

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

**Caratterizzazione di un acquifero per la corretta  
gestione delle risorse idriche**

*Characterization of an aquifer for the correct management  
of water resources*

RELATORE:

*Prof. Tazioli Alberto*

TESI DI LAUREA DI:

*Massacci Edoardo*

CORRELATORE:

*Dott. Fronzi Davide*

**Anno Accademico 2023-2024**



# Sommario

INTRODUZIONE .....	5
1.1 INCIPIT DELLA TESI .....	5
1.2 IMPORTANZA DELLA CORRETTA GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE .....	11
1.3 GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE NEI PERIODI DI SICCAITA' .....	13
1.4 LAVORI E RICERCHE SVOLTE NELL'AREA OGGETTO DI STUDIO .....	32
1.5 SCOPO DELLE RICERCHE EFFETTUATE .....	38
INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO .....	39
2.1 CAMPO PROVE- ZONA BETELICO (AN) .....	39
2.2 ANALISI DATI ESISTENTI.....	41
2.3 INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO .....	43
2.4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTUALE GENERALE .....	46
2.5 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE DELL'AREA DI CAMERANO (AN) .....	49
2.6 STUDI DEL DOTT. GEOL. COLLAREDA .....	50
2.7 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DI DETTAGLIO .....	57
2.8 INQUADRAMENTO MORFOLOGICO E GEOMORFOLOGICO .....	62
2.9 STRATIGRAFIA DEL TERRENO ANALIZZATO .....	62
2.10 IDROGRAFIA SUFERFICIALE ED IDROGEOLOGIA.....	64
2.11 SISMICITÀ .....	65
2.12 SISMICITÀ STORICA .....	68
2.13 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE .....	70
2.14 EFFETTI LOCALI .....	71
2.15 CATEGORIA DI SUOLO DI FONDAZIONE .....	72
MATERIALI E METODI .....	72
3.1 STRUMENTAZIONE DI PROVA .....	72
3.2 PROVA DI POMPAGGIO DELL'ACQUA .....	81
3.3 PROVA DI IMMISSIONE DI TRACCIANTE .....	83
3.4 METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA VELOCITA' DI DISPERSIONE DEL TRACCIANTE.....	86
RISULTATI .....	88
4.1 RISULTATI DELLA PROVA DI POMPAGGIO .....	88
4.2 RISULTATI DELLA PROVA DI IMMISSIONE DI TRACCIANTE .....	98
4.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA PERMEABILITA' DEL TERRENO .....	104

4.4 CONFRONTO DEI VALORI DI PERMEABILITA' OTTENUTI .....	112
CONCLUSIONI .....	118
BIBLIOGRAFIA .....	121
SITOGRAFIA .....	124

# INTRODUZIONE

## *1.1 INCIPIT DELLA TESI*

La geologia rappresenta una scienza cruciale per la comprensione e la gestione delle risorse idriche, risorse che sono fondamentali per il sostentamento umano, la preservazione degli ecosistemi naturali e il progresso economico. La comprensione delle formazioni geologiche e degli acquiferi sottostanti è essenziale per determinare i meccanismi di stoccaggio e movimento dell'acqua sotterranea, elementi indispensabili per garantire un approvvigionamento idrico sostenibile e affidabile.

Nel contesto globale contemporaneo, la gestione delle risorse idriche affronta una serie di sfide complesse e interconnesse. La crescita demografica, l'urbanizzazione accelerata, l'espansione industriale e i cambiamenti climatici stanno esercitando una pressione senza precedenti sulle risorse idriche disponibili, portando a situazioni di scarsità d'acqua e deterioramento della qualità in molte regioni del mondo. A queste sfide si aggiunge la gestione inefficace e la mancanza di dati precisi sulla distribuzione e dinamica delle risorse idriche, aggravando ulteriormente i problemi esistenti.

La geologia applicata fornisce gli strumenti e le metodologie necessarie per affrontare queste sfide. La caratterizzazione degli acquiferi, attraverso indagini geologiche e idrogeologiche, permette di ottenere informazioni dettagliate sulla quantità e qualità delle riserve d'acqua, sui tassi di ricarica e sui percorsi di flusso. Queste informazioni sono cruciali per sviluppare strategie di gestione che bilancino il prelievo e la ricarica, prevenendo il sovrasfruttamento e la contaminazione delle risorse idriche. La conoscenza approfondita della geologia di

un'area consente inoltre di prevedere e mitigare i rischi associati all'uso delle risorse idriche, come l'intrusione salina, la subsidenza del suolo e l'inquinamento da sostanze pericolose.

Nonostante i significativi progressi nella comprensione dei sistemi idrici sotterranei, numerosi problemi legati alla gestione delle risorse idriche persistono. La contaminazione delle falde acquifere da parte di sostanze chimiche, l'intrusione di acqua salina in acquiferi costieri, il progressivo abbassamento dei livelli delle falde freatiche e gli impatti dei cambiamenti climatici rappresentano sfide complesse che richiedono un approccio integrato e basato su solide conoscenze geologiche. Questi problemi sono spesso esacerbati da pratiche di gestione inadeguate e da una mancanza di coordinamento tra i diversi enti coinvolti nella gestione delle risorse idriche.

La necessità di una gestione delle risorse idriche basata su dati scientifici e integrata con le conoscenze geologiche è più urgente che mai. Solo attraverso un approccio interdisciplinare sarà possibile garantire la disponibilità e la qualità delle risorse idriche per le generazioni future. Questa tesi intende contribuire a questa sfida, fornendo una base scientifica solida per la gestione sostenibile delle risorse idriche e dimostrando l'importanza della geologia applicata in questo ambito cruciale. La comprensione approfondita degli acquiferi e delle loro dinamiche idriche rappresenta un passo fondamentale verso una gestione più responsabile e sostenibile delle risorse idriche, garantendo il benessere delle comunità e la protezione degli ecosistemi naturali.

Al fine di inquadrare al meglio la gravità della situazione attuale legata alle risorse idriche, è utile osservare alcuni grafici che evidenziano i problemi ai quali gran parte delle nazioni, compresa la nostra e nello specifico anche la regione Marche, sono sottoposte.

Come si evince in Figura 1, gran parte del mondo si trova costretta a fronteggiare una situazione di stress idrico che varia nel range medio-alto-estremamente alto, e tutte le quante le nazioni più ricche e sviluppate dal punto di vista demografico rappresentano situazioni di estrema criticità.

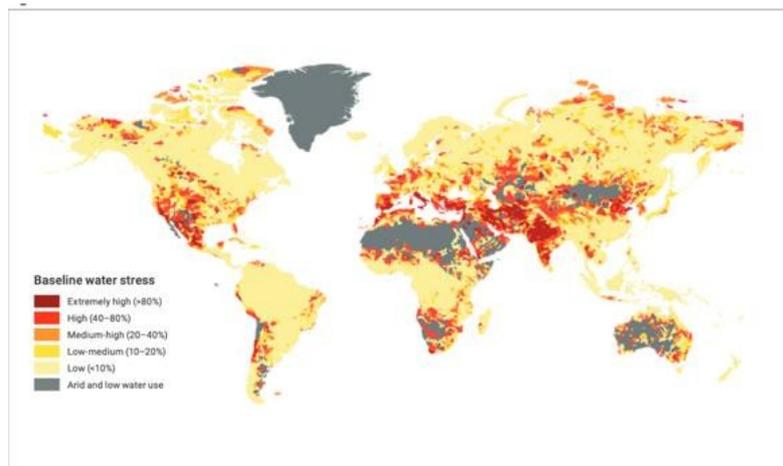


Figura 1, Situazione di stress idrico nazionale (WRI, 2019)

In Figura 2 viene riportato il water footprint a livello globale, che misura in volume la quantità di acqua fresca pro capite utilizzata, consumata, sprecata o inquinata. Anche in questo caso come nel punto precedente, sono gli stati più ricchi e popolosi a sfruttare in maniera eccessiva le risorse idriche.

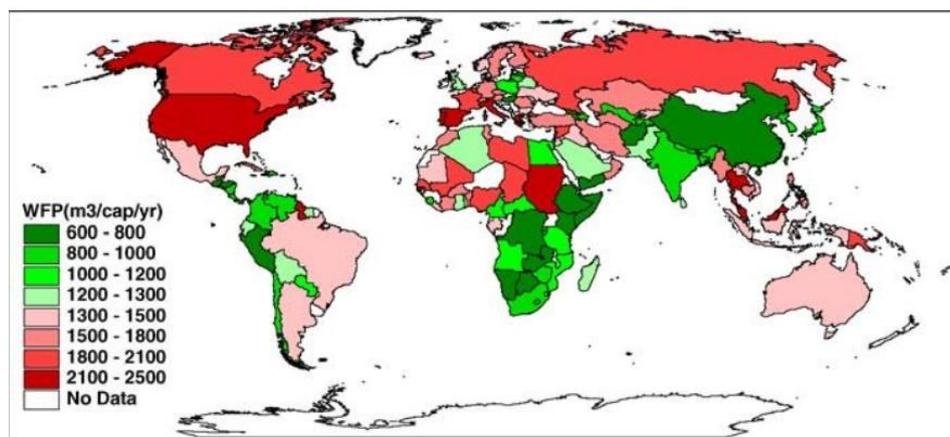


Figura 2, Water footprint pro capite (Australian museums, 2019)

Facendo focus sulla nostra nazione, si evince, come riportato in Figura 3, una grande scarsità della risorsa idrica rinnovabile, che sta portando ad una situazione sempre più critica nei confronti della ricarica degli acquiferi.

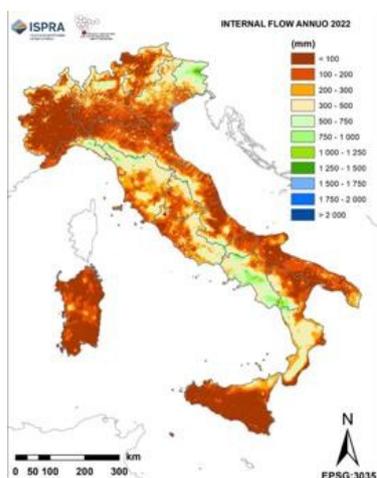


Figura 3, Distribuzione della risorsa idrica rinnovabile ([www.isprambienete.gov.it](http://www.isprambienete.gov.it))

A una situazione molto grave, come visibile in Figura 4, si aggiunge una rete acquedottistica estremamente danneggiata a livello nazionale, che contrapposta a un aumento sempre più evidente di richiesta di acqua potabile, sottopone ad ulteriore stress le risorse disponibili.

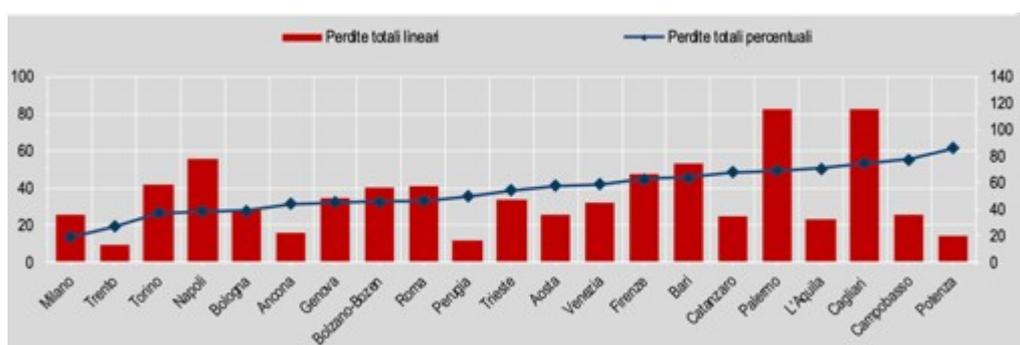
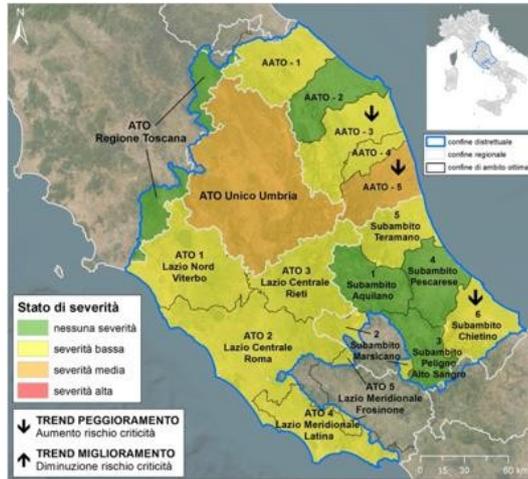


Figura 4, Perdite totali nelle reti di distribuzione dei capoluoghi di regione (Istat, 2020)

Viene riportata in Figura 5 la situazione di severità idrica relativa al centro Italia.

Osservando nello specifico la regione Marche si evince un trend che varia da nessuna severità a severità media. Osservando la media nazionale risulta essere un buon risultato,

ciò non toglie che ci siano dei margini di miglioramento e sicuramente delle operazioni da fare per far sì che la situazione non peggiori.



*Figura 5, Stato di severità idrica del centro italia (Osservatorio permanente sugli utilizzi idrici, 2024)*

In Figura 6 viene riportato lo SPI (Standard Precipitation Index) relativo alle stazioni pluviometriche della regione Marche, che indica siccità severa e talvolta estrema. Si evidenzia una situazione con periodi molto siccitosi a cui corrisponde una diminuzione degli acquiferi alluvionali e un aumento del numero di eventi estremi: piove più volte in modo intenso ma lontano dalle «finestre» utili per la ricarica delle falde.

siccità severa ed  
estrema!



Anomalie SPI alcune stazioni

Valori SPI	Classe
$SPI \geq 2$	Umidità estrema
$1.5 \leq SPI < 2$	Umidità severa
$1 \leq SPI < 1.5$	Umidità moderata
$-1 < SPI < 1$	Nella norma
$-1.5 < SPI \leq -1$	Siccità moderata
$-2 < SPI \leq -1.5$	Siccità severa
$SPI \leq -2$	Siccità estrema

sezione	bacino	spl 3 mesi	spl 6 mesi
Mercatale	Foglia	-0.51	-1.47
Montecchio	Foglia	-0.96	-1.69
Pesaro Ferrovia	Foglia	-1.02	-1.67
Santa Maria in Arzilia	Arzilia	-1.24	-1.79
Sant'Angelo in Vado- Via Canale	Metauro	-0.78	-1.56
Cagli Civita	Bosso	-0.58	-1.19
Cagli Ponte Cavour	Burano	-0.52	-1.19
Acqualagna	Candigliano	-0.64	-1.36
Metaurilla	Metauro	-0.79	-1.58
San Michele al Fiume	Cesano	-0.82	-1.72
Marotta Cesano	Cesano	-0.82	-1.71
Corinaldo	Nevola	-0.87	-1.9
Serra dei Conti	Misa	-0.85	-1.8
Bettolelle	Misa	-0.87	-1.85
Colleponi	Sentino	-0.41	-1.32
Camponoccechio	Esino	-0.15	-1.06
Mole	Esino	-0.25	-1.14
Chiaravalle	Esino	-0.36	-1.22
Monte San Vito	Triponzio	-0.82	-1.62
Montepolesco	Musone	-0.49	-1.31
Crocette	Aspio	-0.76	-1.24
Marcelli	Musone	-0.8	-1.42
San Severino Marche	Potenza	0.05	-0.9
Villa Potenza	Potenza	-0.25	-1.17
Porto Recanati	Potenza	-0.4	-1.29
Pontelatrave	Chienti	-0.23	-1.07
Passo di Pollenza	Chienti	-0.61	-1.62
Villa San Filippo	Chienti	-0.74	-1.76
Friano	Tenna	-0.65	-1.82
Porto Sant'Elpidio	Tenna	-1.2	-2.3
Ete Caldarette	Ete Vivo	-1.51	-2.36
San Giorgio all'Isola	Aso	-0.36	-1.66
Ortezzano	Aso	-1.19	-2.37
Viconare	Menocchia	-1.72	-2.26
Grottammare	Tesino	-1.78	-2.6
Pescara del Tronto	Tronto	-0.48	-1.62
Porta Cartara	Castellano	-0.88	-2.22
Brecciarolo	Tronto	-0.74	-2.08
Sentina	Tronto	-1.14	-2.46
Visso	Nera	-0.19	-1.3

Figura 6, Andamento dello SPI nelle stazioni pluviometriche della regione Marche (Osservatorio permanente sugli utilizzi idrici, 2024)

## *1.2 IMPORTANZA DELLA CORRETTA GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE*

L'acqua, spesso definita come la linfa vitale del nostro pianeta, sta affrontando una crescente pressione a causa dell'aumento della richiesta, dei mutamenti climatici e dell'inquinamento<sup>1</sup>. Una volta considerata inesauribile, questa risorsa di inestimabile valore è ora riconosciuta come limitata e sempre più rara. La distribuzione delle risorse idriche nel mondo è disomogenea, con alcune regioni che godono di abbondanza e altre che lottano con gravi carenze. Paesi dotati di estesi sistemi fluviali, come il Canada e il Brasile, contrastano nettamente con aree aride e semi-aride come il Medio Oriente e il Nord Africa, dove le penurie d'acqua sono una costante<sup>2</sup>. L'urbanizzazione rapida e la crescita demografica, soprattutto in paesi come l'India e la Cina, intensificano la pressione sulle risorse idriche, portando a un eccessivo sfruttamento delle acque sotterranee e a tensioni sui corpi idrici superficiali<sup>3</sup>. I cambiamenti climatici aggravano ulteriormente la situazione, rendendo l'approvvigionamento idrico più imprevedibile, come testimoniato dall'aumento delle siccità e delle inondazioni. Con la popolazione mondiale in crescita e il cambiamento climatico in atto, diventa sempre più urgente adottare una gestione sostenibile delle risorse idriche.

Le risorse idriche sono fondamentali per lo sviluppo socioeconomico sostenibile, supportando una vasta gamma di attività economiche e garantendo la sopravvivenza umana stessa. La disponibilità e la gestione di tali risorse influenzano in modo significativo la

---

<sup>1</sup> Vörösmarty, C.J. et al., (2000) - *Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth*, 284–288.

<sup>2</sup> Papa, F. et al., (2020) - *Water Resources in Africa under Global Change: Monitoring Surface Waters from Space. Surv. Geophys* , 43–93.

<sup>3</sup> Han, Y. Et al., (2023) - *Exposure, Distribution, and Ecological Risk of Four New Bisphenol Analogs in the Typical Lake Region of Taihu Lake. Expo. Health*; early access .

prosperità e il benessere delle società. L'agricoltura, che assorbe circa il 70% dell'acqua dolce mondiale, rappresenta il fulcro della dipendenza economica da questa risorsa. È il principale sostegno economico per molti paesi in via di sviluppo, dove una grande parte della popolazione dipende dall'agricoltura. In regioni come l'Africa subsahariana e alcune parti dell'Asia, dove la scarsità d'acqua è un problema critico, la mancanza di fonti idriche affidabili può ostacolare seriamente la produttività agricola, portando a insicurezza alimentare, povertà e stagnazione economica<sup>4</sup>. Al contrario, una gestione efficace delle risorse idriche può aumentare la produttività agricola, migliorare la sicurezza alimentare e stimolare la crescita economica. Oltre all'agricoltura, l'acqua è fondamentale per molteplici processi industriali, evidenziando l'impatto economico della gestione delle risorse idriche. La mancanza di acqua sufficiente o affidabile può interrompere le attività industriali, ridurre la produzione economica e causare perdite di posti di lavoro, mentre una gestione sostenibile dell'acqua può favorire la crescita industriale e la resilienza economica.

Le risorse idriche contribuiscono in modo significativo al benessere sociale, supportando una vasta gamma di servizi essenziali. Tra questi, uno dei più cruciali è l'igiene, dove l'acqua è utilizzata per mantenere la pulizia e prevenire la diffusione di malattie. L'accesso a acqua potabile pulita e servizi igienici è un diritto umano fondamentale e un indicatore chiave dello sviluppo sociale. Tuttavia, ancora nel 2021, circa 2,2 miliardi di persone nel mondo non hanno accesso a fonti d'acqua sicure e gestite in modo appropriato, mentre 4,2 miliardi non dispongono di servizi igienico-sanitari adeguati<sup>5</sup>. Questa situazione evidenzia l'importanza della gestione delle risorse idriche e l'urgente necessità di soluzioni che garantiscano un

---

<sup>4</sup> Schilling, J et al., (2020) - *Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa*. Reg. Environ. Chang, 15.

<sup>5</sup> Sachs, J.D. et al., (2022) - *Sustainable Development Report 2022*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2022.

accesso più ampio a acqua pulita e servizi igienico-sanitari adeguati. Inoltre, la qualità dell'acqua influisce direttamente sulla salute umana, con l'acqua contaminata che rappresenta una delle principali cause di malattie come il colera, la dissenteria e il tifo. Le risorse idriche contribuiscono anche al benessere psicofisico, offrendo spazi per il relax, l'attività fisica e il contatto con la natura. Svolgono un ruolo fondamentale nel mantenimento della sostenibilità ambientale, supportando la biodiversità, regolando il clima terrestre e agendo come ammortizzatori contro i cambiamenti climatici.

Data l'importanza cruciale delle risorse idriche nello sviluppo socioeconomico, è essenziale analizzare il loro rapporto con lo sviluppo sostenibile. Questo implica la comprensione delle complesse interazioni tra disponibilità d'acqua, qualità, utilizzo e i fattori socioeconomici che ne influenzano le dinamiche. È inoltre necessario esplorare strategie innovative per la gestione delle risorse idriche che tengano conto delle esigenze sociali, economiche e ambientali.

### *1.3 GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE NEI PERIODI DI SICCITA'*

Il rapido e tumultuoso processo di crescita dei consumi civili e industriali dell'acqua, accompagnati a volte da una disinvolta e indiscriminata utilizzazione nonché dall'inquinamento, hanno contribuito a rendere l'acqua una "preziosa risorsa".

Se si pensa che i consumi medi individuali in alcune aree del nostro paese, alla pari cioè delle società più sviluppate dell'Europa e del Nord America, si aggirano attorno ai 400 litri

al giorno si può facilmente comprendere quando si parla dell'acqua come di una risorsa limitata e, quindi, meritevole della massima attenzione<sup>6</sup>.

La vigente normativa per la gestione delle risorse idriche (in particolare, L. 183/89, L. 36/94, D.lgs. 152/99)<sup>7</sup> individua tra gli obiettivi da perseguire la tutela della qualità e dell'equilibrio quantitativo del ciclo idrico nonché la protezione dell'ambiente e degli ecosistemi connessi ai corpi idrici. A tale scopo, sono state istituite le autorità di bacino, con i compiti di redigere il Piano di bacino e di definire e aggiornare il bilancio idrico e gli Ambiti Territoriali Ottimali (ATO), per la gestione del Servizio idrico integrato, costituito dall'insieme dei servizi pubblici di captazione, distribuzione, nonché collettamento, depurazione e smaltimento delle acque reflue.

Il D.lgs. 152/99 (art. 44), richiede inoltre di individuare adeguati strumenti organizzativi di pianificazione per l'integrazione dei diversi piani, di bacino, di gestione del servizio idrico integrato e dei Piani di tutela delle acque.

#### AMBITI TERRITORIALI OTTIMALI

L'Ambito Territoriale Ottimale è istituito dalla legge 36/94<sup>8</sup> e dalle leggi regionali attuative della stessa, che ne fissano i limiti geografici, ed è finalizzato principalmente alla riorganizzazione su base locale del Servizio Idrico Integrato che comprende l'approvvigionamento idrico, gli usi, il riuso, la raccolta e il trattamento delle acque reflue urbane.

---

<sup>6</sup> Ambrosetti (2023) - *The european*. Libro bianco 2023

<sup>7</sup> [www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it)

<sup>8</sup> [www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it)

L'Autorità d'Ambito, in conformità con gli altri istituti, ha il compito di rappresentare la domanda collettiva del servizio - in una situazione di monopolio naturale - e di regolare la produzione ed erogazione dello stesso all'utenza, attraverso un opportuno rapporto di committenza ad uno o più soggetti.

La normativa individua negli ATO strutture che superino la dimensione comunale di gestione, e demanda ad essi l'elaborazione del Piano d'ambito, lo strumento attraverso il quale vengono definiti:

- gli obiettivi di miglioramento del servizio idrico per il raggiungimento di standard di qualità con livelli minimi del servizio;
- gli investimenti occorrenti al loro raggiungimento;
- l'ottimizzazione del sistema tariffario, con copertura dei costi e metodologie premianti l'efficienza e la qualità del servizio;
- le politiche di gestione relative al risparmio, al riuso e alla destinazione di risorse più pregiate per gli usi potabili.

Le varie leggi regionali in vigore, attuative della L. 36/94, contengono scelte e indicazioni applicative in parte omogenee e in parte diverse sul territorio nazionale:

- per la perimetrazione degli ATO, cinque regioni hanno individuato un unico ATO regionale, sei hanno delimitato gli ATO coincidenti con i confini provinciali, altre sei con dei confini molto simili ad essi e solo due regioni hanno scelto criteri di aggregazione diversi da quelli amministrativi;

- la forma di cooperazione fra Comuni varia da regione a regione; in alcuni casi si è scelta la forma del consorzio, in altri si è individuata la convenzione fra enti affidando di solito alla Provincia il ruolo di coordinamento, in altri ancora si è lasciata libera scelta tra le due forme;
- la gestione in alcuni casi è fatta da un unico gestore, in altri da più gestori e in altri è prevista una fase transitoria durante la quale coesistono più gestori;
- alcune regioni hanno definito un ruolo regionale di coordinamento e raccolta dati, istituendo osservatori od autorità amministrative regionali.

#### SERVIZI IDRICI E SERVIZIO IDRICO INTEGRATO

La riorganizzazione del Servizio Idrico Integrato, programmato con il Piano d'Ambito dall'Autorità d'Ambito, consiste nel perseguire l'obiettivo di miglioramento del livello di servizio reso all'utenza, distribuito a scala di intero ambito, nell'accezione più globale dell'obiettivo di qualità, comprendendo qualità tecnica, affidabilità, efficienza organizzativa, positivi effetti socioeconomici e ambientali e costi sostenuti dall'utenza. L'obiettivo di cui sopra dovrà essere in sintonia con la normativa in evoluzione, riguardante sia gli standard di servizio per l'approvvigionamento idropotabile (D.lgs. 31/2001<sup>9</sup>) che le caratteristiche di mitigazione degli impatti di acque reflue trattate sui corpi idrici recettori, anche in correlazione con i futuri Piani di Tutela delle acque (D. lgs. 152/99). L'istituzione degli ATO ha consentito una razionalizzazione della gestione dei servizi idrici, precedentemente affidata ad una molteplicità di gestori (circa 7800 soggetti) diversi per natura, dimensioni e organizzazione.

