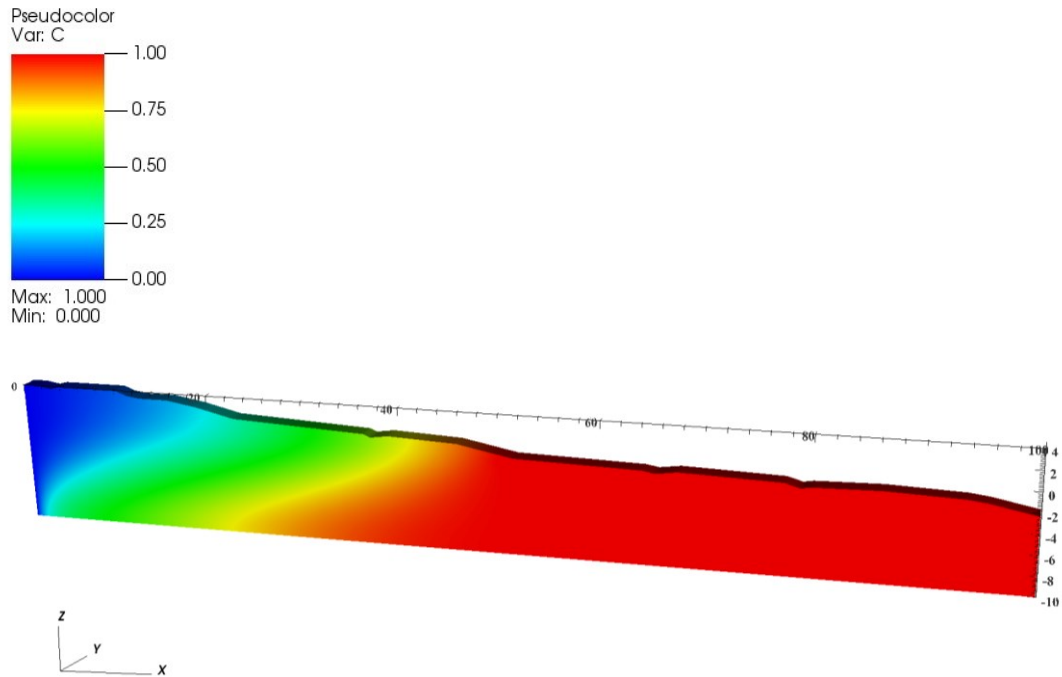


Figura 39: Concentrazione dopo 75 anni dall'abbassamento di 1 m del livello della falda freatica

Come atteso, si nota che il processo di intrusione nell'acquifero freatico è assai più evidente che nello scenario di riferimento. Questo perché l'acqua del mare, avendo una densità maggiore, ha una spinta più grande di quella dell'acqua dolce che avendo lo stesso livello non ha abbastanza forza da respingerla. Da tenere in considerazione è che le condizioni al contorno che sono state poste individuando la zona più esterna dell'acquifero con concentrazione nulla; per avere una soluzione più realistica vicino a tale boundary si sarebbe dovuto utilizzare un dominio con una maggiore estensione di terra emersa (Figura 35 - Figura 39).

Per quanto riguarda la distribuzione della pressione, il confronto tra la Figura 20 con la Figura 40 consente di evidenziare come il carico idraulico sia diminuito lato entroterra, rimanendo invariato al di sotto del mare.

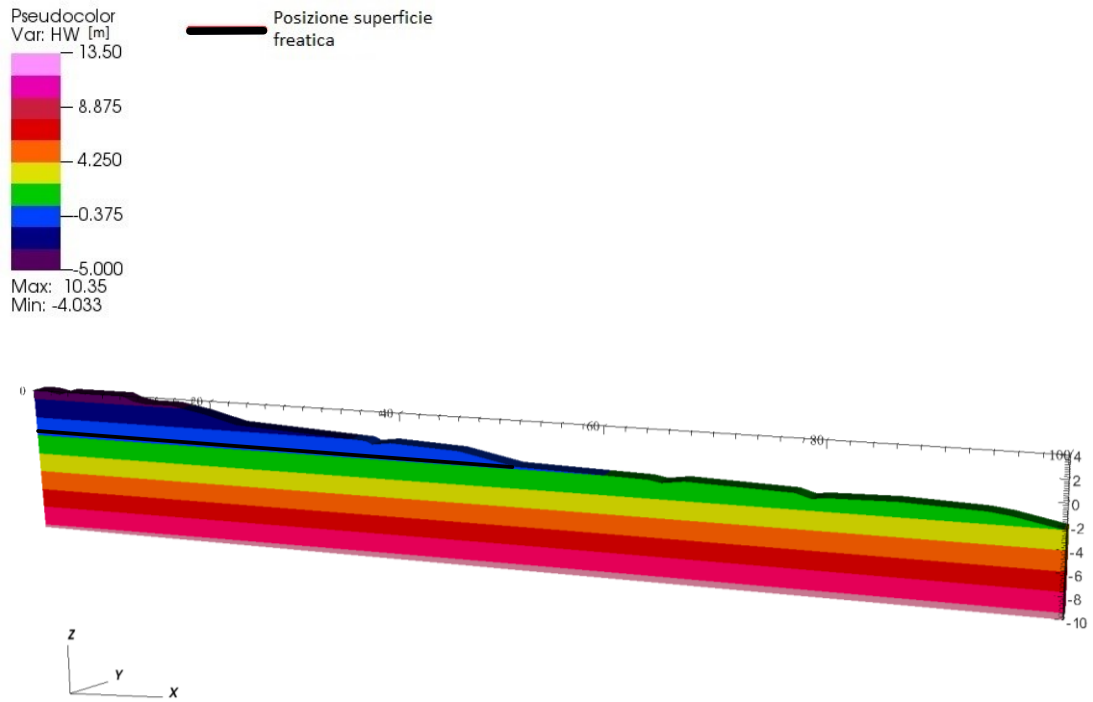


Figura 40: Rappresentazione dell'andamento delle pressioni in condizioni di stabilità con variazione leggera del livello dell'acquifero

4.3.2. Variazione significativa del livello della falda freatica

In questo paragrafo si analizza lo scenario in cui si riscontri un importante abbassamento del livello della superficie freatica ($h_f = -1.0$ m s. l. m.), (Figura 41).

