

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

**Analisi dei processi occorrenti nella Critical Zone (CZ):
infiltrazione e ricarica della falda di un acquifero poroso**

*Analysis of processes occurring in the Critical Zone (CZ):
infiltration and groundwater recharge in a porous aquifer*

RELATORE:

Prof. Tazioli Alberto

TESI DI LAUREA DI:

Carletti Eleonora

CORRELATORE:

Dott. Fronzi Davide

Anno Accademico 2021-2022

“A mio fratello che porto con me in ogni mio traguardo”

Sommario

INTRODUZIONE	4
1.1 Parte generale.....	4
1.2 Problematiche legate alla Critical Zone	16
1.2.1 Cluster Tematici	18
1.3 Scopo della tesi	21
1.4 Sintesi dei metodi e dei risultati.....	23
MATERIALI E METODI	25
2.1 Inquadramento dell'area in studio	25
2.1.1 Geologia	25
2.1.2 Clima	29
2.1.3 Criticità.....	32
2.2 Descrizione del campo prova.....	34
2.2.1 Il piezometro	35
2.2.2 Il lisimetro a suzione	38
2.2.3 Il tensiometro.....	41
2.2.4 L'infiltrometro.....	45
2.2.4.1 L'infiltrometro a doppio anello	47
2.2.5 Strumento elettronico ZL6	49
2.2.6 Sensori per rilevamenti specifici	50
2.3 Campionamenti	52
2.4 Misure in situ	52
2.5 Determinazione del contenuto naturale d'acqua.....	55
2.6 Determinazione della distribuzione granulometrica dei terreni.....	59
RISULTATI	89
3.1 Risultati contenuto d'acqua.....	89
3.2 Risultati analisi granulometrica	101
CONCLUSIONI	105
BIBLIOGRAFIA	108
SITOGRAFIA	110

INTRODUZIONE

1.1 Parte generale

Il territorio nazionale attualmente si trova a fronteggiare un problema sempre più allarmante: la costante diminuzione della disponibilità idrica nelle campagne e nelle città¹. Sin dalla preistoria l'uomo ha costruito pozzi, canali di drenaggio, dighe ed acquedotti al fine di controllare le acque, ma urbanizzazione, crescita demografica, inquinamento e cambiamenti climatici ne stanno mettendo a repentaglio qualità e quantità a nostra disposizione. Come afferma ANBI, Associazione Nazionale Bonifiche Irrigazioni, sono essenzialmente due le cause che concorrono al rischio desertificazione, la prima concerne le alte temperature che al giorno d'oggi si verificano più frequentemente e la seconda è invece connessa alla costante assenza di precipitazioni².

Per mantenere il fragile equilibrio tra le nostre esigenze e il rischio dell'approvvigionamento naturale nel contesto del cambiamento climatico sono state messe a punto alcune soluzioni quali la costruzione di dighe/invasi, sistemi poco vantaggiosi che vengono facilmente messi in crisi dalla mancanza di precipitazioni, hanno costi elevati e occupano ampi spazi o il riuso dei reflui urbani depurati, non ancora reso possibile. Tra le soluzioni, la più attendibile ed incoraggiante è la ricarica delle falde in condizioni controllate (in inglese *Managed Aquifer Recharge*, MAR). A tal proposito, si parla di "gestione integrata delle risorse idriche", che

¹ Domenico Guarino, *Allarme siccità in Italia, che cosa sta succedendo e come affrontare l'emergenza* in Luce, 2022

² Martina Marinangeli, *Allarme siccità, le Marche all'asciutto: danni all'agricoltura fino al 40%* in Corriere Adriatico, 2022

mira a preservare il livello delle falde freatiche, le portate dei fiumi e a combattere le inondazioni e la salinizzazione delle acque nelle zone costiere³.

La falda acquifera libera o freatica (detta anche acquifero non confinato) è caratterizzata da una struttura che prevede uno strato permeabile poggiante su uno impermeabile in cui l'acqua riempie i pori sino alla superficie piezometrica, poi si sposta con un certo gradiente idraulico ed è sottoposta alla pressione atmosferica⁴. Le falde acquifere si suddividono in vulcaniche, termali o classiche. Le prime due permettono di avere un'acqua priva di batteri perché si riempiono di vapore che va a condensarsi. Le falde sono sostanzialmente dei contenitori di materiali e rocce impermeabili che impediscono la dispersione di acqua verso l'esterno, ma hanno tuttavia la possibilità di essere rintebrate attraverso filtrazione. Le falde acquifere possono nascere grazie agli spostamenti degli elementi impermeabili che creano delle conche, purtroppo però non vivono in eterno, infatti le cause principali che ne determinano la scomparsa sono la sismologia che può portare alla fessurazione delle rocce che la delimitano e l'erosione dell'acqua che con il tempo può avere lo stesso effetto. Inoltre, alcuni problemi legati a queste formazioni sono il ristagno dell'acqua che comporta proliferazione batterica e sviluppo di gas che ne impediscono l'utilizzo perfino in campo agricolo.

In generale, le falde sono soggette a prelievi ingenti che ne mettono a rischio la rinnovabilità e ne riducono la capacità di diluizione e trasporto degli inquinanti. Nelle aree costiere il

³ Geraldine Picot-Colbeaux et al., *Come preservare le nostre risorse idriche? E perché non promuovendo la ricarica delle falde acquifere?* in Info Chrétienne, 2021

⁴ Ing. Simona Berardi, *Dinamica degli inquinanti – suolo saturo e insaturo*, Università di Roma “Tor Vergata”, 2009-2010

prelievo eccessivo favorisce l'intrusione salina, che riduce ulteriormente l'utilizzabilità dell'acqua.

Molte sostanze indesiderate sono naturalmente presenti nelle acque sotterranee, come, ad esempio, ferro e manganese negli acquiferi profondi o l'arsenico negli acquiferi di origine vulcanica. Al contrario, la presenza di pesticidi, nonché l'intrusione salina, sono indicatori di impatto antropico.

“In Italia circa il 58% dei corpi idrici sotterranei si trova in uno stato chimico "buono", (ovvero al di sotto di una certa soglia che non ne compromette il pregio) prevalentemente in aree montane e poco esposte a contaminazioni, mentre il 25% sono "scarse" per l'eccesso di sostanze inorganiche quali nitrati, solfati, fluoruri, cloruri, boro, insieme a metalli, sostanze clorurate e aromatiche e pesticidi”⁵.

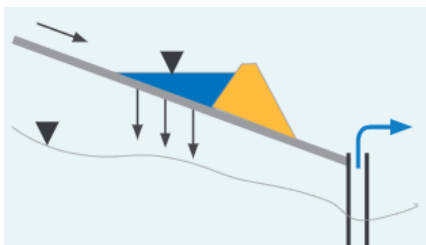
Con il termine “ricarica” si identifica “il flusso d’acqua che raggiunge la zona satura, proveniente da qualsiasi direzione (da sotto, da lato, dall’alto)”⁶. Per esempio, le sorgenti di ricarica diretta ed indiretta dall’alto possono essere: i bacini superficiali (laghi, corsi d’acqua) aventi un livello idrico superiore al livello piezometrico; l’irrigazione, la cui variabilità stagionale può comportare effetti ben più importanti delle precipitazioni; le perdite da reti di distribuzione e di servizio, in aree urbanizzate ed industriali. Con gli anni sono state perfezionate ulteriori strategie per ricaricare gli acquiferi (Fig.1.1.1) come la modifica del letto del corso d’acqua, ad esempio con la realizzazione di invasi artificiali per trattenere il deflusso superficiale e consentire l’uso per l’irrigazione; la filtrazione delle

⁵ Giovanni Carrada e Cristina Frizza, *Transizione ecologica aperta - Dove va l'ambiente italiano?* - ISPRA istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, 2021

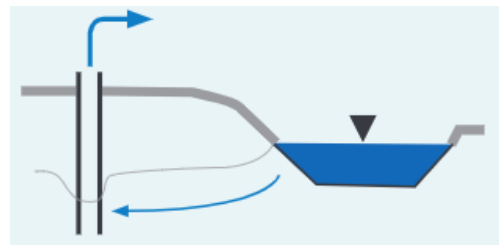
⁶ Giovanni Formentin, *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, 2013, pag. 2

sponde in presenza di bacini superficiali; la distribuzione che sfrutta le acque alluvionali per aumentare l'umidità del suolo o i pozzi di ricarica attraverso i quali viene iniettata acqua negli acquiferi. In Emilia Romagna, è stato introdotto un sistema di ricarica artificiale attraverso il quale si alimentano gli acquiferi con risorse convenzionali (acqua di superficie, acqua di inondazione, acqua piovana) o non convenzionali (acque reflue, acqua salmastra, salina). Queste ultime, presenti anche in assenza di precipitazioni, possono costituire un'importante fonte di approvvigionamento per le falde purché preventivamente depurate e nel caso di acqua salina sottoposte a desalinizzazione⁷.

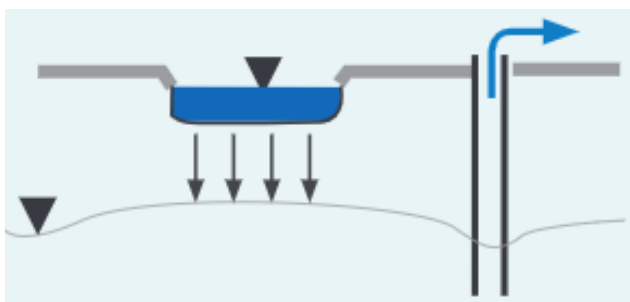
Fig.1.1.1 Strategie di ricarica gestita degli acquiferi MAR (IAH 2005)
(unesdoc.unesco.org)



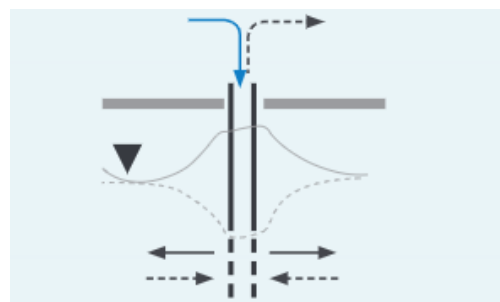
(a) *La modifica del letto del corso d'acqua*



(b) *La filtrazione delle sponde*



(c) *La distribuzione*



(d) *La pratica dei pozzi di ricarica*

⁷ Geraldine Picot-Colbeaux et al., *Come preservare le nostre risorse idriche? E perché non promuovendo la ricarica delle falde acquifere?* in Info Chrétienne, 2021

La quantità d'acqua sotterranea generata dalle precipitazioni o dai corsi d'acqua varia in funzione della stagione e dell'altitudine del bacino conservato: aumenterà in inverno e all'inizio della primavera con la maggiore incidenza delle piogge e lo scioglimento anticipato della neve, mentre tenderà a diminuire in estate e in autunno con la diminuzione di precipitazioni e la maggiore evaporazione.

Durante il periodo invernale, caratterizzato da maggior frequenza e durata degli eventi piovosi, una piccola percentuale di acqua più piccola rispetto alle rimanenti stagioni viene assorbita dalla vegetazione; la restante parte si ripartisce tra ruscellamento superficiale (che poi si riverserà in fiumi e laghi) e infiltrazione. Quest'ultima porzione, muovendosi per gravità, penetra negli interstizi del terreno saturando in primis gli strati più superficiali, proseguendo verso quelli a maggiore profondità fino a raggiungere una superficie impermeabile, dando così luogo alla formazione di una falda acquifera continuamente regolata dal ciclo idrologico (Fig. 1.1.2). Quest'ultima rappresenta un serbatoio di riserva nei periodi di siccità e allo stesso tempo una grande risorsa idrica potabile che va tutelata e protetta, poiché spesso la domanda supera la capacità di alimentazione delle falde, di conseguenza risulta necessario ridurre il consumo complessivo⁸.



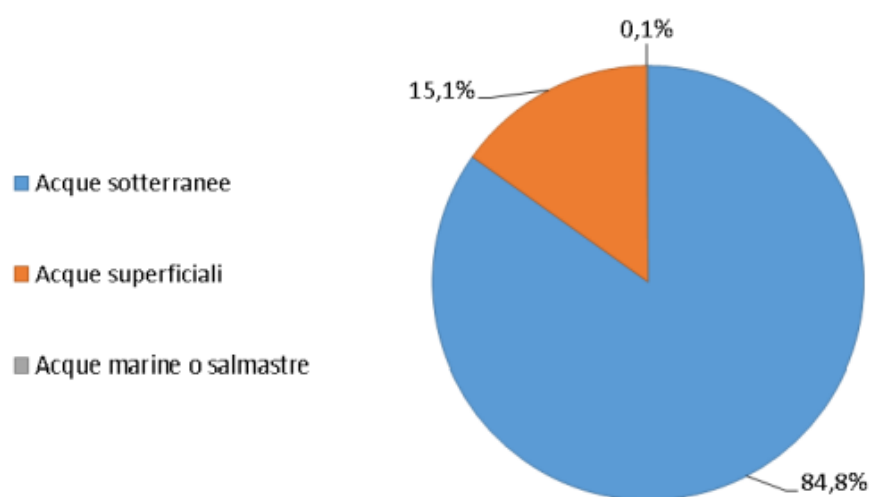
Fig. 1.1.2 Il ciclo dell'acqua si compone di un insieme di fenomeni che si ripetono periodicamente e che hanno come motore l'energia solare. Il Sole riscaldando le acque oceaniche e continentali ne determina il passaggio dallo stato

⁸ Filippo Mion, *le Acque Sotterranee* in intervista Ufficio Comunicazione ARPAV, 2013

liquido a gassoso, ovvero l'evaporazione. Il vapore salendo nell'atmosfera si raffredda e condensandosi da origine alle nuvole che diventate pesanti danno luogo ad una precipitazione. L'acqua una volta ricaduta sulla superficie terrestre è partizionata in 3 componenti: una che risale in atmosfera per evapotraspirazione (evaporazione che ha luogo nei pressi delle foglie e del tronco delle piante e nella superficie del terreno; traspirazione che indica l'estrazione d'acqua in corrispondenza delle radici e la successiva cessione all'atmosfera); una che muovendosi per gravità defluisce superficialmente andando a rifornire bacini oceanici e continentali; un'ultima parte, anch'essa mossa dalla gravità, penetra in profondità andando ad alimentare le falde idriche. (www.depuratoriacqualife.it)

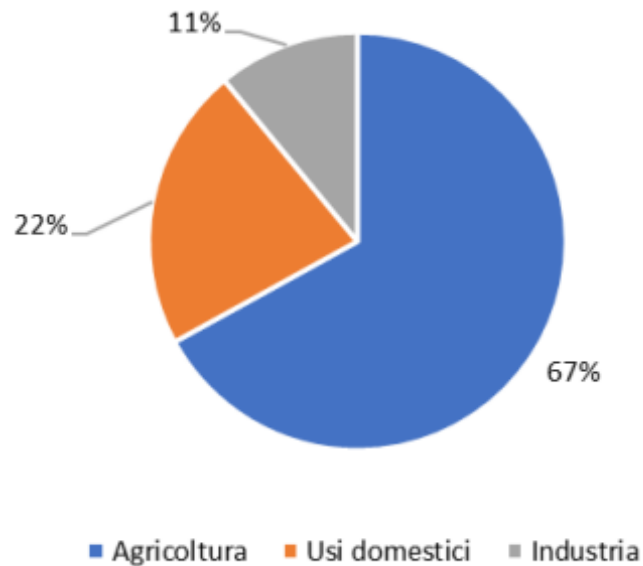
Le acque sotterranee rappresentano circa il 99% di tutta l'acqua dolce allo stato liquido sulla Terra. In Italia nel 2018 si è registrato un consumo di acque derivanti da falda pari all'84,8%, seguito dal 15,1 % di acque superficiali e in una minima parte (0,1%) da acque marine o salmastre (Fig. 1.1.3). Nel mondo, in un anno, vengono estratti circa 1000 km³ di acqua dalle falde, di questi più della metà sono utilizzati in agricoltura (Fig. 1.1.4). Tuttavia le acque sotterranee restano ancora poco conosciute e, di conseguenza, sottovalutate, mal gestite e persino sprecate⁹.

Fig. 1.1.3 Fonti prelievo idrico per uso civile in Italia, elaborazione Legambiente su dati ISPRA 2018



⁹ Elisa Scocchera e Andrea Minutolo, *Acque Sotterranee - il necessario è invisibile agli occhi*, Ufficio Scientifico Legambiente, 2021, pag. 9 e pag. 13

Fig. 1.1.4 Utilizzo globale acque di falda, elaborazione Legambiente su dati IGRAC



Nel corso della stagione estiva, invece, l'afflusso di turisti oltre a mantenere operative attività industriali e commerciali, che sono tra le principali produttrici di inquinamento atmosferico, comporta una crescente richiesta d'acqua. Le falde acquifere sotterranee sono infatti minacciate dall'effetto serra, dall'intrusione salina nelle aree costiere, dall'inquinamento e dalla riduzione della ricarica provocata dall'azione umana con azioni e processi che favoriscono il deflusso superficiale piuttosto che l'infiltrazione, quali la cementificazione selvaggia, la creazione di nuove infrastrutture e opere senza una adeguata pianificazione che comprenda anche il ripristino, in aree attigue, della regolare infiltrazione. L'intrusione salina, fenomeno in alcuni casi naturale ma che può essere incrementato da eccessivi prelievi delle acque di falda nelle zone costiere, determina un aumento del volume di acqua sotterranea salata e un decremento del volume di acqua sotterranea dolce. Dall'altra parte, *“L'effetto serra modifica il bilancio energetico dell'atmosfera e quindi il suo ciclo idrologico. In particolare, in un clima più caldo l'evaporazione dagli oceani aumenta e l'atmosfera può*

contenere più vapor d'acqua. Per questo, a livello globale il riscaldamento globale porta ad un aumento di precipitazione"¹⁰.

Gli obiettivi di sviluppo sostenibile dell'Unesco puntano, entro il 2030, ad *“aumentare significativamente l'uso razionale delle risorse idriche in tutti i settori e garantire la sostenibilità dei prelievi e degli approvvigionamenti di acqua dolce*"¹¹.

La porzione d'acqua che “sfugge” alla cattura da parte delle piante e non evapora è detta precipitazione efficace (Pe). Tale porzione è disponibile per la ripartizione tra acque di ruscellamento ed acque di infiltrazione. Il regime di precipitazione e la topografia dell'area definiscono la quantità d'acqua che, rifiutata dal sottosuolo, ruscella superficialmente e può raggiungere corsi d'acqua superficiali o depressioni¹². In particolare, possiamo distinguere tale acqua in una componente di ruscellamento divisa in superficiale (Rs) e sotterranea (Ri, ossia ruscellamento ipodermico) ed una di infiltrazione (I) attraverso il terreno. Grazie a questi elementi possiamo ricavare il bilancio idrogeologico: $Pe = I + R$, dove $R = Ri + Rs$, dal quale otteniamo per differenza l'infiltrazione (Fig. 1.1.5).

Darcy studiò il flusso monodimensionale dell'acqua attraverso strati orizzontali di sabbia e notò che la portata per unità di superficie (Q/A) è direttamente proporzionale alla perdita di carico (Δh) e inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso in esame (L), ovvero è direttamente proporzionale al gradiente idraulico ($i = \Delta h/L$), da cui la relazione:

¹⁰ Filippo Giorgi, *Effetti del riscaldamento globale sul ciclo idrologico terrestre* in Rai Cultura

¹¹ Geraldine Picot-Colbeaux et al., *Come preservare le nostre risorse idriche? E perché non promuovendo la ricarica delle falde acquifere?* in Info Chrétienne, 2021

¹² Giovanni Formentin, *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, 2013, pag. 2

$$\frac{Q}{A} = v = k * \frac{\Delta h}{L} = k * i$$

nota come Legge di Darcy, nella quale k, detto coefficiente di permeabilità, è legato alla densità e alla viscosità del fluido e alla permeabilità intrinseca del mezzo poroso¹³.

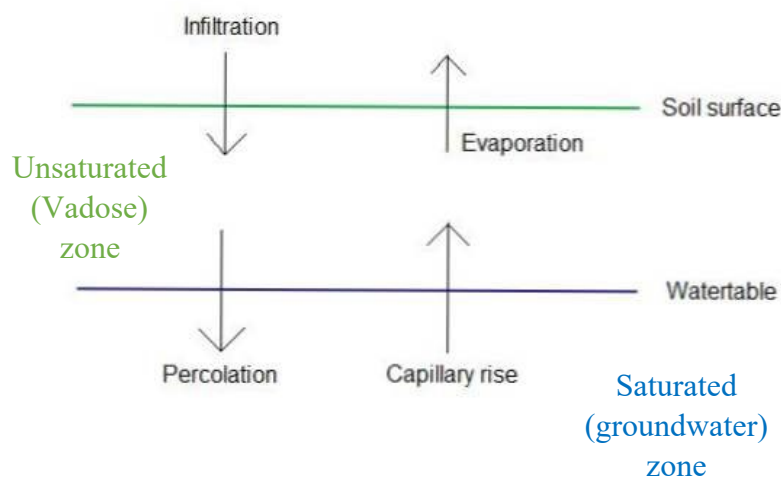


Fig. 1.1.5 L'immagine evidenzia il percorso dell'acqua attraverso il terreno: prima si infila tra la superficie del suolo e la zona della radice, poi percola tra la zona vadosa e quella saturata.

I due meccanismi sono differenti poiché rispettivamente uno ripristina la carenza di umidità del suolo e l'altro reintegra le falde acquifere sotterranee. In

un secondo momento l'acqua risale per capillarità attraverso la falda acquifera e per evaporazione dalla zona insatura. (it.sawakinome.com)

Partendo dal piano campagna l'acqua incontra uno strato di suolo vegetale, detto di evapotraspirazione funzione di alcune caratteristiche sito-specifiche quali il regime climatico, da cui dipende il tasso di evaporazione; la soggiacenza della falda, da cui dipende la disponibilità di acqua per la vegetazione o l'evaporazione e la copertura vegetale, da cui dipende la capacità di intercettare l'acqua¹⁴; poi raggiunge lo strato di ritenzione caratterizzato da acqua assorbita e capillare, infine termina nello strato della frangia capillare, fascia di transizione tra la zona insatura e la falda, in cui l'acqua resta in

¹³ Giovanni Formentin, *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, 2013, pag. 7

¹⁴ Giovanni Formentin, *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, 2013, pag. 2

sospensione nei vuoti vincendo la forza di gravità. Sottostante queste tre zone che danno origine alla zona vadosa, la quale presenta un grado di saturazione decrescente man mano che ci si sposta verso la superficie, si incontra la zona di falda che risulta essere completamente satura¹⁵ (Fig.1.1.6). Tali condizioni dipendono dal tipo di suolo presente poiché quelli più compatti con pori ostruiti o discontinui favoriscono il ruscellamento, al contrario quelli con struttura granulare o a blocchi con pori continui facilitano l'infiltrazione (Fig. 1.1.7)¹⁶; se è asciutto permette un'infiltrazione veloce, se è ghiacciato impedisce quasi completamente l'ingresso d'acqua. Il processo è anche favorito dalla presenza di materiale vegetale, che sia vivo o morto, e in mancanza di questo si adottano sistemi artificiali.

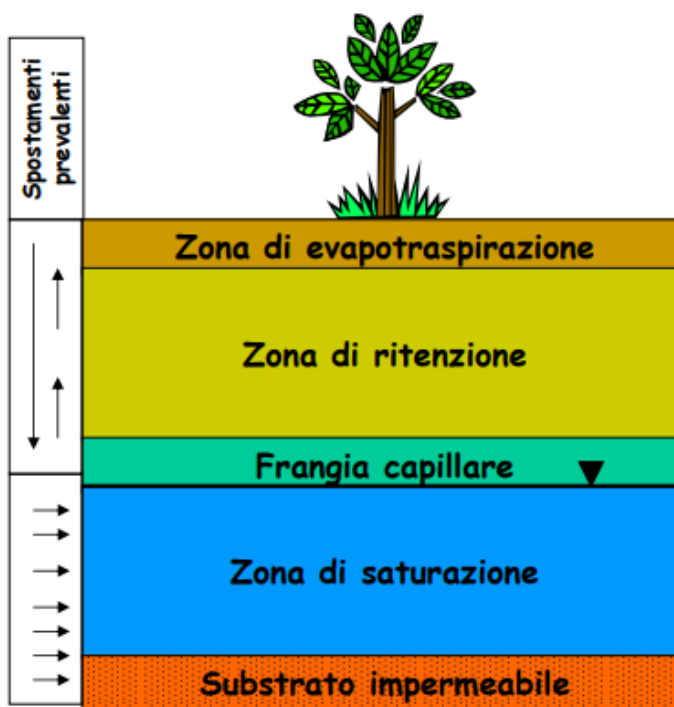


Fig. 1.1.6 Distribuzione in zone di umidità dell'acqua nel terreno.