---

<sup>9</sup> [www.parlamento.it](http://www.parlamento.it)

Alla fine del 2002 vengono fornite informazioni da 52 Autorità di ATO, pur con insufficienze e imprecisioni, che contribuiscono a formare una significativa visione di insieme, attraverso molteplici comparazioni eseguite, con i seguenti risultati:

-la copertura del servizio di acquedotto, rapportato alla popolazione residente, risulta generalmente superiore al 90%; la risorsa viene prelevata per circa l'85% da acque sotterranee e per il restante 15% da acque superficiali;

-il valore medio della dotazione idrica pro-capite risulta di 297 l/g. con significativa variabilità tra i diversi ATO;

-il valore medio delle perdite in rete risulta pari al 42% del volume approvvigionato, ma considerato che in alcune situazioni le perdite apparenti possono essere rilevanti è lecito pensare che le perdite reali siano alquanto inferiori alle perdite denunciate nelle ricognizioni;

-l'età media delle reti di distribuzione, per gli ATO considerati, si attesta intorno ai 30 anni;

-il grado di copertura del servizio fognario è di circa 84% e in 18 ATO arriva al 90%; la tipologia è di tipo misto nel 72% dei casi, reti nere nel 22% e per le reti di acque bianche o meteoriche di circa il 9%; Le reti fognarie raccolgono le acque usate, provenienti dagli agglomerati urbani e industriali, e le convogliano agli impianti di depurazione dove subiscono un processo di riduzione del loro potere inquinante: tale processo, ai sensi della normativa vigente, dev'essere più o meno spinto a seconda degli obiettivi di qualità del corpo idrico recettore.

-il livello di copertura del servizio di depurazione dell'acqua ad usi civili è del 73%; dalle ricognizioni eseguite emerge la proliferazione di impianti di piccole dimensioni (80% delle 7000 unità censite) e circa il 10% del parco esistente non è funzionante o risulta non adeguato

ai limiti di emissione previsti dalla normativa vigente. L'età media degli impianti censiti è di 16 anni.

Infine, i consorzi di bonifica e di irrigazione realizzano e gestiscono le reti irrigue e di scolo delle acque. In Italia, la superficie totale consorziata è di circa 15 milioni di ettari; lo sviluppo dei canali consortili (di scolo, irrigui, uso promiscuo, condotte tubate) è di 195.000 km. Le opere di irrigazione, con invasi e vasche, sono 564 di cui 433 al sud. I volumi idrici, trattati con le opere di irrigazione, ammontano a circa 2.470 milioni di metri cubi in invasi e vasche. La normativa, in materia di risorse idriche, è in vigore da parecchi anni ma il sistema di gestione integrata del ciclo idrico nell'ambito degli ATO comincia adesso a far intravedere il disegno della riforma ed i suoi primi effetti sull'organizzazione dei servizi.

## PIANI DI TUTELA DELLE ACQUE

Il Piano di tutela delle acque è lo strumento di pianificazione introdotto dal decreto 152/99<sup>10</sup>.

Il piano contiene l'insieme delle misure necessarie alla tutela qualitativa e quantitativa dei sistemi idrici, a scala regionale e di bacino idrografico. L'elaborazione del Piano, che costituisce piano stralcio di settore del Piano di bacino, è demandata alle Regioni, in accordo con le Autorità di bacino.

Alla base del piano di tutela vi è la conoscenza degli aspetti quantitativi naturali che caratterizzano i corpi idrici (andamenti temporali delle portate nei corsi d'acqua, delle portate e dei livelli piezometrici negli acquiferi sotterranei, dei livelli idrici nei laghi, serbatoi, stagni). Da tale conoscenza, scaturisce la possibilità di conseguire i due principali obiettivi del Piano:

---

<sup>10</sup> [www.normattiva.it](http://www.normattiva.it)

-il mantenimento o il riequilibrio del bilancio idrico tra disponibilità e prelievi, indispensabile per definire gli usi compatibili delle risorse idriche al fine della loro salvaguardia nel futuro;

-la stima delle caratteristiche di qualità dei corpi idrici attraverso l'intensificazione del monitoraggio e la conseguente definizione degli interventi per il conseguimento degli obiettivi di qualità.

## USI

Gli usi dell'acqua, che determinano la sua richiesta e quindi i prelievi, possono essere ripartiti nelle seguenti macrocategorie: uso potabile, uso industriale, uso irriguo, uso energetico, uso estetico-ricreativo e vita acquatica.

Per usi civili si intendono quelli relativi al consumo umano e ai servizi di igiene privati e collettivi. I consumi idrici per usi civili variano in relazione alle dimensioni degli agglomerati urbani, al livello di benessere economico e alle abitudini di vita della popolazione. Negli ultimi decenni si è registrato un aumento delle dotazioni idriche pro capite, da ricondursi principalmente all'innalzamento della qualità del servizio idrico e del reddito medio della popolazione.

La richiesta idrica industriale varia in relazione al settore considerato: quelli più idro esigenti sono il petrolchimico, il metallurgico, il tessile e l'alimentare. Il fabbisogno idrico dell'industria italiana è diminuito negli ultimi anni, a causa della progressiva riduzione delle attività manifatturiere, a vantaggio della fornitura di servizi, dell'aumento della produttività

industriale, dell'automazione sempre più spinta dei processi produttivi e dell'introduzione di nuove tecnologie a basso consumo d'acqua.

Il fabbisogno idrico in agricoltura dipende dall'estensione delle superfici irrigabili, dalle caratteristiche climatiche e ambientali, dalla tipologia colturale, dalle tecnologie di distribuzione utilizzate. Il settore agricolo è il più idro esigente: tra le colture a più elevato consumo d'acqua si annoverano il granturco, le foraggere e le ortive. L'impiego dell'acqua nella produzione di energia può essere sia diretto (immissione nelle condotte forzate delle centrali idroelettriche) sia indiretto (trasformazione in vapore nelle centrali termoelettriche dove l'acqua viene anche impiegata per il raffreddamento degli impianti). La produzione idroelettrica non comporta consumi idrici o degrado delle caratteristiche di qualità, dato che l'acqua viene restituita al corpo idrico dopo il suo utilizzo. Questo tipo di uso risulta, tuttavia, spesso in conflitto con gli altri usi della risorsa e con le esigenze di conservazione delle caratteristiche naturali dei corpi idrici.

Per usi estetico-ricreativi si intendono le acque destinate alla balneazione, alle attività alieutiche, alla salvaguardia del patrimonio naturalistico-ambientale, ai fini della sua fruizione turistica.

Dai dati elaborati da IRSA-CNR<sup>11</sup> (1999) relativi al prelievo idrico, si evince che l'uso potabile conta per il 19%, l'uso energetico per il 14, l'uso industriale per il 19, mentre è preponderante l'uso irriguo che arriva al 48% della totalità dei prelievi.

---

<sup>11</sup> <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/acqua/gestione-delle-risorse-idriche-in-italia/usi>

Il vigente quadro normativo (legge n.183/89, legge n.36/94, dlgs n.152/99) definisce prioritaria la tutela della vita acquatica ("uso ambientale"), alla quale deve essere destinata una quota dei deflussi minimi vitali (Dmv), cioè la portata minima necessaria a garantire comunque la salvaguardia delle strutture naturali dei corsi d'acqua e la presenza delle biocenosi tipiche corrispondenti alle condizioni naturali locali.

## LO STATO DI SEVERITÀ IDRICA A SCALA NAZIONALE

Lo stato di severità idrica a scala nazionale qui riportato è ottenuto sulla base delle risultanze delle riunioni degli Osservatori distrettuali permanenti per gli utilizzi idrici <sup>12</sup> e degli aggiornamenti comunicati dalle Autorità di Bacino Distrettuale, che coordinano gli Osservatori. Gli Osservatori sono stati istituiti, a partire dal 2016, nei sette Distretti idrografici in cui è ripartito il territorio nazionale, e costituiscono misura del Piano di Gestione delle Acque, ai sensi della Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE <sup>13</sup>. Gli Osservatori si configurano, pertanto, come strumento a supporto del governo integrato dell'acqua e forniscono gli indirizzi per la regolamentazione dei prelievi e degli usi e delle possibili compensazioni, in particolar modo in occasione di eventi di siccità e/o di scarsità idrica.

A seguito dell'emanazione del c.d. decreto siccità D.L. 39/2023<sup>14</sup> e della sua successiva conversione in legge, con la legge 13 giugno 2023, n. 68 <sup>15</sup>, l'Osservatorio diviene organo dell'Autorità di Bacino Distrettuale, ai sensi dell'art. 63, comma 3, del decreto legislativo n.

---

<sup>12</sup> [https://www.isprambiente.gov.it/pre\\_meteo/idro/idro.html#osservatori](https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/idro.html#osservatori)

<sup>13</sup> <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0060-20141120>

<sup>14</sup> Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2023

<sup>15</sup> Gazzetta Ufficiale n. 136 del 13 giugno 2023

152 del 3 aprile 2006 (c.d. T.U. Ambientale), e opera sulla base degli indirizzi adottati ai sensi dell'art. 63, commi 2 e 5 dello stesso decreto legislativo.

Le attività degli Osservatori distrettuali permanenti per gli utilizzi idrici fanno riferimento alle situazioni corrispondenti a diversi scenari di severità idrica così individuati:

-situazione normale ossia scenario non critico, in cui i valori degli indicatori di crisi idrica (portate/livelli/volumi/accumuli) sono tali da prevedere la capacità di soddisfare le esigenze idriche del sistema naturale e antropico, nei periodi di tempo e nelle aree considerate;

-scenario di severità idrica bassa: in cui la domanda idrica è ancora soddisfatta, ma gli indicatori mostrano un trend peggiorativo, le previsioni climatiche mostrano ulteriore assenza di precipitazione e/o temperature eccedenti i valori ordinari per il periodo successivo;

-scenario di severità idrica media: lo stato di criticità si intensifica in quanto le portate in alveo risultano inferiori alla media, la temperatura elevata determina un fabbisogno idrico superiore alla norma, i volumi accumulati negli invasi e nei serbatoi non sono tali da garantire gli utilizzi idropotabili, irrigui, industriali e ambientali con tassi di erogazione standard. Sono probabili danni economici e impatti reversibili sull'ambiente;

-scenario di severità idrica alta: sono state prese tutte le misure preventive ma prevale uno stato critico non ragionevolmente prevedibile, nel quale la risorsa idrica non risulta sufficiente a evitare danni al sistema, anche irreversibili. Sussistono le condizioni per la dichiarazione dello stato di siccità prolungata ai sensi dell'art. 4.6 della Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE (Water Framework Directive 2000/60/EC) o, in casi più gravi, per l'eventuale richiesta, da parte delle Regioni interessate, della dichiarazione dello stato di

emergenza nazionale, ai sensi della L. 225/1992, come modificata dalla L. 100/2012, e secondo quanto previsto dalla Dir. PCM 26 ottobre 2012.

Sulla base delle riunioni ultime degli Osservatori e dei successivi aggiornamenti, la situazione sullo stato di severità idrica a scala nazionale al 10/05/2024 è quella riportata in Figura 7, ottenuta considerando la situazione media in ciascun Distretto idrografico, così come riportata dall'Osservatorio. Trattandosi di situazioni medie a livello distrettuale, si sottolinea la possibilità che ci siano anche aree all'interno dei singoli Distretti idrografici con uno stato di severità idrica differente (inferiore o superiore rispetto a quello del Distretto). Pertanto, è sempre necessario fare riferimento ai Bollettini dei singoli Osservatori e alle sintesi sotto riportate per una panoramica completa della situazione nei singoli Distretti idrografici.

A completamento del quadro delineato dai Bollettini, è riportata la Sintesi condivisa del Gruppo tecnico per le previsioni mensili e stagionali <sup>16</sup>, coordinato dal Dipartimento della Protezione Civile e riunitosi in data 29/02/2024.

Le sintesi relative allo stato di severità idrica per ciascun Osservatorio distrettuale sono a cura della corrispondente Autorità di Bacino Distrettuale, che ne coordina le attività.

L'ISPRA, tramite il Comitato tecnico di coordinamento nazionale degli Osservatori, sotto il coordinamento dell'attuale Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica<sup>17</sup>, ha il compito di promuovere l'armonizzazione su tutto il territorio nazionale dei criteri da adottare per l'individuazione e la raccolta dei dati necessari alla gestione delle risorse idriche, per il monitoraggio degli eventi di siccità e scarsità idrica e per la determinazione dei livelli di

---

<sup>16</sup> [https://www.isprambiente.gov.it/pre\\_meteo/idro/SeverIdrica.html#PrevStag](https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/SeverIdrica.html#PrevStag)

<sup>17</sup> <https://www.mase.gov.it/>

severità idrica, basati su dati ufficiali e valutazioni solide e coerenti con le valutazioni effettuate dagli enti territoriali afferenti agli stessi Osservatori.



Figura 7, Stato di severità idrica a livello nazionale

## STABILIRE LE PRIORITÀ DEGLI USI

La definizione di opportune misure di mitigazione richiede una preliminare scelta delle priorità da destinare ai diversi usi idrici. Tali priorità possono riguardare sia la ripartizione di eventuali deficit idrici, sia l'implementazione di misure orientate a ridurre gli impatti.

Sebbene la scelta delle priorità va fatta sulla base delle particolari condizioni economiche, sociali, istituzionali, in generale possono considerarsi due livelli di priorità:

-Prima priorità: Assicurare un adeguato approvvigionamento idrico per gli usi domestici in relazione ai requisiti per la salute, la sicurezza e il benessere pubblico.

-Seconda priorità: Minimizzare gli effetti avversi della siccità sull'economia, sull'ambiente e sul benessere sociale.

In Italia, la L. 36/94, impone che subito dopo il consumo umano sia assicurata la priorità all'uso agricolo.

## STABILIRE GLI OBIETTIVI DI GESTIONE PER OGNI LIVELLO DI SICCIÀ

-Pre-allerta

L'obiettivo di gestione di questa fase di percezione iniziale del fenomeno siccitoso è quello di essere pronti all'eventualità di una siccità, assicurando il consenso pubblico sull'adozione di eventuali misure di mitigazione. Pensate allo scopo di evitare situazioni di allerta o di emergenza, le azioni prese in considerazione nello scenario di pre-allarme sono generalmente di natura indiretta, vengono attuate volontariamente dagli stakeholders e presentano un costo solitamente basso. Gli interventi principali individuati in questa fase riguardano essenzialmente la comunicazione e la sensibilizzazione degli stakeholders e

l'intensificazione del monitoraggio (ad es. con la creazione o l'attivazione di appositi comitati per affrontare la siccità) e la valutazione di scenari futuri, soprattutto quelli peggiori.

-Allerta

L'obiettivo di gestione relativo a questo livello di rischio è legato al superamento della siccità evitando la situazione di emergenza attraverso politiche di conservazione dell'acqua e individuazione di fonti idriche addizionali, al fine di garantire l'approvvigionamento idrico almeno durante l'arco di tempo necessario per definire e implementare misure di emergenza. A differenza di quelle da adottare nello scenario di pre-allerta, le misure prese in esame in questa situazione sono generalmente di natura diretta, non su base volontaria per gli stakeholders e presentano generalmente un costo di implementazione che può avere impatti significativi sull'economia degli stakeholders. Di natura non strutturale in genere, tali interventi prevedono razionamenti parziali per gli usi dell'acqua ad eccezione di quella ad uso potabile e cambiamenti nella gestione delle risorse anche con la limitazione dei diritti degli utenti e delle priorità relative alle condizioni normali.

-Emergenza

In questo caso l'obiettivo di gestione è relativo alla mitigazione degli impatti ed alla minimizzazione dei danni, mentre la priorità prefissata è quella di poter garantire Linee guida per la gestione delle siccità 58 l'approvvigionamento civile in primo luogo e successivamente quello agricolo. Le misure da adottare nella fase di emergenza presentano alti costi economici e sociali, sono di natura diretta e generalmente vengono approvate come azioni di interesse generale sotto condizioni di emergenza. Tali misure eccezionali includono principalmente interventi di natura non strutturale (razionamenti idrici, sussidi e prestiti a basso tasso di interesse, incremento della copertura assicurativa).

## INDIVIDUAZIONE DELLE MISURE DI MITIGAZIONE DELLA SICCIÀ

-Criteri per classificare le misure di mitigazione delle siccità.

Le misure da implementare per prevenire e mitigare gli impatti delle siccità possono essere classificate in diversi modi. Una prima classificazione è basata sulla finalità delle misure stesse, distinguendo tra misure orientate all'incremento delle risorse, alla riduzione delle domande idriche ovvero alla minimizzazione degli impatti. Altre classificazioni più recenti fanno riferimento alla modalità di implementazione delle misure, distinguendo tra misure a lungo termine e a breve termine. Le prime sono misure messe in atto prima del verificarsi di un evento di siccità e sono finalizzate a ridurre la vulnerabilità dei sistemi di approvvigionamento attraverso interventi prevalentemente di tipo strutturale e in genere individuate nei documenti di pianificazione generale quali, ad esempio, il Piano di Bacino.

Le misure a breve termine, invece, sono misure implementate dopo l'inizio di un evento di siccità sulla base di un piano redatto in anticipo per ridurre la gravità degli impatti di una siccità in atto. Esse vanno inserite in appositi piani atti a fronteggiare le situazioni di emergenza che, preparati in anticipo, vanno aggiornati ed implementati allorché i sistemi di monitoraggio indicano una condizione incipiente di siccità grave. In Figura 8 è riportata la lista delle principali possibili misure di mitigazione sia a breve che a lungo termine suddivise

nelle tre categorie sopra richiamate con l'indicazione dei settori (civile, irriguo, ecc.) ai quali esse si applicano.<sup>18</sup>

Categoria	Breve termine	Settori			
Riduzione delle domande	Campagne di sensibilizzazione al risparmio idrico	C	A	I	R/A
	Limitazione di usi urbani (lavaggio auto, irrigazione giardini)	C			
	Limitazione dell'irrigazione di colture annuali	A			
	Manovre tariffarie	C	A	I	R/A
	Razionamento delle erogazioni	C	A	I	R/A
Incremento delle risorse idriche	Incremento dell'efficienza dei sistemi idrici esistenti (ricerca perdite, regole di esercizio, etc.)	C	A	I	
	Uso di fonti d'emergenza (risorse aggiuntive di scarsa qualità e/o di alto costo)	C	A	I	R/A
	Sovrasfruttamento acquiferi (uso di riserve strategiche)	C	A	I	
	Uso di risorse destinate in condizioni normali a scopi ricreativi o ecologici	C	A	I	R/A
	Cessione temporanea di cessioni idriche				
Minimizzazione degli effetti della siccità	Riallocazione temporanea delle risorse idriche	C	A	I	R/A
	Indennizzi pubblici per i danni	C	A	I	R/A
	Sgravi fiscali (riduzione o rinvio pagamenti)	C	A	I	R/A
	Programmi di riabilitazione			I	R/A
<b>Lungo termine</b>					
Riduzione delle domande	Incentivi per il risparmio idrico	C	A	I	R/A
	Sistemi di irrigazione e tecniche agronomiche per ridurre i consumi	A			
	Introduzione di colture meno idroesigenti o trasformazioni in asciutte	A			
	Rete duale di approvvigionamento civile	C			
	Riciclo nell'industria	A			
Incremento delle risorse idriche	Collegamenti bidirezionali tra sistemi acquedottistici	C	A	I	
	Riutilizzo di acque reflue depurate	C	A	I	R/A
	Trasferimenti idrici tra bacini idrografici	C	A	I	R/A
	Nuovi serbatoi di regolazione o incremento di capacità	C	A	I	
	Uso di acquiferi come riserve di acqua sotterranee	C	A	I	
Minimizzazione degli effetti della siccità	Dissalazione di acque salate o salmastre	C	A		R/A
	Controllo delle perdite di evaporazione	C	A	I	
	Campagne di informazione per migliorare la preparazione alla siccità	C	A	I	
	Riallocazione delle risorse sulla base di requisiti di qualità	C	A	I	R/A
Sviluppo di Piano di emergenza e Piani di gestione di crisi idriche	Sviluppo di sistemi di preannuncio monitoraggio	C	A	I	R/A
	Sviluppo di Piano di emergenza e Piani di gestione di crisi idriche	C	A	I	R/A
	Assicurazione volontaria		A	I	

Settore: C = civile; A = agricolo; I = industriale; R = ricreativo; A = ambientale

Figura 8, Principali misurazioni di mitigazione della siccità

<sup>18</sup> Rossi G., (2020) -*Drought mitigation measures: a comprehensive framework*, in J.V. Vogt, F. Somma, (eds.), *Drought and Drought mitigation in Europe*, Kluwer Academy Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 223-246.

## SCelta DELLA MISCELA PREFERIBILE DELLE MISURE

La redazione dei piani richiede l'individuazione dell'insieme di misure più appropriate per prevenire e mitigare gli impatti di siccità. Tale individuazione dipende dalle caratteristiche del sistema analizzato, da fattori tecnico-economici ma anche socio-politici.

Spesso può risultare necessario procedere alla scelta di una combinazione di misure a lungo termine e a breve termine. Se tale scelta fosse fatta su base esclusivamente economica richiederebbe di eguagliare il costo incrementale degli interventi a lungo termine con il costo incrementale di implementazione delle misure di emergenza relativo all'evento di siccità che si verifica. Una più avanzata procedura potrebbe essere applicata qualora si consideri la distribuzione di probabilità dei deficit idrici, ottenuta ad esempio simulando il comportamento del sistema di approvvigionamento idrico in presenza di differenti misure di mitigazione della siccità.

Tuttavia, a causa della varietà degli impatti della siccità e delle azioni da adottare per fronteggiare in particolare gli impatti economici, ambientali e sociali, una valutazione fatta solo su base economica non appare adeguata, anche da un punto di vista teorico, e non risulta comunque sufficiente per interpretare il reale processo decisionale. Appare perciò opportuno fare ricorso ad una tecnica di valutazione multi-criteriale che consenta di prendere in conto i punti di vista dei vari stakeholders sulle alternative da confrontare.

## PROCESSO DI ATTUAZIONE DEGLI INTERVENTI

Come già menzionato, un approccio di tipo preventivo opera in anticipo rispetto all'inizio di una grave crisi idrica. Tale approccio risulta composto essenzialmente da due fasi differenti: la preparazione di appositi piani che permettono di evitare o di ridurre le conseguenze dell'emergenza idrica e l'attuazione di tali piani quando la siccità si verifica. Le diverse attività che caratterizzano l'approccio preventivo, secondo le due fasi principali individuate, sono riportate in Figura 9.

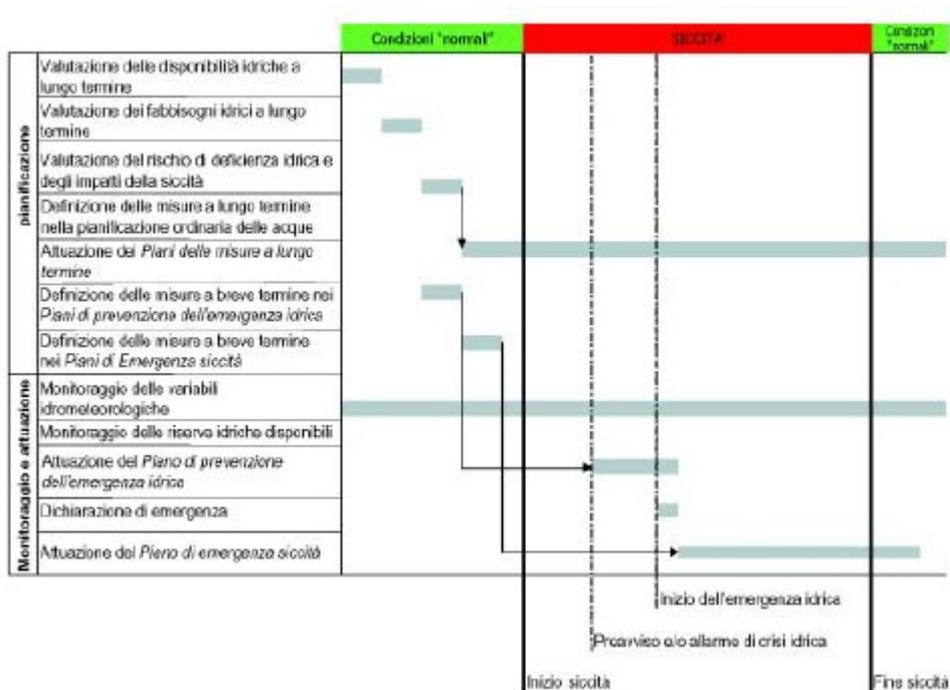


Figura 9, Approccio preventivo nella gestione della siccità

Come riportato schematicamente in tale figura, in seguito ad una valutazione iniziale delle disponibilità e dei fabbisogni idrici a lungo termine, la prima fase prevede una valutazione

del rischio di deficienza idrica attraverso un'analisi delle varie componenti di un sistema di approvvigionamento idrico individuando quelle più vulnerabili al fenomeno della siccità attraverso indagini di carattere economico, sociale e ambientale. Analizzati gli impatti sui diversi settori interessati si può passare ad una previsione degli interventi a lungo termine nell'ambito della pianificazione ordinaria. In particolare, nel caso della normativa italiana vigente, è possibile prevedere un Piano delle misure a lungo termine da introdurre nel Piano stralcio risorse idriche del Piano di bacino. La valenza di tale Piano consiste nella possibilità di ridurre la vulnerabilità alla siccità dei sistemi di approvvigionamento idrico facendo leva su un incremento di risorse e/o su una riduzione della domanda o delle perdite e degli sprechi. Invece, sono rivolti direttamente alla lotta alla siccità gli altri due piani previsti in questa fase:

- Piano di prevenzione dell'emergenza idrica, di competenza degli enti gestori dei sistemi di approvvigionamento idrico;
- Piano di emergenza siccità, di competenza delle Regioni o delle Autorità di bacino.

I primi dovrebbero comprendere le misure rivolte ad evitare l'insorgere di vere emergenze idriche. Il Piano di emergenza dovrebbe comprendere una serie di misure a breve termine da attuare quando la siccità per durata o severità produce impatti gravi (emergenza idrica). La seconda fase dell'approccio pro-attivo prevede un monitoraggio continuo delle variabili idrometeorologiche e delle riserve idriche disponibili volto ad identificare situazioni di crisi idrica, preavviso e allarme di crisi idrica e, quindi, di avviare le misure necessarie ad evitare la vera e propria emergenza idrica. Tuttavia, nel caso in cui non sia possibile evitare il verificarsi di una crisi idrica che assuma i contorni di una vera e propria calamità naturale (a

seguito di una dichiarazione del governo), si procede all'attuazione del Piano di emergenza fino al ripristino di condizioni normali.