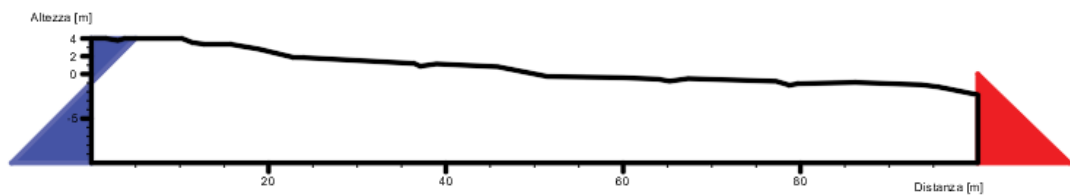


Figura 41: Rappresentazione delle pressioni al contorno nello scenario con livello di falda nell'acquifero inferiore al livello del mare

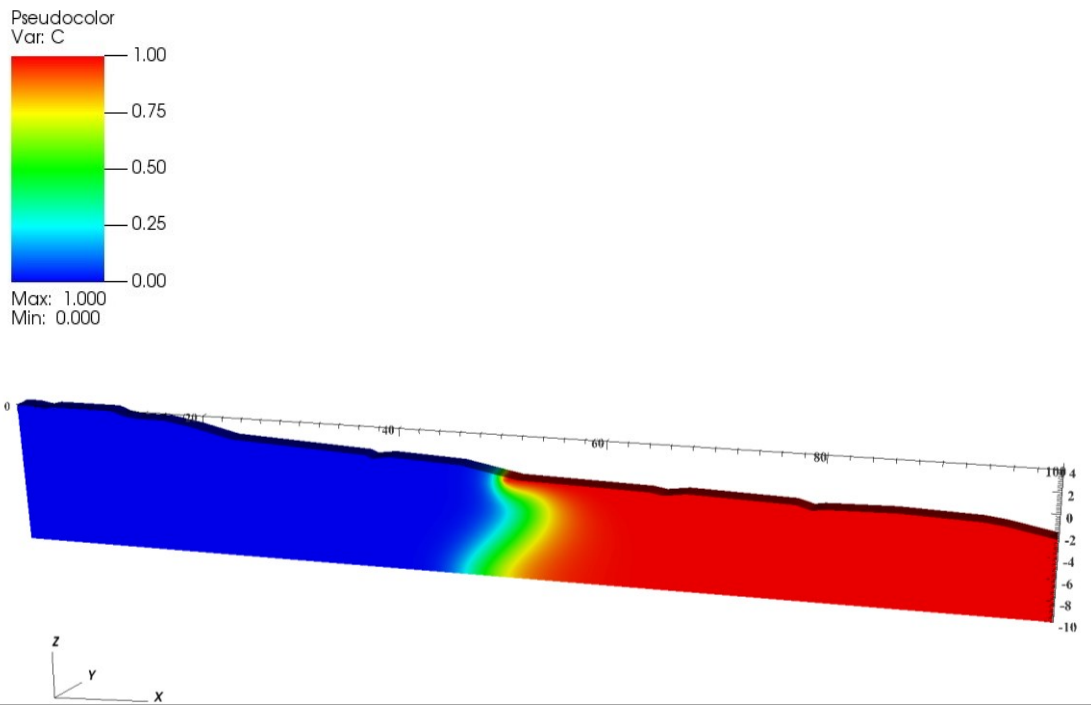


Figura 42: Concentrazione dopo 8 mesi dall'abbassamento di 2 m del livello della falda freatica

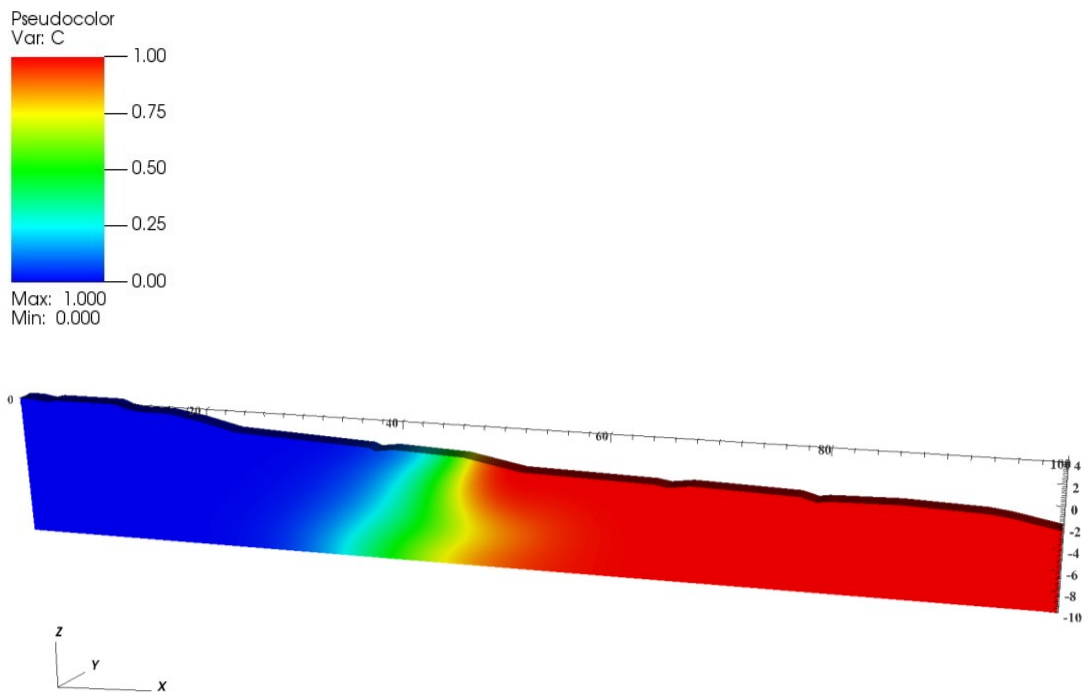


Figura 43: Concentrazione dopo 5 anni dall'abbassamento di 2 m del livello della falda freatica