Il profilo verticale del terreno è suddivisibile in:

-zona di evapotraspirazione: strato più superficiale di 1-3 m, sede di attività biologica e di scambi idrici con l'atmosfera;

-zona insatura (zona di ritenzione): zona in cui coesistono aria e acqua e in cui l'acqua si muove per percolazione (moto verticale);

-frangia capillare: zona interessata da fenomeni di risalita capillare attraverso gli spazi intergranulari;

-zona satura: zona in cui l'acqua occupa tutti i vuoti e si muove per filtrazione (moto orizzontale per effetto del gradiente idraulico).

-substrato impermeabile: limite ultimo della zona di saturazione, costituito da materiale molto fino (limo o argille) o da formazioni rocciose non fratturate. (didattica-2000.archived.uniroma2.it)

¹⁵ Filippo Giorgi, *Effetti del riscaldamento globale sul ciclo idrologico terrestre* in Rai Cultura

¹⁶ <https://www.ecosurvey.it/2007/11/manuale-per-indagini-ambientali-in-siti-contaminati/>

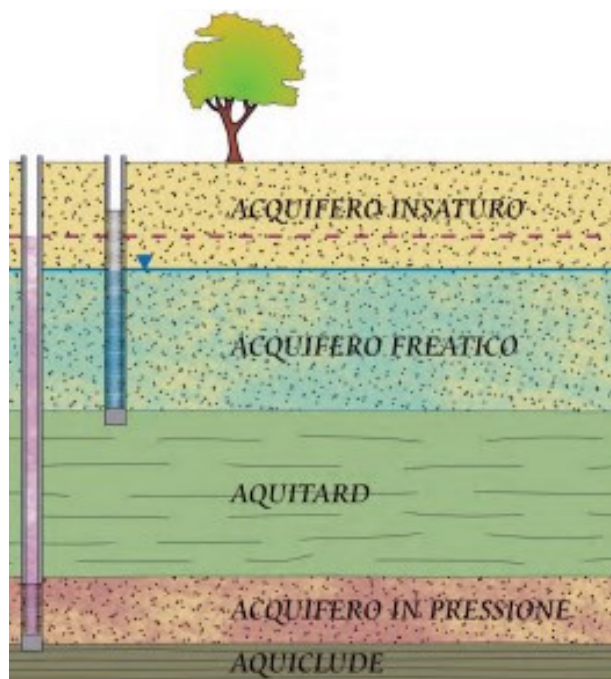


Fig. 1.1.7 Successione acquiferi in relazione alla permeabilità delle rocce, ovvero la capacità di farsi attraversare dall'acqua. (www.socgeol.it)

- Acquiferi: rocce portatrici d'acqua;
- Aquitard: rocce in cui ho circolazione idrica ma in quantità limitate;
- Acquicludes: rocce impermeabili in cui l'acqua fa difficoltà a muoversi;

“Il 25% di tutti gli acquiferi è gestito in maniera insostenibile, mentre il prelievo idrico dalle falde aumenta del 5% ogni anno. Per le Nazioni Unite trovare soluzioni per la ricarica delle falde e promuovere una gestione cooperativa dell'acqua “nascosta” è di massima importanza”¹⁷.

La tecnica da utilizzare per la modalità di stima della ricarica dipende dai mezzi a disposizione (lisimetri, traccianti), dallo scopo del lavoro e dalle caratteristiche specifiche dell'area in esame: ad esempio in aree umide solitamente la falda ha bassa soggiacenza ed il rapporto con i canali superficiali è di alimentazione; in aree aride invece solitamente la falda ha soggiacenza elevata e viene alimentata dai corsi d'acqua superficiali. Nelle aree urbane ed industriali, l'edificazione porta ad un aumento dell'impermeabilizzazione del suolo che si riteneva responsabile della riduzione della ricarica in falda. Tuttavia diversi studi hanno

¹⁷ Emanuela Bompan, *Acque sotterranee, un tema al centro del World Water Day in Oltremare, 2022*

dimostrato che l'effetto è contrario: la realizzazione di reti di trasporto e stoccaggio di acqua provocano generalmente un incremento della ricarica rispetto alle condizioni naturali¹⁸.

Nei pressi delle aree di ricarica, le acque interagiscono con lo strato sottile e biologicamente attivo del suolo impoverendolo di sostanze minerali e modificando il proprio chimismo. Se una falda entra a contatto con sostanze tossiche provenienti da acque di scarico non trattate o con pesticidi e scorie provenienti dai campi agricoli, può determinarne il trasporto anche per lunghe distanze fino ad arrivare alla sorgente, al fiume o nell'acqua superficiale determinando un potenziale rischio per l'ambiente e le persone¹⁹. Le piogge e le acque di scioglimento nivale nelle aree non urbane e non industriali presentano valori di pH normalmente tra 5 e 6. Nelle aree industriali, il pH delle precipitazioni è molto al di sotto di 5.7, frequentemente tra 3 e 4. La principale causa di questo aumento dell'acidità è lo zolfo rilasciato nell'atmosfera dalle industrie, dagli impianti di lavorazione mineraria e dalle centrali elettriche a carbone o a petrolio²⁰. Ad ostacolare l'utilizzo delle falde acquifere sono pertanto l'inquinamento e il sovrasfruttamento, perciò è importante trovare il perfetto equilibrio tra la quantità di estrazione e i tempi di ripristino del livello della falda. In definitiva come ribadito negli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG6) e affermato dalle Nazioni Unite, le acque sotterranee sono una risorsa preziosa per la qualità della vita sulla terra, non per altro la giornata mondiale dell'acqua del 2022 è dedicata proprio alle acque di

¹⁸ Giovanni Formentin, *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, 2013, pag. 3

¹⁹ Elisa Scocchera e Andrea Minutolo, *Acque Sotterranee - il necessario è invisibile agli occhi*, Ufficio Scientifico Legambiente, 2021, pag. 17

²⁰ Rudy Rossetto et al., *Il futuro della ricarica delle falde in condizioni controllate in Italia: il progetto europeo FPVII MARSOL e la EIP on Water MAR to MARKET in Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 2014

falda: "Groundwater: Making the Invisible Visible". Le acque sotterranee sono invisibili, ma il suo impatto è visibile ovunque.

1.2 Problematiche legate alla Critical Zone

Nel 1988 Gail Ashley ha introdotto per primo il termine Zona Critica o "Critical Zone" (CZ) riferendosi alla porzione di superficie terrestre che si sviluppa dalla chioma degli alberi, al suolo e al sottosuolo fino alle falde acquifere. Il concetto di CZ è stato originariamente proposto dalle comunità scientifiche delle Scienze della Terra, per poi comprendere

Fig. 1.2.1
(www.esa.org)



l'ecologia e la dinamica atmosferica²¹. È in questo ambiente che "la CO₂ atmosferica viene trasformata in materiale vegetale e che il materiale vegetale viene ritrasformato in CO₂ atmosferica ed è qui che l'acqua si trasforma da acqua piovana in acqua di falda e di torrente"²² e sempre qui, come definisce il National Research Council (NRC, 2001, p. 2), roccia, aria, acqua, suolo e organismi viventi

interagiscono continuamente regolando l'habitat naturale (Fig. 1.2.1). Inoltre hanno luogo tutti i processi fondamentali per la vita degli ecosistemi terrestri (ciclo dell'acqua, ciclo del carbonio, ciclo dell'energia) che vengono ostacolati dai cambiamenti climatici e dalle

²¹ Antonello Provenzale et al., *Critical Zone response to water stress: an interdisciplinary whole-system approach (Whole-CZ)*, Bando 2020, Ministero dell'Università e della Ricerca - Segretariato Generale

²² Louis Derry, direttore dell'Ufficio Nazionale del CZO, Critical Zone Observatory. Intervista.

numerose attività umane sul territorio che introducono carbonio nell'atmosfera aumentando così le temperature e modificando il ciclo idrologico²³; anche l'erosione risulta espandersi più velocemente rispetto i tempi passati e l'uomo sembra essere nuovamente il responsabile²⁴. La Zona Critica è pertanto “critica” poiché il suo corretto funzionamento è fondamentale per la sopravvivenza dell'uomo e le sue complesse interazioni garantiscono la disponibilità di risorse quali “il cibo che mangiamo, l'acqua che beviamo e l'ossigeno che respiriamo”²⁵. Tuttavia, i processi fisici, chimici e biologici della Critical Zone sono tutt'ora poco conosciuti infatti: *“Non sappiamo quale sia il percorso che l'acqua compie da quando colpisce per la prima volta la chioma della vegetazione fino a quando finisce nel corso d'acqua che vediamo nascere in seguito a un evento di pioggia o dove finisce come acqua di falda. Inoltre non conosciamo la velocità con cui la roccia viene trasformata in suolo, che è quello che può effettivamente sostenere la crescita delle piante e supportare la vita, e non conoscerla è un grosso problema perché sappiamo che le attività umane sono aumentate drasticamente”*²⁶.

La CZ può essere definita la “pelle vivente del pianeta” e il suo studio richiede un approccio fortemente interdisciplinare, che include il monitoraggio e le misure sul campo, le analisi di laboratorio, il telerilevamento e la modellazione numerica²⁷. Grazie alla realizzazione di osservatori integrati, in cui sono eseguite molteplici misurazioni di carattere locale e globale, si forniscono risposte a domande specifiche ed informazioni estendibili a livello regionale,

²³ Kamini Singha, Boulder Creek Critical Zone Observatory. Intervista.

²⁴ Susan Brantley, Susquehanna-Shale Hills Critical Zone Observatory. Intervista.

²⁵ Justin Richardson (Borsista post-dottorato dell'Ufficio nazionale del CZO). Intervista.

²⁶ Jon Chorover, biogeochimico. Intervista all'Università dell'Arizona.

²⁷ Antonello Provenzale et al., *Critical Zone response to water stress: an interdisciplinary whole-system approach (Whole-CZ)*, Bando 2020, Ministero dell'Università e della Ricerca - Segretariato Generale

nazionale e continentale sulla CZ. Il CZO, Critical Zone Observatory, progetto avviato nel 2007, tiene sotto controllo i consumi sempre più ingenti di risorse idriche ed energetiche e il complesso dinamismo che vede protagonista la Critical Zone²⁸.

Il Critical Zone Collaborative Network (CZNet) è un programma di ricerca che si basa sui risultati degli Osservatori delle Zone Critiche (CZO) e comprende nove aree di studio di cluster tematici con un'ampia gamma di contesti geologici, climatici e di uso del suolo che offrono l'opportunità di comprendere meglio l'evoluzione e la funzione della zona critica²⁹.

1.2.1 Cluster Tematici

1) Bedrock Cluster

Lo studio geologico è importante poiché l'erosione, l'idrologia e la produttività dell'ecosistema in superficie influenzano notevolmente i meccanismi alla base della Critical Zone, che a loro volta condizionano per la propria formazione, lo stress ambientale, la foliazione e le spaccature ereditate, il progresso e la struttura della CZ.

2) Big Data Cluster

Il Big Data Cluster è un progetto che sfrutta dati esistenti e nuovi di un certo volume, molto vari tra loro, di qualità diversa e quasi in tempo reale. Si occupa di valutare la solidità del nostro ambiente naturale alle perturbazioni (piovose e nevose), all'acidificazione, agli incendi ed inondazioni. Un sistema resiliente è capace di mantenere inalterati alcuni

²⁸ Biosphere 2, [Introduction to the Critical Zone Observatories Project - YouTube](#)

²⁹ [CZNet \(criticalzone.org\)](http://CZNet.criticalzone.org)

essenziali servizi, come l'acqua pulita, la salute del suolo e la capacità di sequestrare i gas serra, pur assorbendo le perturbazioni³⁰.

3) Cinet Cluster

Il progetto CINet si occupa delle "interfacce critiche", che possono essere naturali (quali depressioni e pianure alluvionali) o create dall'uomo (come la rete di tegole) e possono servire come siti di interazione, accrescimento o attenuazione e assorbimento dei flussi materiali³¹.

4) Coastal Cluster

La zona critica costiera è minacciata dalle trasformazioni nei cicli idrici e chimici. Tali cambiamenti risultano dannosi sia per il territorio che per l'economia poiché compromettono le infrastrutture di superficie e sotterranee, degradano la bontà dell'acqua e limitano la produzione agricola. Alcuni ricercatori ipotizzano che l'innalzamento del livello del mare stia mutando le foreste costiere e i campi agricoli in paludi salmastre attraverso inondazioni e cambi di salinità. Tali processi causano una forte variazione ambientale nella CZ costiera.

5) Drylands Cluster

Circa il 45% della superficie terrestre è definibile zona arida, ovvero ambiente sensibile alle variazioni climatiche e alle attività antropiche. Oggi giorno, l'incremento demografico e la crescente domanda di cibo determinano lo sfruttamento di tali zone per fini agricoli comportando un'alterazione nel contenuto di nutrienti, sali e carbonio nel suolo. Tale

³⁰ [CZNet \(criticalzone.org\)](http://criticalzone.org) – Our Thematic Clusters – Big Data

³¹ [CZNet \(criticalzone.org\)](http://criticalzone.org) – Our Thematic Clusters – Cinet

progetto indaga la funzione dei carbonati pedogenici nel movimento dell'acqua della zona vadosa, nella ricarica della falda freatica e nel ciclo dei nutrienti³².

6) *DUST^2 Cluster*

Il progetto DUST^2, acronimo di *Dust across a Desert-Urban-Summit Transect*, studia la pericolosità delle modifiche umane per la CZ sul ciclo naturale delle polveri minerali. Soprattutto negli ambienti montani è stato accertato che la deposizione di polveri modifica il pH e il chimismo delle acque superficiali, procura nutrimento per le piante, aiuta nel processo di composizione del suolo, ma provoca scioglimento nivale.

7) *Dynamic Water Cluster*

Il progetto ha l'obiettivo di comprendere in che modo l'acqua si muove e viene accumulata nel terreno e i numerosi processi della CZ: come la crescita degli alberi e il cambiamento del suolo e delle rocce. Tale studio permetterà di prevedere la risposta futura della Terra ai cambiamenti climatici.

8) *Geomicrobio Cluster*

Il progetto ha lo scopo di conoscere i legami tra la struttura microbica per comprendere meglio le interazioni tra geomicrobiologia (scienza che unisce la geologia e la microbiologia) e biogeochimica (scienza che studia i processi chimici, fisici, geologici e biologici che regolano la formazione dell'ambiente naturale) nella Zona Critica. Nei "siti a gradiente", si nota come le caratteristiche discrete della roccia e delle acque sotterranee se ci si sposta verso la superficie, siano determinanti sulle proprietà della comunità microbica del

³² [CZNet \(criticalzone.org\)](http://criticalzone.org) – Our Thematic Clusters – Drylands

suolo e su attributi biogeochimici aggiuntivi. Nei "siti uniformi", si evidenzia come le proprietà fisiche e geochimiche dipendono meno dalla profondità³³.

9) Urban Cluster

Il progetto Urban mira alla conoscenza dell'influenza reciproca tra il modello geologico e l'impronta urbana e come questa si riflette sulla Critical Zone.

1.3 Scopo della tesi

Scopo del presente elaborato è valutare la variazione del contenuto di umidità nel suolo durante il processo di infiltrazione, indagando quindi attraverso l'avanzamento del fronte umido le caratteristiche e le proprietà della circolazione attraverso la critical zone, e analizzare in tempi diversi quale zona diventa più saturata in funzione anche della tipologia del terreno in situ.

Pertanto è stato realizzato un campo prove nella valle del Betelico, situata in Provincia di Ancona, per monitorare ed analizzare gli acquiferi porosi della zona e seguire i processi infiltrativi in una tipologia di terreno molto diffuso nella nostra penisola. Tali processi sono stati analizzati mediante acquisizione di dati in campagna (tramite sensori che acquisiscono e registrano in tempo reale i dati di umidità, conducibilità elettrica, temperatura) e in laboratorio, tramite prelievo di campioni di terreno da analizzare con la procedura di analisi granulometrica e del contenuto d'acqua.

Allo scopo di studiare i processi di infiltrazione che riguardano l'area, sono stati installati molteplici strumenti: meccanici, per la misura in situ, elettronici ed informatici. Per

³³ [CZNet \(criticalzone.org\)](http://criticalzone.org) – Our Thematic Clusters – Geomicrobio

meccanici si fa riferimento agli strumenti di laboratorio come la pila di setacci e il mortaio per la frantumazione del materiale per l'analisi granulometrica; la bottiglia spruzzetta per erogare piccole quantità d'acqua sul campione, i becher, l'agitatore meccanico, il contenitore del frullino, il cilindro di vetro di capacità 1L e il densimetro per l'analisi del contenuto d'acqua. Tra gli strumenti per la misurazione in situ si distinguono il piezometro che consente di individuare la quota piezometrica di una massa liquida, il tensiometro che misura la forza con cui l'acqua viene attratta e successivamente trattenuta dal suolo, il lisimetro che consente di campionare liquidi presenti in soluzione nel terreno. Infine, gli strumenti elettronici presenti sono il software ZL6 per la registrazione di dati ed i vari sensori ad esso allacciati: TEROS 21 per la misura del potenziale idrico, TEROS 12 per la misura del contenuto volumetrico di acqua, della salinità del terreno e della temperatura e 5TE per la misura del contenuto volumetrico di acqua, della conducibilità elettrica e della temperatura del suolo.

Per l'elaborazione finale dei dati si è fatto uso di uno strumento informatico chiamato Excel che gestisce fogli elettronici e con il quale è stato ricavato l'andamento della curva granulometrica e del contenuto d'acqua della zona. La prima consente di individuare la percentuale di argilla, limo, sabbia, ghiaia e ciottoli presenti e perciò permette la conoscenza di un suolo in base alle dimensioni dei grani che lo costituiscono e della loro quantità. La seconda permette di valutare la percentuale d'acqua contenuta nel suolo in funzione della profondità e del periodo nel quale è stato estratto il campione.

1.4 Sintesi dei metodi e dei risultati

Le prove di laboratorio condotte sono l'analisi granulometrica ed il contenuto naturale d'acqua dei campioni di terreno presi al Betelico. L'analisi granulometrica serve a determinare la composizione dimensionale dei terreni campionati e il contenuto d'acqua per conoscere l'umidità del suolo. Per l'analisi granulometrica della componente grossolana ovvero trattenuta al setaccio ASTM n°200, è stata fatta la vagliatura ad umido utilizzando una pila di setacci con maglie di diversa apertura, da 75 μm a 37.5 mm, mentre per la componente fine ovvero passante al setaccio ASTM n°200 è stata eseguita l'aerometria (Fig. 1.4.1). Il contenuto d'acqua invece è stato ricavato tramite essiccazione in forno a 105 °C.

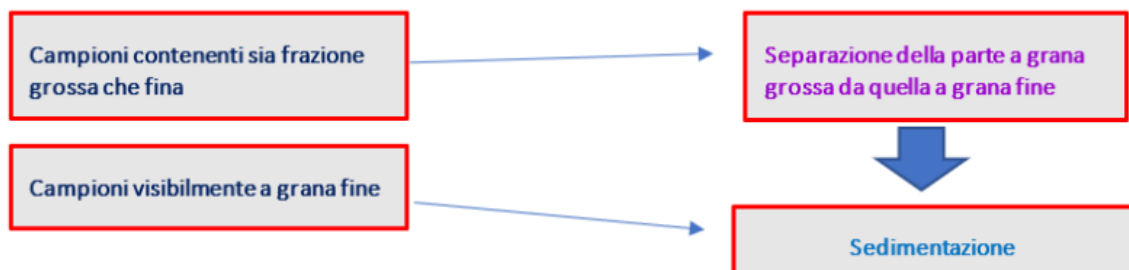


Fig. 1.4.1 Procedura per effettuare l'analisi granulometrica (blog.geostru.eu)

La curva granulometrica è la rappresentazione grafica della distribuzione delle dimensioni delle particelle che compongono un dato terreno. Dalla sua forma si ricavano informazioni su classificazione, uniformità e caratteristiche di permeabilità dei depositi analizzati. È una curva di accumulazione e perciò non presenta minimi. Potrebbe presentare sia tratti sub orizzontali che indicano una lacuna granulometrica che tratti sub verticali che indicano presenza di materiale monogranulare.

Dalla curva granulometrica ottenuta dalle prove di laboratorio si è evidenziata una presenza consistente di frazione fine, con diametro inferiore ai 75 μm , in prevalenza limosa.

Per la frazione con diametro minore di 0.075 mm, si sfrutta una procedura basata sulla misura della densità di una sospensione ottenuta miscelando il campione all'acqua con l'aggiunta di sostanze disperdenti (nel nostro caso sodioesametafosfato) per separare le particelle. L'interpretazione di tale prova si basa sulla legge di Stokes che lega la velocità di sedimentazione della particella in sospensione al diametro della stessa e alla densità della miscela³⁴.

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_f)}{18\mu} gr^2$$

Nota come legge di Stokes, dove:

ρ_s = densità della sfera;

ρ_f = densità del fluido;

μ = viscosità del fluido;

g = accelerazione gravitazionale;

r = raggio della sfera.

Dall'analisi del contenuto d'acqua naturale eseguita si è riscontrato un netto aumento del contenuto d'acqua percentuale, nel mese di gennaio, relativo alla profondità 0-30 cm.

³⁴ <https://www.flottweg.com/it/wiki/tecnologie-di-separazione/velocita-di-sedimentazione/>

MATERIALI E METODI

2.1 Inquadramento dell'area in studio

2.1.1 Geologia

Alla fine dell'Era Paleozoica, circa 250 milioni di anni fa, le terre emerse erano raggruppate in un unico grande continente chiamato Pangea, circondato da un enorme oceano detto Pantalassa. Con l'avvento dell'Era Mesozoica, la Pangea ha iniziato a dividersi in placche tettoniche così da provocare la formazione dell'Oceano Tetide³⁵.

La maggior parte del territorio italiano è composto da rocce che hanno avuto origine proprio sul fondo della Tetide, nel tratto che divideva l'Europa dall'Africa. Il fondo e la profondità di questo oceano era molto variabile e il clima molto diverso da oggi. Sui fondali oltre alle rocce vulcaniche (basalti) si depositavano sedimenti fini e grossolani che litificandosi diedero origine a vari tipi di rocce (argille, arenarie, calcari, ...).

All'incirca 130 milioni di anni fa, verso la fine dell'Era Mesozoica, i movimenti che portavano all'allontanamento delle placche si invertirono determinando il convergere delle stesse. Questo fece sì che le rocce più pesanti (basalti) costituenti la Tetide, fossero spinte all'interno della Terra, mentre le più leggere (sedimentarie e metamorfiche) restavano in superficie. Tali rocce accavallandosi tra loro per effetto della convergenza delle placche hanno originato le catene montuose ed in particolare le Alpi e gli Appennini.

³⁵ https://staticmy.zanichelli.it/catalogo/assets/9788808402035_04_CAP.pdf

Gli Appennini, nati dalla convergenza della placca africana ed europea, sono quasi interamente costituiti da rocce sedimentarie. Nello specifico l'Appennino marchigiano è composto da rocce carbonatiche (calcari, calcari marnosi, marne e dolomie).

Il nostro campo prove si sviluppa nella regione Marche, situata nel centro Italia. Le Marche hanno un territorio per lo più collinare (53%) e montuoso (36%), la restante parte è pianeggiante (Fig. 2.1.1.1). Il territorio è delimitato ad ovest dall'appennino umbro-marchigiano e ad est dal mar Adriatico (Fig. 2.1.1.2).