#### *1.4 LAVORI E RICERCHE SVOLTE NELL'AREA OGGETTO DI STUDIO*

- INTERAZIONE ACQUE SOTTERRANEE-ACQUE SUPERFICIALI RILEVATE DALLE TENDENZE METEOROLOGICHE E DALLE FLUTTUAZIONI DELLE ACQUE SOTTERRANEE SUL LIVELLO DI UN CORSO D'ACQUA<sup>19</sup>

Lo scopo di questo studio è analizzare l'interazione tra le acque sotterranee (GW) e superficiali (SW) in un bacino idrografico sfruttato per l'approvvigionamento idrico tramite pozzi. Il sottobacino, situato nel bacino dell'Aspio, è soggetto a un monitoraggio idrologico continuo. Con una superficie di 14 km<sup>2</sup>, è attraversato dal corso d'acqua Betelico e presenta una falda acquifera non confinata nei depositi alluvionali e una semi-confinata nelle formazioni carbonatiche. L'obiettivo è individuare i fattori che hanno causato il prosciugamento del corso d'acqua negli ultimi due anni, mediante un'analisi delle serie temporali di piogge, temperature dell'aria, livelli piezometrici e del corso d'acqua, nonché dei tassi di pompaggio dei pozzi. Sono stati esaminati i dati pluviometrici degli ultimi 30 anni, calcolando l'Indice di Precipitazione Standard (SPI), e analizzando la frequenza degli eventi piovosi intensi. La correlazione tra il livello piezometrico e quello del corso d'acqua è stata studiata negli ultimi sei anni. Inoltre, è stato confrontato il livello della falda freatica con il flusso di base del corso d'acqua, evidenziando l'interconnessione tra GW e SW nel corso del tempo. L'analisi del surplus idrico, insieme alla caratterizzazione degli eventi

---

<sup>19</sup> Fronzi D. et al., (2022) - *Groundwater-surface water interaction revealed by meteorological trends and groundwater fluctuations on stream water level*, Flowpath.

piovosi, suggerisce che il prosciugamento del corso d'acqua sia principalmente dovuto alla diminuzione della ricarica. Questo studio sottolinea l'importanza di esaminare le interazioni tra GW e SW in un contesto climatico mutevole, combinando l'analisi statistica delle serie temporali con il monitoraggio sul campo.

## - IL PROMONTORIO CALCAREO DEL MONTE CONERO: IL CONTRIBUTO DEGLI ISOTOPI STABILI ALL'IDENTIFICAZIONE DELL'AREA DI RICARICA DEGLI ACQUIFERI<sup>20</sup>

Questa analisi è stata condotta ai fini di approfondire la comprensione delle caratteristiche di ricarica degli acquiferi, concentrandosi sul caso delle dorsali carbonatiche nell'Appennino centrale. In particolare, viene esaminata l'interazione tra tecniche isotopiche e rilievi idrogeologici per valutare l'area di ricarica del sistema della dorsale calcarea del Monte Conero. Questo studio si è concentrato su un'area pilota con aree di affioramento dell'acquifero ben definite al fine di contribuire alla valutazione dell'area di ricarica dell'acquifero. Durante l'indagine, è stata condotta un'analisi idrogeologica approfondita per identificare le aree di infiltrazione nell'acquifero, suddividendo l'intera formazione geologica in diversi membri con comportamenti idrogeologici distinti. Inoltre, sono stati effettuati prelievi periodici di acque sotterranee e precipitazioni a varie altitudini per studiare la composizione isotopica nel corso di circa 4 anni. L'analisi ha coinvolto sia la media ponderata che la media aritmetica degli isotopi nel calcolo del gradiente, confrontandoli tra

---

<sup>20</sup> *Mussi M. et al., (2017) - The Mt Conero limestone ridge: the contribution of stable isotopes to the identification of the recharge area of aquifers. Ital. J. Geosci., Vol. 136, No. 2, 186-197.*

loro per ottenere una comprensione completa della dinamica di ricarica dell'acquifero. I risultati hanno evidenziato l'importanza dei membri più permeabili dell'acquifero e la dipendenza del meccanismo di ricarica sia dai valori isotopici delle precipitazioni locali sia dalle diverse condizioni di infiltrazione nei litotipi.

- VERSO LA PREDIZIONE DEL LIVELLO DELLE ACQUE SOTTERRANEE UTILIZZANDO IL METODO DI PREVISIONE PROPHET SFRUTTANDO UN SISTEMA DI MONITORAGGIO IDROGEOLOGICO AD ALTA RISOLUZIONE <sup>21</sup>

Lo studio compiuto è volto a prevedere la disponibilità idrica, un tema di crescente interesse negli ultimi decenni a causa della pressione antropica e dei cambiamenti climatici che minacciano di esaurire le risorse idriche sotterranee. Numerosi studi di ricerca, condotti a varie scale spaziali, hanno investigato con successo la previsione dei livelli delle acque sotterranee su base giornaliera o stagionale, utilizzando dati meteorologici (come precipitazioni e temperature) e dati osservati sui livelli delle acque sotterranee attraverso approcci basati sui dati. Tuttavia, solo poche ricerche combinano variabili meteorologiche e dati sui livelli delle acque sotterranee con le variabili monitorate nella zona insatura (come il contenuto d'acqua nel suolo, la temperatura del suolo e la conducibilità elettrica bulk), e nella maggior parte di questi studi, la zona è monitorata solo a una singola profondità.

---

<sup>21</sup> Fronzi D. et al., (2023) - *Towards Groundwater-Level Prediction Using Prophet Forecasting Method by Exploiting a High-Resolution Hydrogeological Monitoring System*. Water 2024.

L'approccio di questa ricerca utilizza un sistema di monitoraggio idrogeologico ad alta risoluzione spazio-temporale sviluppato nel Parco Regionale del Monte Conero per prevedere le tendenze del livello delle acque sotterranee di un acquifero superficiale utilizzato per scopi potabili. L'attrezzatura sul campo comprende una stazione termopluviometrica, tre sonde per il contenuto volumetrico d'acqua, la conducibilità elettrica e la temperatura del suolo nella zona insatura a profondità di 0,6 m, 0,9 m e 1,7 m rispettivamente, e un piezometro dotato di una sonda permanente per il livello dell'acqua. Il periodo di monitoraggio è iniziato a gennaio 2022 e le variabili sono state registrate ogni quindici minuti per oltre un anno idrologico, ad eccezione del livello delle acque sotterranee, registrato su base giornaliera. Il modello sviluppato è costituito da tre "scatole virtuali" (atmosfera, zona insatura e zona satura), per le quali le variabili idrologiche che caratterizzano ciascuna scatola sono state integrate in un modello di previsione delle serie temporali basato su Prophet, sviluppato in Python. Ogni parametro misurato è stato valutato per determinare la sua influenza sulla previsione del livello delle acque sotterranee. Il modello è stato calibrato per ottenere una previsione accettabile (circa il 20% prima del periodo monitorato). L'analisi quantitativa ha rivelato che i risultati migliori sono ottenuti utilizzando le variabili idrologiche raccolte nella zona insatura a una profondità di 1,7 m sotto il livello del suolo, con un Errore Assoluto Medio (MAE) di 0,189, un Errore Percentuale Medio Assoluto (MAPE) di 0,062, un Errore Quadratico Medio Radice (RMSE) di 0,244 e un coefficiente di correlazione di 0,923. Questo studio evidenzia l'importanza di calibrare i metodi di previsione del livello delle acque sotterranee esplorando le variabili idrologiche della zona insatura insieme a quelle della zona satura e ai dati meteorologici. Sottolinea inoltre il ruolo fondamentale della previsione delle serie temporali idrologiche nell'ottimizzazione della gestione delle acque sotterranee, un aspetto controverso ma vitale.

## - LABORATORIO SUL CAMPO PERMANENTE PER MONITORARE LA QUALITÀ DELL'ACQUA E I FLUSSI NELLA ZONA INSATURA<sup>22</sup>

Le ricerche in questione sono utilizzate allo scopo di esaminare gli impatti del cambiamento climatico e delle attività antropiche sulle risorse idriche sotterranee in un bacino appenninico su scala ridotta, soggetto a significative pressioni climatiche negli ultimi anni. Questo contesto geografico offre un'opportunità unica per comprendere i processi idrologici e le interazioni tra la superficie terrestre e il sottosuolo. Il focus principale è sull'importanza del monitoraggio continuo sul campo e sull'analisi della qualità dell'acqua per lo sviluppo di modelli concettuali idrogeologici robusti. Questi modelli sono essenziali nella prevenzione e mitigazione dei rischi legati all'inquinamento delle acque sotterranee, specialmente nella zona insatura, e per una migliore comprensione dei meccanismi di ricarica in ambienti eterogenei. L'attuale ricerca (ancora in corso), con un particolare interesse sulle analisi isotopiche nella zona insatura, fornisce una base solida per lo sviluppo di modelli numerici accurati che descrivono i processi di flusso e trasporto. L'obiettivo finale è migliorare le strategie di gestione e protezione delle risorse idriche sotterranee, contribuendo così a promuovere una maggiore sostenibilità ambientale e una maggiore sicurezza nell'approvvigionamento idrico.

---

<sup>22</sup> Fronzi D. et al., (2022) - *A permanent field laboratory to monitor water quality and fluxes in the vadose zone*. GIT 2022, Fondi.

## - PARAMETRI DI FLUSSO IN ACQUIFERI ALLUVIONALI POROSI VALUTATI TRAMITE TRACCIANTI<sup>23</sup>

In questo studio, sono stati condotti esperimenti utilizzando dispositivi per monitorare il livello dell'acqua e pozzi che prelevano acqua dalla pianura alluvionale relativa alla zona del Betelico. L'obiettivo è confrontare come si comportavano diversi materiali traccianti, come Uranina e cloruro di sodio, nel valutare le caratteristiche di un acquifero alluvionale. I test sono stati effettuati sia su pozzi singoli che multipli durante i mesi invernali e primaverili dell'anno corrente (2016). Questi test hanno coinvolto un dispositivo di monitoraggio del livello dell'acqua con una profondità di 30 metri e 4 pozzi che sono collegati all'acquedotto e hanno una profondità compresa tra 12 e 20 metri. I risultati ottenuti dai test con i diversi materiali traccianti hanno mostrato che ci sono zone in cui il flusso dell'acqua è più veloce nella pianura alluvionale. Queste zone si trovano a diverse profondità e sono caratterizzate dalla presenza di strati di ghiaia e sabbia. Inoltre, è stato calcolato che la velocità media del flusso dell'acqua è di circa 3 centimetri al giorno dai test eseguiti sui singoli pozzi, sia sul dispositivo di monitoraggio del livello dell'acqua che sui pozzi stessi. Inoltre, la direzione principale del flusso dell'acqua è risultata essere lungo il corso principale del fiume, come dimostrato dai test effettuati su più pozzi, in cui il materiale tracciante è stato iniettato nel dispositivo di monitoraggio del livello dell'acqua e poi recuperato dai pozzi. Questi risultati confermano che i materiali traccianti fluorescenti sono uno strumento affidabile e prezioso per determinare la velocità e la direzione del flusso dell'acqua sotterranea, così come per valutare i parametri di dispersione, anche quando si tratta di acquiferi composti da più strati.

---

<sup>23</sup> Aquilanti L. et al., (2017) - *Parameters of flow in porous alluvial aquifers evaluated by tracers*. Flowpath, 3<sup>rd</sup> National meeting on hydrogeology, Cagliari, 14-16 June 2017.

In particolare, il tracciante DNA si è dimostrato molto utile nel rilevare i circuiti più veloci e il flusso verticale dell'acqua, anche in acquiferi a più strati. I risultati di questi studi, essendo analoghi agli studi compiuti in questa tesi, verranno utilizzati nella sezione 5.4 come confronto per valutare la veridicità dei parametri ottenuti.

### *1.5 SCOPO DELLE RICERCHE EFFETTUATE*

Questa tesi si propone di approfondire lo studio di un acquifero specifico, con l'obiettivo di fornire una caratterizzazione dettagliata che possa supportare la corretta gestione delle risorse idriche. La scelta dell'acquifero in esame è stata dettata dalla sua rilevanza locale e dalla necessità di un approccio scientifico rigoroso che possa offrire dati e modelli utili per una gestione integrata e sostenibile.

Il lavoro di ricerca verrà strutturato in diverse fasi, ognuna delle quali mirata a esplorare aspetti specifici dell'acquifero. In primo luogo, sarà condotta una revisione della letteratura per identificare le metodologie più appropriate per la caratterizzazione degli acquiferi. La seconda fase della ricerca è quella di caratterizzare la zona in esame, essendo che le prove sperimentali che verranno effettuate, come ogni altra prova di campo, non possono prescindere dal contesto in cui si trovano e dalle condizioni a contorno in cui vengono condotte. Il luogo in cui esse sono svolte riveste un'importanza determinante, influenzando la validità e l'applicabilità dei risultati ottenuti. Si porrà dunque l'attenzione sulla zona interessata, offrendo un contesto fondamentale per comprendere al meglio il significato e l'impatto delle ricerche effettuate.

Successivamente, saranno raccolti dati di campo attraverso campagne di monitoraggio e campionamento, che forniranno informazioni dettagliate sulla stratigrafia, la permeabilità e la qualità delle acque sotterranee. Le prove di campo scelte ai fini di raccolta dati risultano

essere la prova di pompaggio dell'acqua e la prova di immissione di tracciante nell'acquifero.

Il presente lavoro si propone di dare un piccolo contributo alla caratterizzazione idrogeologica di una parte limitata delle risorse idriche (sebbene tale studio è opportuno che venga esteso all'intero territorio nazionale).

In particolare questo studio idrogeologico ha lo scopo di analizzare la via di circolazione preferenziale che le acque sotterranee percorrono all'interno degli acquiferi ed individuare le condizioni e le modalità, per poi utilizzare il tutto ai fini di fornire una base solida per sviluppare strategie di gestione delle risorse idriche che siano in grado di garantire l'equilibrio tra il prelievo e la ricarica dell'acquifero, minimizzando i rischi di esaurimento e deterioramento delle acque.

## **INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO**

### *2.1 CAMPO PROVE- ZONA BETELICO (AN)*

Facendo una breve introduzione dal punto di vista geologico, il campo prove nel quale sono state eseguite le sopracitate ricerche, si trova in zona Betelico, tra le campagne dell'Anconetano (come visibile in Figura 10 e in Figura 11). In tale luogo, l'UNIVPM, e nello specifico il dipartimento SIMAU (Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica) -sezione geologia applicata, ha disposto due piezometri, il piezometro interno Betelico visibile in **Error! Reference source not found.** e il piezometro esterno Betelico visibile in **Error! Reference source not found.**, che si trovano il primo a monte del secondo.

PIEZOMETRO INTERNO BETELICO :  $43^{\circ}32'03''\text{N}$   $13^{\circ}34'27''\text{E}$ , altitudine: 80 m s.l.m.m.

PIEZOMETRO ESTERNO BETELICO:  $43^{\circ}32'00''\text{N}$   $13^{\circ}34'19''\text{E}$ , altitudine: 76 m s.l.m.m.

In linea d'aria, la distanza tra i due piezometri risulta essere di 216,4 m.

Il diametro di entrambi i piezometri risulta essere 4 pollici= 10,16 cm.

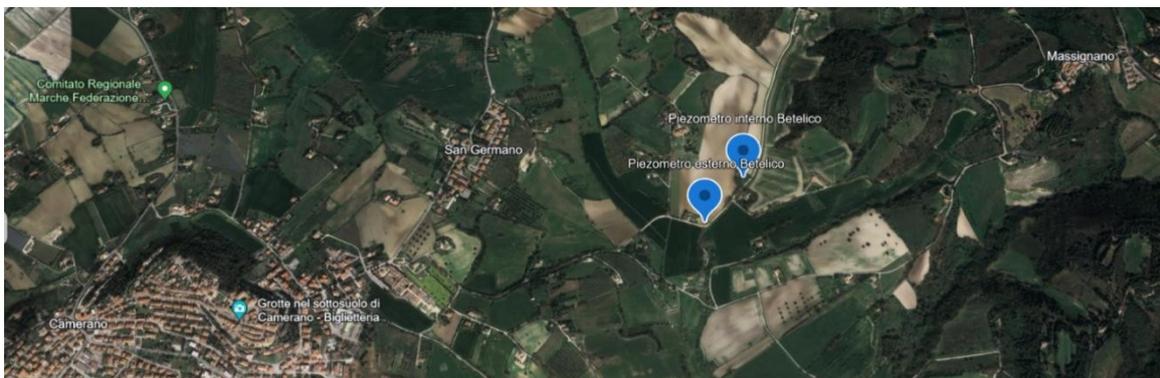


Figura 10, Vista dei piezometri dal satellite (www.earth.google.com)

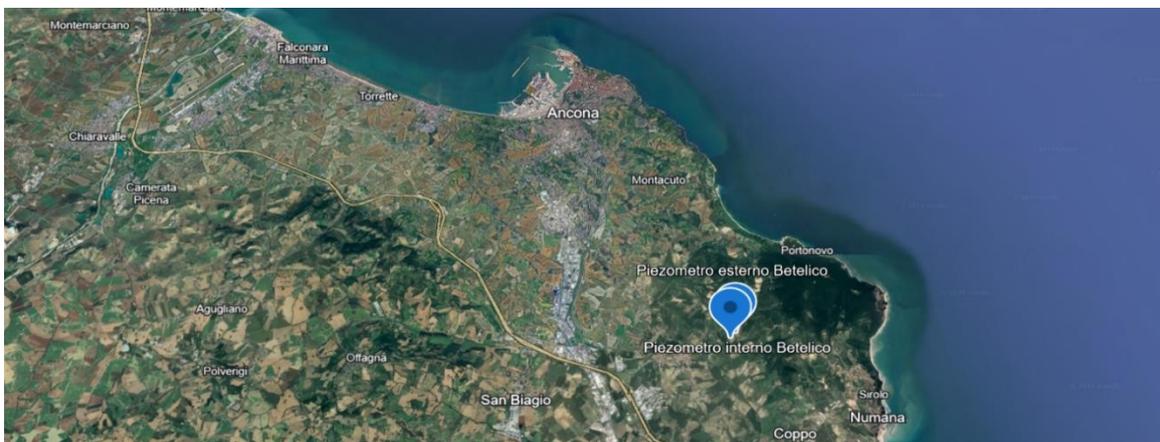


Figura 11, Vista dei piezometri dal satellite (zoom) (www.earth.google.com)



Figura 13, Vista dell'ubicazione del piezometro interno (a monte) ([www.earth.google.com](http://www.earth.google.com))



Figura 13, Vista dell'ubicazione piezometro esterno (a valle) ([www.earth.google.com](http://www.earth.google.com))

Al fine di caratterizzare l'area di interesse è stato condotto il seguente programma di indagine:

- sopralluoghi preliminari e stesura del programma d'indagine;
- rilevamento geologico e geomorfologico;
- controllo dell'idrografia e dei punti d'acqua;
- ricerca dei dati geologici esistenti sia della zona in esame che di quelle limitrofe, ritenuti utili ai fini del presente lavoro.

## 2.2 ANALISI DATI ESISTENTI

I riferimenti litostratigrafici e geotecnici utilizzati nel presente capitolo traggono origine da alcune pubblicazioni consultate:

- ❖ **BOWLES J.E., (1991)** – *Foundation analysis and design*. RmacGraw Hill Libri Italia Ed., Milano.
- ❖ **CALAMITA F. et al., (1986)** – Studi geol. Camerti, volume speciale “La Geologia delle Marche”.

- ❖ **CASADIO M. & ELMI C., (1999)** – *Il manuale del Geologo*. Pitagora Editrice Bologna.
- ❖ **CELLO G. et al., (1995)** - *Tettonica attiva in Appennino centrale ed implicazioni per l'analisi della pericolosità sismica del settore assiale della catena Umbro-Marchigiana-Abruzzese*. Studi Geol. Camerti, XIII, 115-138.
- ❖ **CENTAMORE E. & AL., (1986)** - *Carta Geologica delle Marche in scala 1:250'000* a cura di Centamore E., L.A.C. Firenze.
- ❖ **CENTAMORE E. & DEIANA G., (1986)** - *La geologia delle Marche*. Studi geol. Camerti, Vol. Spec.: 1-145.
- ❖ **CENTAMORE E. et al., (1991)** – *Rappresentazione cartografica alla scala 1:100'000 in: L'Ambiente Fisico delle Marche*. Regione Marche, Assessorato Urbanistica-Ambiente: allegato.
- ❖ **CESTARI F., (1990)** – *Prove geotecniche in sito*. Geo-Graph Ed., Segrate.
- ❖ **CESTELLI GUIDI C., 1981** – *Geotecnica e tecnica delle fondazioni*. Ulrico Hoepli, Milano. Vol. 1 e 2.
- ❖ **COLOMBO P., 1974** – *Elementi di geotecnica*. Zanichelli, Bologna.
- ❖ **CONSIGLIO NAZIONALE RICERCHE (C.N.R.)**. Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (G.N.D.C.I.), Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nell'Italia centrale (I.R.P.I.): “*Carta Inventario dei Movimenti Franosi della Regione Marche ed Aree Limitrofe*. Scala 1:100'000”. Pubblicazione G.N.D.C.I. n° 580.
- ❖ **DESIO A., (1973)** – *Geologia applicata all'ingegneria*. Hoepli, Milano.
- ❖ **LAMBE W.T. & WHITMAN R.V., (1997)** – *Meccanica dei terreni*. Dario Flaccovio Ed., Palermo.

- ❖ **LANCELLOTTA R., (1987)** – *Geotecnica*. Zanichelli, Bologna.
- ❖ **REGIONE MARCHE, (2004)** - Autorità di Bacino Regionale: “Piano stralcio di bacino per l’Assetto Idrogeologico dei bacini di rilievo regionale (PAI)”.
- ❖ **RICCI LUCCHI F., (1978)** – *Sedimentologia, Parte I, II e III*. Cooperativa Libreria Universitaria Editrice, Bologna.

Tali studi, sempre a carattere generale, forniscono utili indicazioni per inquadrare il territorio in esame in un contesto più ampio relativamente alle condizioni geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche.

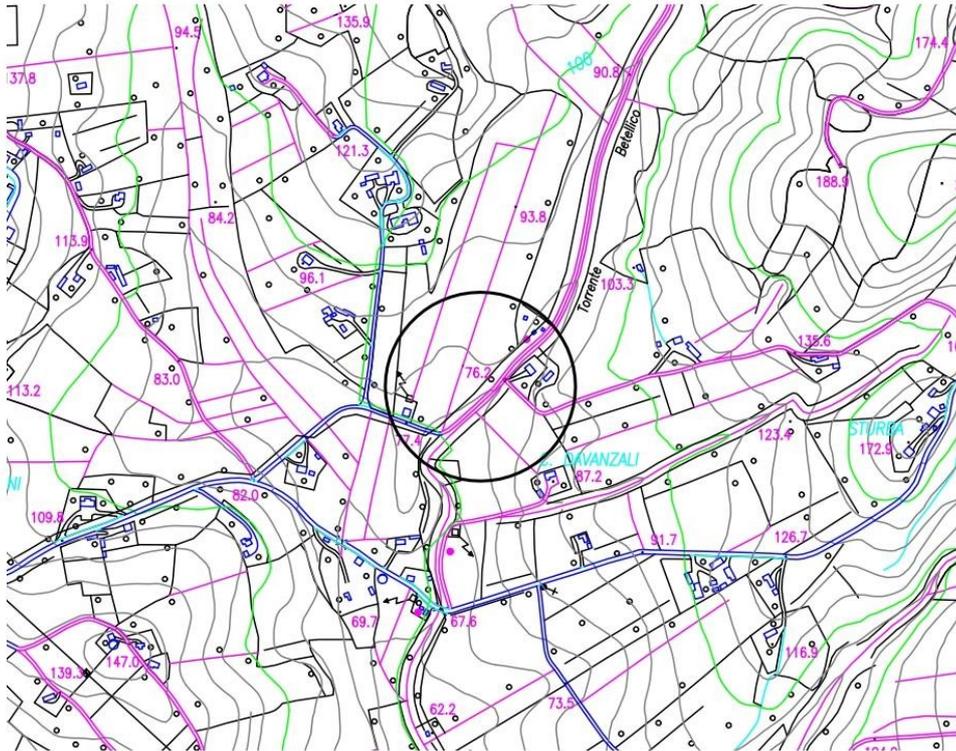
### *2.3 INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO*

Il sito di indagine si localizza nella carta topografica della Regione Marche Foglio n° 293 Osimo, sezione 293070 Camerano in scala 1:10'000 (Figura 14) e più precisamente nella mappa catastale Foglio n° 156 del Comune di Camerano (AN) (Figura 15).

L’area si individua ai piedi del versante occidentale di una dolce collina denominata “La Gradina” (211,7mt), ad una quota variabile da 76 a 80m s.l.m.m.; in destra idrografica del Torrente Betellico.

**COROGRAFIA**

Scala 1:10.000



Carta Topografica  
Foglio n° 293 Osimo  
Sezione n° 293070 Camerano

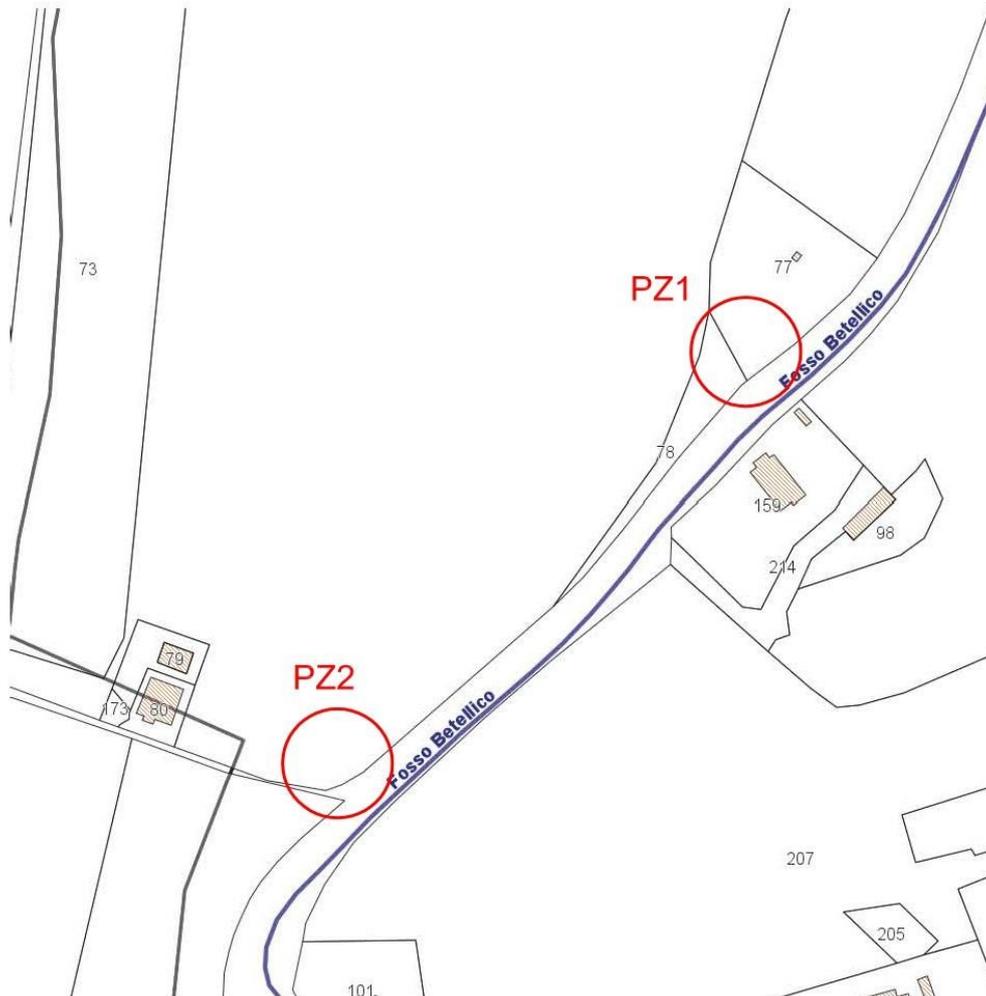


Località: Betellico - Comune di Camerano (AN)

*Figura 14, Corografia dell'area di interesse (www.regione.marche.it)*

**PLANIMETRIA CATASTALE**

Scala 1:2.000



Foglio di mappa n° 156  
Comune di Camerano (AN)

 Area di studio

Località: Betellico - Comune di Camerano (AN)

*Figura 15, Planimetria catastale dell'area di interesse ([www.comune.camerano.an.it](http://www.comune.camerano.an.it))*

## 2.4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE GENERALE

L'Appennino umbro-marchigiano costituisce la porzione più esterna e meridionale dell'Appennino settentrionale ha una tipica forma arcuata, come visibile in Figura 16.