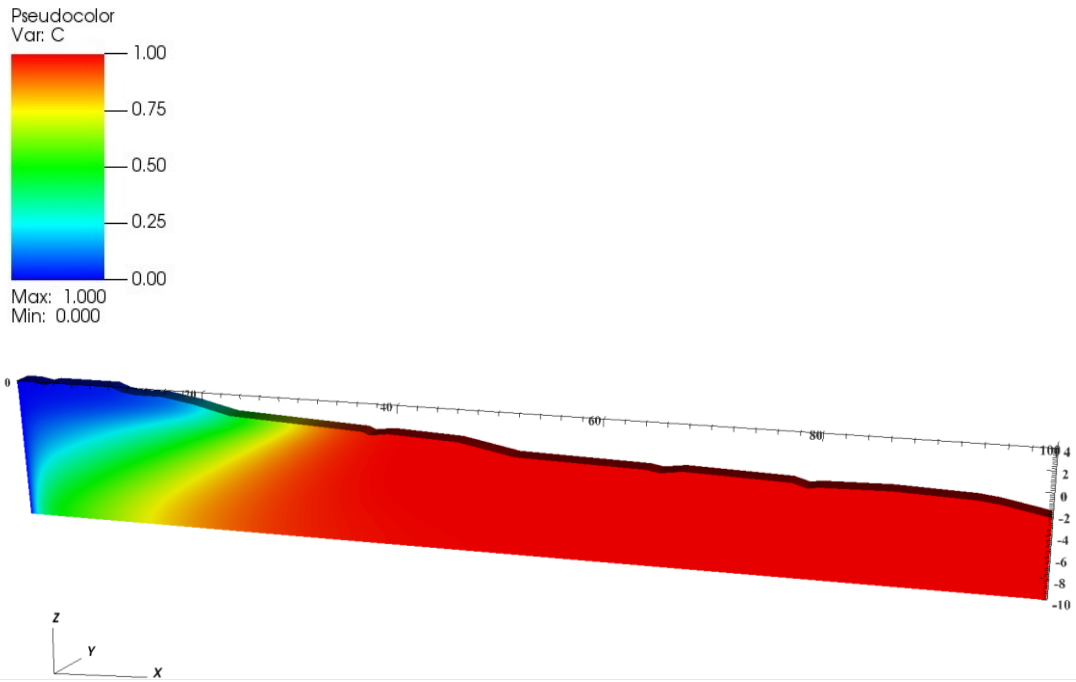


Figura 44: Concentrazione dopo 25 anni dall'abbassamento di 2 m del livello della falda freatica

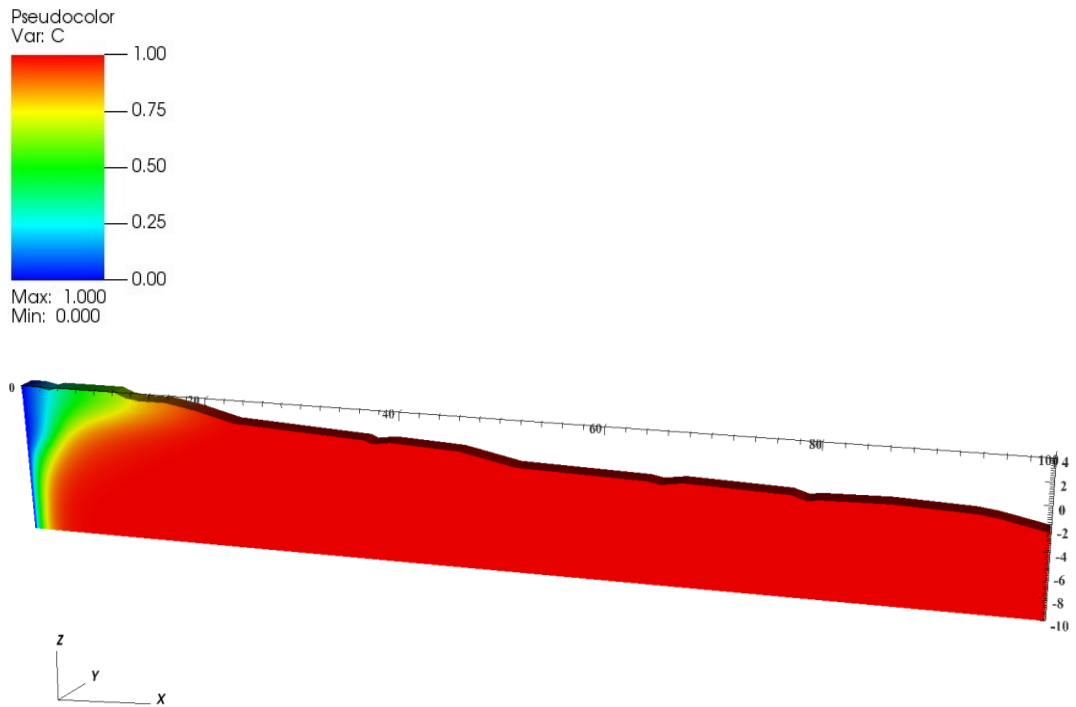


Figura 45: Concentrazione dopo 45 anni dall'abbassamento di 2 m del livello della falda freatica