Fig. 2.1.1.1 Areogramma del territorio marchigiano (regione.marche.it)

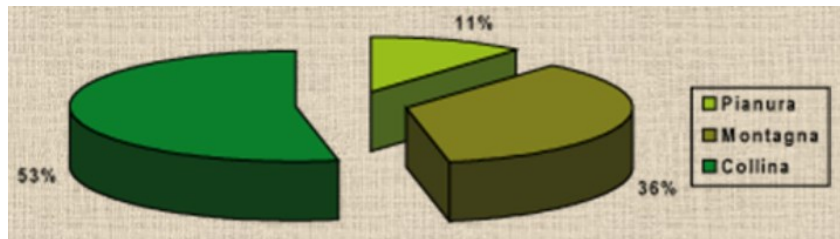


Fig. 2.1.1.2 Cartina fisica della Regione Marche (pinterest.it)

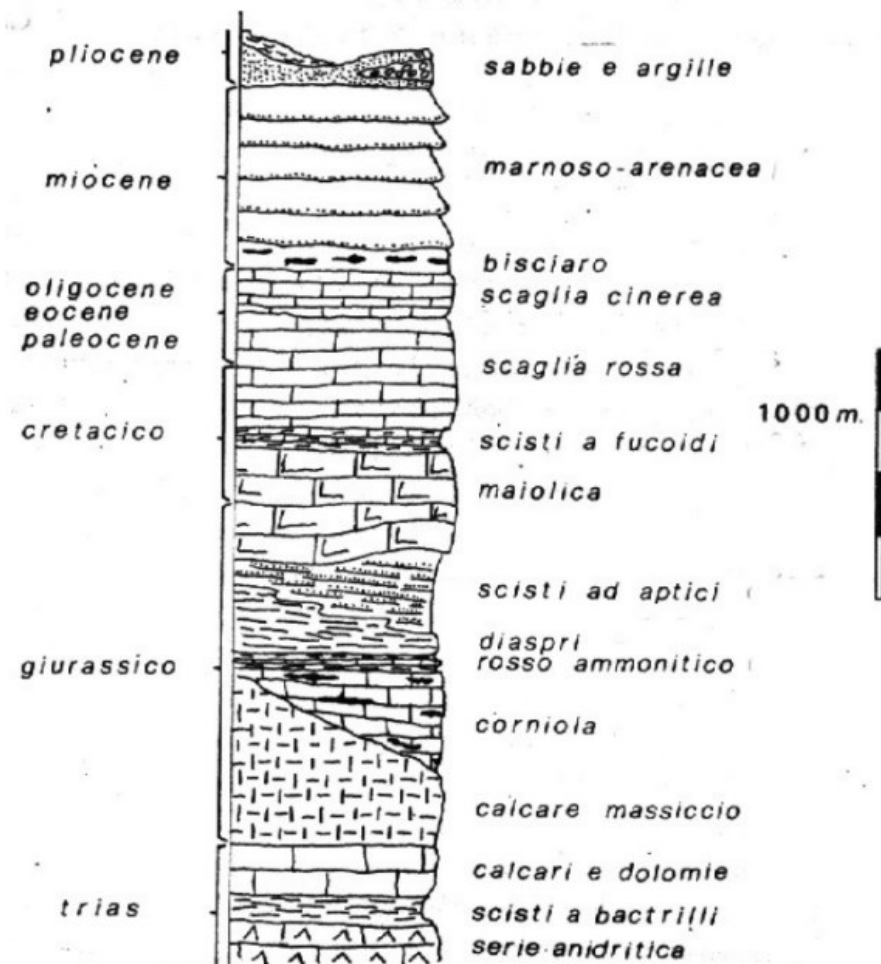


Fig. 2.1.1.3 Serie Umbro- Marchigiana, descrive la successione di varie formazioni rocciose che hanno dato origine a questa area. (www.luniversoeluomo.org)

Le Marche sono costituite da formazioni sedimentarie. Tra gli affioramenti più antichi ci sono il calcare massiccio a cui seguono la corniola, il rosso ammonitico, gli scisti ad aptici, la maiolica, gli scisti a fucoidi e la scaglia rossa. Le formazioni principali sono la scaglia cinerea, il bisciario e lo schlier. A seguire i sedimenti pliocenici e pleistocenici³⁶.

Nelle aree collinari i sedimenti sono per lo più formati da argilla, arenaria, sabbia o ghiaia.

³⁶ <http://www.ambiente.marche.it/Ambiente/Natura/Ambientenaturale/Geologia.aspx>

Il capoluogo di provincia della regione Marche è Ancona. Affacciata ad est sul mar Adriatico, confina a nord-ovest con la provincia di Pesaro e Urbino, a sud con la provincia di Macerata e a ovest con l'Umbria (Fig. 2.1.1.4). Presenta la tipica struttura geografica e paesaggistica del resto della regione, ma nonostante il territorio in massima parte collinare, il 34,5% della provincia di Ancona è classificato come montagna³⁷.



Fig. 2.1.1.4 Cartina politica della regione Marche (cartinadatieuropa.it)

³⁷ <http://www.centrometeo.com/previsioni-meteo/previsioni-meteo-regionali/5588-meteo-e-clima-in-provincia-di-ancona>

2.1.2 Clima

Il clima è l'insieme delle condizioni medie atmosferiche calcolate in una certa area geografica per un periodo di tempo sufficientemente lungo (almeno trent'anni). La temperatura, i venti, le precipitazioni, l'umidità e la pressione atmosferica, cioè il peso che l'aria esercita su ogni punto della superficie terrestre sono gli elementi utilizzati per definire il clima. I fattori che ne definiscono le caratteristiche sono: la latitudine (la distanza di un luogo dall'Equatore), l'altitudine (l'altezza di un luogo misurata a partire dal livello del mare), la distanza dal mare (o marittimità). Determinanti per la regolazione del clima sono anche le correnti marine, enormi masse d'acqua in movimento che spostano acque calde e fredde da una zona all'altra del pianeta (Fig. 2.1.2.1)³⁸.

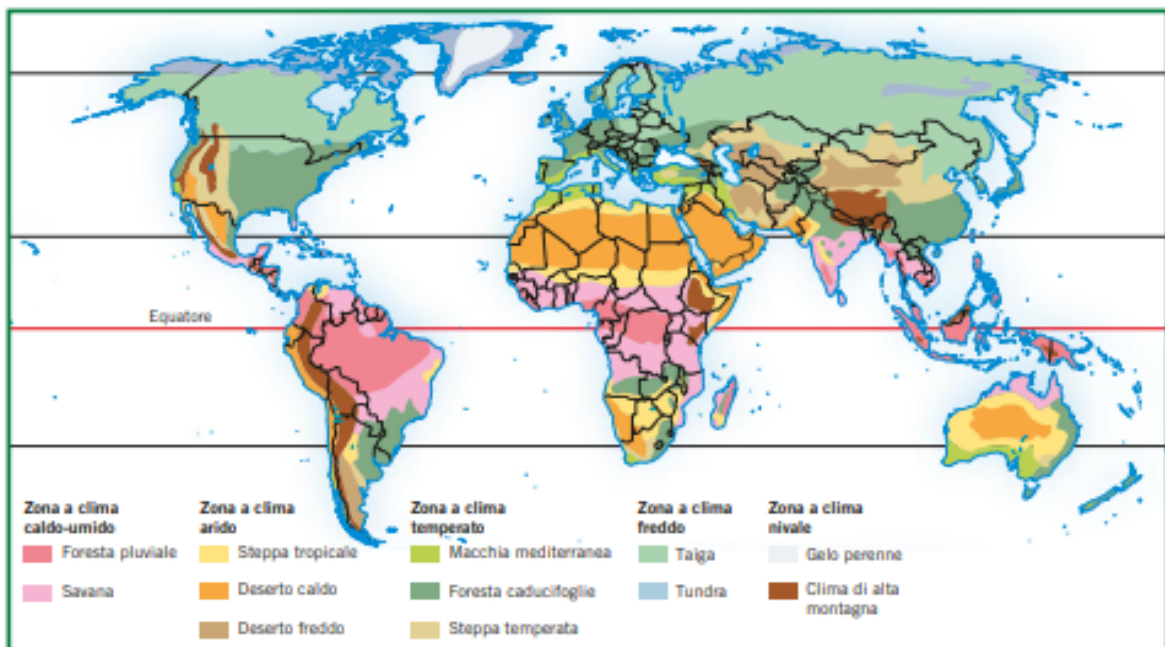


Fig. 2.1.2.1 Si evidenziano cinque gruppi climatici: climi caldo-umidi, aridi (caldi o freddi), temperati, freddi, nivali, ognuno dei quali determina il proliferarsi di fauna e flora diverse, nonché la formazione e la caratterizzazione dei suoli. (staticmy.zanichelli.it)

³⁸ https://staticmy.zanichelli.it/catalogo/assets/9788808402035_04_CAP.pdf

L'Italia è compresa fra i 36° e i 47° di latitudine nord, e quindi nella fascia temperata (Fig. 2.1.2.2). Presenta un clima di montagna nelle zone con maggiore altitudine, ma per il resto presenta un clima di tipo mediterraneo. Tuttavia, la forma allungata della penisola determina forti variazioni climatiche tra le regioni del nord e del sud e tra le aree interne e litoranee (Fig. 2.1.2.3). Inoltre, il clima d'Italia è caratterizzato da eventi anomali, come siccità, precipitazioni violente, grandinate, trombe d'aria, che talora si traducono in calamità naturali³⁹.



Fig. 2.1.2.2 La carta climatica mondiale è divisa in cinque grandi fasce climatiche: le due temperate tra i tropici e i circoli polari, la tropicale tra i due tropici e la zona artica ed antartica in corrispondenza dei rispettivi poli. (sito01.seieditrice.com)

³⁹ <https://www.gmpe.it/node/169>



Fig. 2.1.2.3 In Italia si distinguono sei regioni climatiche (come riporta la legenda), in particolare nella regione Marche (area di nostro interesse) si hanno la zona appenninica caratterizzata da un clima continentale e precipitazioni abbondanti e la zona adriatica con precipitazioni scarse e con temperature inferiori rispetto alle coste tirreniche, dovute alla minore azione mitigatrice del mar Adriatico. (www.gmpe.it)

Nella regione Marche il clima presenta sbalzi di temperatura tra una stagione e l'altra: le estati sono calde, ma rinfrescate dalla brezza marina, gli inverni sono freddi con regolari piogge stagionali. Nelle aree montuose si presentano estati fresche e inverni rigidi con possibili precipitazioni nevose. Lungo la costa, invece, il clima è marittimo con deboli escursioni termiche e precipitazioni (Fig. 2.1.2.4)⁴⁰. Nella provincia di Ancona, zona di nostro interesse, il clima è mediterraneo come nel resto della regione. In inverno le

⁴⁰ <https://slideplayer.it/slide/961644/>

temperature si mantengono intorno ai 7-8 °C e difficilmente scendono sotto lo zero. In estate si possono raggiungere i 35 °C, ma la forte umidità rende il clima più umido che porta alla percezione di una temperatura maggiore rispetto a quella reale⁴¹.



Fig. 2.1.2.4 Le Marche presentano un clima di tipo mediterraneo nella fascia costiera e medio-collinare che tende verso l'interno a divenire subcontinentale. Nella zona montuosa si presenta temperato fresco anche se restano ancora influssi di tipo mediterraneo. (www.geofisico.it)

2.1.3 Criticità

L'Italia è un paese industrializzato e densamente abitato dove le attività produttive e l'enorme patrimonio storico-architettonico devono compararsi con la fragilità geologica del territorio, caratterizzata da eventi ricorrenti (frane, alluvioni, terremoti, eruzioni vulcaniche, ecc.) che lo trasformano. A seguito della proclamazione del regno d'Italia, nel 1861 prese avvio il progetto per la realizzazione della Carta geologica d'Italia che permetteva la conoscenza del territorio e delle risorse naturali indispensabili per lo sviluppo economico.

⁴¹ <http://www.centrometeo.com/previsioni-meteo/previsioni-meteo-regionali/5588-meteo-e-clima-in-provincia-di-ancona>

Gran parte dei paesi europei hanno ultimato la copertura geologica nazionale, l'Italia invece pur soggetta a rischi idrologici, sismici e vulcanici e con enormi problemi di inquinamento tutt'ora presenta una cartografia che per oltre il 50% risulta inadeguata⁴².



*Fig. 2.1.3.1 Carta Geologica d'Italia - scala 1:1.000.000
(Servizio Geologico d'Italia/ISPRA, 2011, www.isprambiente.gov.it)*

⁴² <https://www.socgeol.it/files/download/pubblicazioni/Miscellanea/Geologia%20x%20Italia-link.pdf>

I geologici sono convinti che l'emissione nell'atmosfera di grandi quantità di gas serra come la CO₂ che ha tempi di permanenza sufficientemente lunghi da non poter essere facilmente rimossa, può innescare significative variazioni climatiche. Il conseguente riscaldamento climatico è causa, ad esempio, dell'innalzamento del livello marino, di un aumento dell'acidità delle acque oceaniche, di una diminuzione dei livelli di ossigeno nelle acque marine, e dei cambiamenti significativi nei modelli climatici. Dal 1750 ad oggi sono state aggiunte nell'atmosfera terrestre più di 500 miliardi di tonnellate di carbonio (corrispondenti a più di 1850 miliardi di tonnellate di CO₂)⁴³.

2.2 Descrizione del campo prova

La prima fase dell'indagine ambientale è di carattere conoscitivo e serve a definire il modello idrogeologico dell'area in esame. Vi gioca quindi un ruolo preminente lo studio idrogeologico, il cui scopo è quello di fornire gli elementi indispensabili per la comprensione delle modalità di alimentazione e deflusso delle falde presenti nell'area di studio e delle modalità di migrazione degli inquinanti⁴⁴.

Il campo prove allestito nella valle del Betelico in Provincia di Ancona ci permette di monitorare ed analizzare gli acquiferi porosi lì presenti (Fig. 2.2.1)⁴⁵. Al fine di studiare i processi di infiltrazione che riguardano la zona, sono stati installati due piezometri per la misura dei livelli piezometrici, uno dentro al campo pozzi ed uno, più profondo, fuori, e dei

⁴³ <https://www.socgeol.it/files/download/pubblicazioni/MIscellanea/Geologia%20x%20Italia-link.pdf>

⁴⁴ Struttura fisica del suolo – Docenti.Unina.it, *Monitoraggio e caratterizzazioni di suoli e acque profonde contaminati*, Tratto da: Manuale per le indagini ambientali nei siti contaminati - APAT Manuali e linee guida 43/2006

⁴⁵ www.earth.google.com

tensiometri per misurare la tensione matriciale dell'acqua di infiltrazione. Sono presenti alcune sonde per la misura della conducibilità elettrica, l'umidità, la temperatura e il potenziale matriciale del suolo a varie profondità ed inoltre un pluviometro per misurare l'altezza delle precipitazioni meteoriche.



Fig 2.2.1 Campo prove (www.earth.google.com)

2.2.1 Il piezometro

Il piezometro è un pozzo di osservazione usato in idrogeologia per misurare il carico idraulico di una falda ad una data profondità (Fig. 2.2.1.1). L'uso combinato di più piezometri disposti nel sito di indagine, consente la ricostruzione, per interpolazione di misure effettuate, della superficie piezometrica della falda, ovvero la superficie in cui la pressione dell'acqua è uguale a quella atmosferica che ci permette a sua volta la conoscenza del gradiente idraulico e la direzione del flusso di falda (Fig. 2.2.1.2).

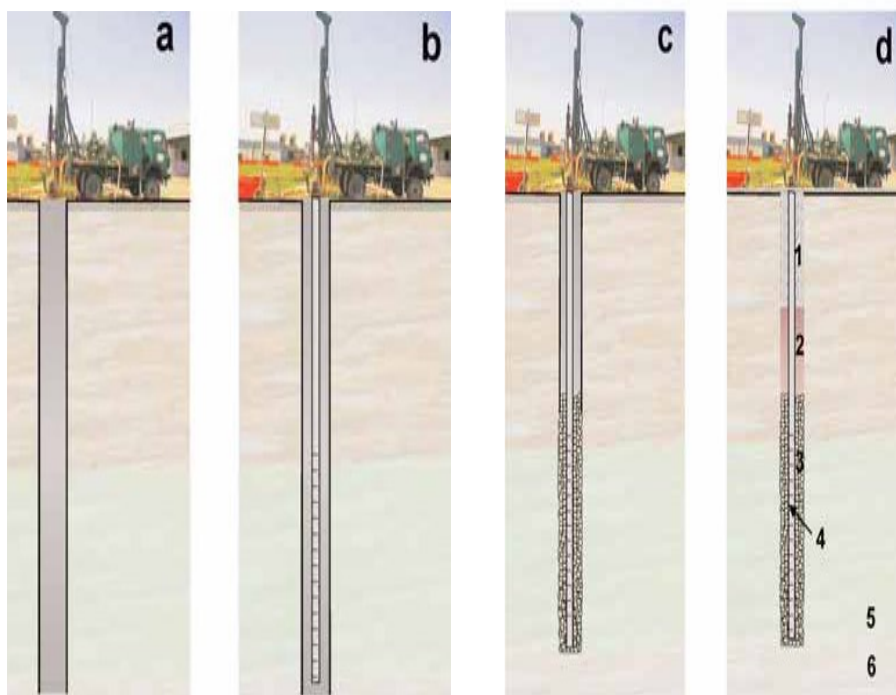


Fig. 2.2.1.1

Fasi della realizzazione di un piezometro:

a) realizzazione del foro;

b) posa in opera del tubo di rivestimento, finestrato in corrispondenza della falda, cieco nei tratti rimanenti;

c) realizzazione del dreno in corrispondenza del tratto finestrato;

d) realizzazione del setto impermeabile e cementazione;

Legenda:

- 1) sigillatura con cemento; 2) sigillatura con bentonite;
- 3) dreno in ghiaietto calibrato; 4) tratto finestrato del piezometro;
- 5) Falda freatica; 6) letto impermeabile dell'acquifero. (slideplayer.it)

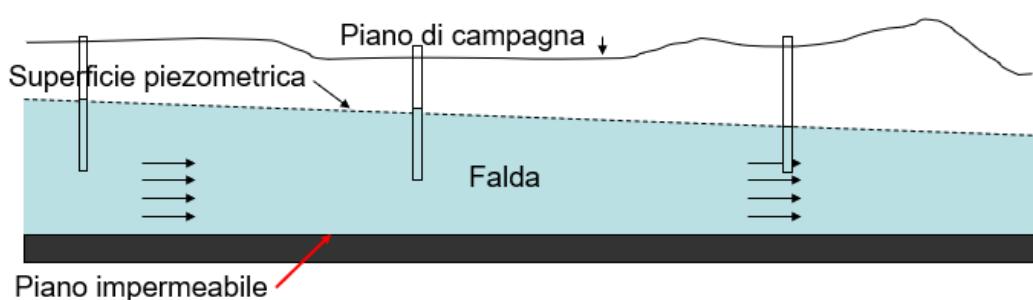


Fig. 2.2.1.2 Esempio di sviluppo della superficie piezometrica della falda rispetto al piano campagna. (slideplayer.it)

Misurare la soggiacenza della falda implica valutare la profondità della sua superficie rispetto alla superficie topografica. Tale misura si fa per mezzo del freatimetro, uno strumento costituito da una sonda di lettura alimentata a batteria che viene calata all'interno

del piezometro per mezzo di un cavo millimetrato o centimetrato (Fig. 2.2.1.3). Il circuito elettrico si chiude nel momento in cui la sonda viene a contatto con la superficie dell'acqua. Un suono, solitamente abbinato all'accensione di un led, avverte dell'avvenuto contatto con l'acqua e che si può procedere con la lettura della distanza della superficie piezometrica dal bocca tubo (Fig. 2.2.1.4). Il bocca tubo disposto in sito è rialzato di 35 cm, perciò alla lettura eseguita va sottratta tale distanza se si vuole conoscere la profondità della superficie piezometrica dal piano campagna.

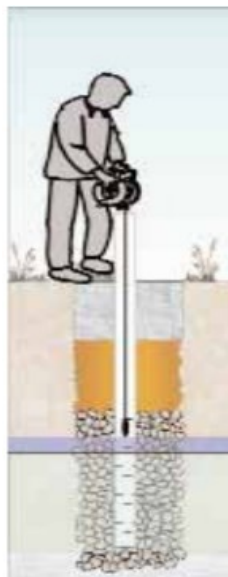


Fig. 2.2.1.3
Schema di utilizzo
del freatometro.
(slideplayer.it)

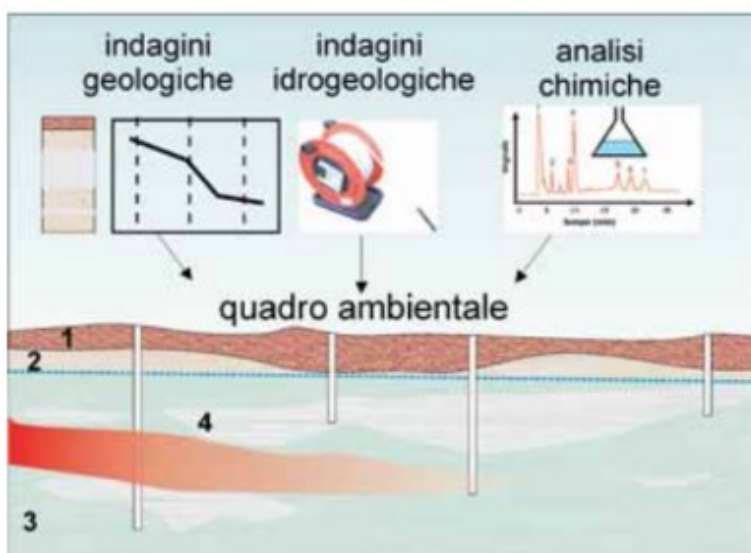


Fig. 2.2.1.4 -Quadro ambientale
del sito.

Dall'integrazione delle indagini geologiche ed idrogeologiche con le analisi chimiche di laboratorio si ottiene un quadro complessivo dello stato di contaminazione del sito in esame.
(wwwdisc.chimica.unipd.it)

2.2.2 Il lisimetro a suzione

I lisimetri sono, in termini semplici, dei campionatori/contenitori di acqua circondati da terreno (il meno disturbato possibile) e con o senza vegetazione, isolati dal terreno circostante. È possibile misurare la quantità d'acqua che filtra attraverso una pietra porosa posta alla base dello strumento.

I lisimetri permettono di simulare condizioni di campo rispettando la soluzione circolante (Lazarovitch et al., 2006). Per collocare tali strumenti in sito è opportuno valutare gli aspetti climatici, il suolo e la vegetazione presente, al fine di ridurre eventuali errori. Tra le caratteristiche principali che distinguono i diversi lisimetri ci sono: le dimensioni, il peso, il metodo di riempimento del suolo disturbato o indisturbato, la vegetazione e il tipo di suolo. Esistono molteplici lisimetri applicati in ambito scientifico, uno dei quali è il low-tension lysimeter, ovvero il lisimetro a suzione, nel quale è applicata una depressione al sistema di raccolta⁴⁶.

Il lisimetro a suzione è uno strumento che consente il campionamento di liquidi presenti in soluzione nel terreno che a loro volta ci permettono di valutare gli elementi nutritivi disciolti, la salinità, il pH ed altri parametri utili allo sviluppo delle piante (Fig. 2.2.2.1). Tale utensile presenta un diametro esterno di 48 mm ed è inserito in fori di 14 cm o più per garantire la creazione di un letto di malta di silicio intorno ad esso, che ha lo scopo di mettere in connessione lo strumento con il suolo circostante.