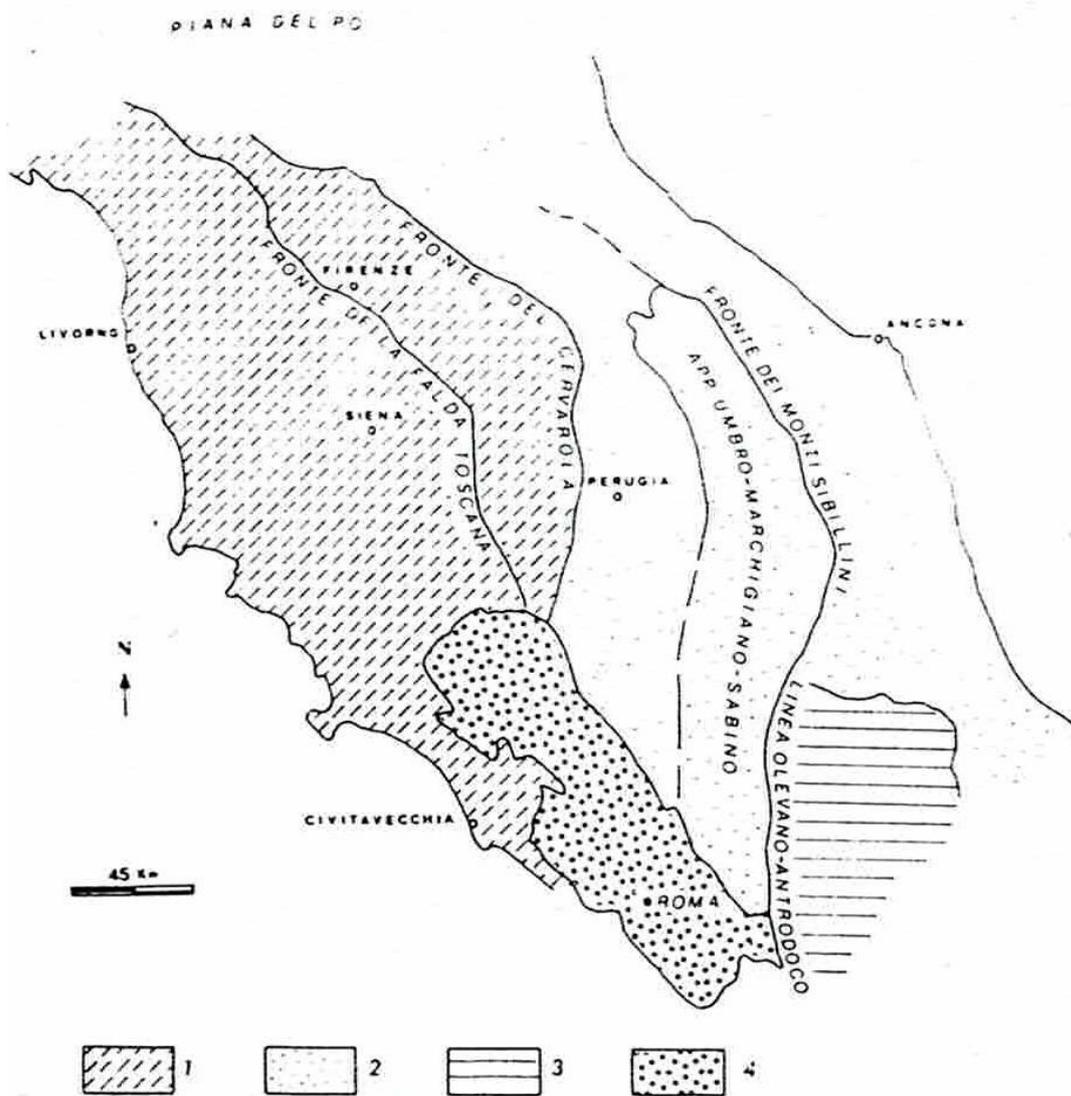


Figura 16, Domini strutturali nell'Appennino centro-settentrionale e rocce vulcaniche pleistoceniche (4): 1) dominio toscano; 2) dominio umbro-marchigiano; 3) dominio laziale-abruzzese (da Calamita F. et al., 1986 – Studi geol. Camerti, volume speciale “la Geologia delle Marche”)

Questa catena appenninica è caratterizzata da pieghe e da sovrascorrimenti neogenici a vergenza principalmente nord-orientale.

L'Appennino umbro-marchigiano rappresenta un segmento post-collisionale del sistema montuoso Mediterraneo Africa-vergente, derivante dalla convergenza e dalla collisione tra il margine continentale Sardo-Corso (di origine europea) e il blocco adriatico (di affinità africana).

Inoltre l'Appennino umbro-marchigiano è un esempio di catena costituita principalmente per *thrust-faults* (a geometria *flat-ramp-flat*) di un *multilayer* sedimentario meso-cenozoico a forte contrasto di competenza.

Il suo attuale assetto strutturale è il prodotto dell'evoluzione di eventi transpressivi prima e transtensivi poi verificatisi a partire dal Tortoniano in concomitanza con un'importante fase tettonica che ha la massima espressione più ad occidente, dove il dominio toscano si accavalla su quello umbro.

Durante la compressione, l'area più interna è migrata verso l'Adriatico e, tra il Tortoniano ed il Pliocene Inf., si sono sviluppate strutture plicative con vergenza orientale e sovrascorrimenti.

Nel Pliocene medio-superiore la tettonogenesi assume un carattere prevalentemente distensivo generando faglie dirette la cui attività, proseguita fino ai tempi recenti, è testimoniata anche da fenomeni sismici.

I principali motivi strutturali che caratterizzano l'area in esame sono dati dal sovrascorrimento dei Monti Sibillini e dalle macro pieghe associate neogeniche e dalle faglie estensive quaternarie che dislocano le strutture compressive della catena.

L'appennino è costituito, partendo dalla base, da un potente complesso calcareo (*Calcarea massiccio*) a cui segue una successione pelagica per uno spessore di circa 900-1'400 m in relazione alla presenza della successione giurassica condensata o completa. Al di sopra di tale successione si hanno i depositi torbiditici silico-clastici (con spessori anche di 2'000 - 3'000 m).

I terreni affioranti nei termini triassico-paleogenici si possono riferire ad una sedimentazione di margine continentale passivo e di avanfossa mentre per i termini mio-pliocenici si ha una sedimentazione di tipo piggy-back, come visibile in Figura 17.

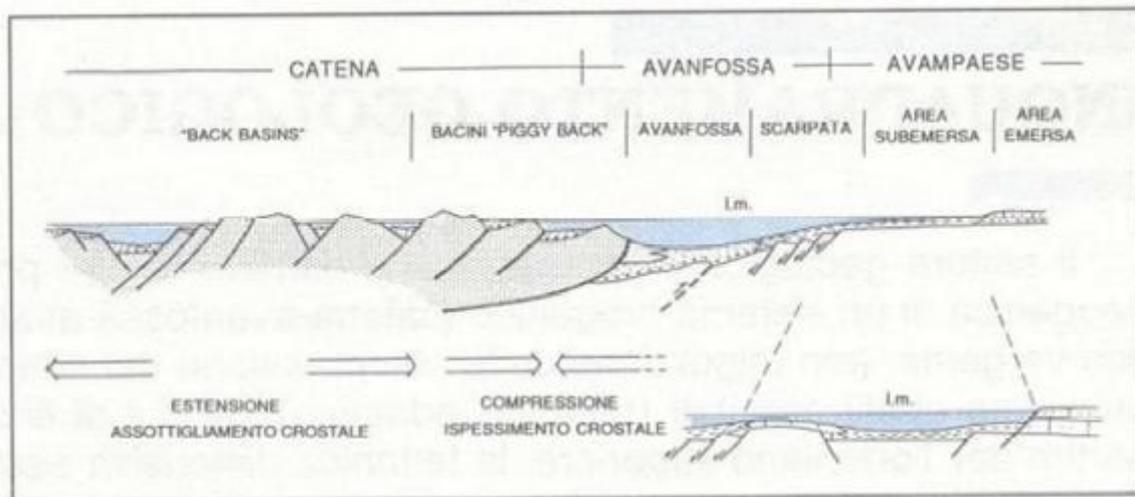


Figura 17, Schema semplificato del sistema Catena-Avanfossa-avampaese (da Boccaletti et alii, 1990)

Inoltre tra la copertura e il sottostante basamento cristallino è interposto un livello di evaporiti triassiche (*Anidriti di Burano* rinvenute nei sondaggi dell'Agip) che costituisce il principale livello di scollamento.

## *2.5 INQUADRAMENTO GEOLOGICO STRUTTURALE DELL'AREA DI CAMERANO (AN)*

L'area in esame fa parte del dominio marchigiano esterno, ed è caratterizzata da uno stile tettonico costituito essenzialmente da elementi compressivi (pieghe e sovrascorrimenti) e da faglie trascorrenti/transpressive, orientate prevalentemente in direzione appenninica (NW - SE), ed antiappenninica (NE - SW). Esso rispecchia lo stile strutturale dell'Appennino umbro-marchigiano, ed è legato alla fase più intensa della tettonogenesi appenninica medio-pliocenica. E' durante tale fase che si sono formate le strutture tettoniche dell'anconetano (monoclinale di Ancona, sinclinale di Tavernelle, anticlinale carbonatica del M.te Cònero ed anticlinali di Varano e Falconara M.ma), quelle costiere tra Fano e Falconara M.ma, quella di P.to S. Giorgio e, ad occidente, l'anticlinale di Agugliano-Polverigi. Il tutto è riportato in Figura 18.

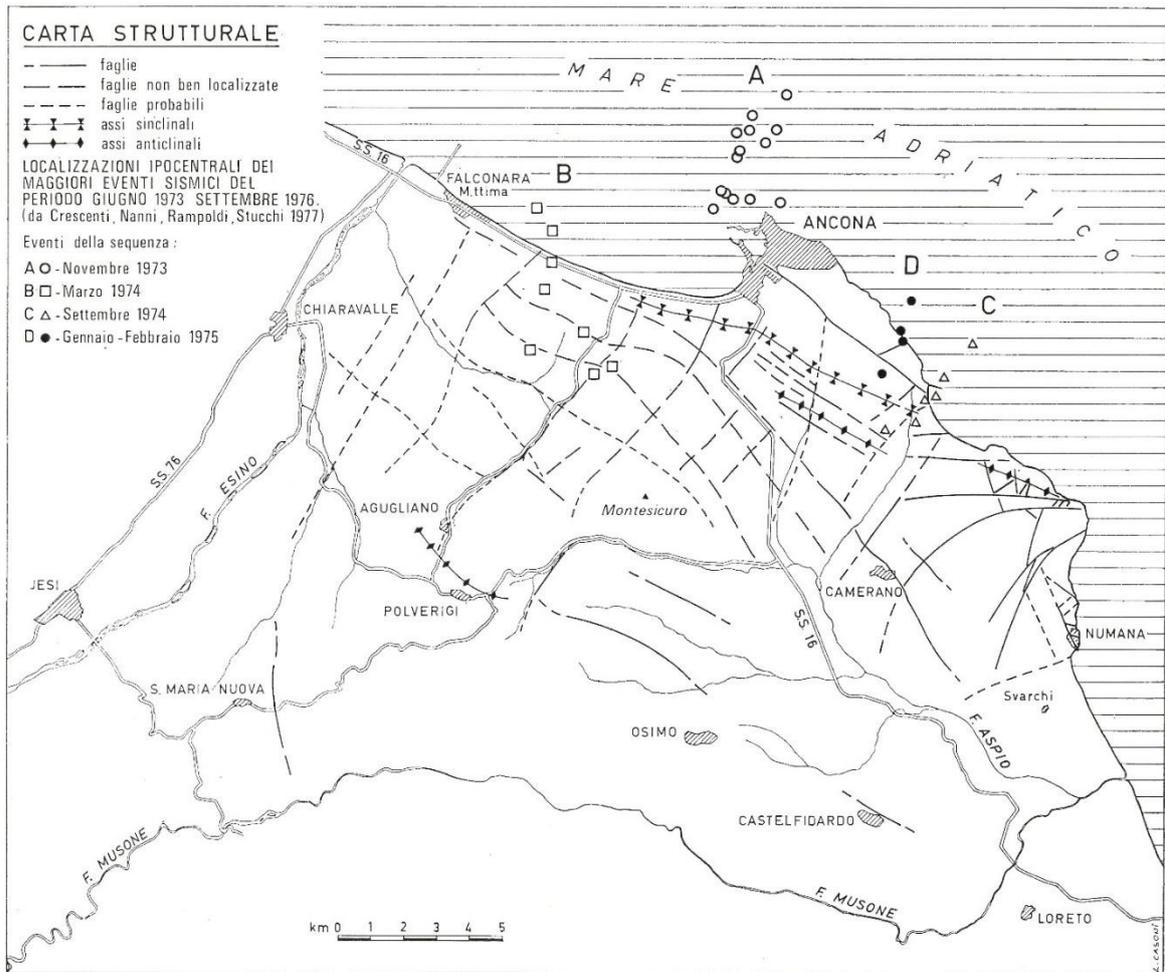


Figura 18, Carta strutturale (da Colalongo et Al., 1979)

## 2.6 STUDI DEL DOTT. GEOL. COLLAREDA

Per questa sezione sono stati utilizzati gli studi condotti dal dott. Geol. Collareda M. (studio di MS Livello 1 Comune di Camerano, che nel 2014 ha esaminato la zona di interesse. Da tali studi vengono tratte importanti informazioni ai fini della ricerca attuale. Il territorio comunale di Camerano si sviluppa quasi interamente su terreni plio-pleistocenici compresi tra gli affioramenti carbonatici costituenti il rilievo del monte Conero e le deposizioni alluvionali della vallata del torrente Aspigo. L'area di interesse si inserisce in un contesto

strutturale caratterizzato da una successione stratigrafica essenzialmente monoclinale immergente a sudovest con formazioni geologiche progressivamente più antiche proseguendo verso nord-est.

L'elevato grado di fratturazione che interessa sia il nucleo carbonatico che le formazioni, deriva da fenomeni di stress tettonici, verificatisi in fase orogenetica e post-orogenetica.

L'area marchigiana centro-orientale è in genere considerata una porzione dell'avanfossa periadriatica mio-plio-pleistocenica, situata all'esterno delle principali dorsali carbonatiche che costituiscono i tratti geologici e geomorfologici essenziali della catena umbro-marchigiana, anche se tale modello non rispecchia pienamente l'area di interesse. Si tratta, ad ogni modo, di un segmento di avanfossa che rappresenta uno dei settori più significativi per la comprensione dell'evoluzione sedimentaria e deformativa delle zone più esterne dell'orogene appenninico sin dal Miocene superiore.

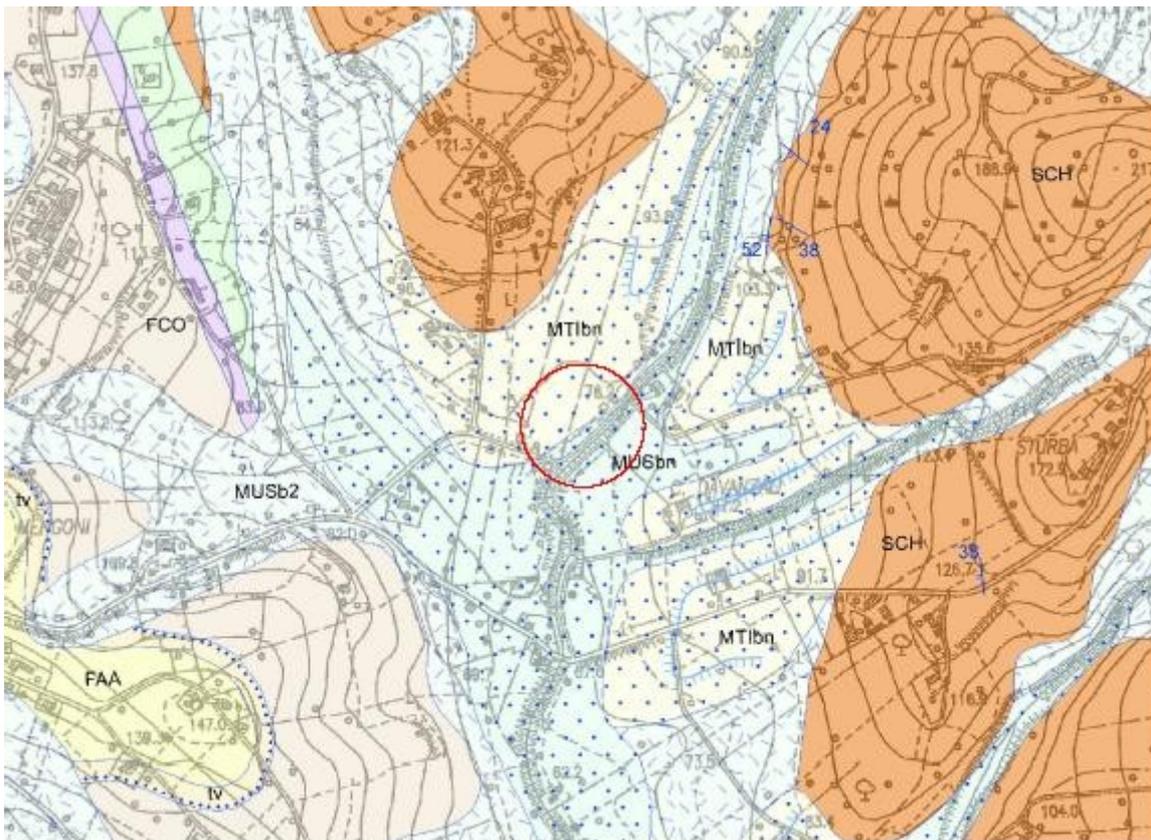


Figura 19, Stralcio carta geologica regionale (1: 10.000 – Sezione n° 293070 “Camerano”, [www.regione.marche.it](http://www.regione.marche.it))

Il territorio comunale è fortemente caratterizzato dalla presenza di sedimenti olocenici attribuibili al Sistema del Musone (MUS), come visibile in Figura 19.

L’area del centro storico di Camerano è interessata dalla presenza della Formazione delle Argille Azzurre (FAA) e dell’Orizzonte del Trave (tv), appartenenti alla successione plio-pleistocenica marchigiana esterna e caratterizzate da giaciture con valori di inclinazione tali da indicare un assetto sinclinalico delle strutture. L’area nord orientale del comune invece risulta caratterizzata dalla presenza della Formazione a Colombacci (FCO), della Formazione di Sapigno (GNO) e della Formazione di Schlier (SCH), appartenenti alla successione umbro-marchigiana-romagnola di età eocene-miocenica. Tali formazioni sono

caratterizzate da giaciture con valori di inclinazione tali da indicare un assetto anticlinale delle strutture, come visibile in Figura 20 (la cui legenda è riportata in Figura 21).

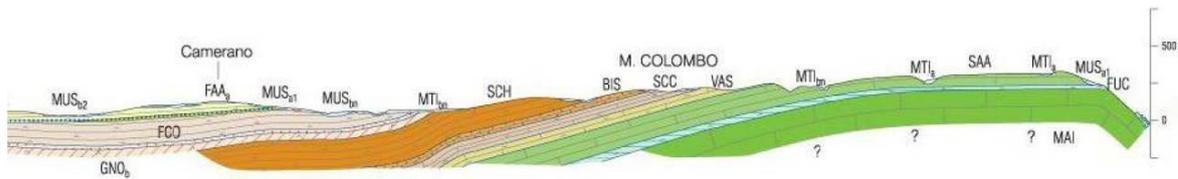


Figura 20, Tratto di sezione A-A' tratta dal Foglio 293 "Osimo"

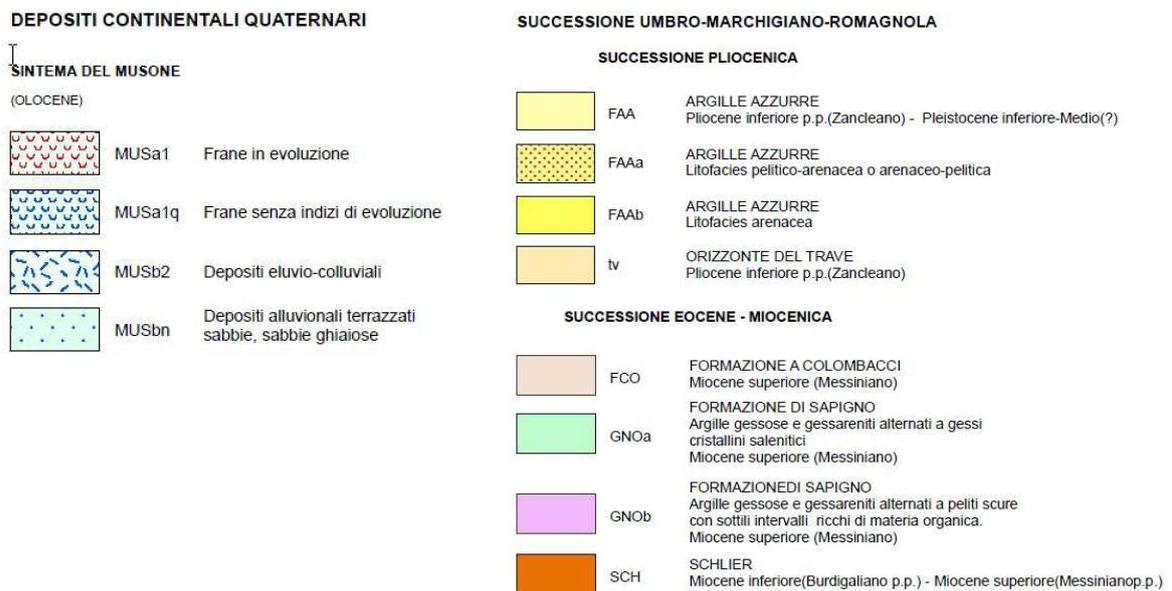


Figura 21, Legenda tratta dal Foglio 293 "Osimo"

Di seguito si riporta una breve descrizione stratigrafica delle principali formazioni geologiche presenti nell'area comunale.

-Depositi continentali quaternari - Sistema del Musone (MUS): Si tratta dell'insieme dei sedimenti attuali in corso di deposizione da parte dei principali agenti modellatori del

paesaggio attuale e di sedimenti messi in posto durante le modificazioni oloceniche dell'ambiente fisico. Questi sedimenti posseggono una grande variabilità sia tessiturale sia del grado di attività; vi sono compresi anche depositi alluvionali terrazzati mentre i depositi più diffusi sono quelli di pianura alluvionale i quali mostrano passaggi verso monte a depositi di versante.

Vengono distinti i seguenti depositi.

-*MUSa1* (Frane in evoluzione). Si tratta di depositi messi in posto per gravità lungo la maggior parte dei versanti. La tipologia di questi movimenti è molto articolata, ma predominano i fenomeni di scivolamento che evolvono successivamente in colata e colate vere e proprie.

-*MUSa1q*. Frane senza indizi di evoluzione.

-*MUSb2* (Coltre eluvio colluviale). Si tratta di depositi tessituralmente eterogenei nei quali sono rappresentate percentuali variabili di detriti angolosi e sub-angolosi a volte alternati o frammisti a sedimenti fini (sabbia, silt e argilla), più o meno pedogenizzati e arricchiti in componente organica. Il loro spessore è in genere esiguo (qualche metro), ma in corrispondenza delle testate delle vallecole o in corrispondenza dei coronamenti di vecchie frane, il loro spessore può raggiungere anche una decina di metri.

-*MUSbn* (Deposito alluvionale terrazzato). Si tratta di depositi alluvionali posti a quote più elevate del letto di piena straordinaria e non raggiunti dagli eventi eccezionali durante gli ultimi 50-60 anni. Questi depositi, affioranti sugli orli dei terrazzi che bordano l'alveo attuale sono caratterizzati nella loro parte alta da ghiaie e ghiaie sabbiose, subordinatamente da sabbie.

-Successione Umbro Marchigiana Romagnola – Successione Pliocenica: Si tratta di una spessa coltre di depositi marini plio-pleistocenici, la cui parte più antica si sarebbe deposta nel Pliocene inferiore mentre quella più recente, di età pleistocenica, marcherebbe la ripresa della sedimentazione dopo un lungo *hiatus* sedimentario che avrebbe interessato larga parte del Pliocene superiore. La successione pliocenica è abbastanza monotona e costituita da sedimenti pelitici mentre quella pleistocenica è stata divisa in cinque unità informali, le quali rappresentano in senso stratigrafico dinamico cicli trasgressivo-regressivi.

Le Argille Azzurre comprendono tutti i sedimenti più antichi suddivisi in corpi su base puramente litologica. L'orizzonte del Trave è considerato di età pliocenica e caratterizza la base delle Argille Azzurre.

Vengono distinti i seguenti depositi.

-*Argille Azzurre (FAA)*. Questa formazione è caratterizzata dalla predominanza di *facies* argillose e siltose, le quali si associano ciclicamente a orizzonti sabbiosi, arenacei e talora conglomeratici. Le alternanze litologiche riconosciute sono state interpretate da Colalongo et al. (1975; 1979) come cicli regressivo-trasgressivi e dunque come una successione verticale ordinata di diverse *litofacies*. PLIOCENE INFERIORE P.P. (ZANCLEANO) – PLEISTOCENE INFERIORE – MEDIO.