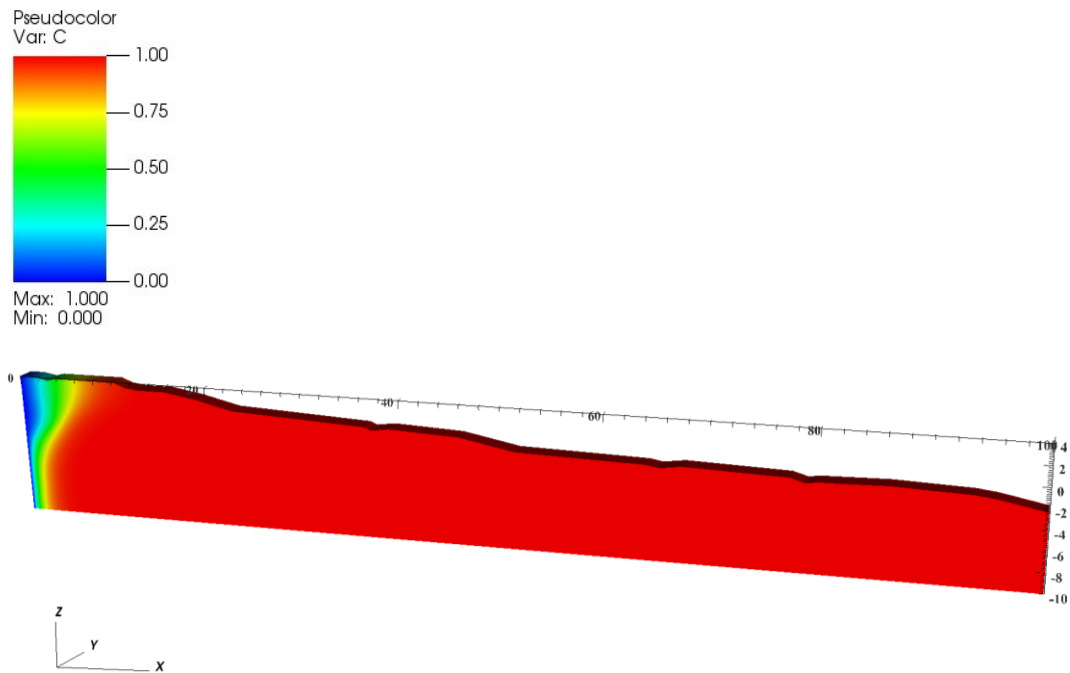


Figura 46: Concentrazione dopo 75 anni dall'abbassamento di 2 m del livello della falda freatica

I risultati in termini di concentrazione sono forniti in Figura 42 - Figura 46. Si nota che il processo di salinizzazione con il trascorrere del tempo interessa completamente la zona dell'acquifero. Il maggiore carico idraulico e la maggiore concentrazione facilitano il movimento dell'acqua salata del mare nell'entroterra. Ancor più in questo scenario le condizioni al contorno poste sull'entroterra in termini di $c = 0$ vincolano artificialmente la soluzione modellistica in prossimità del boundary.

La soluzione per la pressione evidenzia una netta diminuzione dei valori nella zona dell'acquifero prossimo all'entroterra (Figura 47) mentre nella zona a mare la situazione rimane pressoché invariata, motivo per il quale la salinità si propaga largamente nell'acquifero freatico.

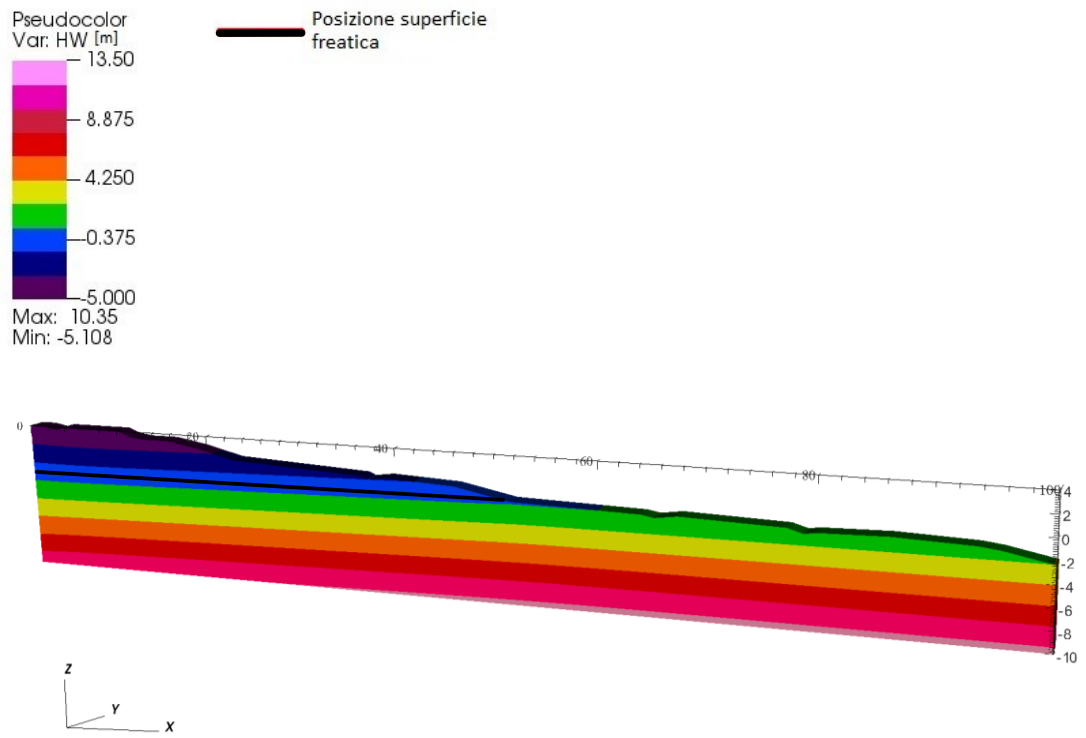


Figura 47: Andamento della pressione in condizioni stazionarie equilibrate nello scenario con abbassamento di 2 m del livello della falda freatica

4.4. Confronto tra i risultati

In questo capitolo sono confrontati i risultati ottenuti in termini di concentrazione nello scenario di riferimento e in quelli ottenuti dalla variazione dei parametri e delle condizioni al contorno. Sono state scelte tre posizioni rappresentative all'interno del dominio di calcolo, Figura 48, in modo da condurre un confronto più rappresentativo.