⁴⁶ Federico Roncolato, *Nuovo approccio alla gestione strumentale della fertirrigazione in ortofloricoltura*, Tesi di Dottorato, 2011, par. 1.5 pag. 33-34

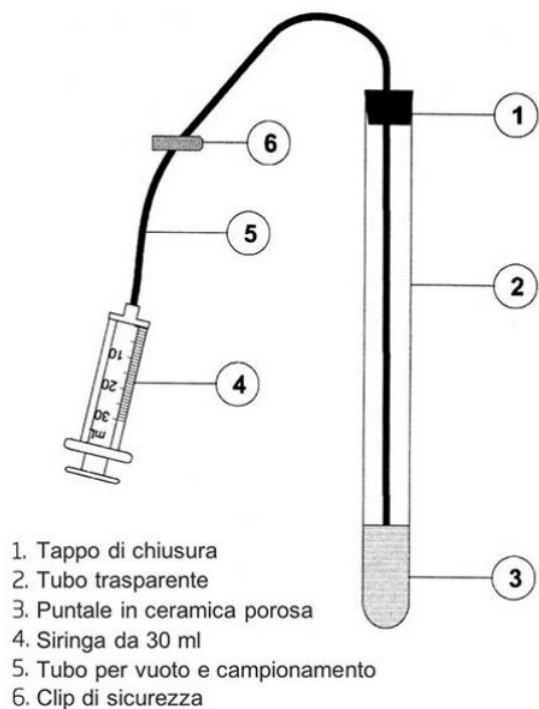


Fig. 2.2.2.1 Lisimetro a suzione. Lo strumento presenta una punta in ceramica porosa, un tubo trasparente in plastica dove si crea il vuoto e un tubicino in gomma che consente la formazione del vuoto e l'estrazione del campione. (scubla.it)

In sommità del lisimetro è presente l'ingresso della linea di pressione/vuoto che viene poi collegata al manometro posto nel terminale di superficie e che consente la formazione di vuoto nello strumento; con ciò garantisce la formazione di un gradiente tra l'interno del lisimetro, il suolo e la malta di silicio. In aggiunta, nella parte superiore del lisimetro è presente la linea di campionamento che permette all'acqua campionata di risalire in superficie⁴⁷.

Per permettere il funzionamento dei lisimetri a coppa porosa è indispensabile creare una depressione all'interno del tubo per far sì che la coppa porosa, montata ermeticamente su di esso, riesca ad estrarre la soluzione circolante dal suolo. La depressione applicata è connessa

⁴⁷ https://www.agrometria.it/sites/default/files/prodotto_scheda_tecnica/Manuale%20lisimetri_0.pdf

al tipo di suolo, alle condizioni ambientali, alla quantità di soluzione circolante, al contenuto idrico del suolo al momento della prova e all'istante in cui applichiamo la depressione (Warrick e Amoozegar-Fard, 1977; Weihermüller, 2005)⁴⁸.

L'installazione corretta del lisimetro prevede che si prepari a priori il foro e il letto di malta di silicio. Durante la procedura di inserimento del letto di malta, il lisimetro va mantenuto centrato nel foro e completata l'operazione di stesura si dispongono sigilli di bentonite nella parte sommitale. Il lisimetro entra in funzione una volta eliminata l'acqua al suo interno (Fig. 2.2.2.1).

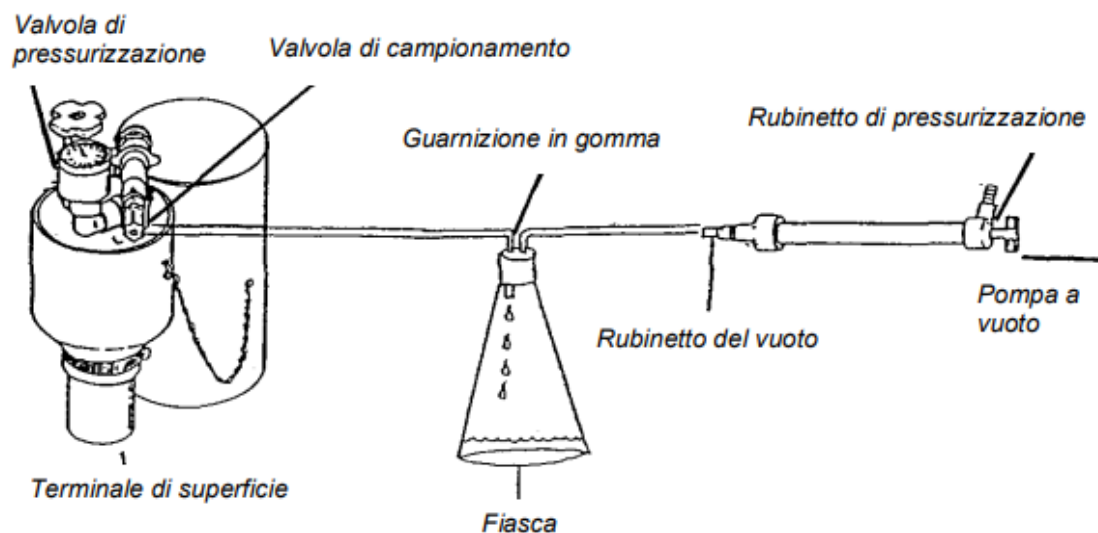


Fig. 2.2.2.1 – Attivazione del lisimetro. Si procede chiudendo la valvola di pressurizzazione e aprendo quella di campionamento nel terminale di superficie. Dal rubinetto di campionamento alla fiasca porta campione si inserisce una prima tubazione e la seconda la si dispone dalla fiasca al rubinetto del vuoto della pompa. A questo punto si crea vuoto e l'acqua tende a fluire nella fiasca. (www.agrometria.it)

⁴⁸ Federico Roncolato, *Nuovo approccio alla gestione strumentale della fertirrigazione in ortofloricoltura*, Tesi di Dottorato, 2011, par 1.5 pag. 38-39

2.2.3 Il tensiometro

Il tensiometro misura il potenziale matriciale, ossia la forza con cui l'acqua viene trattenuta dal terreno. Tale forza indica quanto strettamente l'acqua è legata al suolo e quanta energia deve essere esercitata dalle radici delle piante per rimuovere e utilizzare l'acqua (Fig. 2.2.3.1).

I componenti di base di un tensiometro (standard cod. 2710) sono una tazza di ceramica porosa, un tubo di plastica e un misuratore di vuoto. La tazza di ceramica è posta in buon contatto idraulico con il terreno e consente il trasferimento dell'acqua all'interno e all'esterno del corpo del tensiometro in base alla tensione del terreno. Il vuoto all'interno del corpo del tensiometro si equilibra con la tensione dell'acqua nel terreno e il comparatore fornisce una lettura diretta della tensione (Fig. 2.2.3.2).

Il livello d'acqua nello strumento non diminuisce quando il terreno risulta saturo e si leggerà il valore "zero"; al contrario lo strumento potrà misurare la pressione interstiziale quando l'acqua nel tensiometro tenderà a permeare verso il terreno insaturo.

In conclusione si possono dedurre il carico di suzione e i livelli saturi ed insaturi conoscendo l'altezza in cui viene misurato lo "zero".



*Fig. 2.2.3.1 Tensiometro
(www.agriexpo.online)*

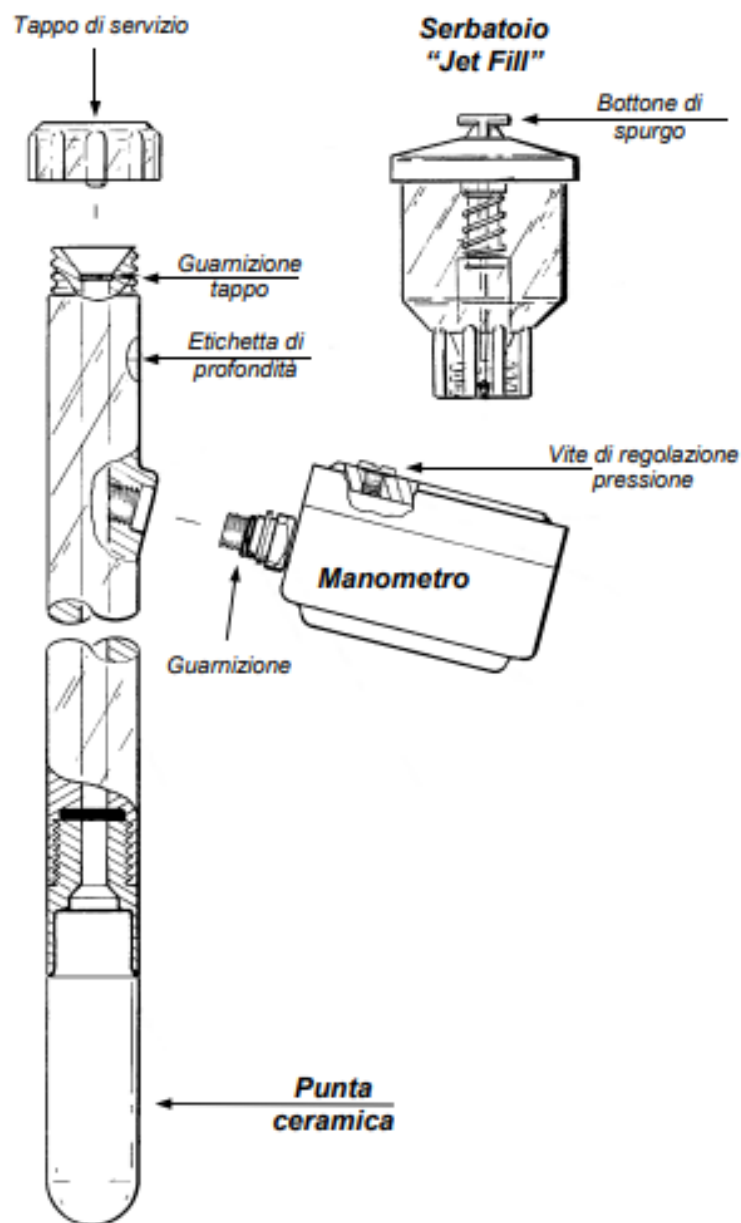


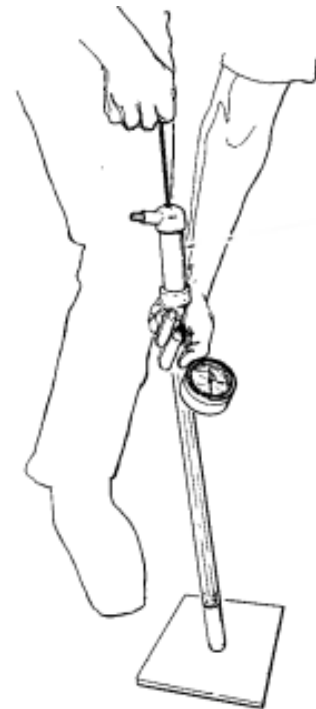
Fig. 2.2.3.2 *Composizione del Tensiometro (www.ecosearch.info)*

Per attivare il tensiometro viene usato un fluido blu che inibisce la crescita delle alghe all'interno del tensiometro e il cui colore rende più facile osservare l'aria accumulata all'interno del tensiometro. In alternativa è possibile utilizzare acqua semplice senza l'additivo blu. Durante la procedura il tensiometro va mantenuto in posizione verticale finché la coppa di ceramica non si satura e il fluido non gocciola dalla punta di ceramica (Fig. 2.2.3.3). Successivamente, l'unità viene completamente riempita e si crea vuoto all'interno

del tensiometro con una pompa manuale. Dopo ogni pompaggio, il tensiometro va riempito fino all'orlo con acqua o soluzione blu. L'operazione di pompaggio va ripetuta per quattro o cinque volte fino a quando non si vedranno più bolle d'aria dallo stelo del comparatore (Fig. 2.2.3.4). Quando l'unità è pronta, il tensiometro va sigillato.



*Fig. 2.2.3.3 Il tensiometro durante la fase di riempimento viene mantenuto in posizione verticale
(www.soilmoisture.com)*



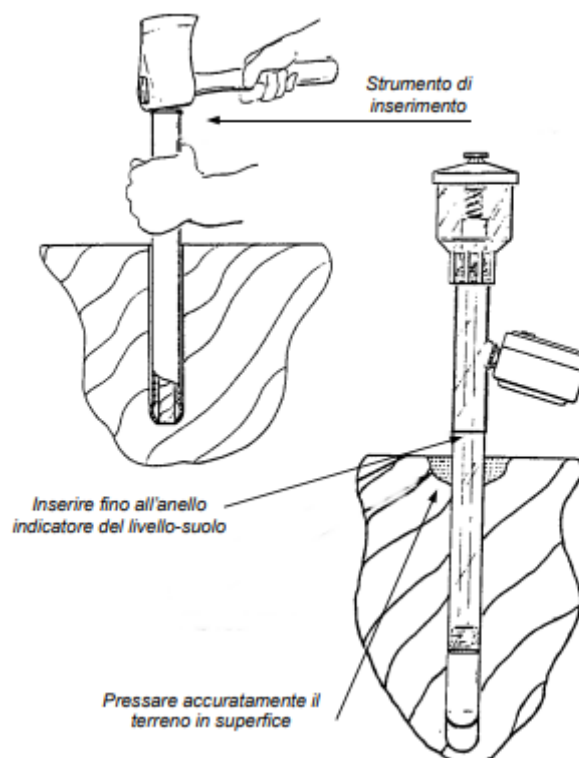
*Fig. 2.2.3.4 Operazione di pompaggio
(www.soilmoisture.com)*

Se siamo in possesso di un tensiometro Jet Fill (cod. 2725), è necessario riempire il tappo del serbatoio con fluido blu o acqua. Se non si è provvisti di una pompa manuale, si può rimuovere l'aria premendo ripetutamente per 50-60 volte in un minuto il pulsante posto in sommità del serbatoio. Per facilitare l'operazione il tensiometro viene inclinato.

Nell'eventualità che il tensiometro non sia immediatamente installato, la tazza di ceramica deve essere coperta con un sacchetto di plastica per evitare l'evaporazione dell'acqua⁴⁹.

L'installazione deve essere effettuata in modo che le tazze di ceramica porosa siano a stretto contatto con il terreno (Fig. 2.2.3.6). Il terreno di superficie è strettamente ricalzato attorno al tubo del corpo per impedire all'acqua di superficie di penetrare. Per quanto concerne l'installazione bisogna in aggiunta prendere in considerazione la presenza di suoli morbidi o duri: nei primi il tensiometro viene inserito con una semplice spinta, nei secondi dobbiamo realizzare un foro con trivella. Comunque sia in entrambi i casi dobbiamo fare particolare attenzione a pressare il terreno in superficie. Dopo la fase di installazione a seconda che il terreno sia asciutto o bagnato dovremo attendere un periodo più o meno lungo per leggere dei valori di suzione attendibili che risulteranno maggiori per suoli asciutti rispetto quelli umidi.

Fig. 2.2.3.6 La punta ceramica va mantenuta in stretto contatto con il suolo per garantire il corretto funzionamento del tensiometro (www.ecosearch.info)



⁴⁹ 2710ARL Tensiometer and 2725ARL Jet Fill Tensiometer da SOILMOISTURE EQUIPEMENT CORP., 2011

Se il terreno in cui è stato installato il tensiometro è umido e le letture di aspirazione del terreno sono basse, l'aria accumulata sarà minima. Se, invece, il tensiometro è stato installato in un terreno relativamente asciutto e i valori di aspirazione del terreno sono compresi tra 40 e 60 centibar, l'aria si accumulerà piuttosto rapidamente per i primi giorni dopo l'installazione. Dopo le prime operazioni di rimozione dell'aria con la pompa manuale a vuoto sul campo, il tasso di accumulo dell'aria diminuirà notevolmente e gli interventi di rimozione dell'aria saranno necessari solo su base settimanale o più a lungo.

2.2.4 L'infiltrometro

L'infiltrazione è il processo grazie al quale l'acqua dalla superficie entra nel terreno per forza gravitazionale e capillare. Possiamo misurarla con procedure analitiche o empiriche: in particolare, per le prime, si sfrutta uno strumento chiamato infiltrometro. L'infiltrometro è un cilindro riempito d'acqua, che viene installato nel letto di un corpo superficiale. La velocità di riduzione del livello è una misura dell'acqua infiltrata.

Per la misura della conducibilità idraulica si può applicare la formula di Darcy tra la superficie del suolo e il fronte di inumidimento:

$$v_i = K_w \frac{(H_w + L_f - h_f)}{L_f}$$

v_i = velocità di infiltrazione

L_f = profondità fronte umido

h_f = altezza piezometrica in corrispondenza del fronte di inumidimento

H_w = tirante idrico sulla superficie

K_w = conducibilità idraulica

Se H_w e h_f sono trascurabili rispetto L_f allora $v_i = K_w$. Essendo il suolo non in condizioni di saturazione può essere presente aria residua nei pori del suolo quindi si adopera un diverso coefficiente di conducibilità a seconda che il suolo sia a grana grossa (ghiaie e sabbie), $K_w = 0,5K_{fs}$ e grana fine (limi ed argille), $K_w = 0,25 K_{fs}$, dove K_{fs} è la conducibilità idraulica in condizioni di saturazione del suolo⁵⁰.

L'infiltrometro a disco (Fig. 2.2.4.1) tende a sovrastimare la conducibilità idraulica perché poco accurato, perciò si usa l'infiltrometro a doppio anello (Fig. 2.2.4.2). L'anello esterno ha la funzione di ridurre la componente orizzontale del flusso idrico, mentre l'anello interno delimita il suolo destinato alla prova di infiltrazione. Il valore della conducibilità idraulica è ottenuto dal rapporto tra la riduzione del tirante idrico [mm] e l'intervallo temporale in cui tale abbassamento si manifesta [s, min, h]⁵¹.



Fig. 2.2.4.1 Infiltrometro a disco o ad anello (www.unirc.it)

⁵⁰ Prof. Santo Marcello Zimbone, *Misura dei parametri idrologici del suolo*, Corso di idraulica ed idrologia forestale, 2008-2009, pag. 36-38

⁵¹ Prof. Santo Marcello Zimbone, *Misura dei parametri idrologici del suolo*, Corso di idraulica ed idrologia forestale, 2008-2009, pag. 39-41

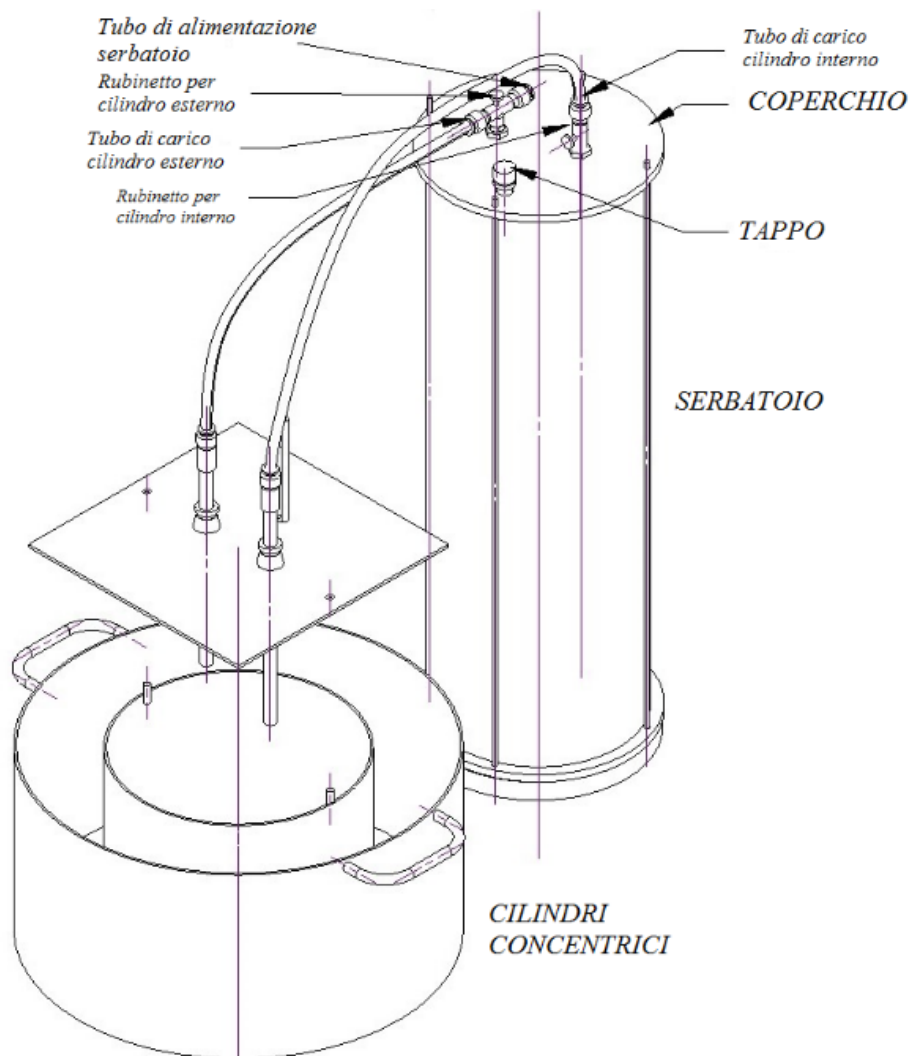


Fig. 2.2.4.1 L'infiltrometro a doppio anello e carico costante è costituito da due anelli cilindrici concentrici in acciaio inossidabile di qualche decina di cm di altezza che vengono infissi verticalmente nel terreno. L'anello interno è alimentato da un flusso di acqua che mantiene costante il carico idrico sul terreno e all'interno dell'anello stesso. Il serbatoio dotato di un'asta graduata permette la lettura della quantità di acqua dispersa nel terreno. (manualedelegeologo.it)

2.2.4.1 L'infiltrometro a doppio anello

L'infiltrometro a doppio anello misura la velocità di infiltrazione dell'acqua nel suolo. Per la collocazione di tale strumento serve una superficie di prova piana e priva di ostacoli, quali pietre o ramoscelli. Con una livella a bolla viene valutata la verticalità dei due anelli che

devono presentare stessa infissione. Una volta allestito lo strumento viene versata acqua pulita che deve essere mantenuta a livelli simili tra i due anelli per evitare errori nella valutazione dei valori di infiltrazione (Fig. 2.2.4.1.1). La diminuzione nel tempo del livello dell'acqua nell'anello interno è indicatrice della velocità di percolazione verticale. Quando tale dato assume valore costante la misurazione è conclusa.

Durante la procedura di valutazione della velocità di infiltrazione possono insorgere dei problemi: un aumento della velocità può essere indice della presenza di macropori dovuti all'effetto della vegetazione o alla siccità, di un livello dell'acqua diverso tra i due anelli, di terreni molto stratificati, di un'errata installazione dell'anello o di una misurazione troppo prolungata. Al contrario una diminuzione della velocità di infiltrazione può essere causata dalla presenza di terreno incrostato, da versamento dell'acqua che danneggia la struttura o da acqua non pulita⁵².



Fig. 2.2.4.1.1 Installazione infiltrometro a doppio anello (www.soilutionsystem.com)

⁵² L'Infiltrometro a doppio anello e le misurazioni di runoff/sedimento | Soilution System

2.2.5 Datalogger ZL6

Il ZL6 è un datalogger, facente parte di ZETRA System, che permette la registrazione di dati. Viene usato per le operazioni all'aperto dato che è sigillato in una cella resistente al clima (Fig. 2.2.5.1). All'interno è dotato di un circuito per la ricarica delle batterie alimentato dall'energia prodotta da due pannelli solari integrati. ZL6 è capace di riunire i dati raccolti da sei sensori, di tipologia METER, che vengono poi trasmessi a ZENTRA Cloud, una piattaforma WEB per l'acquisizione e la visualizzazione dei dati collezionati dallo strumento. Ha una memoria di 8 MB, ma i dati acquisiti, in intervalli anche lunghi che variano tra i 5 minuti e le 12 ore, sono sovrascritti dal software partendo dai più vecchi, così da eliminare la necessità di cancellarli ogni volta⁵³.



Fig. 2.2.5.1 Cella ZL6 e suo sistema interno (www.misure.net)

⁵³ www.misure.net

2.2.6 Sensori per rilevamenti specifici

L'umidità del suolo è una variabile chiave nel controllo dello scambio di acqua ed energia termica tra la superficie terrestre e l'atmosfera attraverso l'evaporazione e la traspirazione delle piante. Per misurarla si può sfruttare il sensore di umidità del suolo TEROS 12 (Fig. 2.2.6.1) che calcola il contenuto d'acqua da 0-100%, la temperatura del substrato tra -40 e +50°C e la conducibilità elettrica (EC) nell'intervallo 0-23 dS/m. Per fare queste letture sfrutta degli aghi di acciaio inossidabile: l'umidità è misurata tra l'ago più in profondità e quello centrale; la conducibilità tra il centrale e quello più superficiale; mentre la temperatura è misurata con termistore presente nell'ago centrale.