- *Litofacies arenaceo-pelitica e pelitico-arenacea (FAAa)*: si tratta di sedimenti caratterizzati da alternanze di strati pelitici e arenacei, in proporzioni comprese tra il 25 e il 75%. Le laminazioni trattive diffuse nei sedimenti granulari suggeriscono che l'origine dei corpi sabbiosi sia da ricercare nella rideposizione di ingenti quantità di materiale clastico accumulato nei sistemi costieri e deltizi durante eventi di piena eccezionale e/o a seguito di episodi di tempesta.

- *Litofacies arenacea (FAAb)*: questa *litofacies* è costituita da sabbie e arenarie medie e fini, in strati a geometria complessa di spessore variabile da pochi decimetri a oltre 1 metro. I sedimenti descritti sono associabili ad ambienti sedimentari simili a quelli riconosciuti per la *litofacies* precedente.

- *Orizzonte del Trave (tv)*: È un corpo tabulare di calcareniti grossolane, in strati da sottili a medi, a composizione organogena e bioclastica e arenacea quarzosa-litica. Questo orizzonte giace in discordanza angolare sulla formazione a Colombacci e talora anche sulla formazione di Sapigno. I successivi terreni delle Argille Azzurre giacciono invece in concordanza su questo orizzonte. L'orizzonte del Trave rappresenta una tipica formazione di *ravinement* di una *facies* di spiaggia progradante a seguito di una rapida trasgressione. PLIOCENE INFERIORE P.P. (ZANCLEANO)

#### -Successione Umbro Marchigiana Romagnola – Successione Eocene Miocenica

Si tratta di depositi marini e del bacino periadriatico. La sequenza mesozoica è rappresentata dalle formazioni della *scaglia rossa*, delle *marne a fucoidi* e della *maiolica*. La successione oligomiocenica è rappresentata da tutti i termini dalla *scaglia variegata* alla *formazione a Colombacci*.

Nel territorio comunale vengono distinti i seguenti depositi:

- *Formazione a Colombacci (FCO)*. Questa formazione è costituita da marne argillose, argille e argille siltose di colore da grigio a nerastro, in strati sottili, alle quali sono intercalati fino a cinque sottili livelli di calcari micritici biancastri e livelli di marne scure. MIOCENE SUPERIORE (MESSINIANO).

-*Formazione di Sapigno (GNO)*. Questa formazione consiste di un'alternanza di argille scure bituminose, diatomiti, gessi cristallini, gessareniti laminate e calcari solfiferi. Tali litotipi sono variamente associati e sono distinguibili per le caratteristiche di tale associazione: una *litofacies* inferiore, formata prevalentemente da peliti (GNO<sub>b</sub>) e una *litofacies* superiore, contenente gessi cristallini e gessareniti (GNO<sub>a</sub>). Lo spessore della *litofacies* GNO<sub>a</sub> è di circa 15 metri, mentre la formazione nel suo complesso raggiunge i 40-50 metri. MIOCENE SUPERIORE (MESSINIANO).

-*Schlier (SCH)*: Si tratta di marne argillose, marne calcaree e argille di colore dall'avana, al bianco, al grigio, in strati da sottili a medi, spesso clivati, con sporadici noduli limonitizzati. In genere lo spessore della formazione è assai variabile (da poche decine a oltre 400 m). Lo Schlier è costituito da tipici sedimenti emipelagici di piattaforma esterna con una componente carbonatica pelagica variabile ma sempre rilevante. MIOCENE INFERIORE (BURDIGALIANO P.P.) – MIOCENE SUPERIORE (MESSINIANO P.P.).

## 2.7 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DI DETTAGLIO

Il rilevamento di campagna ha permesso di evidenziare che, nell'area oggetto del presente lavoro, affiorano i terreni miocenici della successione Umbro-marchigiano-romagnola, in particolare affiora a nord ed ad est, la Formazione dello Schlier visibile nella **Error! Reference source not found.** e nella **Error! Reference source not found.**

Tale litotipo è eteropico alle Marne con cerroigna affiorante più a sud ed è costituito da un'alternanza di marne calcaree e marne argillose grigie con toni azzurri, calcari marnosi detritici biancastri e, subordinatamente, argille marnose grigio-azzurre e calcari silicizzati in strati sottili, questi ultimi al passaggio con il Bisciario.

La stratificazione, in genere sottile, è solitamente obliterata dalla bioturbazione e da un intenso clivaggio. Lo spessore della formazione è di circa 200-300 m. L'età va dal Miocene inferiore (Burdigaliano p.p.) fino al Miocene superiore (Messiniano p.p.).

Gli strati hanno una giacitura con direzione N 170, immergenti verso W ed inclinazione di circa 38°. Il substrato marnoso nell'area di indagine, è coperto da una coltre formata da terreno vegetale e/o materiale di riporto (Strade bianche) e dai depositi alluvionali terrazzati del Torrente Betellico. Questi ultimi sono stati messi in posto nel Pleistocene superiore e nell'Olocene e sono costituiti da commistioni, in varie proporzioni di sabbie e sabbie ghiaiose eterometriche prevalentemente calcaree, arrotondate e/o subarrotondate in cui difficilmente si rinvencono strutture sedimentarie.

L'assetto tettonico-strutturale dell'area esaminata non presenta elementi di rilievo; non sono stati riconosciuti disturbi tettonici quali faglie, sovrascorrimenti, etc. . Il sottosuolo dell'area del Betellico, oggetto di interesse, è dunque principalmente costituito da marne di diversi tipi, i quali sono dettagliatamente elencati nella litologia visibile nella Figura 22 e nella Figura 23. La marna<sup>24</sup>, una varietà di roccia sedimentaria di origine terrigena, è costituita principalmente da una mescolanza di argilla e carbonato di calcio, solitamente sotto forma di calcite (CaCO<sub>3</sub>) o dolomite [MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]. Nei tipici depositi di marna, la percentuale di calcite varia tra il 35% e il 65%; al di sopra o al di sotto di questi valori si incontrano transizioni verso calcari (o dolomie) quando il contenuto di carbonato è alto, o verso argille quando è basso. Questo tipo di roccia si forma principalmente da sedimenti fangosi, spesso di origine marina, depositati in condizioni di bassa energia ambientale. La parte argillosa si

---

24

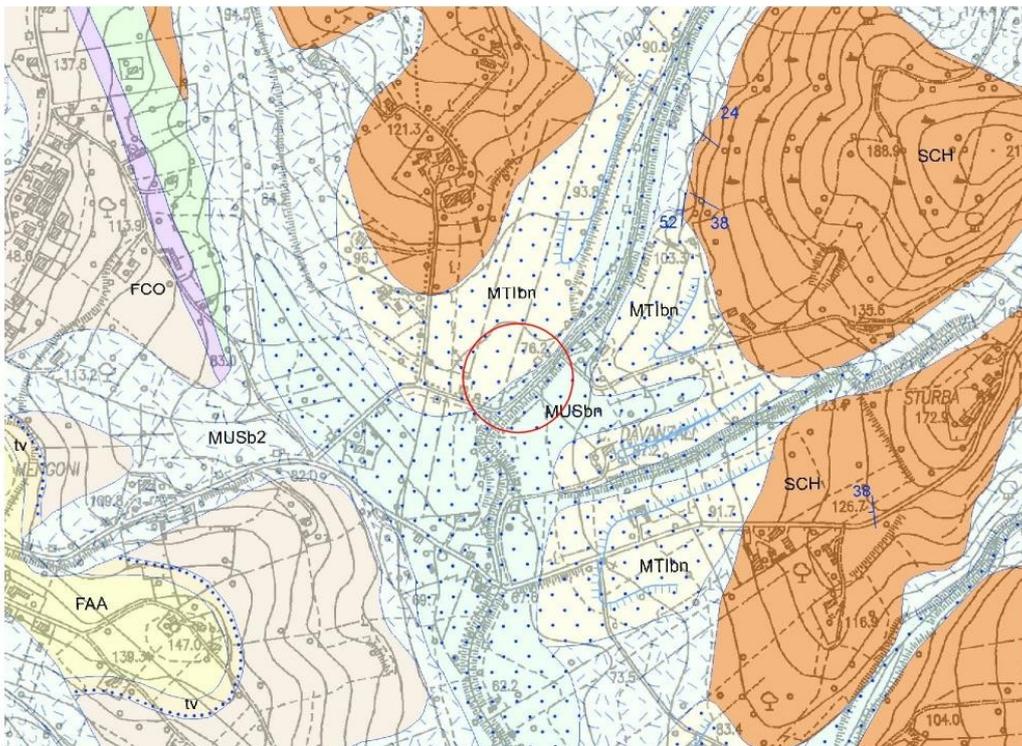
[https://it.wikipedia.org/wiki/Marna\\_\(roccia\)#:~:text=La%20marna%20%C3%A8%20una%20roccia,\(CO3\)2%5D.](https://it.wikipedia.org/wiki/Marna_(roccia)#:~:text=La%20marna%20%C3%A8%20una%20roccia,(CO3)2%5D.)

accumula attraverso la decantazione lenta di particelle di argilla (con dimensioni inferiori a 0,0625 mm), mentre quella carbonatica può derivare dalla precipitazione di sali o dalla deposizione di particelle organogene, provenienti da resti microscopici di organismi con gusci o scheletri calcarei. Le marne trovano un'ampia applicazione industriale nella produzione di miscele cementizie. Si tratta di rocce derivate dalla diagenesi di fanghi contenenti una miscela variabile di carbonato di calcio e minerali argillosi. La parte terrigena fine deriva dall'erosione delle aree continentali adiacenti, mentre quella carbonatica può provenire da processi di precipitazione chimica o dalla deposizione di resti di organismi marini. Le marne si formano in ambienti sedimentari come lagune, mari o laghi. I clasti, composti principalmente da fillosilicati, hanno dimensioni inferiori a 1/16 di millimetro. La roccia può presentare varie caratteristiche, come consistenza terrosa e friabile (nelle forme meno coerenti e poco cementate), struttura a foglietti (nelle marne altamente stratificate) o struttura massiccia, con frattura scheggiata o anche concoide (nelle marne con elevato contenuto di carbonato). Spesso, i sedimenti marnosi sono ricchi di fossili, alcuni in ottimo stato di conservazione. La reazione effervescente con l'acido cloridrico conferma la natura carbonatica della roccia. Verso la costa continentale e all'interno della piattaforma continentale, le marne tendono a essere sostituite da sedimenti clastici di origine terrigena più grossolani, depositati in ambienti con maggiore energia (come sabbie, silt, arenarie e siltiti). Nei fondali più profondi, le marne possono estendersi fino alla scarpata continentale e alle piane abissali, ma vengono gradualmente sostituite da sedimenti carbonatici più puri. Nell'Appennino centro-meridionale, le marne costituiscono gran parte del substrato roccioso.

**CARTA GEOLOGICA**

Scala 1:10.000

Stralcio della carta geologica regionale  
Sezione n° 393070 Camerano



*Figura 22, Carta geologica dell'area di interesse (www.regione.marche.it)*

# Tav. 3b

## LEGENDA CARTA GEOLOGICA

### Sezione n° 393070 Camerano

<b>DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI</b>			Contatto stratigrafico o litologico
<b>SINTEMA DEL MUSONE</b> (OLOCENE)			Contatto stratigrafico inconforme
	MUSa1 Frane in evoluzione		Orlo di terrazzo fluviale
	MUSa1q Frane senza indizi di evoluzione		Traccia di superficie assiale di sinclinale
	MUSb2 Depositi eluvio-colluviali		Stratificazione diritta
	MUSbn Depositi alluvionali terrazzati sabbie, sabbie ghiaiose		Stratificazione orizzontale diritta
<b>SINTEMA DI MATELICA</b> (PLEISTOCENE SUPERIORE)			Sorgente
	MT1a Depositi di versante		Sorgente minerale
	MT1bn Depositi alluvionali terrazzati sabbie, sabbie ghiaiose		
<b>SUCCESSIONE UMBRO-MARCHIGIANO-ROMAGNOLA</b>			
<b>SUCCESSIONE PLOCIENICA</b>			
	FAA ARGILLE AZZURRE Pliocene inferiore p.p.(Zancleano) - Pleistocene inferiore-Medio(?)		
	FAAa ARGILLE AZZURRE Litofacies pelitico-arenacea o arenaceo-pelitica		
	FAAb ARGILLE AZZURRE Litofacies arenacea		
	tv ORIZZONTE DEL TRAVE Pliocene inferiore p.p.(Zancleano)		
<b>SUCCESSIONE EOCENE - MIOCENICA</b>			
	FCO FORMAZIONE A COLOMBACCI Miocene superiore (Messiniano)		
	GNOa FORMAZIONE DI SAPIGNO Argille gessose e gessareniti alternati a gessi cristallini salenitici Miocene superiore (Messiniano)		
	GNOb FORMAZIONE DI SAPIGNO Argille gessose e gessareniti alternati a peliti scure con sottili intervalli ricchi di materia organica. Miocene superiore (Messiniano)		
	SCH SCHLIER Miocene inferiore(Burdigaliano p.p.) - Miocene superiore(Messiniano p.p.)		
	BIS BISCIARO Miocene inferiore(Aquitano p.p. - Burdigaliano p.p.)		
	SCC SCAGLIA CINEREA Eocene superiore p.p.(Priaboniano) - Oligocene superiore(Chatiano)		
	VAS SCAGLIA VARIEGATA Eocene medio p.p.(Luteziano p.p.) - Eocene superiore(Priaboniano p.p.)		

Figura 23, Legenda della carta geologica riportata in figura 16 ([www.regione.marche.it](http://www.regione.marche.it))

## *2.8 INQUADRAMENTO MORFOLOGICO E GEOMORFOLOGICO*

La zona interessata dallo studio è posta ad una quota variabile da circa 76m s.l.m. a 80 m s.l.m.m., in destra idrografica del Torrente Betellico da cui dista rispettivamente circa 8m dal piezometro a valle (PZ2) a circa 16m dal piezometro a monte (PZ1); sul lato di monte di una piccola strada bianca di campagna.

L'area di studio presenta elementi del paesaggio correlati direttamente alla fascia alluvionale del Torrente Betellico. Quest'ultimo, ha inciso e alluvionato i depositi marnosi e successivamente si è incassato negli stessi a causa delle variazioni del regime idraulico del Torrente stesso.

In dettaglio, l'area si trova al di sopra di un terrazzo alluvionale del Fiume Torrente Betellico ed è caratterizzata da una debole pendenza verso est.

L'area di studio, allo stato attuale, non è interessata da movimenti gravitativi attivi e/o quiescenti e da erosioni dovute all'azione delle acque correnti superficiali.

## *2.9 STRATIGRAFIA DEL TERRENO ANALIZZATO*

Essendo il campo prove appartenente all'UNIVPM, nel passato sono già state eseguite altre analisi in situ, dunque risulta essere disponibile la stratigrafia per l'intera profondità del piezometro esterno (a valle)<sup>25</sup>, come riportato in Figura 25 e la stratigrafia fino a 4,7 m di profondità dal p.c. relativa al piezometro interno (a monte)<sup>26</sup>, riportata in Figura 25, ottenuta mediante rotazione a secco con distruzione di nucleo, un metodo utilizzato nell'ingegneria geotecnica e nella geologia per esplorare il sottosuolo e ottenere informazioni sulle stratificazioni del terreno. Questo approccio prevede l'uso di un'attrezzatura di perforazione

---

<sup>25</sup> Tazioli et al., (2017), stratigrafia del piezometro esterno (a valle)

<sup>26</sup> Palpacelli S. (2021), stratigrafia fino a 6 m di profondità del piezometro interno (a monte)

che funziona senza l'impiego di fluidi, come acqua o fango, mantenendo intatte le proprietà naturali del terreno e evitando la contaminazione delle acque sotterranee. A differenza delle tecniche che raccolgono campioni di terreno intatti, questa metodologia distrugge il nucleo durante la perforazione, portando in superficie il materiale frantumato sotto forma di detriti. La trivella utilizzata è dotata di punte diamantate o in carburo di tungsteno, capaci di perforare vari tipi di terreno e rocce, mentre sistemi di estrazione meccanica trasportano i detriti in superficie. I principali vantaggi di questa tecnica includono la semplicità e l'efficienza, poiché non richiede la gestione di fluidi di perforazione, rendendo il processo più rapido e meno costoso. Inoltre, l'assenza di fluidi riduce il rischio di contaminazione delle falde acquifere. Tuttavia, la distruzione del nucleo comporta la mancanza di campioni intatti, limitando la possibilità di analisi dettagliate delle caratteristiche del terreno e fornendo informazioni meno precise rispetto ai metodi che preservano il nucleo.

La stratigrafia del terreno può essere così riassunta:

a - Terreno vegetale: costituito da terreno agricolo con scheletro calcareo avente uno spessore di circa 35cm;

b - Depositi alluvionali;

c - Substrato: è costituito da strati di argille marnose e calcari marnosi.

La porzione di tetto è costituita da circa 1,65mt di ghiaie sabbioso limose a cui seguono circa 8,0mt di argilla limosa.

La porzione di letto, avente uno spessore di circa 18,5mt è costituita da commistioni, in varie proporzioni di argille, limi, sabbie e ghiaie.

Lo spessore complessivo di tale deposito è pari a circa 28,15mt.

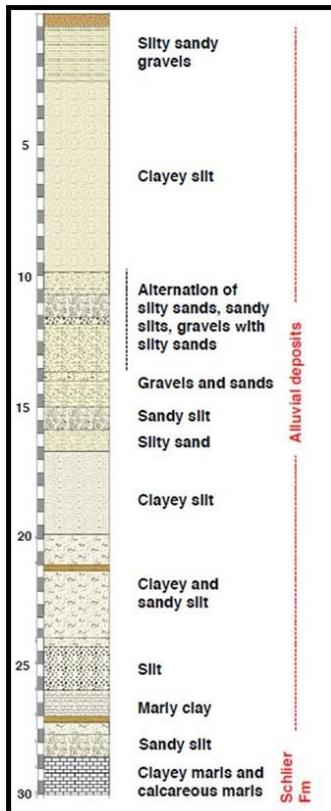


Figura 25, Stratigrafia del terreno per l'intera profondità del piezometro esterno (a valle)

STRATIGRAFIA	QUOTE		LITOLOGIA
	p.c.	parz.	
	0,35	0,35	Terreno vegetale con scheletro calcareo
1,0			<b>Depositi alluvionali recenti</b>
2,0			Limi molto sabbiosi color marrone scurastro, asciutti e medio duri.
3,0	2,8	2,45	Ghiaie calcaree a basso indice di arrotondamento (detrito di versante), asciutte e mediamente addensate.
	3,3	0,50	
4,0			Sabbia limosa color marrone chiaro/nocciola, asciutta e mediamente addensata.
5,0	4,3	1,0	Limi sabbiosi con granuli ghiaiosi calcareo a basso indice di arrotondamento dispersi, asciutti e medio duri.
6,0	4,7	0,4	

Figura 25, Stratigrafia del terreno circondante il piezometro interno (a monte) fino a 4,7 m dal p.c.

Tale litotipo è da riferirsi ai depositi appartenenti alla successione miocenica della successione Umbro-marchigiano-romagnola della Formazione dello *Schlier*.

## 2.10 IDROGRAFIA SUPERFICIALE ED IDROGEOLOGIA

L'idrografia superficiale e l'idrogeologia dell'area presentano aspetti determinati dall'erodibilità, permeabilità e giacitura del substrato marnoso-argilloso nonché dalle caratteristiche del terreno vegetale e la pendenza della zona.

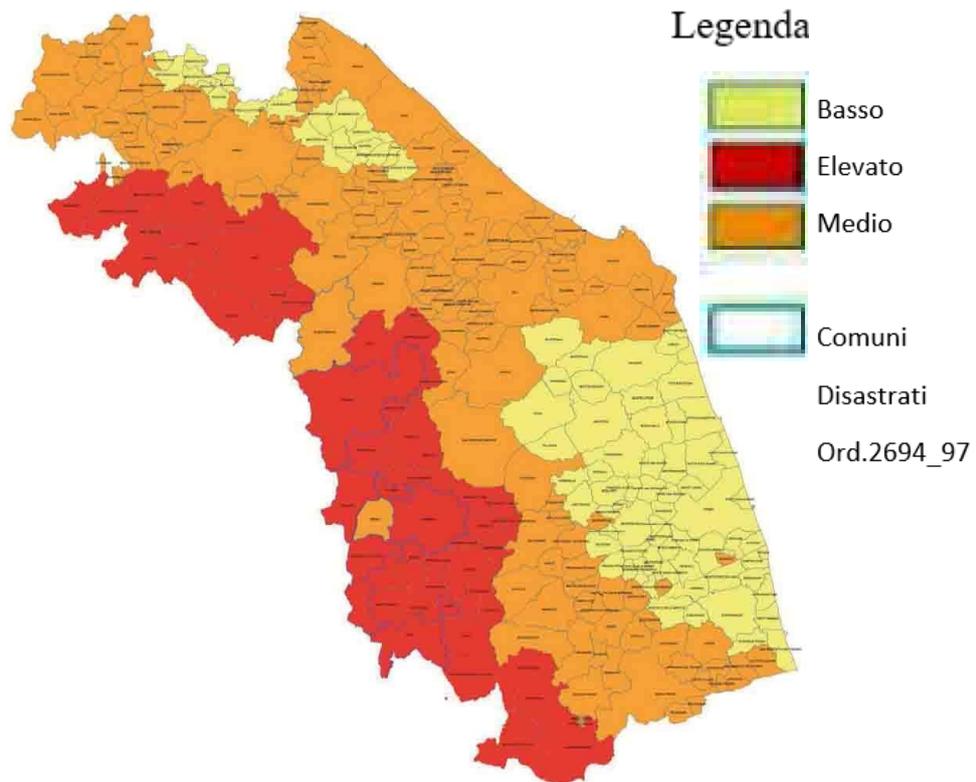
Il reticolo idrografico è imperniato sul Torrente Betellico ad est il quale rappresenta la principale via di drenaggio e scorrimento delle acque dell'area; inoltre, nei pressi del versante il deflusso delle acque meteoriche è garantito da piccole vallecole e fossi.

Non sono state riconosciute fenomenologie imputabili all'azione localizzata delle acque correnti superficiali.

### *2.11 SISMICITÀ*

La Regione Marche, in attuazione delle leggi nazionali, con la L.R. 33/84 e con la Circolare 15/90 con il fine di ridurre il rischio sismico classifica e raggruppa i comuni marchigiani in tre livelli di rischio sismico: A - Alto, B - Medio e C - Basso.

Il Comune di Camerano (AN) era inserito nella categoria di Rischio Medio, come visibile dalla Figura 266.



*Figura 26, Livelli di rischio sismico del territorio marchigiano ai sensi della L.R. 33/84 (www.regione.marche.it)*

Con l'entrata in vigore del D.M. 14.01.2008 s.m.i., il territorio comunale di Camerano (AN) ricade nella "simbolica" zona sismica 2 (Figura 277), nella quale il valore di  $A(g)$  accelerazione orizzontale al suolo espressa come frazione della accelerazione di gravità ( $g$ ) risulta pari a:

Zona sismica	$A(g)$ d'ancoraggio dello spettro di risposta elastico (Norme tecniche)	$A(g)$ con probabilità di superamento della soglia pari al 10% in 50 anni
2	0,25g	0,15-0,25

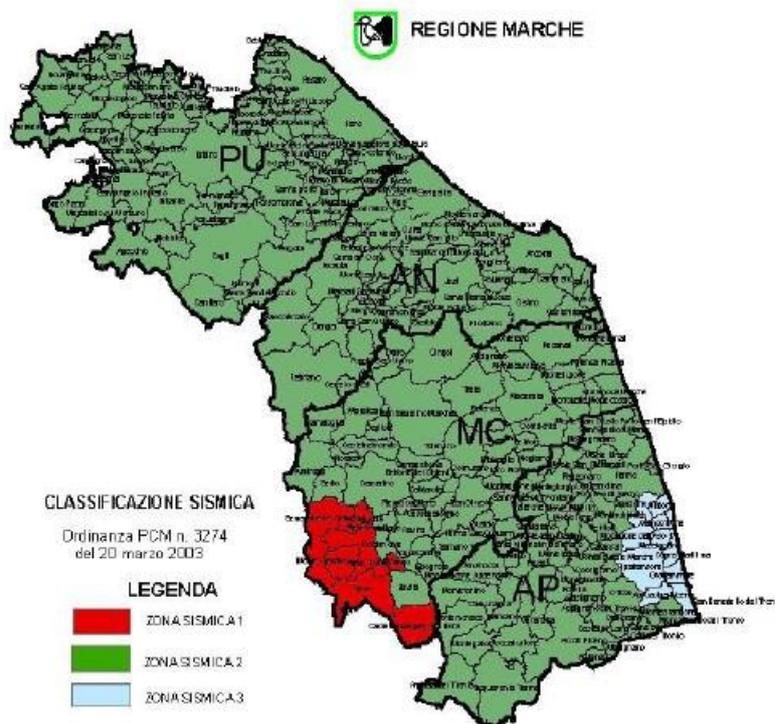


Figura 27, Classificazione sismica Regione Marche in riferimento al PCM n. 3274 ([www.regione.marche.it](http://www.regione.marche.it))

Dalle informazioni dedotte da numerosi studi condotti dal Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti- INGV sulla distribuzione delle massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani "Individuazione delle zone ad elevato rischio sismico del territorio regionale", si evince che il territorio sotteso al Comune di Camerano (AN) rientra tra le aree con intensità massima dell'VIII grado, come visibile dalla Figura 288.