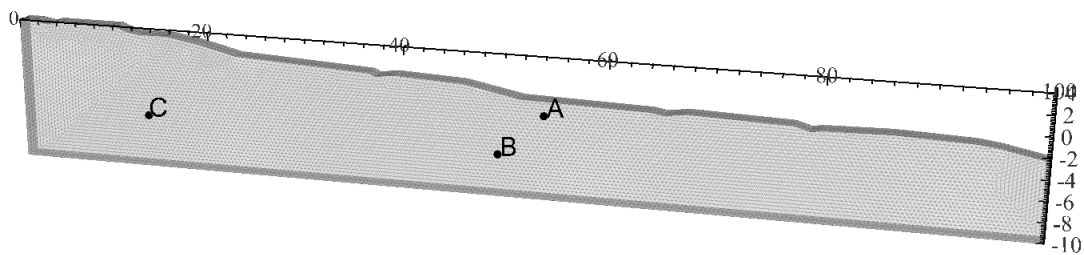


Figura 48: Posizione dei nodi sul dominio di calcolo per i quali sono stati confrontati i risultati

4.4.1. Posizione A

Il nodo A è situato in corrispondenza alle coordinate $x = 55.3$ m, $z = -2.4$ m, leggermente a destra della mezzeria del profilo. Come si può notare dalla Figura 49 la concentrazione salina rimane sempre maggiore del 55% indipendentemente dallo scenario analizzato. Nello scenario di riferimento (in figura "Riferimento") si inizia da una condizione $c = 1$, come imposto dalle condizioni iniziali, per poi decrescere fino al raggiungimento del nuovo stato di equilibrio in cui $c = 0.63$. Per il caso di variazione della densità dell'acqua di mare (in figura "Densità") l'andamento di c è caratterizzato da una minima riduzione, questo dovuto alla maggiore spinta dell'acqua salata. Con la variazione della dispersività longitudinale e trasversale (in figura "Dispersività"), partendo dunque dalla condizione di equilibrio dello scenario di riferimento, si osserva un aumento graduale della concentrazione. Al variare della conducibilità idraulica (in figura "Cond. idraulica") non si ottengono significative variazioni dalla condizione iniziale. Variazioni più decise si ottengono nei casi in cui si cambiano le condizioni al contorno lato campagna: sia con una variazione debole (abbassamento di 1.0 m) che significativa (abbassamento di 2 m) del livello di falda (in figura rispettivamente "Variazione debole falda" e "Variazione

“significativa falda”) si nota un aumento della concentrazione che raggiunge in “breve” tempo il valore dell’acqua di mare.