Esso sfrutta una tecnica di calibrazione che massimizza la precisione e riduce al minimo la variabilità da sensore a sensore, pur mantenendo un buon rapporto qualità-prezzo. Il TEROS 12 è un sensore duraturo, preciso e facile da installare⁵⁴.

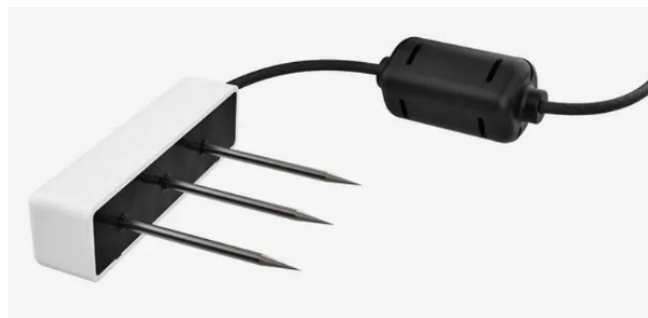


Fig. 2.2.6.1 Sensore TEROS 12 (www.metergroup.com)

Il potenziale idrico misura l'energia potenziale posseduta dall'acqua in un sistema, per valutarlo quantitativamente si può usare il sensore di potenziale idrico TEROS 21 (Fig.

⁵⁴ https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/teros-12-soil-moisture-sensor?creative=589757453988&keyword=&matchtype=&network=g&device=c&gclid=Cj0KCQjwhsmaBhCvARIsAibEbH7u03UkVjvonNndJsE74T1CXA7uPINarURKK8deQCIXfTL_gqQavqIaAr4fEALw_wcB

2.2.6.2). Esso è facile da usare, non ha bisogno di manutenzione e ci permette di raccogliere dati a lungo termine. Il TEROS 21 ci consente di sapere se c'è abbastanza acqua per la vegetazione e dove questa si muove, inoltre rileva la permittività dielettrica di una matrice solida al fine di conoscerne il contenuto d'acqua. È un sensore economico, a basso consumo energetico e di lunga durata⁵⁵.



Fig. 2.2.6.2 Sensore TEROS 21 (www.metergroup.com)

Il 5TE (Fig. 2.2.6.3) è un sensore usato per monitorare la conducibilità elettrica, il contenuto volumetrico d'acqua e la temperatura del suolo. È un sensore accurato e a basso costo che sfrutta una frequenza di 70 MHz per minimizzare gli effetti di salinità e tessitura. La conducibilità elettrica è valutata per mezzo di elettrodi in acciaio inossidabile e la temperatura grazie ad un termistore incorporato⁵⁶.



Fig. 2.2.6.3 Sensore 5TE (it.aliexpress.com)

⁵⁵ https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/teros-21-soil-water-potential-sensor?creative=589757453997&keyword=&matchtype=&network=g&device=c&gclid=Cj0KCQjwhsmaBhCvARIsAibEbH6JHOqlaYI4N8zSow5S-O6qs3oWWpims6KWJ9x3fltJqLhOstSD8ncaAkXGEALw_wcB

⁵⁶ www.publications.metergorup.com

2.3 Campionamenti

Per permettere una visione più uniforme del contenuto d'acqua naturale del sito di interesse sono stati effettuati dei campionamenti nel mese di novembre, gennaio e marzo. Ogni volta sono stati estratti 3 campioni, per un totale di 9, a profondità 0-30 cm, 30-60 cm e 60-90 cm con l'uso di un carotatore manuale. In particolare nel campione di marzo la profondità massima campionabile è stata 80 cm perché il terreno si è presentato troppo compatto. Il materiale così prelevato è stato messo in bustine di plastica, sottovuoto e ben sigillato, in modo da evitare eventuale perdita d'acqua per evaporazione.

In aggiunta sono stati prelevate carote di terreno in corrispondenza dei lisimetri installati in situ per eseguire l'analisi granulometrica che sono state poi riposte in buste sigillate. Per ogni lisimetro si è scesi fino alla profondità ultima ad intervalli di 30 cm circa, a seconda della resistenza fornita dal terreno. Si sono così ricavati diversi campioni, tra i quali si è optato per quelli ricavati dal lisimetro 430 cm, in modo tale da studiare come varia la composizione granulometrica fino alla profondità di 430 cm. Durante la procedura di estrazione si sono riscontrati dei problemi alla profondità di 270 – 290 cm e di 320 – 350 cm, tanto che non è stato possibile estrarre campione e si è optato per compensare le porzioni mancanti con materiale proveniente dal lisimetro 320 cm.

2.4 Misure in situ

Nel campo prove Betelico sono stati disposti sei lisimetri a suzione (par. 2.2.2) che consentono di campionare i liquidi in soluzione presenti nel suolo. Per ognuno con l'uso del tensiometro a suzione è stata misurata la pressione capillare, cioè la forza con cui l'acqua è

trattenuta nel terreno (Fig. 2.4.1.a). Se la pressione raggiunge lo zero implica che il lisimetro dovrebbe aver raccolto acqua.

PROFONDITA' LISIMETRI (cm)	PRESSIONE CAPILLARE (kPa)
60	0
120	53
180	0
230	0
320	63
430	41

Fig. 2.4.1.a Tabella delle profondità dei lisimetri disposti in sito e delle relative pressioni capillari lette. (letture eseguite a Marzo 2022)

Inoltre, sono stati installati quattro tensiometri (par. 2.2.3), che consentono la misurazione del carico di suzione e del fronte bagnato, analizzanti diverse profondità del terreno (Fig. 2.4.1.b).

PROFONDITA' DEL TERRENO (cm)
30
60
120
150

Fig. 2.4.1.b Tabella delle profondità dei tensiometri disposti in sito

Nel campo prove, per di più, è collocata una stazione di raccolta dati, composta dal software ZL6, costituito da 6 porte connesse a sensori per rilevamento di più parametri [software e sensori descritti nei par. 2.2.5 e 2.2.6] (Fig. 2.4.1.c):

N°PORTA	SENSORE	LETTURA
1	TEROS 21 (infisso a 170 cm)	Temperatura e potenziale matriciale
2	TEROS 21 (infisso a 60 cm)	Temperatura e potenziale matriciale
3 LIBERA		
4	TEROS 12 (infisso a 60 cm)	Contenuto d'acqua, conducibilità elettrica, temperatura
5	5TE (infisso a 175 cm)	Contenuto d'acqua, conducibilità elettrica, temperatura
6	TEROS 12 (infisso a 90 cm)	Contenuto d'acqua, conducibilità elettrica, temperatura

Fig. 2.4.1.c Tabella dei sensori allacciati alle relative porte e delle misure che possono consentire

2.5 Determinazione del contenuto naturale d'acqua

Il contenuto d'acqua naturale influenza le caratteristiche di resistenza meccanica dei terreni. Rappresenta la quantità d'acqua presente nel terreno rispetto la fase solida, viene indicato con w ed espresso in percentuale. Si misura come il rapporto tra la massa d'acqua nel terreno (M_w) e la massa di granelli solidi (M_s): $w = \frac{M_w}{M_s}\%$. Tale valore va a zero se il terreno non presenta acqua. Sperimentalmente il contenuto d'acqua viene misurato confrontando il peso del campione umido (inalterato) e il peso dello stesso campione essiccato in forno a 105°C per 24 ore, dalla cui differenza si ottiene il peso dell'acqua contenuta nel campione inalterato di partenza⁵⁷.

La legge che lega il peso umido al peso secco è la seguente:

$$P_{umido} = P_{secco} * (1 + w)$$

dove w indica il contenuto d'acqua percentuale.

Per l'analisi del contenuto d'acqua sono stati utilizzati 9 campioni relativi a misure svolte in mesi diversi (novembre, gennaio, marzo).

In principio è stato pesato il campione ben sigillato (Fig. 2.5.1) in bustine di plastica, in modo da non perdere nemmeno una goccia d'acqua.

⁵⁷ Prof. Santo Marcello Zimbone, *Misura dei parametri idrologici del suolo*, Corso di idraulica ed idrologia forestale, 2008-2009, pag. 12



Fig. 2.5.1 Pesatura campione sigillato

È stata poi eseguita la tara della bustina per poterla sottrarre al peso complessivo iniziale. Una volta fatto questo i vari campioni sono stati versati in contenitori di alluminio, precedentemente tarati, in seguito sono stati nuovamente pesati (Fig. 2.5.2) e messi in forno per 24h (Fig. 2.5.3).



Fig. 2.5.2 Pesature campione non sigillato

Fig. 2.5.3

*Sistemazione campioni in forno
a 105°C*



Il giorno seguente si è misurato il peso secco (Fig. 2.5.4-2.5.5) che è stato poi confrontato con il peso umido per poter conoscere il contenuto d'acqua dei singoli campioni. Tuttavia, trattandosi di un approccio distruttivo non c'è la possibilità di riutilizzare il campione di suolo una volta concluso il processo⁵⁸.

⁵⁸ Prof. Santo Marcello Zimbone, *Misura dei parametri idrologici del suolo*, Corso di idraulica ed idrologia forestale, 2008-2009, pag. 12



Fig. 2.5.4 Campione essiccato



Fig. 2.5.5 Pesatura campione essiccato

Infine su Excel, sono stati graficati i risultati riportando in ascissa il contenuto d'acqua percentuale e in ordinata la profondità in cm, così da confrontare come è variata l'umidità del terreno nel tempo.

2.6 Determinazione della distribuzione granulometrica dei terreni

La granulometria è la proprietà che consente di identificare le singole particelle che compongono un terreno in base alle dimensioni e così classificarle. La classificazione granulometrica permette, a seconda del sistema di classificazione scelto, di distinguere le particelle in classi, che sono generalmente quattro, in ordine di dimensione decrescente: ghiaia, sabbia, limo e argilla.

L'analisi granulometrica ci consente di ricavare l'espressione in percentuale del peso delle singole frazioni trattenute dai diversi setacci rispetto al peso totale del campione vagliato, al fine di ricostruire la curva granulometrica rappresentativa di tutte le frazioni costituenti (ghiaia, sabbia, limo, argilla). La frazione fine, ovvero con diametro dei granuli inferiore a 75 µm quindi passante al setaccio ASTM n°200, non può essere analizzata tramite l'uso di setacci perciò ci si è serviti di un metodo indiretto chiamato aerometria (o metodo densimetrico). Il metodo densimetrico sfrutta la proprietà fisica che hanno le particelle di terreno di depositarsi in un mezzo liquido, quindi la velocità con cui queste cadono, per determinare la quantità di sabbia, limo e argilla. La legge su cui si basa tale metodica è quella di Stokes che lega le dimensioni e la percentuale delle particelle in sospensione in un liquido (acqua distillata nel nostro caso) con la loro velocità di sedimentazione⁵⁹: “Le particelle di uguale dimensione immerse in un liquido, cadono tutte con la stessa velocità che rimane costante nel tempo”.

⁵⁹ Prof. Alessandra Trapannone, *Tessitura del Terreno – La gestione sostenibile del suolo*, RAI CULTURA, <https://www.raicultura.it/raicultura/articoli/2020/05/Tessitura-del-terreno-797a8e2f-afa6-4047-a91b-cc07c1e77455.html>

A determinati intervalli di tempo prestabiliti (30 s, 1 m, 2 m, 4 m, 15 m, 30 m, 2h, 4h, 24h, 48h, 72h) vengono effettuate alcune misure di densità attraverso l'uso di un densimetro calibrato così da ricavare la velocità di sedimentazione del campione e contemporaneamente misure di temperatura (Fig. 2.6.1). L'analisi è terminata quando la densità della sospensione è prossima a quella dell'acqua pura (circa 1). A questo punto attraverso la legge di Stokes, si ricava il diametro delle particelle ancora in sospensione e si ricostruisce la curva granulometrica anche per la parte fina.

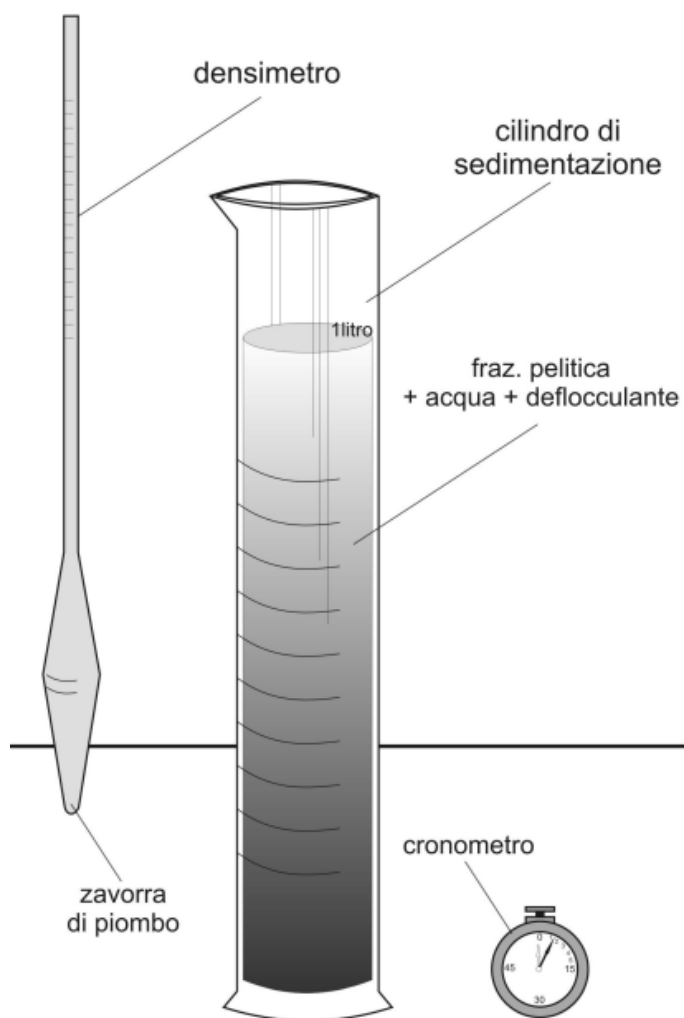


Fig. 2.6.1 Strumenti per aerometria: cilindro, densimetro e cronometro (www.isprambiente.gov.it)

Il densimetro utilizzato per la prova è il 151 H così calibrato (Fig. 2.6.a).

151H Calibration			
Reading number during calibration	151H specific gravity hydrometer at reading t in reference solution	Temperature at reading t	Average specific gravity shift
t	R ₁₅₁	T (°C)	A
1	1,0025	20,9	1,005
2	1,0035	12,1	1,004
3	1,0030	15,3	1,004
4	1,0030	17,9	1,005
5	1,0025	19,6	1,005
6	1,0025	21,4	1,005
7	1,00275	22,7	1,005

Average specific gravity shift		1,005
Standard Deviation		0,0004
		ok
Maximum hydromete	r ₁	0,995
Minimum hydromete	r ₂	1,038
Distance between	H _{r1}	18,15 cm
Distance between	H _{r2}	8,35 cm
	H _{r1} -H _{r2}	9,80 cm
Meniscus correctio	C _m	0,0005
Volume of the hyd	V _{hb}	57,5 cm ³
Cross-sectional ar	A _c	28,7 cm ²
Diameter of the cy	d _{max}	6,05 cm

Fig. 2.6.a Tabella calibrazione densimetro 151H

Al termine della prova unendo i risultati ottenuti dall'analisi granulometrica della frazione fine e di quella grossolana si costruisce su Excel un diagramma semilogaritmico che riporta in ascissa, in scala logaritmica, il diametro dei granuli in mm e in ordinata, in scala lineare, il passante cumulativo percentuale (Fig. 2.6.2).

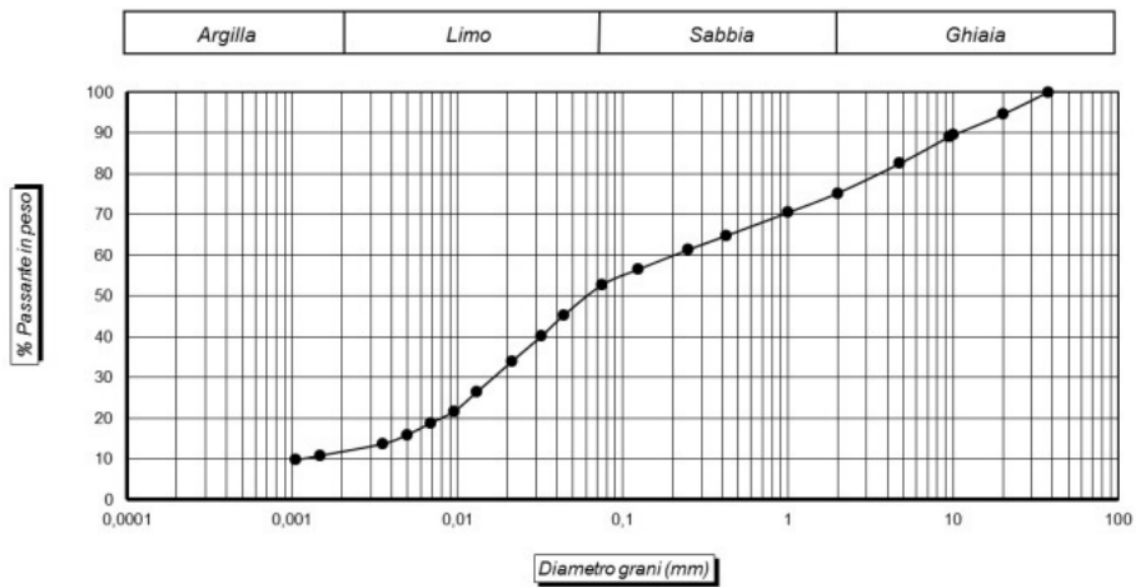


Fig. 2.6.2 Esempio di curva granulometrica. Dalla curva si evince la percentuale delle componenti argillose, limose, sabbiose e ghiaiose che costituiscono il campione di suolo. (www.glariskalp.eu)

L'analisi granulometrica è stata condotta su 15 campioni: 13 presi dal lisimetro 430 cm e 2 presi dal lisimetro 320 cm per poter caratterizzare quelle profondità non campionate dal lisimetro precedente [per presenza di materiale ghiaioso] (Fig. 2.6.b).

LISIMETRO (cm)	PROFONDITA' (cm)
430	0 - 30
430	30 - 60
430	60 - 90
430	90 - 120

430	120 - 150
430	150 - 180
430	180 - 210
430	210 - 240
430	240 - 270
320	285 - 310
430	290 - 320
320	310 - 330
430	350 - 380
430	380 - 410
430	430 - 460

Fig. 2.6.b Tabella lisimetri usati e relative profondità di campionamento

Alcuni campioni hanno mostrato fin da subito presenza di materiale fino, perciò si è passato subito alla preparazione del campione per l'analisi granulometrica con aerometro (Fig. 2.6.c).

LISIMETRO (cm)	PROFONDITA' (cm)
430	60 - 90
430	150 - 180
430	180 - 210
430	210 - 240
430	240 - 270
430	380 - 410

Fig. 2.6.c Tabella dei campioni contenenti materiale per lo più fino

Gli strumenti utilizzati per la prova sono: una bilancia analitica, una bacchetta di vetro, un cronometro, il densimetro 151 H per misurare la densità del fluido, un agitatore meccanico e un cilindro graduato da 1000 ml per la sedimentazione.

La classificazione granulometrica della parte fina con aerometro si sviluppa in più fasi: per prima cosa si pesa il becher (ovvero si fa la tara), poi si mettono 55-60 g al massimo di terreno (Fig. 2.6.3), si tara nuovamente e si aggiungono 5 g di sodio esametafosfato in polvere che permette la separazione dei legami che tengono unite le particelle di terreno (Fig. 2.6.4); successivamente si aggiungono circa 100 ml di acqua distillata (Fig. 2.6.5), si miscela bene con una stecca di vetro (Fig. 2.6.6) e infine si fa riposare per almeno un giorno (Fig. 2.6.7).

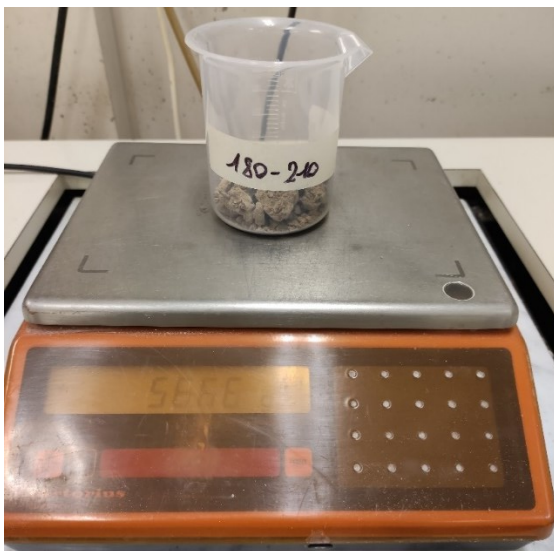


Fig. 2.6.3 Pesatura campione

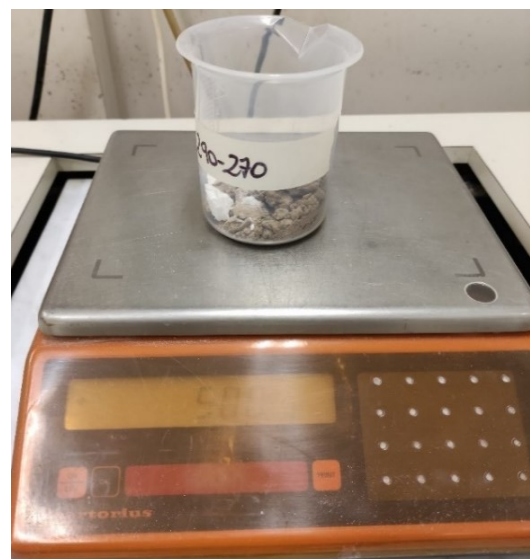


Fig. 2.6.4 Pesatura campione + sodioesametafosfato in polvere



Fig. 2.6.5 Aggiunta di acqua distillata al campione



Fig. 2.6.6 Campione miscelato



Fig. 2.6.7 Campione a riposo coperto con pellicola

Nei giorni successivi si può procedere con la preparazione del campione per la prova. Inizialmente si trasferisce il contenuto del becher all'interno del contenitore del frullino avendo cura di non perdere materiale (Fig. 2.6.8-2.6.9).



Fig. 2.6.8 Contenitore del frullino

Fig. 2.6.9 Campione lasciato riposare 24h viene versato nel contenitore del frullino



A seguito di una breve fase di miscelazione (Fig. 2.6.10), di durata 5 minuti circa, si versa il contenuto nel cilindro di vetro (Fig. 2.6.11) avendo cura di pulire bene ogni parte e non lasciare materiale. Successivamente si porta a volume il campione aggiungendo acqua distillata fino alla linea dei 1000 ml (Fig. 2.6.12). Poi si chiude con un tappo il cilindro che viene capovolto per circa 15 volte prima di dare l'avvio alla prova.



Fig. 2.6.10 Fase di miscelazione con agitatore



Fig. 2.6.11 Campione miscelato viene versato nel cilindro di vetro

Fig. 2.6.12 Il cilindro riempito fino a 1L viene sigillato con il tappo



Il cilindro viene inserito in verticale nella vasca (che sta a temperatura ambiente), si toglie il tappo, si inserisce il densimetro (Fig. 2.6.13) e si misura ad intervalli di tempo la densità (Fig. 2.6.14). Se c'è schiuma superficiale si può usare l'isopropanolo in gocce inserito con siringa per poter fare una lettura migliore.



Fig. 2.6.13

Cilindro disposto nella vasca



Fig. 2.6.14 Il densimetro viene inserito nei vari cilindri per le misurazioni ad intervalli di tempo

Alla fine della prova, dopo alcuni giorni di lettura, arrivati ad una misura di circa 1,008 quindi prossima ad uno, il cilindro viene tolto dalla vasca (Fig. 2.6.15-17).