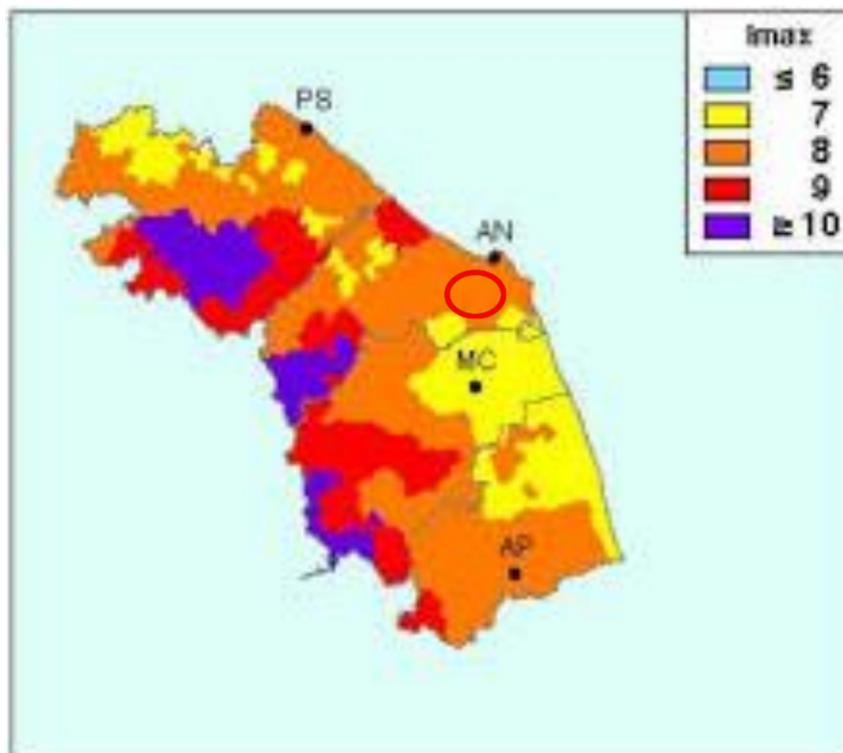


Figura 28, Carta delle Massime Intensità Macrosismica registrate nei Comuni delle Marche ([www.regione.marche.it](http://www.regione.marche.it))

## 2.12 SISMICITÀ STORICA

L'area del Comune di Camerano, nel suo passato storico è stata caratterizzata da eventi sismici riportati nel Catalogo dei Forti Terremoti Italiani, Istituto di Geofisica e Vulcanologia (INGV), con area di riferimento il Comune di Camerano (Cfr. Figura 299) sono stati identificati i seguenti eventi ricavabili dal database dell'INGV:

**Storia sismica di Camerano**  
[43.530, 13.551]



Numero di eventi: 14

Effetti	In occasione del terremoto del:								
Is	Anno	Me	Gi	Or	Mi	Area epicentrale	Np	Ix	Mw
7	1741	04	24	09	20	FABRIANESE	135	9	6.08
5	1897	09	21			ADRIATICO CENTRALE	44	7	5.50
NF	1897	12	18	07	24	Appennino umbro-march.	132	7-8	5.18
NF	1898	08	25			VISSO	66	7	5.09
6	1917	11	05	22	47	NUMANA	26	6-7	5.36
7	1930	10	30	07	13	SENIGALLIA	263	8-9	5.94
4	1950	09	05	04	08	GRAN SASSO	137	8	5.73
NF	1962	01	23	17	31	ADRIATICO	49	6	5.03
7	1972	02	04	02	42	Medio Adriatico	75	8	5.18
5	1979	09	19	21	35	Valnerina	691	8-9	5.90
4	1980	11	23	18	34	Irpinia-Basilicata	1317	10	6.89
3-4	1984	04	29	05	02	GUBBIO/VALFABBRICA	709	7	5.68
5	1987	07	03	10	21	PORTO SAN GIORGIO	359	7	5.18
5	1997	09	26	09	40	Appennino umbro-march.	869	9	6.05

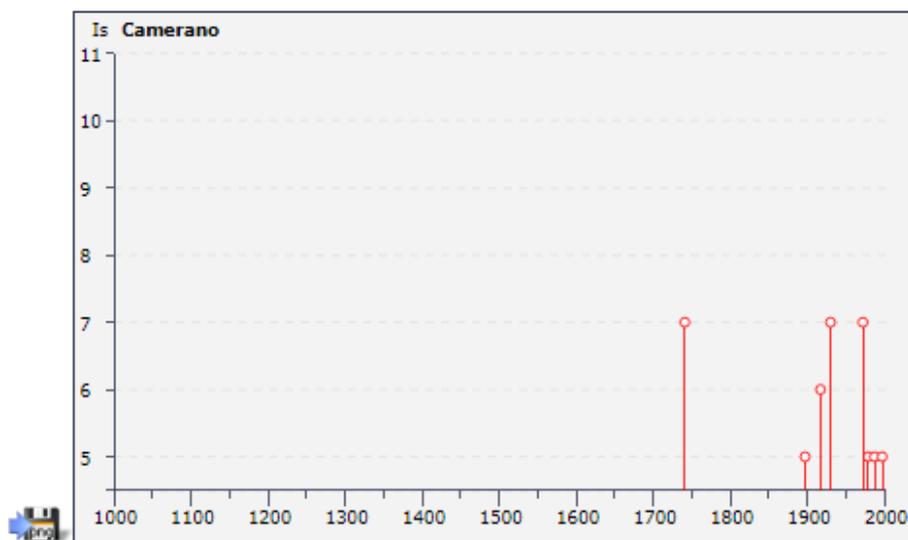


Figura 29, Sismicità storica del Comune di Camerano (www.ingv.it)

Si annovera la recente crisi sismica che ha interessato anche il territorio comunale ed in particolare gli eventi:

- del 24 agosto 2016 (03.36.32) Mw 6.0;
- del 26 ottobre 2016 (19.11.36) Mw 5.5 e (21.18.15) Mw 6.0;
- del 30 ottobre 2016 (07.40.17) Mw 6.5;
- del 18 gennaio 2017 (11.25.23) Mw 5.4, (11.14.09) Mw 5.5, (10.25.40) Mw 5.1

### *2.13 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE*

Tramite applicazione Webgis consultabile on line sul sito dell'I.N.G.V. è possibile in maniera interattiva esaminare le mappe di pericolosità sismica (Figura 30) del territorio nazionale. In particolare, come specificato, per la zona di Camerano (AN) si hanno dei valori di accelerazione del suolo (con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) compresi tra 0.175 ÷ 0.200 ag di accelerazione massima del suolo espressa come accelerazione di gravità.

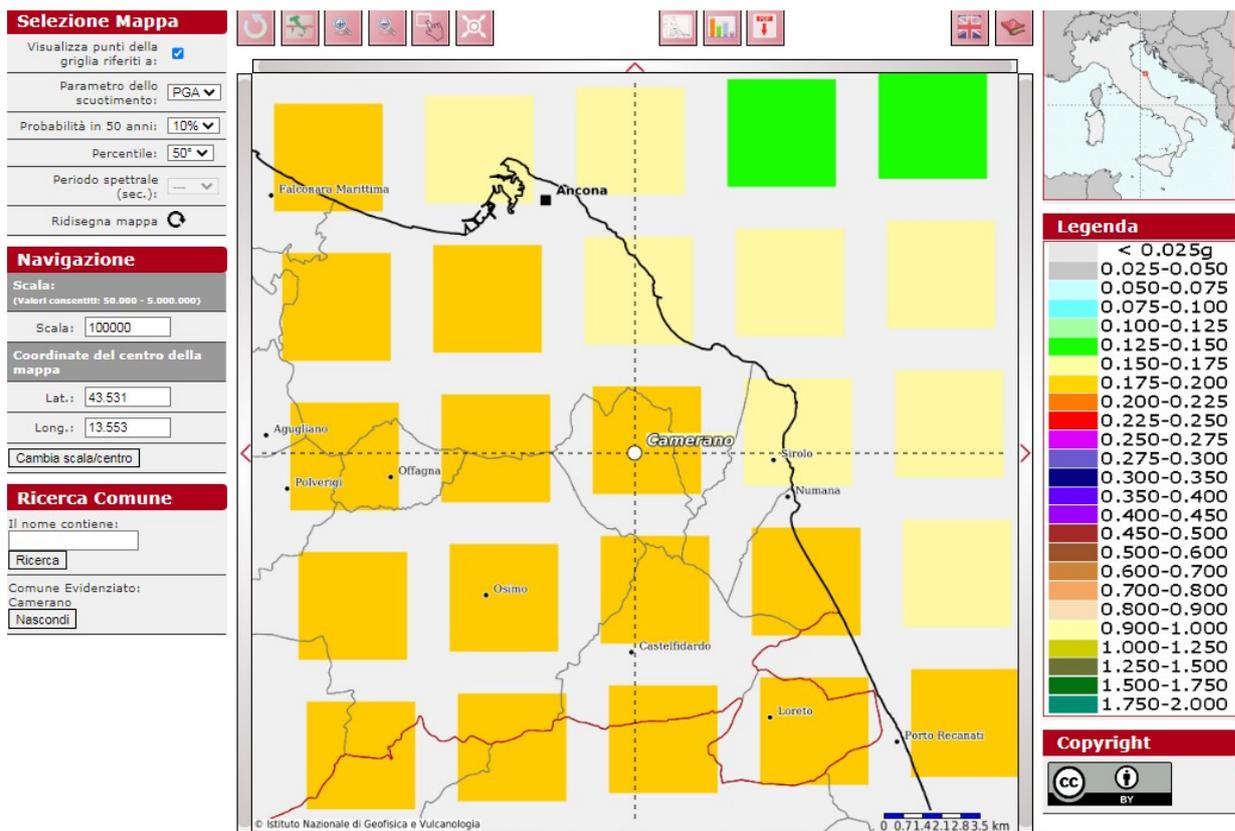


Figura 30, Mappa interattiva di pericolosità sismica per la zona di Camerano, i colori della legenda indicano le diverse accelerazioni al suolo. (www.ingv.it)

## 2.14 EFFETTI LOCALI

In data 4 febbraio 2008 sono state pubblicate nel Supplemento Ordinario della Gazzetta Ufficiale n. 29 le “Norme Tecniche per le Costruzioni”. Le nuove norme per le costruzioni sono state stilate prendendo sostanzialmente spunto dalle normative europee in fase di definizione, ed in particolare recependo i contenuti dell’Eurocodice 8.

Questo comporta un completo rivoluzionamento dell’assetto normativo previgente, tanto per la concezione strutturale degli edifici, che per quanto riguarda il metodo di calcolo e verifica da adottare, non più basato sul metodo alle tensioni ammissibili ma su quello agli stati limite.

Il 20 febbraio 2018, il Ministero delle infrastrutture e dei trasporti ha emanato un decreto di aggiornamento, pubblicato nel Supplemento Ordinario della Gazzetta Ufficiale n. 42.

### *2.15 CATEGORIA DI SUOLO DI FONDAZIONE*

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, il profilo stratigrafico del suolo di fondazione del sito, secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni, pubblicate nella Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 e successivo aggiornamento, è di categoria:

*C – Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

Il sito è stato classificato sulla base delle indagini sismiche effettuate nelle immediate vicinanze, su materiali analoghi per caratteristiche litologiche e stratigrafiche.

Si fa presente che il sito appartiene alla categoria topografica T1 ed il coefficiente di amplificazione topografica ( $S_T$ ) da adottare nel caso in esame è pari ad  $S_T = 1,0$ .

## **MATERIALI E METODI**

### *3.1 STRUMENTAZIONE DI PROVA*

La ricerca condotta ha richiesto l'impiego di due differenti prove, una di pompaggio dell'acqua e una di immissione di tracciante, che verranno successivamente spiegate nel dettaglio, al fine di esaminare vari aspetti idrogeologici del sito in studio. Entrambe le prove hanno richiesto l'utilizzo di una gamma diversificata di strumentazione, con alcuni dispositivi essenziali comuni ad entrambe le metodologie, oltre a strumenti specifici per

ciascuna procedura. In particolare, la prova di pompaggio dell'acqua è stata condotta al fine di valutare la risposta idraulica dell'acquifero sotterraneo, mentre la prova di immissione di tracciante è stata finalizzata a tracciare il flusso delle acque sotterranee e comprendere i loro percorsi nel terreno. Sebbene entrambe le prove abbiano lo stesso obiettivo generale di comprendere il comportamento idrogeologico dell'area studiata, le metodologie e la strumentazione impiegate sono state differenziate per soddisfare le specifiche esigenze di ciascuna procedura.

Questa sezione della tesi fornirà una panoramica esaustiva della strumentazione utilizzata in entrambe le prove, evidenziando sia gli strumenti comuni che quelli specifici per ciascuna metodologia. Tale analisi dettagliata consentirà una comprensione approfondita del processo sperimentale condotto e delle considerazioni tecniche coinvolte nella sua esecuzione.

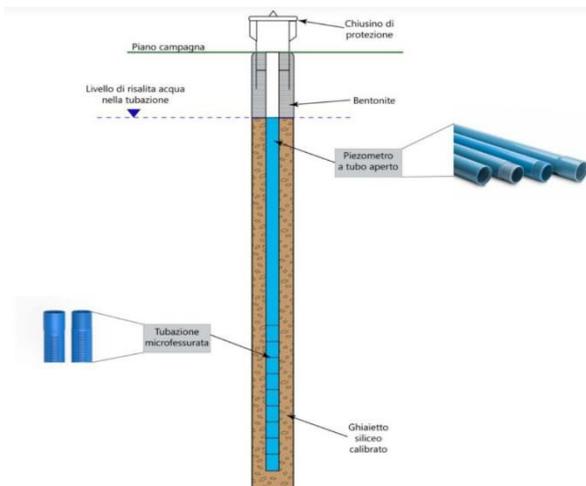
## STRUMENTAZIONE COMUNE

1)Piezometro: entrambe le prove sono state condotte e valutate all'interno dei due piezometri (descritti nella sezione 2.1), che si insinuano nel terreno ad una profondità di 30 m dal p.c. e presentano entrambi un diametro di 4 pollici=10,16 cm. Nello specifico, le prove sono state eseguite nel piezometro esterno (a valle), mentre quello interno (a monte, visibile nella **Error! Reference source not found.**) è stato utilizzato per valutare l'abbassamento della falda in tale punto, dovuta al pompaggio a valle, per valutare l'influenza del processo in un'ottica più ampia. Dunque nella prova di tracciamento, non è servito utilizzare il piezometro di monte. Il piezometro è uno strumento composto da un tubo verticale di diametro ridotto, progettato in modo da evitare il fenomeno della capillarità, il quale viene collegato alla condotta in cui si desidera misurare la quota piezometrica, equivalente alla pressione esercitata dal liquido all'interno della stessa condotta come visibile nella Figura

31. Le versioni più moderne dei piezometri presentano un cilindro rivestito da un setto poroso con una permeabilità predefinita, accompagnato da un sensore per monitorare la pressione dell'acqua che riempie la cavità. Questo cilindro viene inserito in una porzione di foro riempita con sabbia e isolata dal resto del tratto mediante l'utilizzo di bentonite.

Esistono diverse tipologie di piezometri:

- Il piezometro di Casagrande (o idraulico) è composto da un cilindro collegato a un tubo aperto di 20 mm di diametro. La misurazione viene effettuata osservando il livello dell'acqua nel tubo. Tuttavia, il tempo di risposta di questo tipo di piezometro è piuttosto prolungato (dell'ordine di alcune ore) e tende ad aumentare con la diminuzione della permeabilità del terreno.
- Il piezometro pneumatico si basa su un diaframma flessibile che controlla una valvola pneumatica, indicando quando la pressione dell'aria immessa nel sistema corrisponde a quella nella cavità del piezometro.
- Il piezometro continuo di tipo piezoforo implica l'utilizzo di una membrana impermeabile disposta lungo l'intera lunghezza del foro, soggetta a una pressione interna superiore alla massima pressione del terreno. Un sensore viene calato nel foro e isolato mediante l'utilizzo di due packer gonfiabili. Si riduce quindi la pressione interna e si attende il ripristino dell'equilibrio a causa della pressione esterna del terreno.



*Figura 32, Schema tipo di un piezometro (www.geostru.eu)*



*Figura 32, Vista del piezometro esterno Betelico (a valle)*

2)Freatimetro: Il freatimetro (visibile in Figura 33 e in Figura 34) è uno strumento impiegato per rilevare il livello stazionario dell'acqua all'interno di pozzi e piezometri, ma trova anche applicazione per misurare il livello in serbatoi, cisterne, bacini e corsi d'acqua. Il freatimetro è composto da una sonda, detta anche puntale, collegata a un nastro o cavo graduato contenente conduttori elettrici. Questa sonda è connessa a un circuito elettronico di rilevamento e segnalazione, alloggiato all'interno di un avvolgicavo che racchiude l'intero dispositivo. Il puntale del freatimetro è dotato di due elettrodi, che, quando entrano in contatto con l'acqua, attivano un segnale acustico e luminoso nel circuito elettrico. Dopo aver rilevato il segnale, l'operatore può facilmente leggere sul nastro graduato la profondità della superficie dell'acqua rispetto alla testa del pozzo, ovvero il livello statico dell'acqua. Il freatimetro utilizzato è della marca “Galileo- centro misure”.

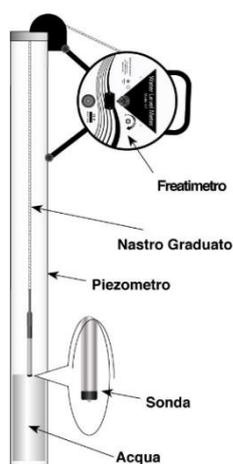


Figura 34, Schema  
tipo di un freatimetro  
([www.egeolab.it](http://www.egeolab.it))



Figura 34, Freatimetro nel  
piezometro esterno Betelico  
(a valle)

3) Diver TD (Temperature Depth): Il Diver, visibile in Figura 35, è un dispositivo sommersibile progettato per monitorare continuamente e in tempo reale il livello dell'acqua a lungo termine. Utilizza un sensore di pressione immerso a una profondità fissa sotto la superficie dell'acqua per raccogliere dati. Questo sensore misura la pressione idrostatica dell'acqua sopra di esso per determinare la profondità totale dell'acqua. Il Diver registra autonomamente la pressione e la temperatura nell'acqua e archivia i dati internamente. È ideale per monitorare sia le acque superficiali che sotterranee e può essere utilizzato in due modalità principali: mantenendo una profondità costante o eseguendo un ciclo di immersione e risalita all'interno del piezometro. Il diver utilizzato nel corso delle prove è di produzione di "Vanessen".



Figura 35,  
Diver  
([www.vanessen.com](http://www.vanessen.com))

4) Diver CTD (Conductivity Temperature Depth) è simile al Diver TD, ma include anche la misurazione in tempo reale della conducibilità elettrica dell'acqua oltre alla temperatura e alla profondità. Utilizza elettrodi sulla sonda per raccogliere dati sulla conducibilità elettrica del mezzo. Il diver utilizzato è della marca "Vanessen".

## STRUMENTAZIONE RELATIVA ALLA SOLA PROVA DI POMPAGGIO

1) Conducimetro: Tale strumento, visibile in Figura 36 e in Figura 377 è stato utilizzato per misurare la conducibilità elettrica e la temperatura dell'acqua che veniva pompata, e per compiere tale processo l'acqua estratta tramite tubo veniva convogliata in dei secchi in modo tale da poterne valutare i parametri. Il conducimetro è uno strumento progettato per determinare la conduttività elettrica, rappresentata dalla lettera greca  $\gamma$ , di un materiale o di una soluzione. La conduttività deriva dalla conduttanza, che indica la capacità di un materiale di trasportare cariche elettriche, ma è normalizzata rispetto a una dimensione specifica del materiale in questione. È importante notare che la conduttanza è l'inverso della resistenza. L'unità di misura della conduttività elettrica  $\gamma$  è il siemens per metro (S/m). La formula per calcolare la conduttività elettrica è  $\gamma = G * l / A$ , dove G rappresenta la conduttanza, l è la lunghezza del campione (espressa in metri), e A è l'area attraversata dagli elettrodi (espressa in metri quadrati). Sul mercato sono disponibili elettrodi standard con una specifica proporzione tra lunghezza e area, chiamata costante di cella, che di solito è pari a 1. Questa costante rimane generalmente stabile nel tempo, salvo modifiche dovute all'usura, ma è sempre possibile verificarla e, se necessario, aggiornarla. La misurazione viene eseguita applicando una tensione nota agli elettrodi e registrando la corrente che attraversa il circuito. È altrettanto valido applicare una corrente nota al circuito e misurare la tensione risultante. Il conducimetro utilizzato è di marca "WTW".



*Figura 376, Conducimetro  
(www.researchgate.net)*



*Figura 37, Conducimetro  
usato durante la prova*

2) Pompa: La pompa in questione utilizzata risulta essere da 220 Volt. Le pompe idrauliche sono dispositivi che possono trasferire fluidi sfruttando l'energia generata da un motore all'interno di un circuito sigillato. Questa energia consente di spostare l'acqua da una posizione all'altra. Le pompe idrauliche sommerse (Figura 388) hanno uno specifico compito: estrarre acqua da serbatoi come pozzi o cisterne e convogliarla dove serve. È essenziale che queste pompe siano completamente immerse nell'acqua, come suggerisce il loro nome. Questo garantisce il loro corretto funzionamento. Operano solitamente per lunghi periodi, avendo l'acqua il duplice ruolo di raffreddare il motore senza surriscaldamenti. Sono progettate per prestazioni a lungo termine con bassa manutenzione. Il cavo elettrico deve essere adeguatamente dimensionato e protetto per l'alimentazione, pensato appositamente per questa funzione. È importante distinguere le pompe sommerse dalle sommergibili, argomento del prossimo paragrafo. Come detto è fondamentale che rimangano sommerse per evitare il fenomeno della cavitazione, un processo che si verifica quando bolle di vapore si formano, crescono e poi collassano in un liquido a temperature

più basse rispetto al suo punto di ebollizione. Questo fenomeno crea piccoli ambienti con temperature localmente molto alte e provoca onde di pressione intense e getti idraulici che vanno a danneggiare la girante. La pompa utilizzata per la prova è prodotta da “Cofanelli”.



*Figura 38, Pompa sommersa (www.tecnomat.it)*

## STRUMENTAZIONE RELATIVA ALLA SOLA PROVA CON TRACCIANTE

1) Tracciante: Il tracciante utilizzato è il cloruro di sodio NaCl, comunemente noto come sale da cucina, e ne verranno utilizzate 624 grammi (1 grammo e 3 grammi sono usati per la calibrazione del sensore, gli altri 620 immessi nel piezometro). Si sceglie l'utilizzo dell'NaCl come tracciante per le due proprietà fondamentali che esso presenta, la prima è la capacità di sciogliersi totalmente in acqua, mentre la seconda è proprio quella di rendere l'acqua molto più conduttiva, in modo tale da essere rilevata poi dal diver.

2) Pompa per immissione del tracciante (Figura 39): risulta essere uno strumento la cui descrizione è analoga allo strumento sopra citato, ma invece che captare acqua dal piezometro la immette.



*Figura 39, Pompa per immissione del tracciante utilizzata*

3) Bailer campionatore: Nella prova di tracciamento è necessario prelevare acqua dal piezometro, riporla in un contenitore e valutarne la conducibilità elettrica quando essa è bianca (senza aggiunta di sale), con 1g di sale e con 3g, in modo tale da tarare il diver. I bailer sono strumenti di campionamento, visibili in Figura 440 e in Figura 41, utilizzati per prelevare campioni d'acqua da pozzi, piezometri e acque sotterranee, ma possono essere impiegati anche in acque superficiali. Essi consistono in un cilindro di piccolo diametro, provvisto di una valvola a sfera sul fondo, la cui densità è molto simile a quella dell'acqua. Questa valvola può essere realizzata in materiali come Delrin, PVC o Acciaio. Durante la discesa nel pozzo o nel piezometro, la pressione dell'acqua mantiene aperta la valvola, consentendo all'acqua di fluire all'interno del cilindro. Quando la discesa si interrompe, il peso dell'acqua raccolta all'interno del cilindro chiude la valvola, permettendo il recupero del bailer con il campione d'acqua al suo interno.



*Figura 410, Bailer campionatore  
(www.egeolab.it)*



*Figura 41, Bailer campionatore utilizzato*

### *3.2 PROVA DI POMPAGGIO DELL'ACQUA*

La prova di pompaggio è stata eseguita con due obiettivi primari, entrambi cruciali per la comprensione dell'ambiente idrogeologico sotto esame. Il primo obiettivo è stato quello di analizzare l'impatto dell'estrazione di una significativa quantità d'acqua dal piezometro esterno (situato a valle) sulla quota piezometrica del piezometro interno (posizionato a monte). Questo studio permette di valutare con precisione l'abbassamento del livello della falda, fornendo così informazioni per la gestione sostenibile delle risorse idriche e per la prevenzione di eventuali fenomeni di esaurimento delle falde acquifere. Il secondo obiettivo è stato quello di esplorare le caratteristiche dell'acqua estratta durante la prova di pompaggio, focalizzandosi in particolare sulla conducibilità elettrica e sulla temperatura. L'acqua prelevata da diverse profondità fornisce preziose informazioni sulla composizione e sulle proprietà fisiche del sottosuolo. Questo approccio stratificato consente di valutare le variazioni delle proprietà chimico-fisiche dell'acqua in relazione alla sua profondità, offrendo così una visione più completa e dettagliata dell'ecosistema idrogeologico in esame. Inoltre, la raccolta di dati riguardanti la conducibilità elettrica e la temperatura dell'acqua durante la prova di pompaggio fornisce un'opportunità unica per comprendere i processi di trasporto di sostanze disciolte nel sottosuolo e per identificare eventuali fenomeni di contaminazione o di interazione tra le acque sotterranee e i materiali circostanti.

In sintesi, la prova di pompaggio si configura come un'importante fase di indagine, in grado di fornire una panoramica dettagliata della dinamica idrogeologica del sito e di supportare la pianificazione e la gestione sostenibile delle risorse idriche.

La prova è stata svolta in data 27/03/2024, per la durata di 4 ore (dalla fase di accensione a quella di spegnimento della pompa), è stata eseguita con i seguenti metodi e ha portato ai seguenti risultati (che verranno, insieme a grafici e orari, riportati in seguito. La prima parte risulta essere quindi una descrizione prettamente qualitativa della prova):

La fase iniziale prevede la valutazione attraverso il freatimetro della quota piezometrica nel piezometro interno (a monte). Inoltre in tale piezometro risulta essere presente un diver TD alla profondità di 10 m dal p.c., che misura in tempo reale minuto per minuto i valori di temperatura e profondità.

In seconda fase, la stessa misura col freatimetro è stata eseguita nel piezometro esterno (a valle). Anche in questo piezometro risulta essere presente un diver alla profondità di 12 m dal p.c. che misura in tempo reale minuto per minuto i dati, stavolta di tipo CTD, in grado quindi anche di fornire dati in merito alla conducibilità elettrica. Essendo il diver posizionato a una quota fissa, si vedrà nel seguito come i dati di temperatura e conducibilità elettrica subiscano lievi variazioni.

A seguito delle analisi nei due piezometri, inizia l'allestimento vero e proprio della prova. Viene calata la pompa all'interno del piezometro a una profondità di 15 m dal p.c., caratterizzata dalla pompa vera e propria, un cavo in acciaio che viene picchettato al terreno in modo tale da fissare a tale quota la pompa, e la tubazione di mandata della pompa stessa. Il sistema viene poi collegato a un generatore di corrente elettrica, e alle ore 11:34 inizia il pompaggio dell'acqua. Allo stesso orario di accensione, è iniziata ad arrivare la prima acqua, molto torbida e sporca (come riportato in Figura 42), che col tempo tenderà poi a



*Figura 42, Prima acqua in arrivo*

pulirsi. Durante la prova sono stati diversi i dati analizzati. Oltre ai dati in continuo forniti dal diver, sono state compiute misure col freatometro, misure di portata e misure di temperatura e conducibilità elettrica con il conducimetro all'interno dei secchi riportati nella figura di destra.

Alle ore 15:34 la prova di pompaggio alla profondità di 15 m dal p.c. è terminata, e per un breve periodo (fino alle 15:41) la pompa è stata portata alla profondità di 20 m dal p.c., per andare a valutare i parametri in termini di conducibilità elettrica e temperatura a tale profondità, attraverso il conducimetro. Una svolta spenta la pompa, lo step finale è stato quello di misurare nuovamente col freatometro la profondità della falda nel piezometro interno (a monte).