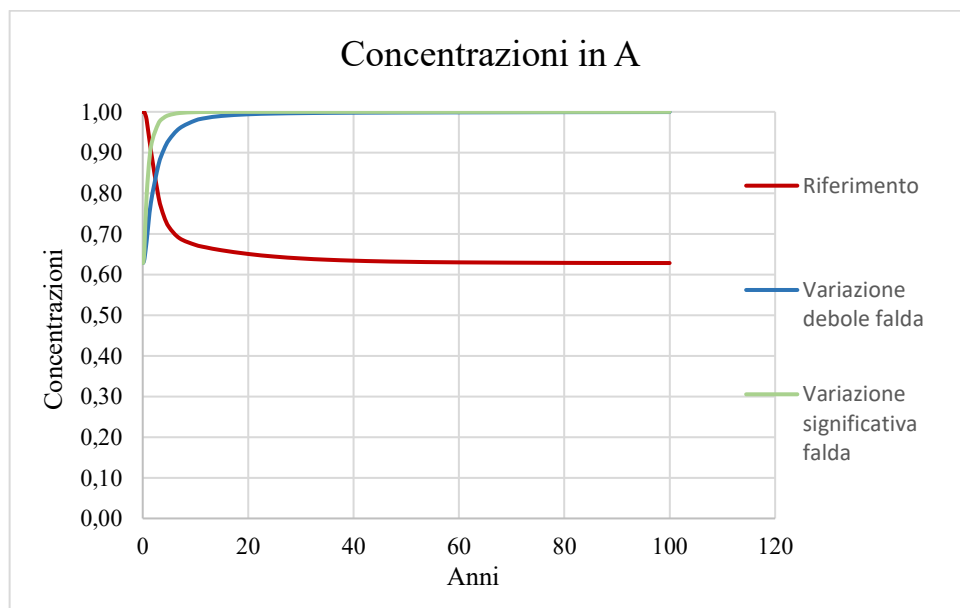
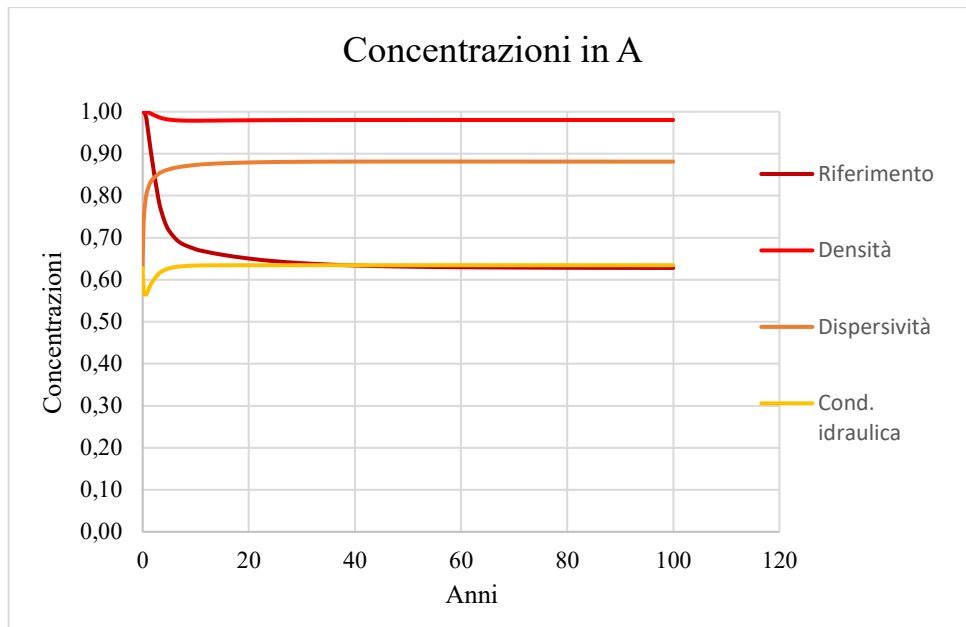
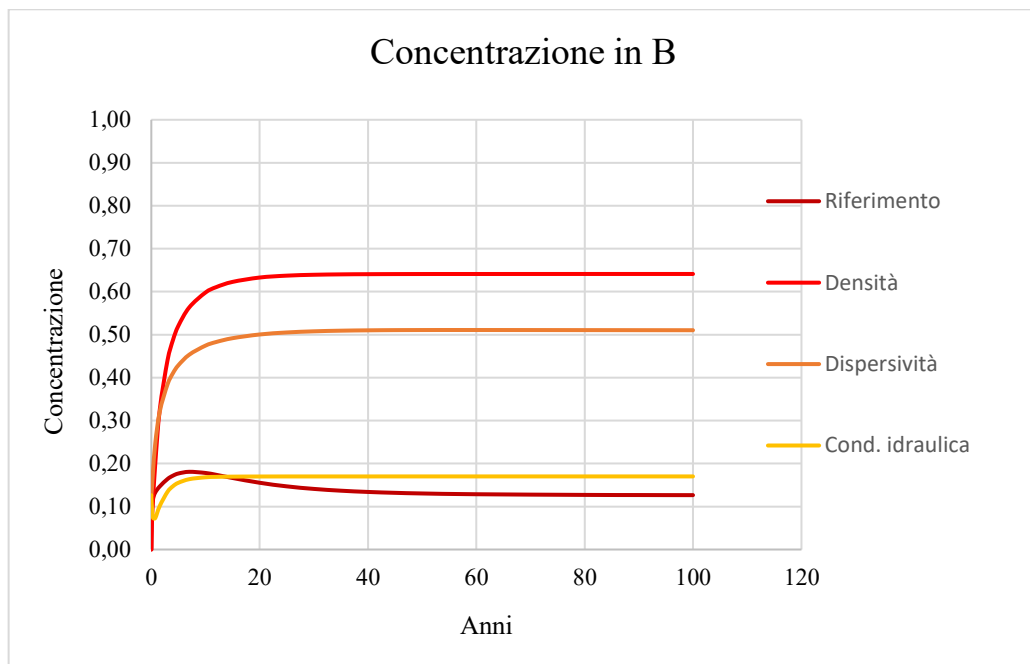


Figura 49: a) Andamento temporale della concentrazione nel nodo A come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e della variazione parametri sensitività; b) Andamento temporale della concentrazione nel nodo C come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e variazione livelli di falda

4.4.2. Posizione B

Il nodo B è situato in corrispondenza alle coordinate $x = 48.7$ m, $z = -6.5$ m, alcuni metri nell'entroterra rispetto alla linea di costa. Questo nodo presenta una variazione maggiore della concentrazione nei vari casi simulati rispetto a quanto ottenuto per la posizione A (Figura 50). Con lo scenario di riferimento si parte da una condizione a concentrazione nulla e nel tempo c aumenta leggermente fino al valore 0.13. Con la variazione della densità l'aumento della concentrazione è considerevole. La situazione è simile per quanto riguarda la variazione della dispersività mentre, come nel nodo precedente, variando la conducibilità idraulica si giunge a una condizione stazionaria non molto lontana rispetto al caso di riferimento. Abbassando il livello di falda c raggiunge il valore massimo pari a 0.99 in entrambi gli scenari analizzati.