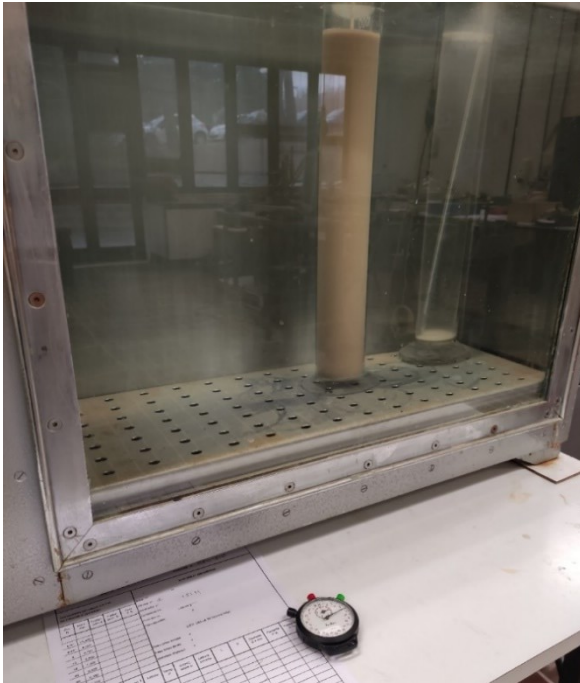


Fig. 2.6.15 Cilindro da ore disposto nella vasca

Fig. 2.6.16 Cilindri da giorni disposti nella vasca, si nota materiale sedimentato in basso





Fig. 2.6.17 Zoom sulla parte bassa del cilindro in cui si nota materiale sedimentato

Si passa il materiale al setaccio 200 ASTM, si usano due contenitori per passante e trattenuto e si pulisce a fondo il cilindro. Si mette in forno (Fig. 2.6.18) ed il giorno seguente si fanno le due pesate del materiale secco (Fig. 2.6.19).



Fig. 2.6.18 Campioni ricavati dall'aerometria messi in forno a 105°C



Fig. 2.6.19 Campioni essiccati

Dalle buste dei campioni non sottoposti subito ad aerometria, in quanto contenenti parti grossolane, sono stati presi circa 100 g di materiale che sono stati poi sminuzzati con il mortaio (Fig. 2.6.20). A seguire il campione è stato setacciato con il vaglio di apertura 2 mm (Fig. 2.6.21) ed è stata presa la parte fina, ovvero il passante [misurando prima la tara del contenitore e buttando via la parte grossa che restava nel setaccio] (Fig. 2.6.22).



Fig. 2.6.20 Mortaio e setaccio 200 ASTM



Fig. 2.6.21 Materiale setacciato al 200 ASTM



Fig. 2.6.22 Materiale setacciato viene pesato

A questo punto si sa il peso del passante perché si conosce il peso di partenza. Fatta la tara del becherino, si versa il fino, lo si pesa e si aggiungono 5 g di sodio esametafosfato. Si eseguono le aerometrie anche per questi campioni. La differenza dai campioni precedenti è che erano già fini alla vista e sono stati subito sottoposti alla prova, questi essendo più grossolani sono stati prima sminuzzati.

L'analisi granulometrica della parte grossolana è stata eseguita sulla porzione restante dei campioni alle varie profondità. Per i campioni con evidenti grumi di terreno si è preferito eseguire prima una sminuzzatura con mortaio al fine di semplificare poi l'operazione di vagliatura (Fig. 2.6.23-26).



Fig. 2.6.23 Campioni che devono essere sottoposti a frantumazione con mortaio



Fig. 2.6.24 Materiale versato nel mortaio per frantumazione



Fig. 2.6.25 Materiale frantumato



Fig. 2.6.26 Materiale recuperato con un pennello

A questo punto i campioni sono stati disposti in contenitori di alluminio precedentemente tarati (Fig. 2.6.27) ed è stato ricavato il peso secco per ognuno di essi (Fig. 2.6.28). Il materiale è stato bagnato abbondantemente con acqua corrente (Fig. 2.6.29), miscelato con una bacchetta di vetro e lasciato riposare per 24 h all'aria aperta (Fig. 2.6.30).



Fig. 2.6.27 Materiale frantumato disposto nei contenitori di alluminio

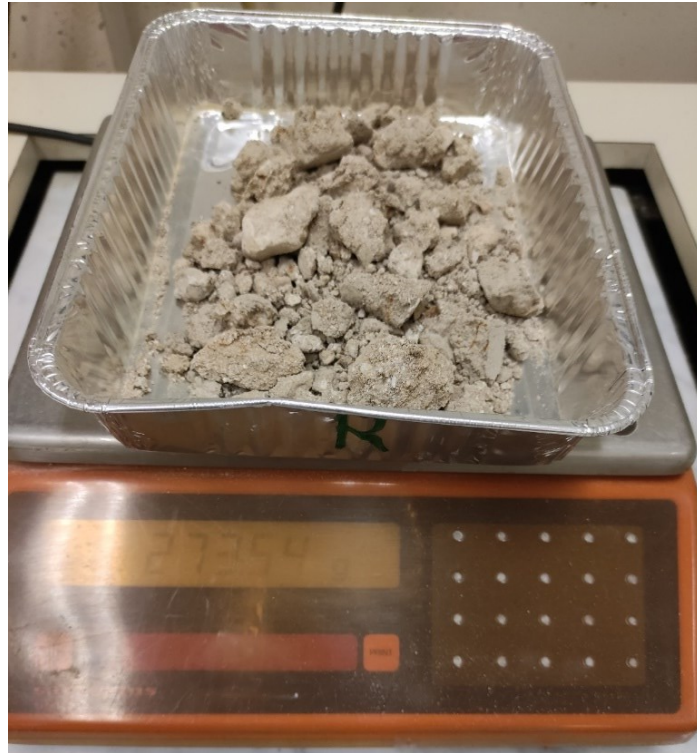


Fig. 2.6.28 Pesatura campione



Fig. 2.6.29 Campioni annegati



Fig. 2.6.30 Campioni annegati, miscelati e lasciati riposare 24 h

Il giorno seguente si è dato avvio alla procedura di vagliatura ad umido. Per la prova sono stati utilizzati 8 setacci (Fig. 2.6.d – 2.6.31).

N° SETACCIO ASTM	APERTURA DELLA MAGLIA
4	4.75 mm
10	2.00 mm
20	850 μm
40	425 μm
60	250 μm
80	180 μm
140	106 μm
200	75 μm

Fig. 2.6.d Tabella dei setacci ASTM usati per la prova e relative aperture delle maglie



Fig. 2.6.31 Pila di setacci. I setacci sono impilati in ordine decrescente partendo da quelli a maglia più larga fino al setaccio ASTM n°200

Per semplicità nella lavorazione si è pensato di dividere i setacci in 5 e 3, separando così le frazioni granulometriche minori studiate in un secondo momento. I setacci sono stati disposti

all'interno di contenitori di plastica capienti in modo da non perdere materiale durante la prova. Il campione dalle vaschette è stato versato nel setaccio superiore avendo cura di non lasciare materiale nel contenitore e una volta sul setaccio è stato nebulizzato al fine di eliminare il materiale dimensionalmente fino rispetto alle maglie del dato setaccio.



Fig. 2.6.32 Avvio vagliatura ad umido con nebulizzatore della frazione più grossolana



Fig. 2.6.33 Vagliatura ad umido

Ad ogni step il materiale trattenuto dal setaccio è stato opportunamente riposto in vaschette di alluminio precedentemente tarate.



Fig. 2.6.34 Trattenuti ai setacci ASTM n°4-10-20

Si procede poi con gli ultimi 3 setacci. Il materiale raccolto nei contenitori di plastica è stato versato completamente nei setacci con l'uso di un becherino, avendo cura di non lasciare del contenuto nel recipiente e di non far traboccare i setacci che avendo maglie molto piccole si ostruiscono facilmente.



Fig. 2.6.35 Pila setacci ASTM n°80-140-200



Fig. 2.6.36 Procedura di vagliatura ad umido della frazione più fina con l'ausilio di un becherino

Completata anche questa operazione si ottiene il materiale trattenuto dai vari setacci disposto in contenitori di alluminio che sono stati poi messi in forno a 105 °C circa per farli essiccare.



Fig. 2.6.37 Trattenuti ai vari setacci



Fig. 2.6.38 Il trattenuto viene fatto essiccare in forno a 105°C

I campioni prelevati dal forno sono stati poi pesati al fine di ricavare l'espressione in percentuale del peso delle singole frazioni trattenute dai diversi setacci rispetto al peso totale del campione vagliato.



Fig. 2.6.39 Trattenuto essiccato setaccio ASTM n°4



Fig. 2.6.40 Trattenuto essiccato setaccio ASTM n°10



Fig. 2.6.41 Trattenuto essicato setaccio ASTM n°20



Fig. 2.6.42 Trattenuto essicato setaccio ASTM n°40

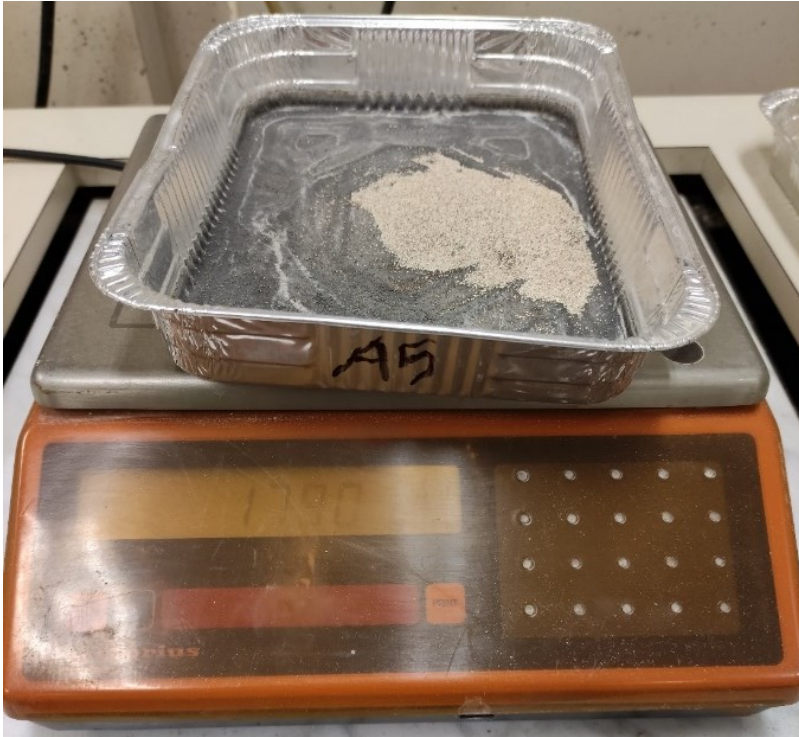


Fig. 2.6.43 Trattenuto essiccato setaccio ASTM n°60



Fig. 2.6.44 Trattenuto essiccato setaccio ASTM n°80



Fig. 2.6.45 Trattenuto essicato setaccio ASTM n°140



Fig. 2.6.46 Trattenuto essicato setaccio ASTM n°200

Il materiale trattenuto al setaccio 4.75 mm è stato poi vagliato con setacci di apertura maggiore, così da comprendere la dimensione alla quale il nostro campione risulta completamente passante.

N° SETACCIO ASTM	APERTURA DELLA MAGLIA
1.1-2 in.	37.5 mm
1 in.	25.0 mm
3/4 in.	19.0 mm
3/8 in.	9.5 mm

Fig. 2.6.e Tabella setacci ASTM usati per la vagliatura del trattenuto al setaccio 4 ASTM e relative aperture della maglia



*Fig. 2.6.47 Pesatura trattenuto setaccio
ASTM n°3/4 in.*



*Fig. 2.6.48 Pesatura trattenuto setaccio
ASTM n°3/8 in.*

RISULTATI

I dati ottenuti durante le attività di laboratorio e di campagna sono stati elaborati tramite il programma MS Excel, che gestisce fogli elettronici, al fine di ricavare rappresentazioni grafiche conclusive e rappresentative del lavoro svolto.

3.1 Risultati contenuto d'acqua

Al termine dell'analisi del contenuto d'acqua naturale sono stati graficati i risultati riportando in ascissa il contenuto d'acqua percentuale e in ordinata la profondità di prelievo espressa in cm a partire dal piano campagna, così da confrontare come è variata l'umidità del terreno nel tempo (Fig. 3.1.1). Osservando il grafico si può notare una netta differenza di comportamento legata al periodo idrologico; le fasi iniziali della ricarica (novembre 2021) sono caratterizzate da contenuto d'acqua simile, con avanzamento del fronte umido tra 30 e 60 cm probabilmente dovuto all'infiltrazione di una serie di eventi meteorici accaduti tra fine settembre e i primi di novembre. Quando il periodo "vira" verso condizioni prevalentemente piovose, si ha trasferimento di acqua di precipitazione soprattutto negli strati più superficiali del terreno, nella parte sotto i 60 cm c'è un lievissimo aumento del contenuto d'acqua. La fase finale della ricarica è caratterizzata da abbassamento netto del valore di umidità, soprattutto a profondità maggiore. In questa fase la maggior parte dell'acqua infiltratasi tra ottobre e febbraio si è trasferita alla falda, attraversando tutto il tratto di CZ.

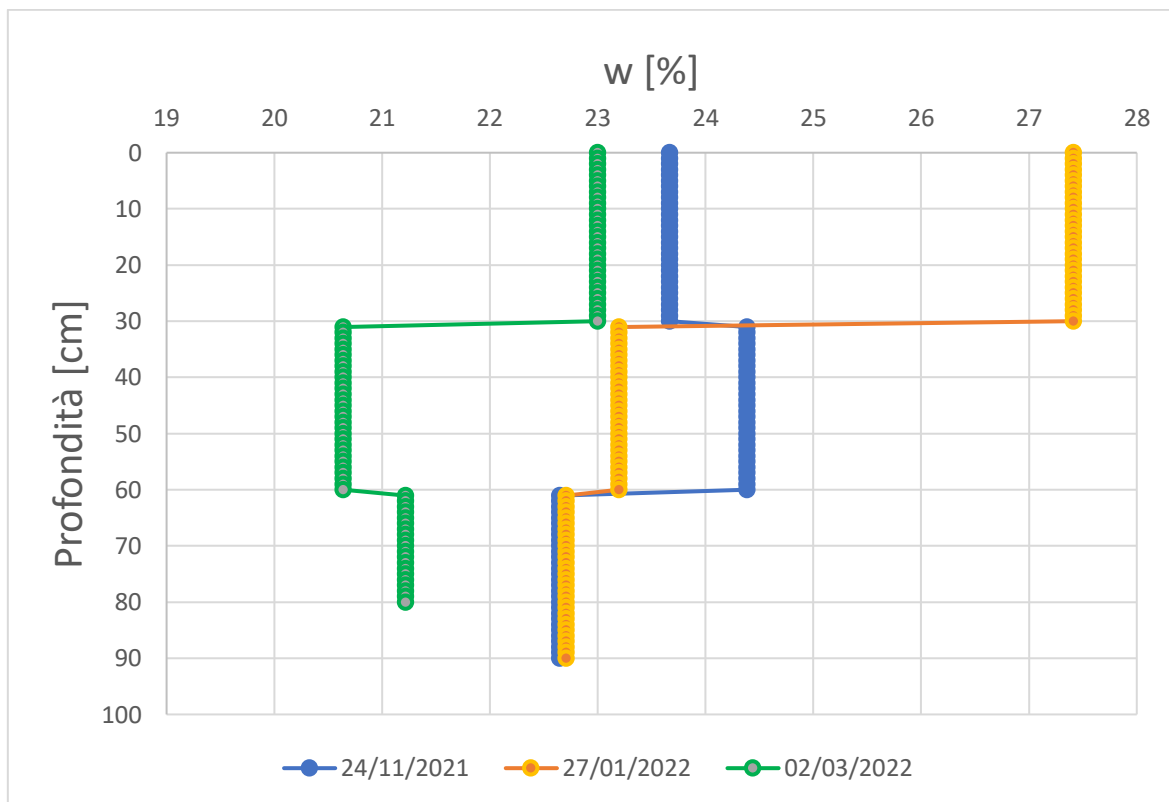


Fig. 3.1.1 Andamento del contenuto d'acqua percentuale in funzione della profondità e del periodo di campionamento. Si nota come alla profondità di 0-30 cm nel mese di gennaio è stato registrato un contenuto percentuale d'acqua elevato, mentre alla profondità di 30-60 cm nel mese di marzo ne è stata riscontrata una netta diminuzione.

Grazie ai dati raccolti in situ dai 5 sensori allacciati al datalogger ZL6, sono stati poi realizzati alcuni grafici relativi al periodo tra il 1° gennaio 2022 e il 30 settembre 2022 discussi nella tesi di Minuti Camilla dal titolo “Realizzazione di un laboratorio di campo permanente per lo studio dei processi di infiltrazione in acquiferi porosi”, aggiornati al 24 novembre 2022 nel presente elaborato. Nei grafici seguenti (Fig. 3.1.2 -3.1.5) vengono confrontati la temperatura dell'aria e del suolo ($^{\circ}\text{C}$), il potenziale matriciale (kPa), la conducibilità elettrica (mS/cm) e il contenuto d'acqua (m^3/m^3) con la quantità di pioggia caduta (espressa in mm e registrata dal pluviometro installato nel sito) e il periodo temporale in cui si è campionato. Ricordando la presenza di più sensori infissi a diverse profondità del

terreno (Tab. 3.1.a), si possono distinguere tre linee rappresentative: in arancione i valori ricavati dalle sonde ad una profondità di 60 cm; in verde i valori ricavati dal sensore TEROS 12 a una profondità di 90 cm ed in violetto i valori ricavati dai sensori posti ad una profondità di 170 cm.

PORTA	TIPO DI SENSORE	PROFONDITA' (cm)
1	TEROS 21	170
2	TEROS 21	60
4	TEROS 12	60
5	5TE	175
6	TEROS 12	90

Tab. 3.1.a Sensori allacciati al datalogger ZL6

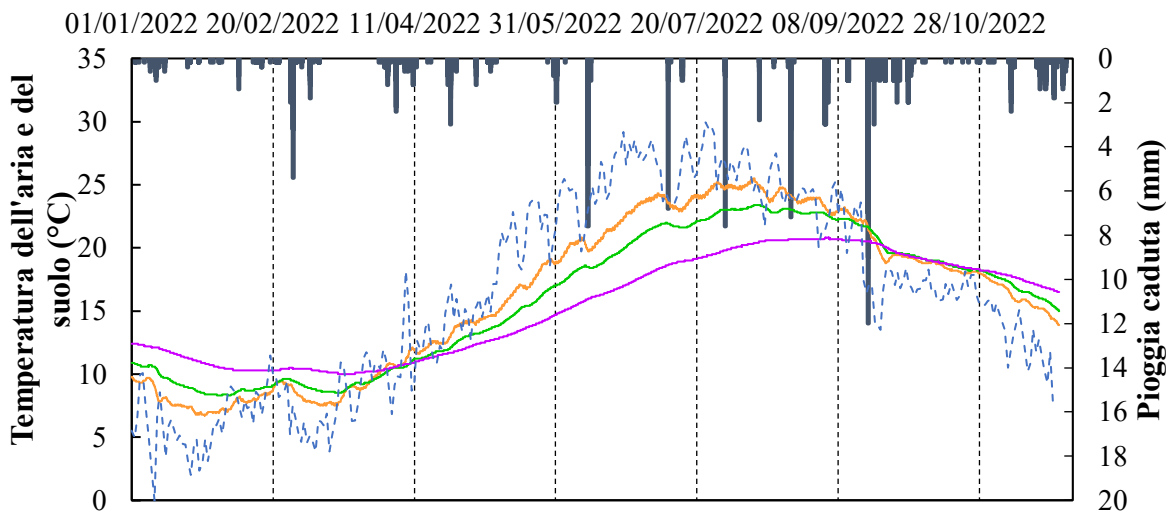


Fig. 3.1.2 Il grafico riporta la temperatura dell'aria (curva tratteggiata) e del suolo in gradi centigradi in funzione dei millimetri di pioggia caduti e del periodo temporale.

Si può notare che a seguito dell'evento alluvionale del 15/09/2022 si ha uno stazionario termico, ovvero la temperatura si mantiene la stessa alle tre profondità. Dopo il 26/10/2022

il suolo tende a raffreddarsi alla profondità di 60 e 90 cm di più rispetto a 170 cm, c'è un crollo drastico della temperatura dell'aria (circa 12 °C) che ha condizionato la temperatura del suolo. Il trend perciò si è invertito dal periodo estivo in cui le curve rispecchiano temperature di 15-25 °C condizionate da temperature dell'aria prossime a 30 °C, a quello invernale in cui si sono raggiunti i 5 °C in prossimità del mese di novembre che hanno portato ad un abbassamento della temperatura del suolo.

In generale si osserva una perfetta inversione del comportamento del suolo in funzione della temperatura dell'aria: a temperature esterne basse (da gennaio ad aprile) gli strati a profondità minore risultano a temperatura inferiore che va crescendo più ci si sposta in profondità. Al contrario da aprile a settembre le alte temperature hanno prodotto un'inversione delle curve portando al riscaldamento degli strati più superficiali prima rispetto quelli a maggiore profondità che si mantengono freschi. Nell'ultimo periodo di osservazione da settembre a novembre il trend si inverte nuovamente, infatti, a temperature esterne inferiori corrisponde un raffreddamento degli strati più esposti rispetto quelli a maggiore profondità.

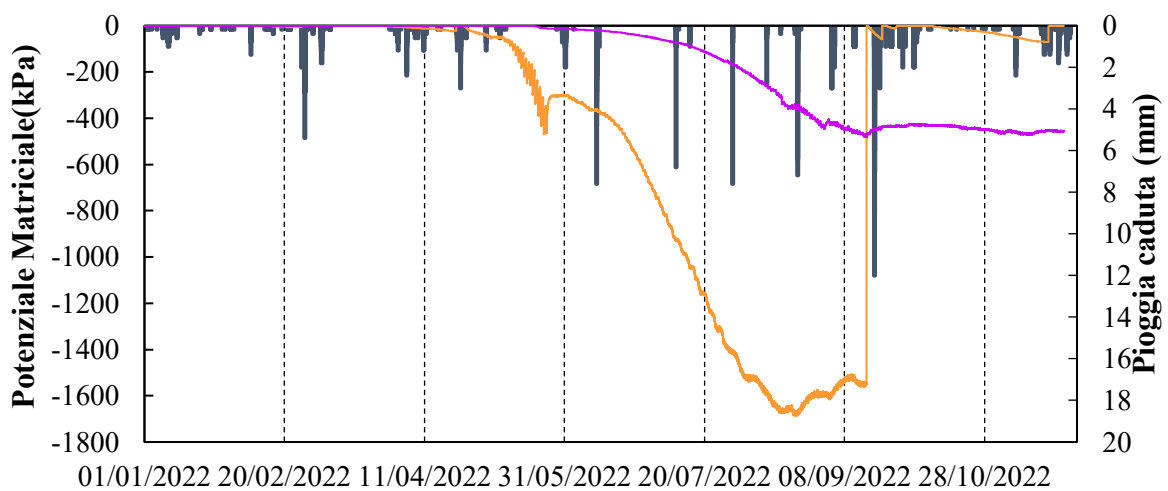


Fig. 3.1.3 Il grafico riporta l'andamento del potenziale matriciale in kPa in funzione dei millimetri di pioggia caduti e del periodo temporale.

Il potenziale matriciale è l'energia impiegata per estrarre acqua dai pori del suolo, tale lavoro è svolto dalle piante attraverso le radici. Nel grafico sono riportate solo due curve poiché alla profondità di 90 cm non è presente un sensore. Si osserva come la curva relativa alla profondità di 60 cm, dove il livello di essiccazione è maggiore, abbia subito una drastica diminuzione fino a circa -1700 kPa da fine marzo fino all'evento alluvionale del 15/09/2022 che ha provocato una risalita verticale della curva fino a valori nulli. Si può notare, infatti, che le curve vanno a zero quando c'è disponibilità di molta acqua perché le piante devono lavorare molto meno per estrarre acqua dal terreno. In particolare si evidenzia un netto cambiamento nell'andamento della curva alla profondità di 60 cm durante l'evento alluvionale del 15/09/2022 che si è mantenuto a livello zero o prossimo fino al 24/11/2022 ultimo giorno di osservazione; mentre la curva relativa alla profondità di 170 cm non ha subito trasformazioni a seguito di tale evento, bensì ha mantenuto un potenziale matriciale di circa -500 kPa da metà settembre a fine novembre, poiché a profondità maggiore il livello di essiccazione è inferiore rispetto agli strati soprastanti.