### *3.3 PROVA DI IMMISSIONE DI TRACCIANTE*

Nel contesto della prova di immissione di tracciante, il suo obiettivo primario risiede nella valutazione della dispersione del tracciante stesso all'interno del piezometro. Tale esito riveste un'importanza significativa poiché fornisce una valutazione della modalità di diffusione dell'acqua all'interno del piezometro, offrendo così preziosi indicatori sulla fratturazione del terreno sottostante. Il tracciante, in questo caso, svolge un ruolo cruciale, poiché il suo carattere di sale determina un aumento della conducibilità elettrica del fluido. È proprio grazie a questa caratteristica che siamo in grado di individuare la presenza o l'assenza del tracciante durante la prova, consentendo di trarre conclusioni significative sulla permeabilità e sulla distribuzione dell'acqua nel sottosuolo. Questo processo di valutazione si avvale dell'utilizzo del diver, che ci consente di monitorare con precisione la presenza e la diffusione del tracciante nel piezometro. Attraverso la raccolta e l'analisi dei dati ottenuti durante la prova, è possibile ottenere una comprensione più approfondita delle caratteristiche

idrogeologiche del sito in esame, contribuendo così alla pianificazione e alla gestione ottimale delle risorse idriche e alla valutazione dei potenziali rischi ambientali.

La prova è stata svolta in data 15/04/2024, per la durata di 3 ore, è stata eseguita con i seguenti metodi e ha portato ai seguenti risultati (che verranno, insieme a grafici e orari, riportati in seguito. La prima parte risulta essere quindi una descrizione prettamente qualitativa della prova):

La fase iniziale prevede la valutazione della quota piezometrica attraverso il freatometro nel piezometro esterno (a valle). Compiuta tale misura, attraverso il diver viene eseguito il primo log all'interno del piezometro. Per log si intende la misurazione in termini di conducibilità elettrica per tutta la profondità del piezometro. Per ogni volta che viene immesso il diver nel piezometro, si ottengono due log; uno in discesa (dall'alto verso il basso fino ad arrivare al fondo del piezometro) e uno in salita (dal basso verso l'alto fino ad arrivare alla cima del piezometro). Il log in discesa risulta essere il più veritiero, dato che compiendoli in salita può succedere che il diver porti verso l'alto acqua a maggiore conducibilità influenzando la prova.

A seguito di tali misurazioni, si inizia l'allestimento vero e proprio della prova. Utilizzando il bailer campionario, viene estratta acqua bianca (senza la presenza di sali aggiunti) dal piezometro. Lo scopo di estrarla risulta essere la calibrazione del diver, infatti in prima battuta viene eseguito un log in un litro di acqua bianca (Figura 443), successivamente il log viene eseguito in un litro di acqua miscelato con 1 g di NaCl (Figura 4) e infine con un litro di acqua miscelato con 3g di NaCl (Figura 45). Tale serie di misurazioni permette di ricostruire una retta, da cui si ottiene un'equazione che mette in correlazione la concentrazione di NaCl (espressa come grammi/litro) e la conducibilità elettrica, in modo

tale che ad ogni valore di concentrazione rilevato siamo in grado di assegnare la corrispondente conducibilità elettrica.



*Figura 453, Log in 1 l di acqua bianca*



*Figura 454, Log in 1 l di acqua+1 g di NaCl*



*Figura 45, Log in 1 l di acqua+3 g di NaCl*

Compiuta la calibrazione, si misura nuovamente la profondità della falda dal p.c. e si esegue un ulteriore log all'interno del piezometro.

In questa fase inizia l'immissione di tracciante vera e propria. Viene utilizzato un tubo lungo 40 m (=400 dm), avente 1.5 cm di diametro (=0.15 dm), dunque nel tubo entrano circa 7 litri (=7 dm<sup>3</sup>) di acqua (per l'esattezza 7.07 litri= 7.07 dm<sup>3</sup>). Ciò che accade durante l'immissione è che i primi 7 litri riempiono il tubo, ma non c'è tracciante, quindi la prima immissione è di acqua e tracciante, la seconda solo di acqua. L'obiettivo è arrivare coi primi 7 litri al fondo del piezometro, e con l'aggiunta dei secondi 7 litri il tracciante si muove verso l'alto. Per essere cautelativi, invece che pompare 7 litri di acqua e NaCl e 7 litri di acqua, si è scelto di pompare 10 litri di acqua e NaCl e 10 litri di acqua. La soluzione è stata composta dunque composta da 10 litri di acqua e 620 g di NaCl, che deve essere totalmente miscelato prima dell'immissione.

Lo step successivo prevede l'inserimento della pompa per immissione, alle ore 11:50, all'interno del piezometro fino ad arrivare al fondo del foro (30 m). Alle ore 11:59 inizia l'immissione. Dopo i primi 5 litri di acqua + NaCl immessi, si inizia lentamente a tirare il

tubo verso l'altro. Alla fine dell'immissione (che dura 2 minuti circa) la pompa ha immesso 20 litri (10 di soluzione e 10 di acqua). Viene poi fatto nell'immediato un log con il diver. Tutto il processo si conclude alle ore 12:05.

Sarà poi necessario nel pomeriggio della giornata stessa, e nei giorni 18/04/2024 e 22/04/2024 recarsi nel sito del piezometro esterno (a valle) per compiere un log con il diver, in modo da valutare la concentrazione di sale e dunque la conducibilità elettrica dell'acqua alle varie profondità e il suo evolversi nel tempo.

### *3.4 METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA VELOCITA' DI DISPERSIONE DEL TRACCIANTE*

A seguito dell'esecuzione, misurazione ed elaborazione dei dati ottenuti (riportati nella sezione 4.2) si è in grado di risalire alla velocità di dispersione del tracciante all'interno del piezometro. Tale calcolo permette dunque di ottenere un valore di velocità che corrisponde al valore di velocità alla quale l'acqua si muove. Una volta ottenuto tale valore, si è in grado attraverso la legge di Darcy di definire il valore della conducibilità idraulica  $K$ . Darcy esaminò il flusso unidimensionale dell'acqua attraverso strati di sabbia orizzontali e scoprì che la portata per unità di superficie ( $Q/A$ ) è direttamente proporzionale alla differenza di carico ( $\Delta h$ ) e inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso considerato ( $L$ ), ovvero è direttamente proporzionale al gradiente idraulico ( $i = \Delta h/L$ )<sup>27</sup>. Questa relazione è espressa dalla formula:

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

---

<sup>27</sup> Tazioli A. (2022), *Materiale didattico relativo al corso di geologia applicata*, presso Univpm.

conosciuta come Legge di Darcy, che d'ora in avanti sarà chiamata "prima equazione". In questa equazione,  $k$ , chiamato coefficiente di permeabilità, dipende dalla densità e dalla viscosità del fluido e dalla permeabilità intrinseca del mezzo poroso. Le ipotesi di validità della legge di Darcy sono le seguenti:

- 1) Moto del fluido di tipo laminare
- 2) Mezzo omogeneo e isotropo (la porosità è la stessa in tutte le direzioni spaziali)
- 3) Esistenza di un gradiente idraulico  $i$  dovuto alla perdita di carico data dalla filtrazione nel terreno.

La legge di Darcy risulta essere valida nel nostro terreno, essendo che l'ipotesi di moto laminare è soddisfatta poiché l'acquifero analizzato è di tipo alluvionale e il mezzo poroso non è fratturato.

Noto il coefficiente di permeabilità  $k$ , si può definire la tipologia di terreno che si trova alle varie profondità confrontando i risultati ottenuti con dei risultati provenienti da manualistica (nella sezione 5.3 è stata valutata la velocità e il coefficiente di permeabilità alle profondità di 15.5 m dal p.c., 17.5 m dal p.c., 18.5 m dal p.c., 19.5 m dal p.c. e lungo il tratto che va dai 23 ai 26 m dal p.c.). Dunque maggiore sarà la velocità di filtrazione, maggiore sarà il coefficiente di permeabilità  $k$  data la dipendenza lineare e maggiore sarà la permeabilità del terreno analizzato.

Per il calcolo della velocità si utilizza la formula di calcolo della velocità di filtrazione in pozzo singolo<sup>28</sup>, che d'ora in avanti sarà chiamata "seconda equazione":

---

<sup>28</sup> Leibundgut C. *et alii*, (2009)- *Traces in Hydrology*, 221-223

$$V_f = \frac{\pi r \ln \left( \frac{c_0}{c(t')} \right)}{(2\alpha t')}$$

Dove:

$V_f$ = velocità di filtrazione

$r$ = raggio del pozzo (piezometro)

$c_0$ = concentrazione al tempo  $t=0$  (appena immesso il tracciante)

$t'$ = tempo che intercorre tra il tempo  $t=0$  (appena immesso il tracciante) e il tempo in cui si vuole effettuare l'analisi)

$c(t')$ = concentrazione al tempo  $t= t'$  (nel caso della seguente analisi si considerano i tempi relativi alle misurazioni effettuate nella settimana di monitoraggio dal 15/04/2024 al 22/04/2024)

$\alpha$ = coefficiente correttivo che varia da 1.5 a 2, l'esperienza suggerisce di utilizzare  $\alpha= 1.7$

## **RISULTATI**

### *4.1 RISULTATI DELLA PROVA DI POMPAGGIO*

1)Dati relativi alle misurazioni delle quote piezometriche con freatimetro.

Al termine della prova (si ricorda che in questo istante la pompa si trova a 20 metri di profondità dal p.c.) sono state effettuate una serie di fitte misure (riportate in Figura 466).

La Figura 477 è relativa all'analisi dei dati del diver, essendo che durante la fase di prova fino allo spegnimento della pompa la quota piezometrica è stata misurata esclusivamente attraverso il diver) che permettono di valutare la risalita dell'acqua nel piezometro. Alle ore

15:41.00 che corrispondono con lo spegnimento della pompa (che in questa fase si ricorda essere a 20 metri di profondità dal p.c.), nel piezometro esterno (a valle) la falda si trova a 11.05m di profondità dal p.c. Durante la prova, c'è stato un abbassamento di falda di 4,88m.

Inoltre i valori raccolti, evidenziano come la falda abbia impiegato un tempo valutabile nell'ordine di grandezza di un'ora per tornare all'incirca alla quota piezometrica iniziale.

Ore:minuti:secondi delle misurazioni	Z (profondità) da p.c. (m)
15:41:00	11.05
15:42:00	9.52
15:43:02	8.81
15:43:34	8.07
15:44:16	7.73
15:45:32	7.44
15:46:41	7.29
15:52:58	6.70
16:13:20	6.37

*Figura 46, Tabella relativa alla risalita della falda post pompaggio nel tempo (dati misurati dal freatometro)*

2) Dati relativi alle misurazioni di profondità, temperatura e conducibilità elettrica attraverso il diver.

Come detto, il diver nel piezometro esterno (di valle) si trova a una profondità di 12m dal p.c., dunque i dati da esso ricavabili sono relativi all'acqua che si trova a tale livello che risulta essere lievemente (a tratti per niente) influenzato dalla prova di pompaggio. Lo strumento misura in tempo reale minuto per minuto, quindi per i tre parametri da esso valutati è stato possibile descrivere dei grafici che coprono l'intera prova.

## -Profondità

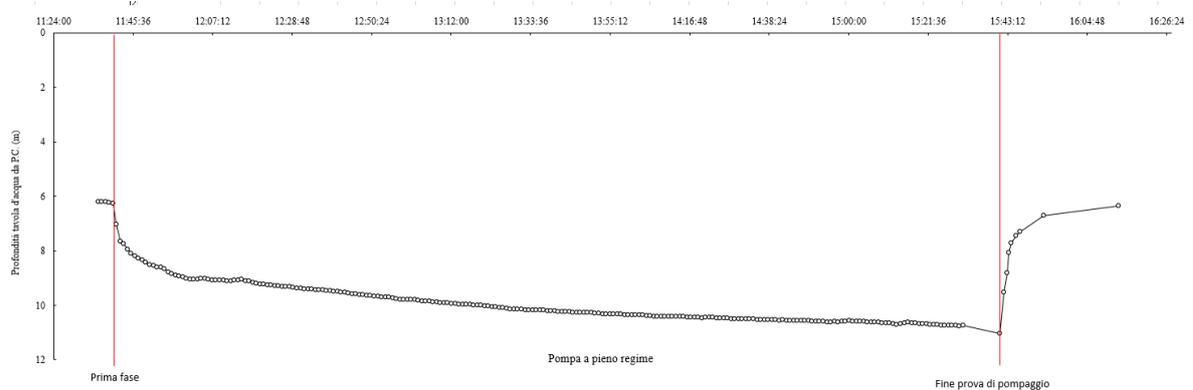


Figura 47, Andamento della profondità della tavola d'acqua nel tempo, estratto dal diver e elaborato con microsoft excel

Analizzando l'andamento riportato in Figura 477, la prova si può dividere in 3 fasi principali:

-Prima fase: essa dura dall'inizio della prova alle ore 11:34 fino alle ore 11:38 circa. In questa fase si evince come la profondità cresca linearmente e debolmente, perché la pompa non si trova a pieno regime.

-Pompa a pieno regime: essa dura dalle ore 11:38 circa fino alla fine della prova alle ore 15:41. In questa fase si evince inizialmente una crescita esponenziale dovuta proprio al fatto che la pompa ha iniziato a lavorare a pieno regime, per poi seguire un andamento semi lineare per tutto il resto della prova. Come sopra riportato, il delta H di profondità da inizio a fine prova è di 4.88m

-Fine prova di pompaggio: essa dura dalle ore 15:41 alle ore 16:13:20. In questa fase si evince il rapido diminuire della profondità nel tempo, che inizia immediatamente appena staccata la pompa, seguendo dapprima un andamento esponenziale che tende poi ad

affievolirsi in un debole andamento lineare fino a diventare poi una retta orizzontale che rappresenta la profondità costante della falda indisturbata.

### -Temperatura

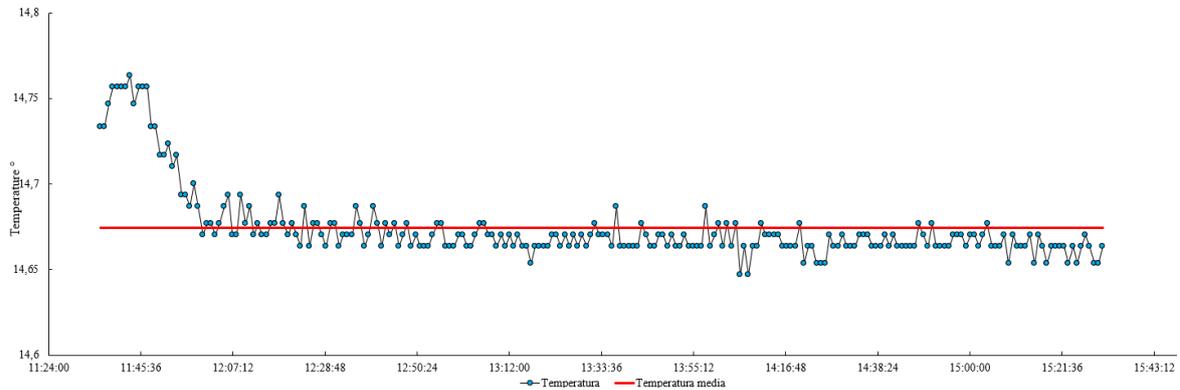


Figura 48, Andamento della temperatura dell'acqua nel tempo, estratto dal diver ed elaborato con microsoft excel

Dall'analisi dell'andamento della temperatura, riportato in Figura 488, si evince una prima fase della durata di circa 20 minuti in cui si ha una rapida discesa dei valori (che comunque oscillano da un massimo di 14,77° a un minimo di 14,65°). Tale discesa è data dal contatto dello strumento con l'acqua, che tende poi a riportare una temperatura costante (ci sono variazioni nell'ordine di  $10^{-1}$ °). Dunque alla profondità di 12m dal p.c., si riporta una temperatura media di 14,67°.

## -Conducibilità elettrica

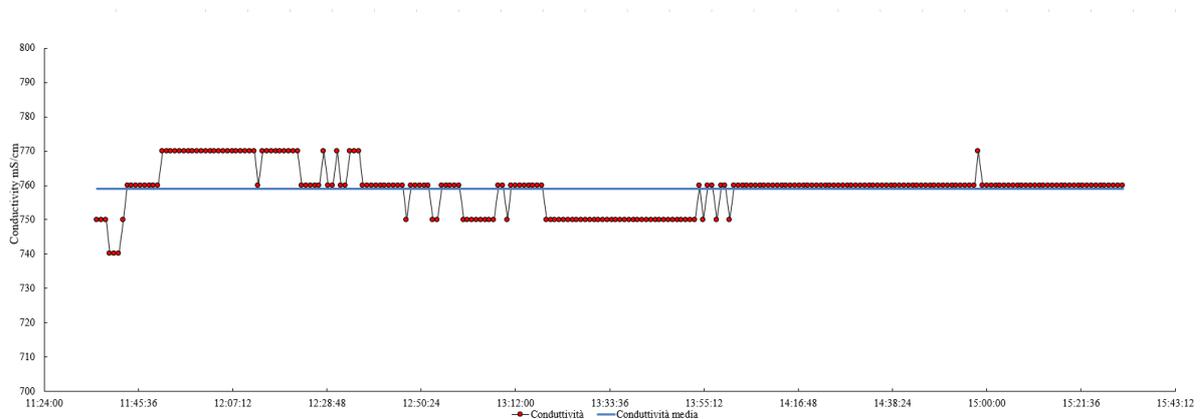


Figura 49, Andamento della conducibilità elettrica dell'acqua nel tempo, estratto dal diver ed elaborato con microsoft excel

A proposito della conducibilità elettrica, si osserva dal grafico riportato in Figura 499 come alla profondità di 12 m dal p.c., essa rimanga quasi sempre costante, con oscillazioni irrilevanti tra i 740 e i 770  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (microsiemens/centimetro). La conducibilità elettrica media è pari a 759  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### 3) Dati relativi alle misure con il conducimetro.

Risulta essere molto importante dal punto di vista delle analisi condotte, effettuare un confronto tra i dati ottenuti dal diver che si trova a profondità costante, e quelli estratti dal conducimetro, che è stato come sopra riportato utilizzato per misurare l'acqua pompata, dunque presenta dei dati relativi ad acqua che si trova via via sempre più in profondità. Ovviamente, avendo spiegato le funzioni del conducimetro, non è possibile riportare un grafico della profondità nel tempo. In ogni caso sarebbe stato un dato ridondante, essendo che la profondità della falda rispetto al p.c. è univoca nel corso della prova.

## -Temperatura

La temperatura dell'acqua pompata, misurata dal conducimetro all'interno dei secchi, risulta essere sempre costante e avente un valore pari a 15,1°. Ciò evidenzia che nonostante si vada a misurare dell'acqua via via più profonda (si ricorda che il deltaH della prova è di 4,88m), tale dislivello risulta essere ininfluenza in termini di temperatura. Per avere variazioni apprezzabili, è necessario misurare ad una maggiore profondità. Di seguito vengono riportati i dati ottenuti in Figura 500 e in Figura 511, e il loro andamento costante, visibile in Figura 5252.

Ore:minuti delle misurazioni	Temperatura (°)
11:46	15.1
11:57	15.1
12:05	15.1
12:13	15.1
12:22	15.1
12:39	15.1
13:07	15.1
13:25	15.1
14:07	15.1
14:39	15.1

*Figura 50, Tabella dei dati relativi alla temperatura nel tempo (misurati con il conducimetro)*

Da qui in poi la pompa è stata portata a 20m dal p.c., ma non ci sono state comunque variazioni di temperatura.

15:36	15.1
15:38	15.1

Figura 51, Dati relativi alla temperatura nel tempo misurati quando la pompa si trova a 20 m dal p.c. (misurati con conducimetro)

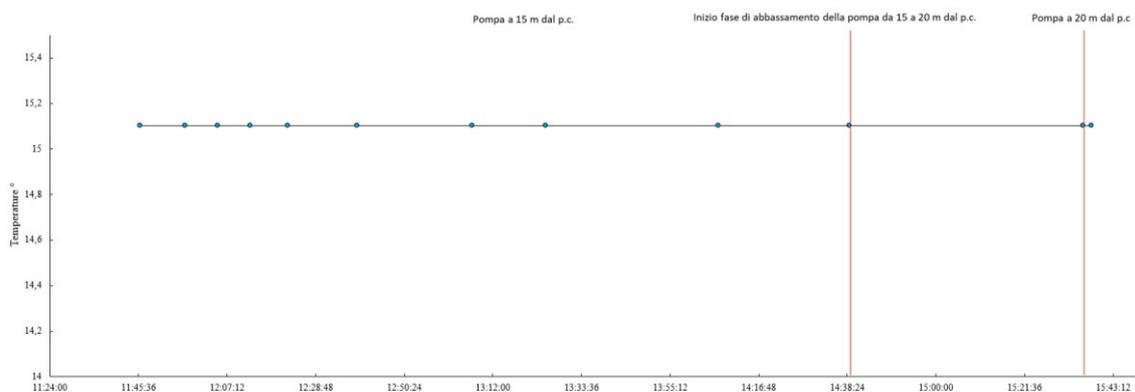


Figura 52, Andamento della temperatura dell'acqua nel tempo, estratto dal conducimetro e elaborato con microsoft excel

#### -Conducibilità elettrica

A differenza del diver, con questa misurazione risultano essere apprezzabili le variazioni di conducibilità elettrica essendo che vengono effettuate su un'acqua via via più profonda. Di seguito vengono riportati i dati ottenuti in Figura 5353 e in Figura 5454 e il loro andamento visibile in Figura 5555.

Ore:minuti delle misurazioni	Conducibilità elettrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
11:46	820
11:57	933
12:05	1024
12:13	1130
12:22	1302

12:39	1512
13:07	1670
13:25	1740
14:07	1800
14:39	1768

Figura 53, Tabella dei dati relativi alla conducibilità elettrica nel tempo (misurati con il conducimetro)

Da qui in poi la pompa è stata portata a 20m dal p.c.

15.36	4840
15:38	2460

Figura 54, Dati relativi alla conducibilità elettrica nel tempo misurati quando la pompa si trova a 20 m dal p.c. (misurati con conducimetro)

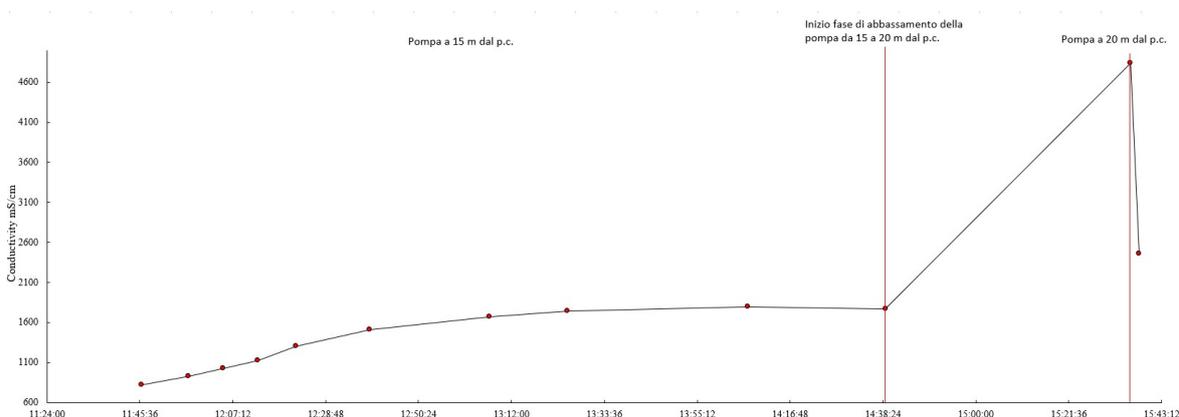


Figura 55, Andamento della conducibilità elettrica dell'acqua nel tempo, estratto dal conducimetro e elaborato con microsoft excel

L'analisi di tale grafico, mostra in prima battuta un aumento semi lineare della conducibilità elettrica fino alle ore 13:25, successivamente alle quali si hanno valori di conducibilità elettrica all'incirca costanti. Successivamente, essendo la pompa stata portata a 20m dal p.c., viene pompata un'acqua che si trova a maggiore profondità, e risulta evidente il notevole aumento di conducibilità elettrica. Superato il valore di picco si evince

un notevole decremento di tale valore, essendo che viene molto probabilmente richiamata l'acqua che si trova al di sopra della pompa.

#### 4) Dati relativi alle misure di portata

Per la misurazione della portata, si è scelto di utilizzare un secchio tarato a 10 litri. Viene dunque misurato il tempo necessario al riempimento dello stesso, e utilizzando la formula di portata  $Q=V/t$  (portata=volume/tempo) si è in grado di ottenere tale dato, come visibile in Figura 576.