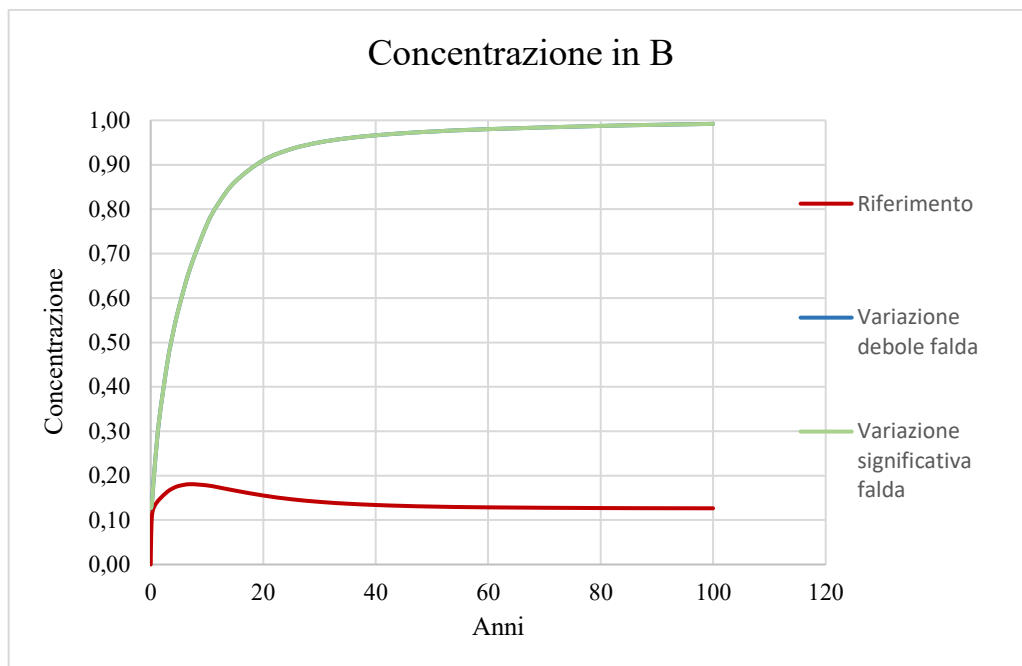


Figura 50: a) Andamento temporale della concentrazione nel nodo B come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e della variazione parametri sensitività; b) Andamento temporale della concentrazione nel nodo B come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e variazione livelli di falda

4.4.3. Posizione C

Il nodo C è situato in corrispondenza alle coordinate $x = 15.4$ m, $z = -5.5$ m, nel mezzo dell'acquifero freatico, non lontano dal boundary del modello verso l'entroterra. Come si può nota dalla Figura 51 la concentrazione in C non cambia nello scenario di riferimento e con la variazione dei parametri di sensibilità. L'acquifero in quella posizione rimane sempre dolce. L'acquifero subisce un aumento della concentrazione quando il livello della falda inizia a diminuire: con un debole abbassamento della falda si è in una zona con concentrazione $c = 0.4$, quando invece la falda ha un abbassamento significativo anche quella zona dell'acquifero viene completamente invasa dal processo di salinizzazione. Da notare come la dinamica in questa posizione sia più lenta di quella in corrispondenza alla posizione A.

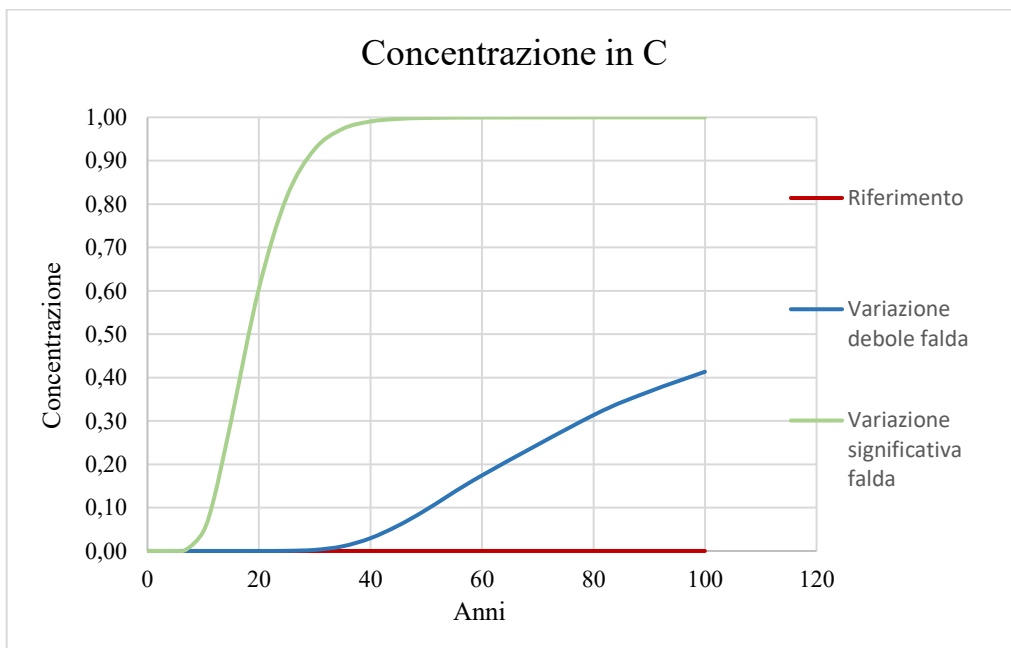
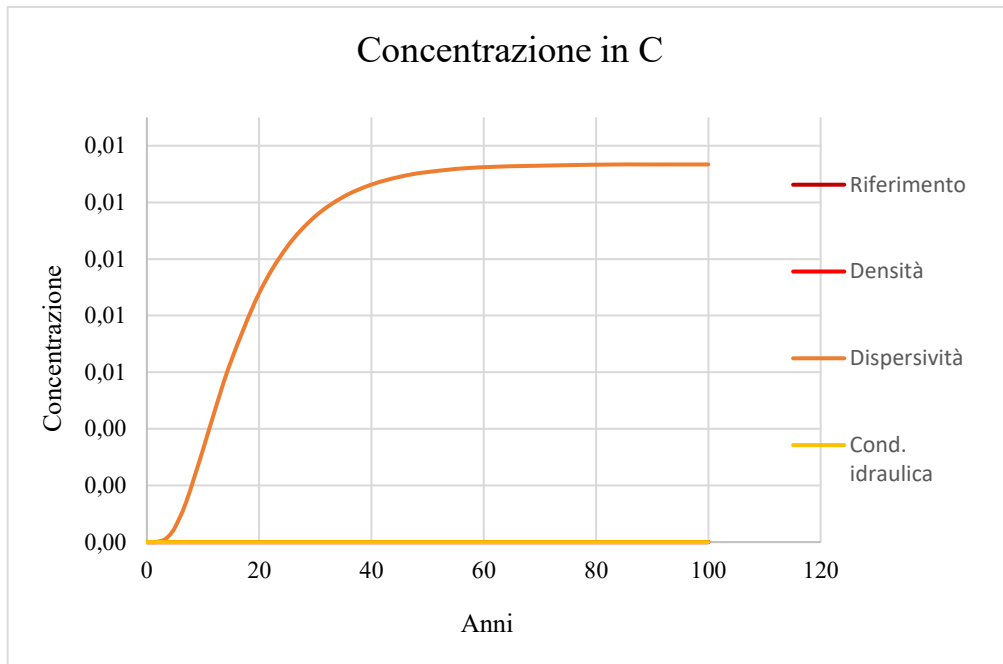