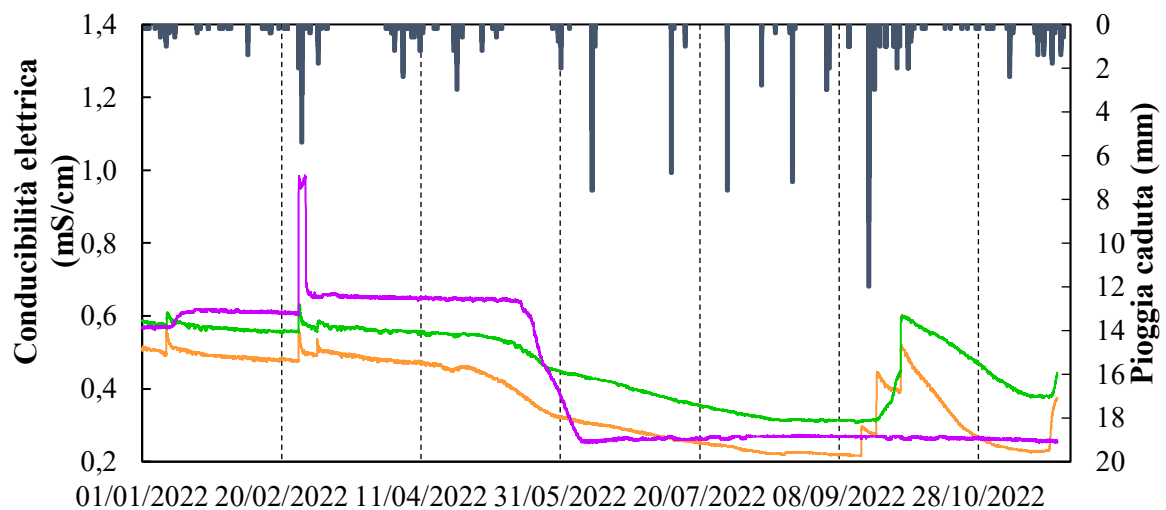


Fig. 3.1.4 Il grafico riporta l'andamento della conducibilità elettrica in mS/cm in funzione dei millimetri di pioggia caduti e del periodo temporale.

Si può notare come all'aumentare del contenuto d'acqua aumenta la conducibilità elettrica poiché l'acqua porta con sé ioni in soluzione. Infatti, durante l'evento del 26/02/2022 caratterizzato da un massimo di 5.4 mm di pioggia caduta, si è evidenziato un picco nella curva relativa alla profondità di 170 cm mantenendo le altre pressoché stabili. In particolare a tale profondità a seguito di questo evento non si sono caratterizzate ricariche d'acqua nei periodi successivi tali da far rialzare i valori di conducibilità elettrica che si è mantenuta costante intorno a 0.2 – 0.3 mS/cm. In prossimità dell'evento alluvionale del 15/09/2022 si registra una crescita graduale della conducibilità elettrica a 60 e 90 cm dovuta alla presenza di eventi piovosi ravvicinati che si è poi attenuata nei mesi di ottobre e novembre. In tale periodo la curva relativa a 60 cm ha toccato valori di conducibilità elettrica inferiori rispetto alla profondità di 170 cm per poi risalire con le piogge di metà novembre insieme alla curva relativa a 90 cm. In generale la risalita della conducibilità elettrica è notevole, da valori di poco superiori a 200 fino a raddoppiare.

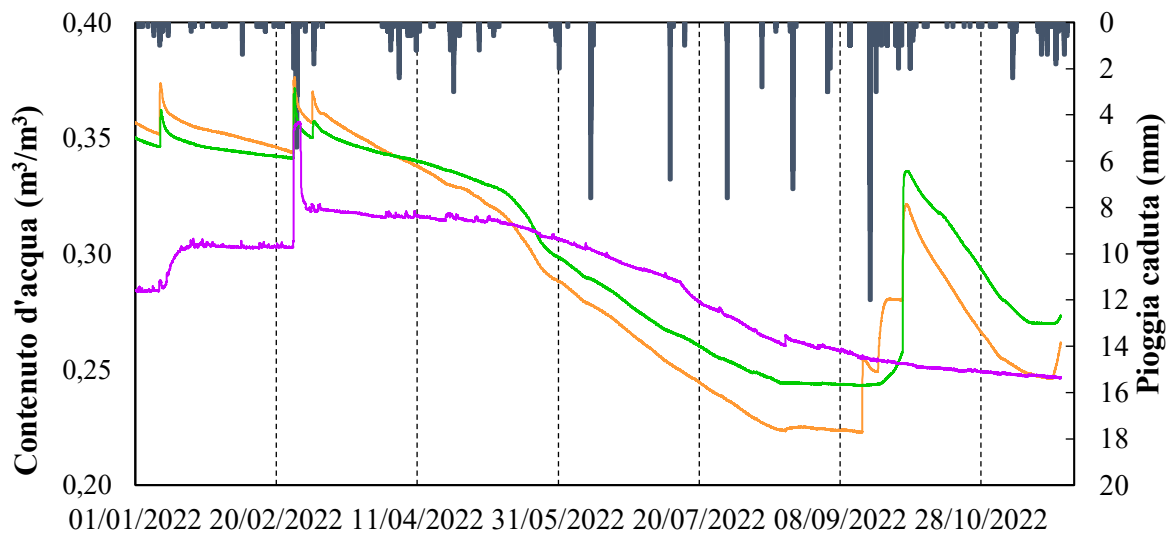


Fig. 3.1.5 Il grafico riporta il contenuto d'acqua in m^3/m^3 in funzione dei millimetri di pioggia caduti e del periodo temporale.

Si può evidenziare che anche a seguito di eventi piovosi discreti, gli strati di suolo più superficiali (60-90 cm) subiscono un aumento del contenuto d'acqua che tende a decrescere in prossimità dei mesi estivi a causa del cambiamento di periodo idrologico. Alle tre profondità, infatti, il suolo si secca nella stagione estiva, ovviamente più lentamente a 170 cm perché l'umidità e il contenuto d'acqua si conservano per un periodo maggiore. Tale tendenza assunta dal grafico ci permette di constatare che gran parte dell'acqua piovana, piuttosto che infiltrarsi per ricaricare l'acquifero, ruscella in superficie o viene sottoposta ad evapotraspirazione. In particolare, si nota che alla profondità di 60 e 90 cm a seguito dell'evento alluvionale del 15/09/2022 si ha una netta crescita nel contenuto d'acqua, soprattutto alla profondità di 90 cm, che va attenuandosi i primi di novembre per poi modificare nuovamente l'andamento verso la fine. L'aumento è netto per i primi due sensori, ritardato di un paio di settimane per il sensore a 90 cm rispetto a quello a 60. Al contrario alla profondità di 170 cm non si riscontra nessuna ricarica, almeno fino alla fine del periodo di osservazione, bensì la curva tende a decrescere ed il terreno a diventare più asciutto; solamente in corrispondenza del 28/02/2022, caratterizzato da un evento di pioggia di grande intensità, la curva ha avuto un picco fino a $0.36 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

In riferimento all'ultimo grafico (Fig. 3.1.5), si possono confrontare i risultati ottenuti con quelli ricavati dall'analisi del contenuto d'acqua naturale eseguita in laboratorio (Fig. 3.1.1). Si può procedere facendo una media approssimata di tutti i valori presi il 27/01/2022 e il 02/03/2022, giorni in cui sono stati eseguiti i campionamenti in situ (Tab. 3.1.b e Fig. 3.1.6).

	27/01/2022		02/03/2022	
PROFONDITA'	w (%)	w (m ³ /m ³)	w (%)	w (m ³ /m ³)
60 cm	23.16	0.353	20.5	0.359
90 cm	22.8	0.346	21.15	0.352

Tab. 3.1.b Tabella di confronto del contenuto d'acqua in percentuale e in m³/m³. Per quanto concerne il 02/03/2022 i dati del contenuto d'acqua ricavati in laboratorio si riferiscono a campioni presi alla profondità di 0-80 cm. È stato necessario confrontare il valore del contenuto d'acqua percentuale riguardante la profondità di 80 cm con il dato ricavato dal sensore in continuo più vicino, ubicato a 90 cm dalla superficie del suolo.

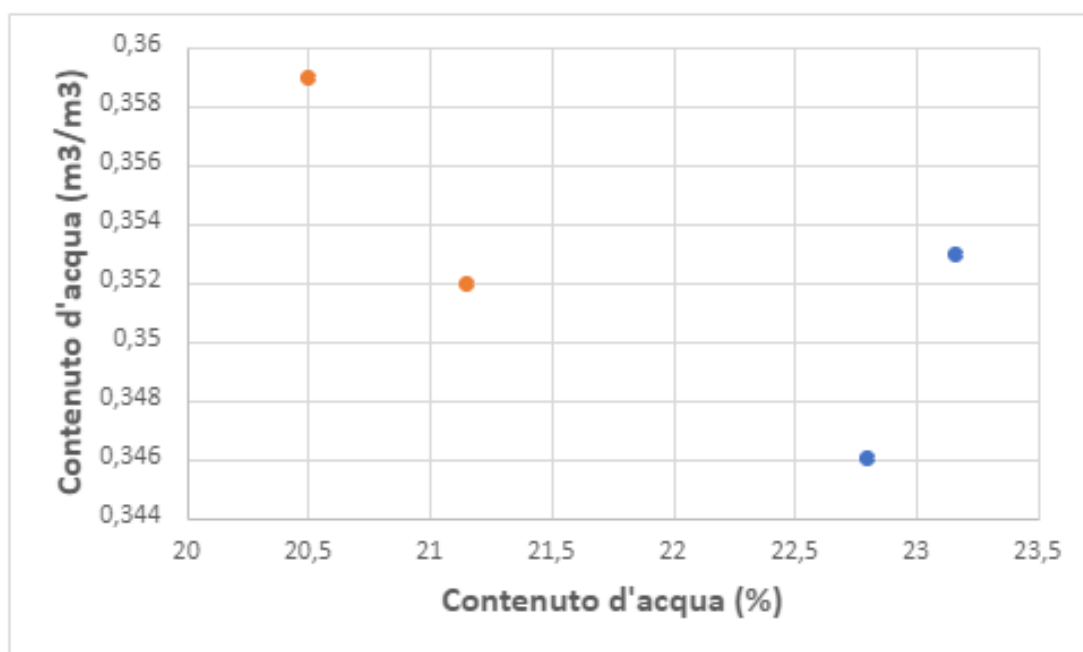


Fig. 3.1.6 Confronto dei risultati del contenuto d'acqua in percentuale e in m³/m³. In rosso i dati relativi al 02/03/2022 e in blu i dati relativi al 27/01/2022. Si evince che nel mese di marzo a contenuti d'acqua percentuali inferiori corrispondono contenuti d'acqua in m³/m³ maggiori e viceversa nel mese di gennaio.

Tale risultato evidenzia come le stagioni e le variazioni climatiche influenzino notevolmente il contenuto d'acqua naturale del suolo e quindi l'infiltrazione nell'acqua attraverso il suolo e il successivo processo di ricarica della falda. Si è notato infatti che nel mese di gennaio le precipitazioni invernali e il clima freddo hanno portato ad un accumulo d'acqua soprattutto

in prossimità degli strati di terreno più superficiali; mentre nel mese di marzo, caratterizzato da minore piovosità e un clima temperato, si è riscontrato un contenuto d'acqua nettamente inferiore al di sotto dei 30 cm di profondità poiché le poche piogge hanno determinato l'accumulo d'acqua solo nei primi strati di terreno, sfavorendone l'infiltrazione. Per quanto riguarda il mese di novembre, invece, si osserva come il contenuto d'acqua a seguito dell'evento alluvionale del 15/09/2022 caratterizzato da un picco di 12 mm di pioggia caduta intorno alle 18.00, che ha determinato una netta ricarica alla profondità di 60 e soprattutto 90 cm, non sia stato sufficiente a mantenere umido il terreno. Pertanto si osserva che le curve tendono a decrescere, con una leggera risalita alla profondità di 90 cm e una poco più evidente a 60 cm.

Al fine di avere un miglior quadro d'insieme, di seguito vengono messe a confronto le risposte dei vari sensori alle precipitazioni nei diversi mesi e per semplicità si ripartisce l'intero periodo di osservazione in tre intervalli temporali: gennaio – aprile (inverno – primavera), aprile – settembre (primavera – estate), settembre – novembre (estate – autunno). Soffermandoci sul periodo che va dal 1° gennaio all'11 aprile si osserva che non si sono riscontrati eventi piovosi consistenti, ma più ravvicinati e di modesta portata. Tali fenomeni hanno determinato: un contributo di potenziale matriciale nullo perciò i sensori non hanno misurato nessuna variazione alle tre profondità (Fig. 3.1.3); una temperatura del suolo pressoché costante intorno a 7-12 °C alle tre profondità funzione di una temperatura dell'aria di 0-10 °C, quindi a temperature esterne basse hanno corrisposto temperature del suolo medio basse (Fig. 3.1.2); una conducibilità elettrica con valori intorno a 0,5-0,7 mS/cm fatta eccezione per il picco improvviso nella curva relativa alla profondità di 170 cm in corrispondenza dei giorni 25-28 Febbraio in cui si è raggiunto l'1 mS/cm per poi decresce nuovamente ai valori precedenti lungo la verticale (Fig. 3.1.4); un contenuto d'acqua intorno

a $0,34-0,37 \text{ m}^3/\text{m}^3$ alle profondità di 60-90 cm e tra $0,28-0,31 \text{ m}^3/\text{m}^3$ alla profondità di 170 cm a parte un picco in prossimità dei giorni 25-28 Febbraio (Fig. 3.1.5). Il risultato ottenuto permette di considerare che contenuto d'acqua e conducibilità elettrica sono strettamente legati poiché durante gli stessi eventi di pioggia si riscontra un picco nella curva relativa a 170 cm mentre alle altre profondità non si riscontrano variazioni. La temperatura del suolo nella stagione inverno – primavera non è elevata ma si mantiene circa costante e il potenziale è a zero, questo implica che le precipitazioni hanno reso umido il terreno, pur non garantendo una ricarica consistente dell'acquifero, il clima freddo non ha permesso l'essiccazione degli strati di terreno e ciò ha favorito il lavoro di estrazione dell'acqua del suolo delle piante. Analizzando, invece, il periodo che va dall'11 aprile all'8 settembre si osserva che soprattutto nel periodo estivo si sono manifestati eventi piovosi di forte entità con picchi elevati. Tali fenomeni hanno determinato: un contributo di potenziale matriciale che a partire da aprile tende a crescere verso picchi sempre più negativi questo implica che le piante hanno dovuto lavorare molto di più per estrarre acqua dal suolo poiché il terreno si presenta più secco (Fig. 3.1.3); una temperatura del suolo in aumento funzione delle alte temperature esterne (Fig. 3.1.2); una conducibilità elettrica che da $0,46-0,56 \text{ mS/cm}$ alle profondità di 60-90 cm si è spostata gradualmente a $0,22-0,31 \text{ mS/cm}$, mentre alla profondità di 170 cm da $0,65 \text{ mS/cm}$ ha subito un calo improvviso tra fine maggio e inizio giugno fino ad un valore circa costante di $0,27 \text{ mS/cm}$ che sottolinea come durante il periodo tra fine luglio e inizio settembre la conducibilità elettrica alla profondità di 170 cm sia stata superiore rispetto quella a 60 cm (Fig. 3.1.4); un contenuto d'acqua nettamente in calo in particolare alle minori profondità da $0,34$ a $0,22-0,24 \text{ m}^3/\text{m}^3$, invece a 170 cm la variazione si mantiene più graduale ma comunque consistente da $0,32$ a $0,26 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Fig. 3.1.5). Anche questa volta il risultato ottenuto permette di constatare che contenuto d'acqua e conducibilità

elettrica sono connessi perché in aprile con clima mite le curve presentano valori più grandi anche se non eccessivamente alti, a fine maggio con temperature esterne in crescita i valori tendono a scendere con un contributo più evidente nella conducibilità elettrica a 170 cm anche se il contenuto d'acqua cala meno ripidamente alla stessa profondità. Nell'ultimo tratto caratterizzante il periodo estivo il terreno si presenta secco e molto riscaldato principalmente negli strati superficiali. Nonostante le rare piogge di modesta portata, la falda non è stata nuovamente ricaricata e i valori di conducibilità elettrica sono, ad alte profondità, prossime a zero. In estate le piante hanno dovuto lavorare moltissimo per estrarre l'acqua dal terreno poiché presente in quantità lievi, con ciò si sono raggiunti picchi negativi di potenziale matriciale di -1700 kPa. Infine si può analizzare il periodo che va dall'8 settembre al 24 novembre in cui si sono manifestati, come tra gennaio e aprile, molteplici eventi piovosi di entità bassa, fatta eccezione per l'evento alluvionale del 15 settembre che ha colpito le Marche con un picco massimo di 12 mm di pioggia caduta intorno alle 18.00. Tali fenomeni hanno determinato: un contributo di potenziale matriciale che da picchi negativi di -1500 kPa ha raggiunto salendo lungo la verticale valori nulli in corrispondenza del 15 settembre che si sono mantenuti fino a fine novembre prossimi allo zero (Fig. 3.1.3); una temperatura del suolo in calo, con curve quasi sovrapposte che si distanziano nell'ultimo tratto, funzione delle temperature esterne variate da 25 ad 8 °C (Fig. 3.1.2); una conducibilità elettrica che alle profondità di 60-90 cm passa da 0,22-0,24 mS/cm ad inizio settembre a 0,5-0,6 mS/cm verso la fine, mentre si mantiene costante a 0,22 mS/cm alla profondità di 170 cm senza subire variazioni (Fig. 3.1.4); un contenuto d'acqua che alla profondità di 170 cm tende gradualmente a decrescere da 0,26 a 0,25 m^3/m^3 , mentre alle altre due profondità, specialmente a 90 cm si osservano picchi in corrispondenza del mese di settembre da 0,22 a 0,32 m^3/m^3 la curva arancione che ha subito però dei momenti di calo/stallo e da 0,24 a

0,33 m^3/m^3 la curva verde che è salita in verticale in prossimità del 30 settembre raggiungendo il suo massimo (Fig. 3.1.5). La curva relativa alla profondità di 90 cm tende poi a scendere nei giorni successivi e a ricaricarsi verso il 15 novembre, mentre la curva relativa alla profondità di 60 cm cala fino a 0,24 m^3/m^3 per poi risalire come l'altra nell'ultima giornata di osservazione. Nuovamente si riesce ad evidenziare la relazione tra contenuto d'acqua e conducibilità elettrica poiché a seguito dell'evento alluvionale del 15 settembre e durante i giorni successivi le curve hanno subito gli stessi andamenti: la curva arancione (60 cm) ha tre picchi questo implica che il terreno ha fatto più fatica a ricaricarsi a seguito degli eventi di pioggia, la curva verde (90 cm) al contrario presenta un solo picco e ciò dimostra come la ricarica sia stata più efficace ed immediata. Per quanto concerne la curva violetto (170 cm) i sensori non hanno rilevato variazioni consistenti nel contenuto d'acqua e di conseguenza nella conducibilità elettrica. Il potenziale matriciale degli strati più superficiali mantenendosi a zero funzione delle piogge ravvicinate del periodo di indagine ha permesso alle piante di usare meno energia per estrarre acqua dal terreno, cosa che non avviene alle profondità maggiori rimaste come visto nel grafico del contenuto d'acqua più asciutte. Al contempo si può sottolineare come le basse temperature non abbiano consentito al terreno di seccarsi, pur mantenendolo asciutto alle grandi profondità e abbiano garantito anche se per un breve periodo la ricarica della falda.

3.2 Risultati analisi granulometrica

Al termine della prova unendo i risultati ottenuti dall'analisi granulometrica della frazione fine e di quella grossolana è stato costruito un diagramma semilogaritmico che riporta in ascissa, in scala logaritmica, il diametro dei granuli in mm e in ordinata, in scala lineare, il passante cumulativo percentuale.

Infine si è proceduto denominando il terreno in riferimento alla classificazione ASTM, American Society for Testing and Materials International, che distingue 3 classi: ghiaia compresa tra 75 mm e 4.75 mm, sabbia tra 4.75 mm e 75 μm , limo e argilla (frazione fina) con diametro inferiore a 75 μm . Inoltre, per caratterizzare al meglio anche la porzione fine si è fatto ricorso alla classificazione AGI, Associazione Geotecnica Italiana, che definisce la separazione tra limo e argilla al diametro 2 μm (Fig. 3.2.2).

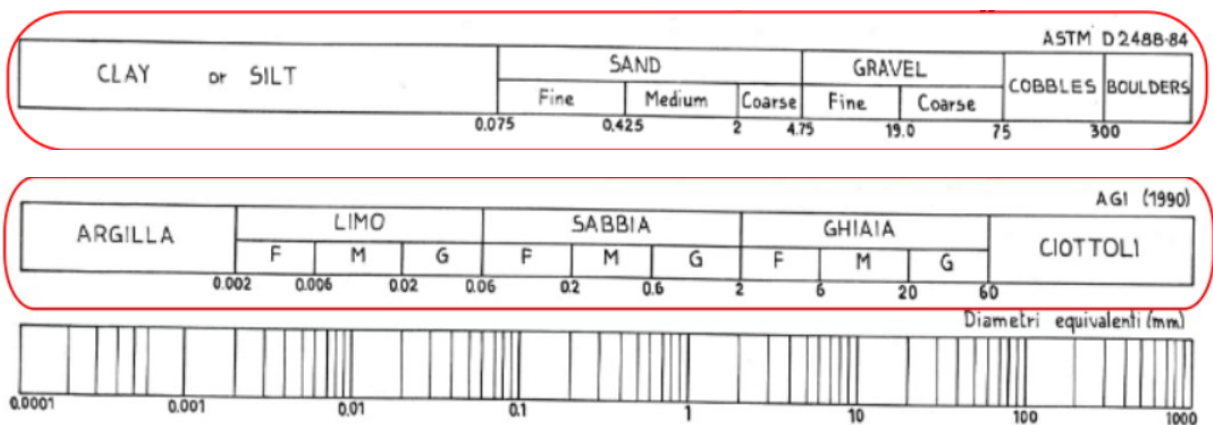


Fig. 3.2.2 Classificazioni ASTM e AGI (www.intrageo.it)

Nella classificazione AGI la classe della ghiaia è compresa tra 60 mm e 2 mm, la classe della sabbia tra 2 mm e 0,06 mm, la classe del limo tra 0,06 mm e 0,002 mm e la classe dell'argilla comprende particelle con diametri inferiore a 0,002 mm.

Utilizzando la convenzione proposta da questa classificazione, il nome ad un terreno viene assegnato seguendo questa procedura⁶⁰:

- Il nome dell'aggregato è dato dalla frazione granulometrica con percentuale maggiore (es. ghiaia);
- Se la seconda frazione granulometrica, in ordine di percentuale in peso, è compresa tra il 50 % e il 25, si usa CON per unire i due nomi (es. ghiaia con limo);
- Se la percentuale in peso della frazione successiva è compresa tra il 25 % e il 20 %, si usa il suffisso OSO (es. ghiaia con limo sabbioso);
- Se la percentuale della frazione successiva è compresa tra il 10 % e il 5 %, si usa il suffisso OSO e DEBOLMENTE (es. ghiaia con limo debolmente limosa).

Combinando i dati delle vagliature ad umido e delle aerometrie in un unico grafico passante (%)-diametro dei grani (mm), si ricava un quadro d'insieme delle curve di distribuzione granulometrica per ognuno dei campioni analizzati (Fig. 3.2.3-3.2.a). Partendo dal piano campagna si riscontra una netta presenza di terreno limoso, così classificato: limo ghiaioso, limo sabbioso, limo, ghiaia con sabbia debolmente limosa, ghiaia sabbiosa, limo con sabbia debolmente argillosa, limo con sabbia argillosa, limo argilloso e limo debolmente argilloso. Il limo è un inerte di granulometria fine, compreso dimensionalmente tra la sabbia e l'argilla e riguarda la frazione di sedimento con grani di diametro tra i 2-75 μm .