Figura 51: a) Andamento temporale della concentrazione nel nodo C come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e della variazione parametri sensitività; b) Andamento temporale della concentrazione nel nodo C come ottenuta da GWS dello scenario di riferimento e variazione livelli di falda

5. Conclusioni

L'elaborato ha come oggetto la modellazione agli elementi finiti dell'intrusione salina in un acquifero costiero con diverse condizioni al contorno e valore dei parametri idrogeologici. L'intrusione salina consiste nello spiazzamento dell'acqua dolce presente in un acquifero con acqua salata che dal fondo del mare penetra nel sottosuolo anche solamente per la maggiore densità. La salinizzazione di suoli e acquiferi costieri è una problematica che riguarda principalmente le zone costiere pianeggianti e, recentemente, è stato favorito dal cambiamento climatico.

In questa tesi sono stati introdotti i modelli di calcolo numerico e analitico che permettono di descrivere il processo dell'intrusione salina in un mezzo poroso. L'applicazione dei modelli ha richiesto la definizione del dominio di interesse (in questo caso rappresentato da un profilo tipico di una spiaggia del nord-Adriatico), la sua discretizzazione in elementi finiti tridimensionali e la prescrizione delle condizioni iniziali e le condizioni al contorno.

Il modello è stato quindi fatto funzionare, con le simulazioni che hanno fornito l'andamento temporale della concentrazione e della pressione in tutti i punti dell'acquifero simulato. È stato individuato e analizzato uno scenario di riferimento rispetto al quale sono stati successivamente confrontare i risultati ottenuti da altri scenari nei quali sono stati variati i valori di alcuni parametri fisici (la densità dell'acqua salata, la conducibilità idraulica, il coefficiente di dispersione), e delle condizioni al contorno imposte all'entroterra, dove l'altezza della falda freatica è stata ridotta per simulare il possibile effetto di una minore ricarica a seguito del cambiamento climatico. Le simulazioni hanno evidenziato e permesso di quantificare come un aumento della densità dell'acqua salata causi una maggiore ingressione a parità degli altri parametri. Aumentando la dispersività longitudinale e trasversale si contribuisce a formare una zona di transizione più ampia. Per quanto riguarda la variazione della conducibilità idraulica si ottiene un risultato coerente con il caso di riferimento con una zona di transizione più ridotta. Gli scenari più critici, ovvero con un'intrusione del cuneo salino assai più accentuato dello scenario di riferimento sono quelli in cui si prevede un abbassamento della falda freatica nell'entroterra: in questi casi l'intrusione dell'acqua salata non è contrastata da un

campo di moto dell'acquifero dolce verso mare ciò evidenzia come i possibili effetti idrologici del cambiamento climatico attesi nei prossimi decenni potranno giocare un ruolo assai negativo sui terreni e le falde delle aree costiere pianeggianti.

Bibliografia

- [1] H. Xiao *et al.*, “Saltwater intrusion into groundwater systems in the Mekong Delta and links to global change,” *Advances in Climate Change Research*, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.04.005>.
- [2] D. F. Payne, “Effects of climate change on saltwater intrusion at Hilton Head Island, SC. U.S.A.”, 2010.
- [3] F. M. Scarelli, F. Sistilli, S. Fabbri, L. Cantelli, E. G. Barboza, and G. Gabbianelli, “Seasonal dune and beach monitoring using photogrammetry from UAV surveys to apply in the ICZM on the Ravenna coast (Emilia-Romagna, Italy),” *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 7, pp. 27–39, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.06.003>.
- [4] O. Essink, *Density Dependent Groundwater Flow - Salt Water Intrusion and Heat Transport*. Utrecht University, Lecture Notes, 2001.
- [5] Bear, J., *Dynamics of fluids in Porous Media*, American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 764 pp., 1972.
- [6] Van Genuchten, M.T. (1980), “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- [7] Scheidegger, A.E., “General theory of dispersion in porous media”, *J. of Geophys. Res.*, 66 (10), 3273-3278, 1961.
- [8] Hassanizadeh, S.M. & Leijnse, T., “On the modeling of brine transport in porous media”, *Water Resour. Res.*, 24 (3), 321-330, 1988.

- [9] Badon Ghijben W., Drabbe J., “Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam”, (in Dutch), Tijdschrift van het Koninklijk Instituut voor Ingenieurs 1888-1889: 8-22, 1889.
- [10] A. Bhattachan *et al.*, “Evaluating the effects of land-use change and future climate change on vulnerability of coastal landscapes to saltwater intrusion,” *Elem Sci Anth*, vol. 6, no. 1, p. 62, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1525/elementa.316>.
- [11] L. Tosi *et al.*, “Sensitivity, Hazard, and Vulnerability of Farmlands to Saltwater Intrusion in Low-Lying Coastal Areas of Venice, Italy,” *Water*, vol. 14, no. 1, p. 64, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/w14010064>.