⁶⁰ <https://www.intrageo.it/geotecnica/geotecnica-come-classificare-un-terreno/#:~:text=La%20seconda%20lettera%20indica%20la,C%20significano%20limoso%20e%20argilloso>

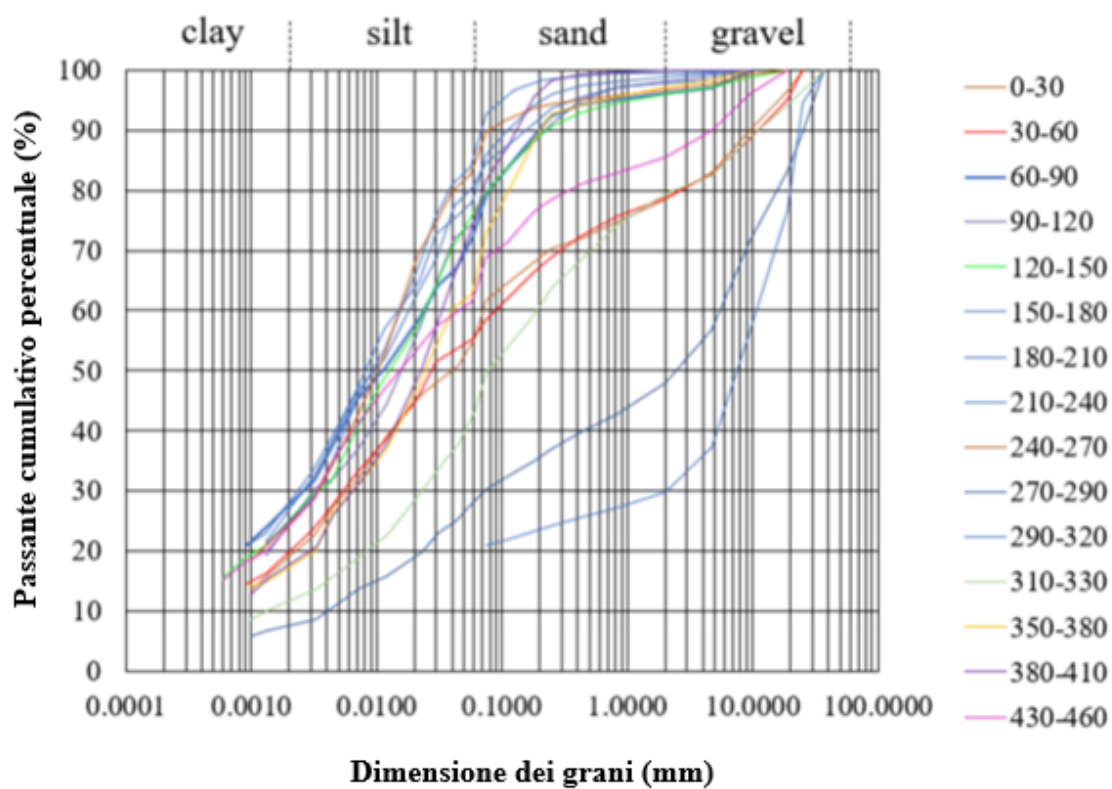


Fig. 3.2.3 Curve di distribuzione granulometrica relative alle varie profondità di indagine

PROFONDITÀ (cm)	CLASSIFICAZIONE (AGI 1990)
0-30	Limo ghiaioso
30-60	Limo ghiaioso
60-90	Limo sabbioso
90-120	Limo sabbioso
120-150	Limo sabbioso
150-180	Limo sabbioso
180-210	Limo sabbioso
210-240	Limo
240-270	Limo

270-290	Ghiaia con sabbia debolmente limosa
290-320	Ghiaia sabbiosa
310-330	Limo con sabbia debolmente argilloso
350-380	Limo con sabbia argilloso
380-410	Limo argilloso
430-460	Limo debolmente argilloso

Fig. 3.2.a Classificazione del terreno secondo le norme AGI 1990

Il risultato della classificazione granulometrica svolta ci permette di constatare che nella zona del Betelico, in Provincia di Ancona, dove è stato allestito il campo prove, è presente un'importante componente limosa. Come si evince dalla tabella sottostante (Fig. 3.2.4), il limo presenta una permeabilità intorno a 10^{-5} - 10^{-9} m/s, a seconda che sia limo sabbioso o argilloso, perciò relativamente bassa. Tale dato spiega in parte perché alle profondità maggiori l'acqua fatica ad infiltrarsi.

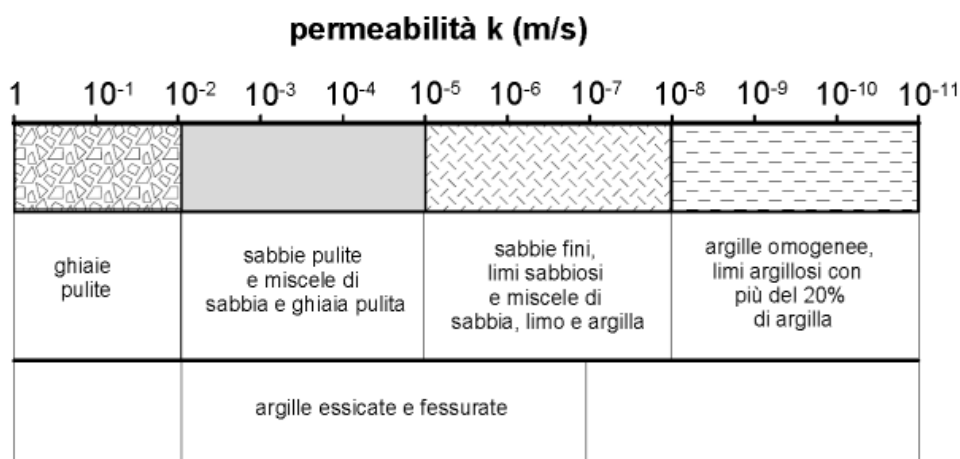


Fig. 3.2.4 Tabella delle permeabilità dei vari tipi di terreno (moodle2.units.it)

CONCLUSIONI

L'elaborato aveva lo scopo di valutare la variazione del contenuto di umidità nel suolo nella valle del Betelico durante il processo di infiltrazione, indagando quindi attraverso l'avanzamento del fronte umido le caratteristiche e le proprietà della circolazione attraverso la Critical Zone, e analizzare in tempi diversi quale zona diventa più satura in funzione anche della tipologia del terreno in situ. Mediante l'ausilio di molteplici metodi di indagine in situ e in laboratorio, si è ricostruito un quadro d'insieme della situazione idrogeologica del terreno e della falda acquifera. Appare evidente come le variazioni climatiche stagionali siano determinanti nello studiare come l'acqua si muove negli strati di terreno. Nei periodi invernali caratterizzati da un'elevata piovosità si è riscontrata una presenza d'acqua maggiore e una saturazione degli strati superficiali limo ghiaiosi/sabbiosi quasi immediata. Al contrario nei periodi estivi contrassegnati da una forte siccità, soprattutto nell'estate 2022, la presenza d'acqua è ridotta e i terreni tendono a seccarsi rapidamente poiché l'acqua tende a ruscellare piuttosto che infiltrarsi. Si è notato invece che più in profondità, dove è presente in prevalenza terreno limo argilloso, le variazioni di contenuto d'acqua sono meno accentuate, questo perché i processi di infiltrazione non avvengono velocemente e allo stesso modo la ricarica della falda idrica sotterranea. A risentire maggiormente dei cambiamenti climatici è pertanto la Critical Zone, ovvero la porzione di superficie terrestre che si sviluppa dalla chioma degli alberi, al suolo e al sottosuolo fino alle falde acquifere, mentre più si scende in profondità, minore è il contenuto d'acqua naturale in condizioni climatiche standard. Dai grafici si è osservato come ci sia una forte relazione tra la conducibilità elettrica del suolo e il contenuto d'acqua a seguito di eventi di pioggia: se più consistenti le curve tendono a salire, se poco rilevanti le curve tendono a calare. In prossimità del periodo estivo si è registrato una diminuzione netta di entrambi i valori conseguenza delle alte temperature

esterne, che con il periodo invernale hanno avuto delle riprese. È interessante confrontare come si comporta il terreno tra gennaio ed aprile con temperature dell'aria basse e tra settembre e novembre con temperature esterne medio – basse. Il contenuto d'acqua si mantiene per il primo periodo di interesse a valori maggiori per profondità di 60-90 cm e subisce un picco nella curva relativa a 170 cm, mentre nel secondo periodo di confronto il contenuto d'acqua si mantiene comunque a valori inferiori ma presenta dei picchi alle profondità di 60-90 cm e mantiene il comportamento a 170 cm costante se non in calo. Allo stesso modo il comportamento assunto dal terreno in relazione al contenuto d'acqua naturale rispecchia i valori di conducibilità elettrica. La temperatura esterna è condizionante nel comportamento che il suolo ha di fronte ad eventi meteorici più o meno elevati poiché in estate il caldo afoso seccando il suolo gli impedisce di ricaricarsi anche a seguito di eventi piovosi considerevoli, mentre in inverno le temperature medio basse favoriscono di più l'infiltrazione. Tuttavia, come si è notato dai grafici, i sensori non hanno rilevato ricariche notevoli ad alte profondità, nemmeno durante la stagione invernale. Ultimo, ma non di minore importanza, è il lavoro svolto dalle piante per estrarre acqua dal terreno; si è potuto constatare che le piante in estate con la scarsità d'acqua a disposizione, devono faticare molto di più rispetto l'inverno in cui le piogge mantengono saturi i primi strati di terreno.

È da sottolineare il comportamento del terreno nei mesi di settembre, ottobre e novembre. A seguito dell'evento alluvionale del 15/09/2022 che ha colpito la costa Marchigiana si è evidenziato un forte accrescimento nel contenuto d'acqua del suolo soprattutto alle minori profondità. I sensori installati in situ alla profondità di 170 cm non hanno registrato nessuna variazione improvvisa nel contenuto d'acqua che al contrario ha continuato a diminuire anche nei giorni seguenti, in parte probabilmente dovuto alla presenza di terreno limoso e quindi poco permeabile. Dopo l'alluvione si sono susseguiti eventi piovosi ravvicinati, che

non hanno tuttavia mantenuto i livelli di contenuto d'acqua precedentemente registrati, ma ne hanno determinato una diminuzione nei mesi successivi con un piccolo recupero in prossimità della seconda metà di novembre.

In conclusione, dopo aver trovato una corrispondenza tra i risultati ottenuti in laboratorio e quelli ricavati in situ durante il periodo di analisi, si forniscono dati utili per lo studio dei processi di infiltrazione e di ricarica della falda di un acquifero poroso, i quali saranno maggiormente rappresentativi a seguito di ulteriori ricerche eseguite a stagione invernale conclusa, con la risalita dei livelli della falda.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Domenico Guarino, *Allarme siccità in Italia, che cosa sta succedendo e come affrontare l'emergenza* in Luce, 19 Giugno 2022
- [2] Martina Marinangeli, *Allarme siccità, le Marche all'asciutto: danni all'agricoltura fino al 40%* in Corriere Adriatico, Venerdì 29 Luglio 2022
- [3] Giovanni Formentin, *Modalità di stima della ricarica della falda in seguito all'infiltrazione delle acque di pioggia*, 26 Novembre 2013
- [4] Paolo Severi et al., *Ricarica in condizioni controllate della conoide del fiume Marecchia, esiti sperimentazioni Laboratorio analisi di Ravenna ARPAE*, 2016
- [5] Geraldine Picot-Colbeaux et al., *Come preservare le nostre risorse idriche? E perché non promuovendo la ricarica delle falde acquifere?* in Info Chrétienne, 28 Luglio 2021
- [7] Filippo Mion, *le Acque Sotterranee* in intervista Ufficio Comunicazione ARPAV, Marzo 2013
- [9] Elisa Scocchera e Andrea Minutolo, *Acque Sotterranee - il necessario è invisibile agli occhi*, Ufficio Scientifico Legambiente, 2021
- [10] Filippo Giorgi, *Effetti del riscaldamento globale sul ciclo idrologico terrestre* in Rai Cultura
- [11] Prof. A. Carravetta, *Idrodinamica degli Acquiferi Costieri*, Università degli Studi di Napoli "Federico II" - Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica e Ambientale
- [12] Alessandro Conte, *Come funziona il ciclo idrologico per la rigenerazione dell'acqua* in In a Bottle, 19 Luglio 2018
- [13] Sabino Palmieri et al., *Hydrometeorological characterization of the Tiber Basin: role of evapotranspiration and soil storage in flood events*, T&A Tecnologia e Ambiente srl, Gennaio 2005
- [14] J.Faccioruso et al., *Idraulica dei Terreni*, Università degli studi di Firenze – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Sezione Geotecnica, Ottobre 2011
- [15] Nicoletta Calace et al., *Manuale per le indagini ambientali nei siti contaminati*, APAT Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, Manuali e linee guida 43/2006
- [16] Traduzione Diego di Curzio et al., *Evoluzione chimica delle acque sotterranee naturali*, The groundwater project, Marzo 2020
- [17] Rudy Rossetto et al., *Il futuro della ricarica delle falde in condizioni controllate in Italia: il progetto europeo FPVII MARSOL e la EIP on Water MAR to MARKET* in Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, Settembre 2014
- [18] Emanuela Bompan, *Acque sotterranee, un tema al centro del World Water Day* in Oltremare, 7 Marzo 2022

- [19] John R. Giardino and Chris Houser, *Principles and dynamics of the Critical Zone*, Giugno 2015
- [20] Giovanni Carrada e Cristina Frizza, *Transizione ecologica aperta - Dove va l'ambiente italiano?* - ISPRA istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, Dicembre 2021
- [21] Ing. Alessandra Nocilla, *Classificazione delle Terre*, lezione di geotecnica in ppt
- [22] Antonello Provenzale et al., *Critical Zone response to water stress: an interdisciplinary whole-system approach (Whole-CZ)*, Bando 2020, Ministero dell'Università e della Ricerca - Segretariato Generale
- [23] Ing. Simona Berardi, *Dinamica degli inquinanti – suolo saturo e insaturo*, Università di Roma “Tor Vergata”, 2009-2010
- [24] Alessio Argentieri et al., *GEOLOGIA PER L'ITALIA*, Società Geologica Italiana, 2014
- [25] Struttura fisica del suolo – Docenti.Unina.it, *Monitoraggio e caratterizzazioni di suoli e acque profonde contaminati*, Tratto da: Manuale per le indagini ambientali nei siti contaminati, APAT Manuali e linee guida 43/2006
- [26] Federico Roncolato, *Nuovo approccio alla gestione strumentale della fertirrigazione in ortofloricoltura*, Tesi di Dottorato, paragrafo 1.5 *L'ESTRAZIONE E IL MONITORAGGIO DELLA SOLUZIONE CIRCOLANTE DAL TERRENO*, Dottorato di ricerca in scienze delle produzioni vegetali, Gennaio 2011
- [27] Prof. Santo Marcello Zimbone, *Misura dei parametri idrologici del suolo*, Corso di idraulica ed idrologia forestale, 2008-2009
- [28] Dott. Angelo Scotti, *Riconoscimento dei terreni e test di infiltrazione*, ALLEGATO 1 attuazione del RR 07/2017 e del PGRA, Relazione geologica di PGT - Aggiornamento alla Variante Generale, Agosto 2019

SITOGRAFIA

{1} NCCS, National Center for Climate Services:

<https://www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/settori/gestione-delle-acque/effetti-dei-cambiamenti-climatici-sul-regime-idrico/acque-sotterranee.html>

{2} Regione Campania - Direzione Generale per le Politiche Agricole, Alimentari e Forestali: http://agricoltura.regione.campania.it/pedologia/pdf/infiltrazione_del_suolo.pdf

{3} Acque del Friuli Educational: <https://www.cafcspa.com/educational/acqua/acque-superficiali-sotterranee/acque-superficiali-sotterranee.html>

{4} Agenzia Regionale Protezione Ambiente Valle D'Aosta:

<https://www.arpa.vda.it/en/acqua/acque-sotterranee/cosa-sono-le-acque-sotterranee>

{5} Confronto percolazione vs infiltrazione: <https://it.sawakinome.com/articles/biology-science-nature/difference-between-infiltration-and-percolation.html>

{6} UNESCO Digital Library: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380743_ita

{7} Biosphere 2, 2012, *Introduction to the Critical Zone Observatories Project*, CRITICAL ZONE OSSERVATORIES - U.S. NSF National Program: [Introduction to the Critical Zone Observatories Project - YouTube](#)

{8} WSKG Public Media, 2017, *Explore the Critical Zone*, Critical Zone Observatories - U.S. NSF National Program: [Explore the Critical Zone - YouTube](#)

{9} Associazione Italiana di Geografia fisica e Geomorfologia: <https://aigeo.it/geomorfologia-criticalzone/>

{10} IGG, Istituto di Geoscienze e Georisorse:

https://www.igg.cnr.it/index.php?id=6&L=0&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=201&cHash=7e482bf2d271df73d8e46a586af703e1

{11} Critical Zone Observatories - U.S. NSF National Program:

<https://czo-archive.criticalzone.org/national/research/the-critical-zone-1national/>

{12} Falde acquifere: Cosa sono e come si formano?

<https://www.progettoicar.it/2021/01/15/falde-acquifere-cosa-sono-e-come-si-formano/>

{13} La Classificazione AGI:

<https://www.intrageo.it/geotecnica/geotecnica-come-classificare-un-terreno/#:~:text=La%20seconda%20lettera%20indica%20la,C%20significano%20limoso%20e%20argilloso>

- {14} Analisi granulometrica per setacciatura dei terreni e Norme di riferimento: <https://blog.geostru.eu/analisi-granulometrica-per-setacciatura-dei-terreni-e-norme-di-riferimento/>
- {15} Tecnologie di separazione: <https://www.flottweg.com/it/wiki/tecnologie-di-separazione/velocita-di-sedimentazione/>
- {16} I climi e gli ambienti naturali, Zanichelli:
https://staticmy.zanichelli.it/catalogo/assets/9788808402035_04_CAP.pdf
- {17} Le grandi regioni climatiche, SEI Editrice: https://sito01.seieditrice.com/temi-di-geografia/files/2012/04/VOL2_PAG65a.pdf
- {18} G.M.P.E. Gruppo Mineralogico Paleontologico Euganeo:
<https://www.gmpe.it/node/169>
- {19} Alberta Piras, <https://slideplayer.it/slide/961644/> , 2014
- {20} <http://www.ambiente.marche.it/Ambiente/Natura/Ambientenaturale/Clima.aspx>
- {21} <http://www.ambiente.marche.it/Ambiente/Natura/Ambientenaturale/Geologia.aspx>
- {22} Meteo e Clima provincia di Ancona: <http://www.centrometeo.com/previsioni-meteo/previsioni-meteo-regionali/5588-meteo-e-clima-in-provincia-di-ancona>
- {23} <https://www.blendspace.com/lessons/RtOiJDlwZie3eA/le-marche>
- {24} Maria Turkina, <https://en.ppt-online.org/817112> , 2019
- {25} [CZNet \(criticalzone.org\)](http://www.criticalzone.org)
- {26} CENNI DI GEOLOGIA DELL'ITALIA:
<https://www.isprambiente.gov.it/files/notizie-ispra/notizia-2014/giro-italia/GEOLOGIROUNICA20141.pdf>
- {27} https://www.agrometria.it/sites/default/files/prodotto_scheda_tecnica/Manuale%20lisimetri_0.pdf
- {28} TENSIOMETRI – istruzioni operative:
https://www.ecosearch.info/sites/default/files/prodotti_documentazione/Istruzioni_operative.pdf
- {29} Tensimetri soilmoisture: [Tensimetri Soilmoisture | Ecosearch](https://www.ecosearch.com/it/risorse/tensimetri-soilmoisture)
- {30} 2710ARL Tensiometer and 2725ARL Jet Fill Tensiometer da SOILMOISTURE EQUIPEMENT CORP., Marzo 2011
https://www.soilmoisture.com/pdfs/Resource_Instructions_0898-2725_2725%20Jet-Fill%20Tensimeters.pdf
- {31} www.misure.net

{32} Infiltrometro a doppio anello: [L’Infiltrometro a doppio anello e le misurazioni di runoff/sedimento | Soilution System](#)

{33} Advanced soil moisture sensing TEROs 12:

https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/teros-12-soil-moisture-sensor?creative=589757453988&keyword=&matchtype=&network=g&device=c&gclid=Cj0KCQjwhsmaBhCvARIsAlbEbH7u03UkVjvonNndJsE74T1CXA7uPINarURKK8deQCI_XfTL_gqQavqIaAr4fEALw_wcB

{34} Soil water potential sensor TEROs 21:

https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/teros-21-soil-water-potential-sensor?creative=589757453997&keyword=&matchtype=&network=g&device=c&gclid=Cj0KCQjwhsmaBhCvARIsAlbEbH6JHOqlaYI4N8zSow5S-O6qs3oWWpims6KWJ9x3ftJqLhOstSD8ncaAkXGEALw_wcB

{35} Prof. Alessandra Trapannone, *Tessitura del Terreno – La gestione sostenibile del suolo*, RAI CULTURA, <https://www.raicultura.it/raicultura/articoli/2020/05/Tessitura-del-terreno-797a8e2f-afa6-4047-a91b-cc07c1e77455.html>

{36} www.earth.google.com

{37} www.depuratoriacqualife.it

{38} www.socgeol.it

{39} www.esa.org

{40} regione.marche.it

{41} didattica-2000.archived.uniroma2.it

{42} www.luniversoeluomo.org

{43} cartinadatieuropa.it

{44} www.geofisico.it

{45} wwwdisc.chimica.unipd.it

{46} scubla.it

{47} www.agriexpo.online

{48} www.unirc.it

{49} manualedelgeologo.it

{50} www.soilutionsystem.com

{51} www.glariskalp.eu

{52} moodle2.units.it

RINGRAZIAMENTI

Giunta al termine di questo percorso vorrei dire grazie a chi mi ha sostenuto e ha contribuito alla realizzazione dell'elaborato.

Un doveroso ringraziamento va al mio relatore Tazioli Alberto per la sua infinita disponibilità e tempestività ad ogni mia richiesta. Grazie per avermi affidato un tema così importante e per avermi fornito molto materiale utile alla stesura dell'elaborato. Grazie al mio correlatore Fronzi Davide per i suoi consigli e per avermi insegnato ad elaborare i dati analizzati. Vorrei inoltre ringraziare Domizi Jonathan per aver seguito con me ogni step delle procedure di analisi di laboratorio e per avermi insegnato ad adoperare varie strumentazioni. Grazie per aver accresciuto le mie conoscenze e competenze.

Ringrazio la mia famiglia per avermi accompagnato in ogni scoglio della mia vita, per sostenermi nelle scelte e per essere un punto di riferimento essenziale per affrontare qualsiasi difficoltà il futuro vorrà presentarmi.

Ringrazio Matteo che mi accompagna in questa vita e sopporta la mia testardaggine, i miei momenti no e la mia pazzia senza tirarsi mai indietro.

Ringrazio Ettore il mio sorriso preferito, il mio risveglio al mattino e l'ultimo mio pensiero prima di addormentarmi. Grazie perché abbiamo imparato l'un l'altra a crescere, a vedere con occhi diversi, ad amarci incondizionatamente e gioire di ogni istante. Grazie per avermi reso madre, donna, ma soprattutto felice.

Ringrazio Valentina per esserci sempre stata, sia nei momenti difficili che in quelli felici, per darmi consigli ogni volta che ne sento il bisogno e per camminare al mio fianco come una sorella.

Ringrazio Nicoletta per non avermi mai lasciato sola. Grazie per la tua amicizia, la tua sincerità, la tua comprensione e il tuo tempo.

Ringrazio i miei compagni di corso perché sopportandoci e supportandoci in ogni situazione, in vista di ogni esame e durante ogni lezione abbiamo vissuto con un po' più di leggerezza questi tre anni insieme.

L'ultimo ringraziamento è per i miei angeli che mi danno la forza ed il coraggio di raggiungere i miei traguardi a testa alta, senza paura. Sarete con me per sempre, in ogni momento di debolezza ed incertezza, a tendermi la mano.

GRAZIE DI CUORE!