Ore:minuti delle misurazioni	Portata (litri/secondo)
11:38	0.556
11:50	0.546
12:06	0.543
12:47	0.556

Figura 576, Tabella dei dati di portata nel tempo

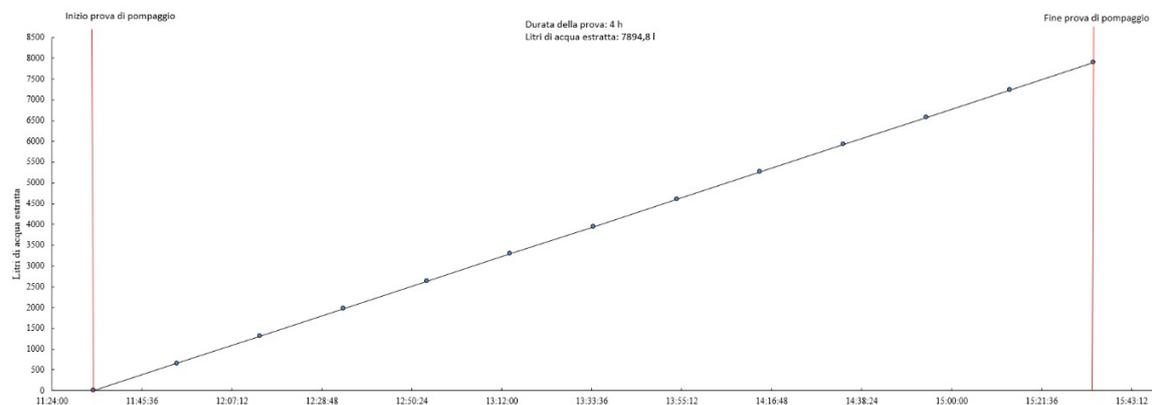


Figura 567, Andamento dei litri di acqua estratta nel tempo, elaborato con microsoft excel

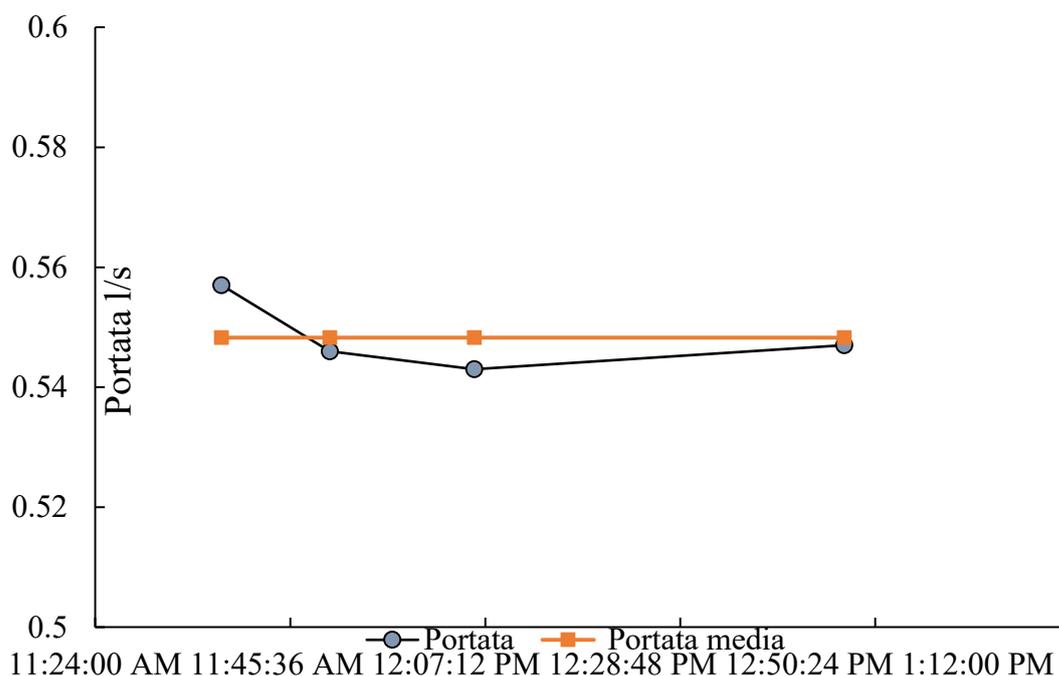


Figura 58, Andamento della portata nel tempo e valore della portata media, elaborato con microsoft excel

Essendo la portata poco variabile per tutta la prova, si è scelto di utilizzare il valor medio = 0.548 litri/secondo, come riportato in Figura 588. Moltiplicando tale valore per l'intera durata della prova, 4 ore (=14400 secondi), si arriva a definire il totale di litri d'acqua estratti=7894,8 litri, come visibile in Figura 57.

##### 5) Dati relativi alle misurazioni nel piezometro interno (a monte) con freatimetro

Ore:minuti delle misurazioni	Z (profondità) da p.c. (m)
10:48	6.45
15:41	6.45

Figura 59, Tabella dei dati relativi alla profondità misurata nel tempo nel piezometro interno (a monte), con freatimetro

Alle ore 15:41 che corrispondono alla fine della prova di pompaggio, nel piezometro interno (a monte) la falda si trova a 6.45m di profondità dal p.c., come visibile in Figura 599. Ciò in assoluto, evidenzia come la falda a monte non abbia risentito del pompaggio di acqua a valle, essendo la quota piezometrica relativa alla fine della prova rimasta invariata rispetto all'inizio.

#### 4.2 RISULTATI DELLA PROVA DI IMMISSIONE DI TRACCIANTE

Nel paragrafo precedente è stata elencata la metodica con la quale è stata eseguita la calibrazione, dai quali sono stati ottenuti i seguenti risultati.

1) Dati relativi alla calibrazione del sistema.

Concentrazione di NaCl (g/l)	Conducibilità elettrica $\mu\text{S/cm}$
0	739.4
1	2443.6
3	5220.6

Figura 60, Dati relativi alle misurazioni di calibrazione del diver

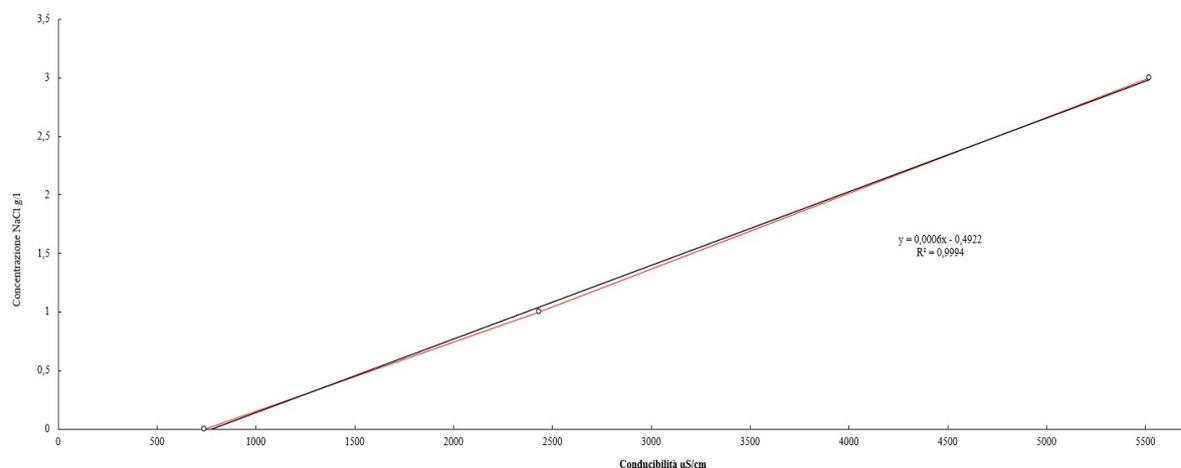


Figura 61, Andamento della calibrazione espressa dalla conducibilità elettrica dell'acqua in funzione del tempo, estratto dal diver ed elaborato con microsoft excel

L'andamento in rosso riportato in **Error! Reference source not found.** rappresenta graficamente i dati visibili in Figura 60, estratti dal diver, la linea nera è l'approssimazione lineare della linea rossa, dalla quale si ricava l'equazione  $y=0,0006x-0,4922$ , dove  $y$  rappresenta la concentrazione in g/l di NaCl,  $x$  la conducibilità elettrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Da tale relazione, conoscendo il valore di concentrazione o di conducibilità elettrica, è immediato ricavare uno dei due parametri incogniti. Viene per completezza riportato anche il parametro  $R^2=0,9994$ , che rappresenta il coefficiente di determinazione, un valore utilizzato in campo statistico che permette di valutare se un modello di regressione lineare può essere usato per previsioni future. Il valore 1 indica la non presenza di errori di previsione, e valori in quell'intorno (es. 0,9994) indicano un modello estremamente valido.<sup>29</sup>

2) Dati relativi alle misurazioni delle quote piezometriche con freatimetro.

Giorno/mese/anno – ore:minuti delle misurazioni	Z (profondità) da p.c. (m)
15/04/2024 – 10:57	6.05
15/04/2024 – 11:31	6.07
15/04/2024 – 17:09	6.10
18/04/2024 – 15:11	6.17
22/04/2024 – 12:59	6.22

*Figura 62, Andamenti della profondità della falda nella settimana di osservazione del piezometro (misurati con freatimetro)*

<sup>29</sup> <https://paolapozzolo.it/coefficiente-determinazione-r-quadro/>

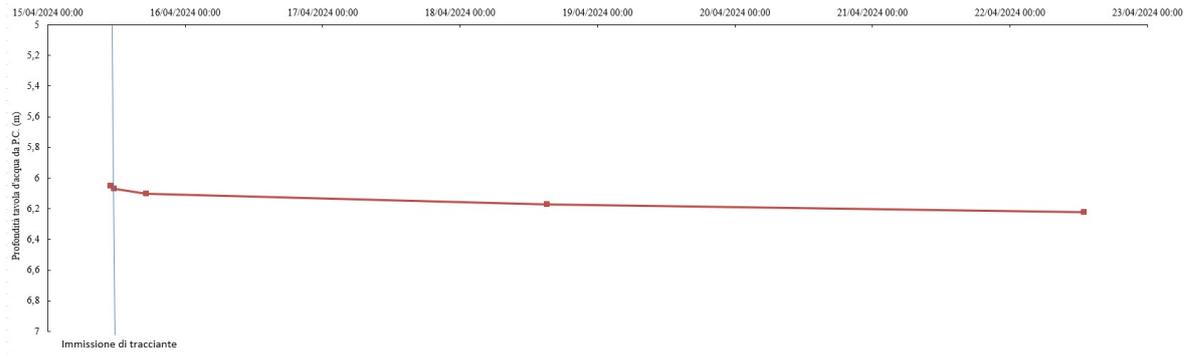


Figura 63, Andamento della profondità dell'acqua rispetto al p.c. relativo al tempo di osservazione dell'acquifero (7 giorni), estratto dal freatometro e elaborato con microsoft excel

Dall'andamento riportato in Figura 63, relativo ai dati di Figura 62 si evince che durante l'osservazione (15/04/2024 - 22/04/2024) la quota piezometrica varia leggermente, con un  $\Delta H$  di 17 cm.

3) Dati relativi alle misurazioni di conducibilità elettrica attraverso il diver.

Giorno/mese/anno – ore:minuti in cui sono stati eseguiti i log in discesa e in salita
15/04/2024 - 11:35 (prima dell'immissione di tracciante)
15/04/2024 - 12:00 (appena dopo l'immissione di tracciante)
15/04/2024 - 17:00
18/04/2024 - 15:20
22/04/2024 - 14:30

Figura 64, Tabella dove sono riportati i giorni e le ore in cui sono stati eseguiti i log

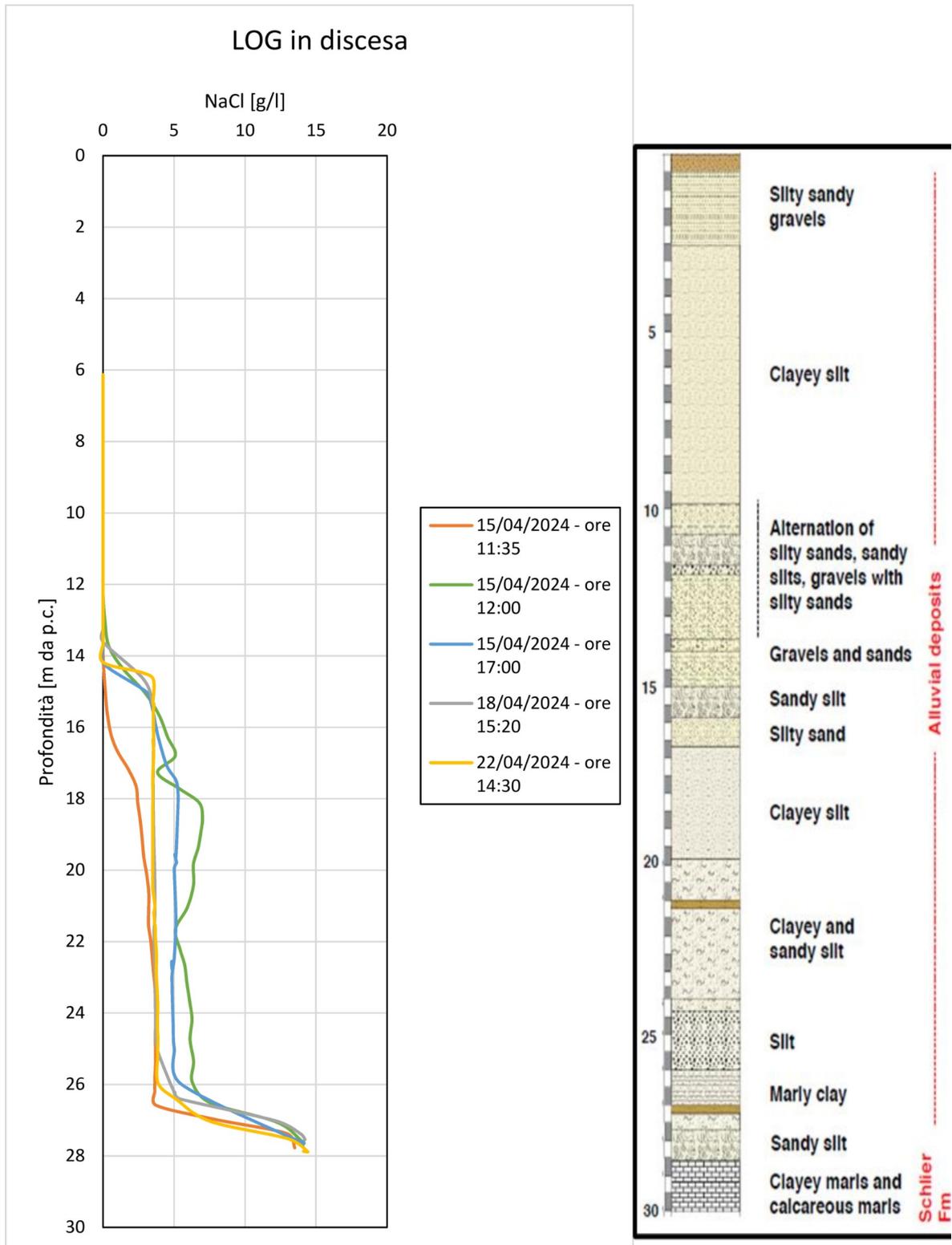


Figura 65, Andamenti dei log in discesa relativi ai momenti di misurazione, espressi in termini di concentrazione di NaCl (tracciante) nella profondità, estratti dai diver e elaborati con microsoft excel, affiancati dalla stratigrafia relativa al piezometro

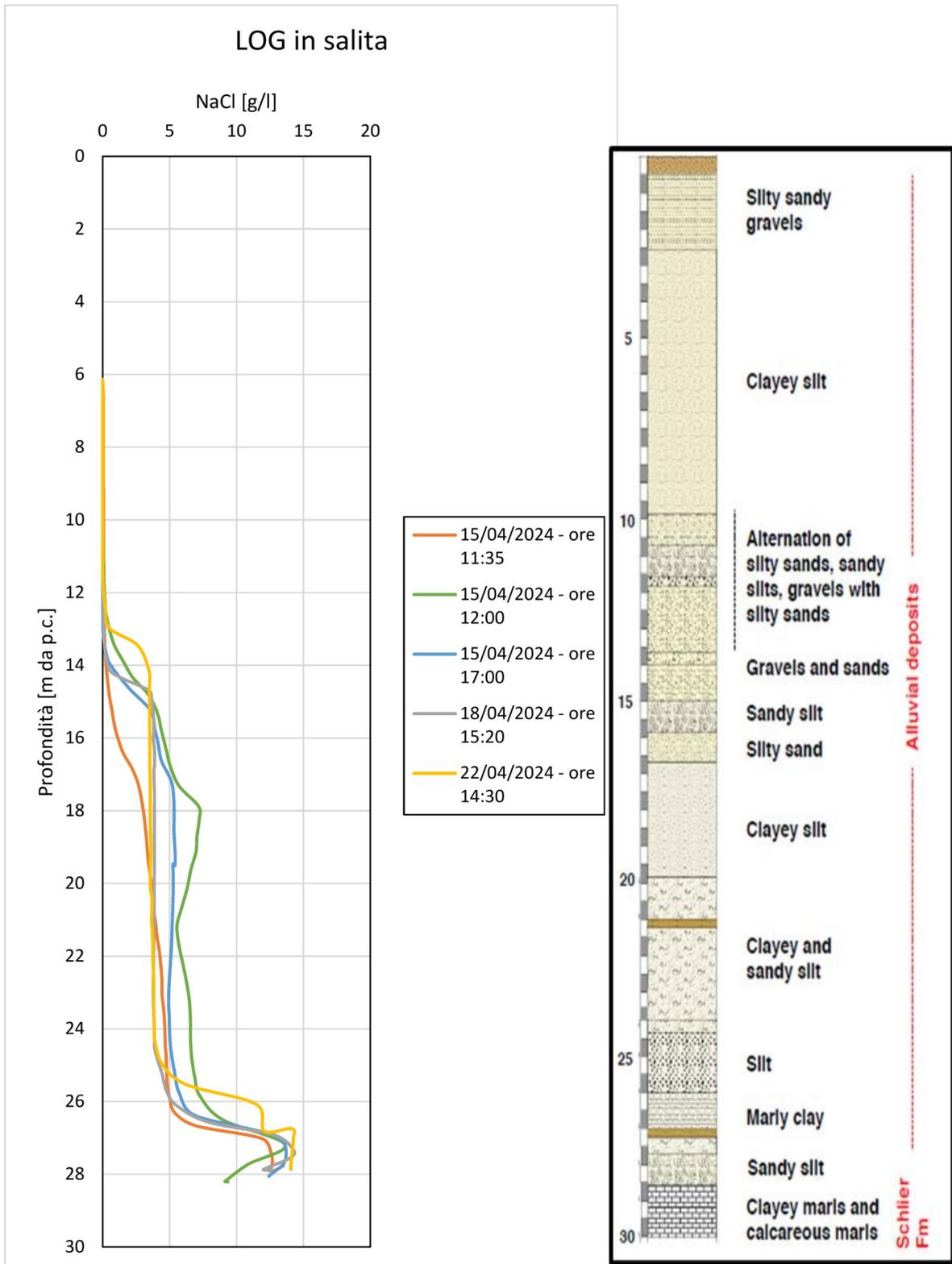


Figura 66, Andamenti dei log in salita relativi ai momenti di misurazione, espressi in termini di concentrazione di NaCl (tracciante) nella profondità, estratti dai diver e elaborati con microsoft excel, affiancati dalla stratigrafia del piezometro

I momenti in cui sono state eseguite le analisi sono riportati in Figura 6464. Come detto, data una maggiore accuratezza nei risultati, verrà analizzato solo il grafico relativo al log in discesa riportato in Figura 6565, ma viene comunque riportato per completezza il grafico relativo ai log in salita, visibile in Figura 6666. Tali grafici sono stati ricostruiti proprio grazie all'equazione della retta nota dalla calibrazione, essendo che il diver rileva la conducibilità elettrica. Essendo queste due variabili linearmente dipendenti, se si plottassero i valori in un grafico profondità-conducibilità elettrica, si otterrebbero i medesimi andamenti.

Dall'analisi del grafico in Figura 6565, si evidenzia che per ognuno degli andamenti la concentrazione di NaCl aumenta dopo i 12 metri di profondità. Sicuramente la diminuzione della concentrazione tra i vari log non risiede nella fratturazione del terreno, perché osservando gli andamenti dei due giorni seguenti, si evince un debole aumento della concentrazione fino ad arrivare alla profondità di 26 metri, nella quale si è depositata la maggior parte del tracciante, dalla quale si denota un importante aumento di concentrazione. L'ultima informazione che si può ricavare dal grafico risulta essere che alla profondità di 18m circa dal p.c. si evince il punto di maggiore distanza dall'andamento relativo alla misurazione appena immesso il tracciante (in verde) e quello relativo alla misurazione compiuta 7 giorni dopo (in giallo). Ciò denota che risulta essere la profondità di maggiore dispersione del tracciante. Tale grafico permette solo di eseguire una descrizione qualitativa del fenomeno in analisi, necessita dunque di essere implementata all'analisi della velocità di dispersione del tracciante, al fine di caratterizzare in maniera più approfondita l'acquifero e il suo comportamento.

### *4.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA PERMEABILITA' DEL TERRENO*

Avendo a disposizione i valori di concentrazione alle varie profondità nei giorni di analisi, si è in grado di utilizzare la seconda equazione riportata nel paragrafo 3.3.

Si ricorda che la velocità di dispersione corrisponde alla velocità di filtrazione dell'acqua.

Dal grafico dei log in discesa si è in grado dunque di valutare alle varie profondità da p.c. (15,5m, 17,5 m, 18,5 m, 19,5 m, tratto da 23 a 26 m).

I risultati relativi alla profondità di 15.5m sono riportati in Figura 677 e elaborati graficamente in Figura 688.

I risultati relativi alla profondità di 17.5m sono riportati in Figura 699 e elaborati graficamente in Figura 7070.

I risultati relativi alla profondità di 18.5m sono riportati in Figura 7171 e elaborati graficamente in Figura 7272.

I risultati relativi alla profondità di 19.5m sono riportati in Figura 7373 e elaborati graficamente in Figura 7474.

I risultati relativi alla profondità del tratto da 23 a 26 m sono riportati in Figura 7575 (nella quale per i vari parametri di concentrazione si è considerato il valor medio relativo a quel tratto) e elaborati graficamente in Figura 7676.

(Per ognuno dei successivi grafici viene riportata l'approssimazione parabolica, l'equazione di tale parabola e  $R^2$ ).

dd/mm/aa – hh/mm delle misurazioni	Z da p.c. (m)	c <sub>0</sub> a t=0 (g/l)	t' (day)	c(t') (g/l)	α(-)	r(cm)	v <sub>f</sub> (cm/day)	v <sub>f</sub> (cm/s)
15/04/2024- 12:00	15.5	4.06			1.7	5.08		
15/04/2024- 17:00	15.5		0.208	3.61	1.7	5.08	2.651	3.068 x 10 <sup>-5</sup>
18/04/2024- 15:20	15.5		3.139	3.58	1.7	5.08	0.188	2.178 x 10 <sup>-6</sup>
22/04/2024- 14:30	15.5		7.104	3.50	1.7	5.08	0.098	1.135 x 10 <sup>-6</sup>

Figura 67, Dati utilizzati per trovare la velocità di filtrazione alla profondità di 15.5 m dal p.c.

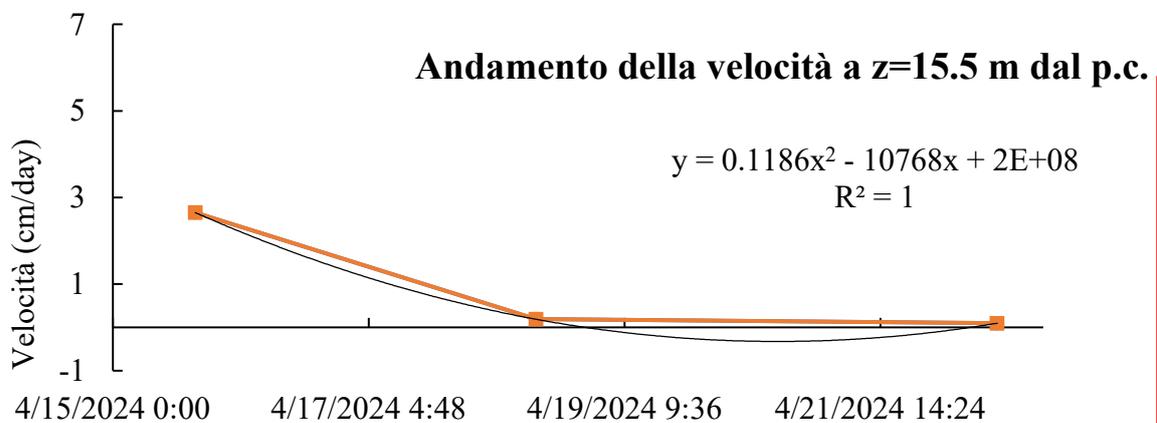


Figura 68, Andamento della velocità di filtrazione nel tempo alla profondità di 15.5m dal p.c., elaborato con microsoft excel.

dd/mm/aa – hh/mm delle misurazioni	Z da p.c. (m)	c <sub>0</sub> a t=0 (g/l)	t' (day)	c(t')	α(-)	r(cm)	v <sub>f</sub> (cm/day)	v <sub>f</sub> (cm/s)
15/04/2024- 12:00	17.5	5.72			1.7	5.08		
15/04/2024- 17:00	17.5		0.208	5.15	1.7	5.08	2.369	2.742 x 10 <sup>-5</sup>
18/04/2024- 15:20	17.5		3.139	3.86	1.7	5.08	0.588	6.807 x 10 <sup>-6</sup>
22/04/2024- 14:30	17.5		7.104	3.55	1.7	5.08	0.315	3.648 x 10 <sup>-6</sup>

Figura 69, Dati utilizzati per trovare la velocità di filtrazione alla profondità di 17.5 m dal p.c.

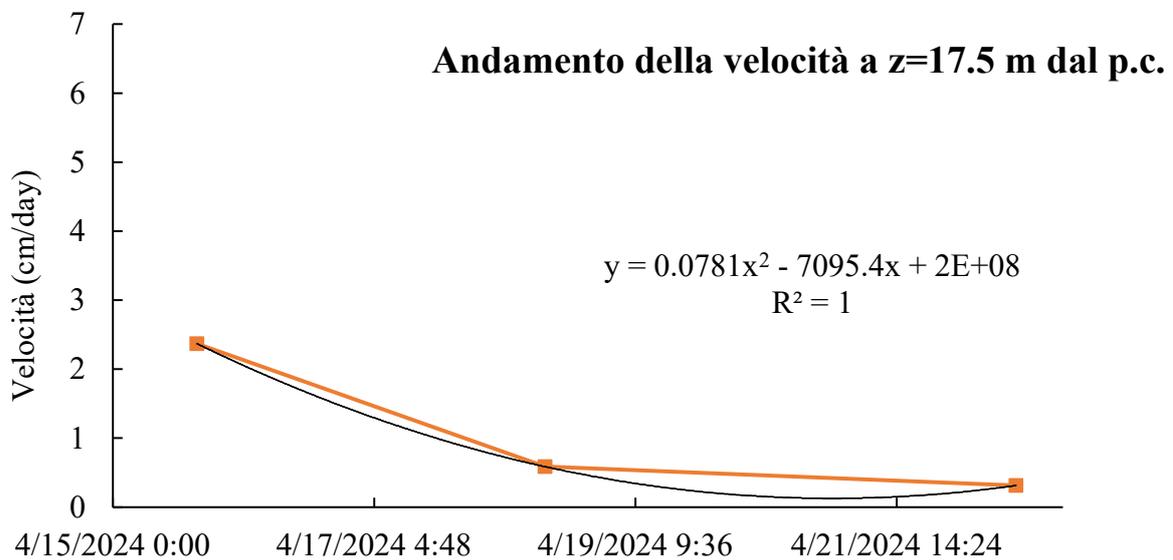


Figura 70, Andamento della velocità di filtrazione nel tempo alla profondità di 17.5 m dal p.c., elaborato con microsoft excel

dd/mm/aa – hh/mm delle misurazioni	Z da p.c. (m)	c <sub>0</sub> a t=0 (g/l)	t' (day)	c(t')	α(-)	r(cm)	v <sub>f</sub> (cm/day)	v <sub>f</sub> (cm/s)
15/04/2024- 12:00	18.5	7.15			1.7	5.08		
15/04/2024- 17:00	18.5		0.208	5.33	1.7	5.08	6.629	7.673 x 10 <sup>-5</sup>
18/04/2024- 15:20	18.5		3.139	3.85	1.7	5.08	0.926	1.071 x 10 <sup>-5</sup>
22/04/2024- 14:30	18.5		7.104	3.56	1.7	5.08	0.461	5.333 x 10 <sup>-6</sup>

Figura 71, Dati utilizzati per trovare la velocità di filtrazione alla profondità di 18.5 m dal p.c.

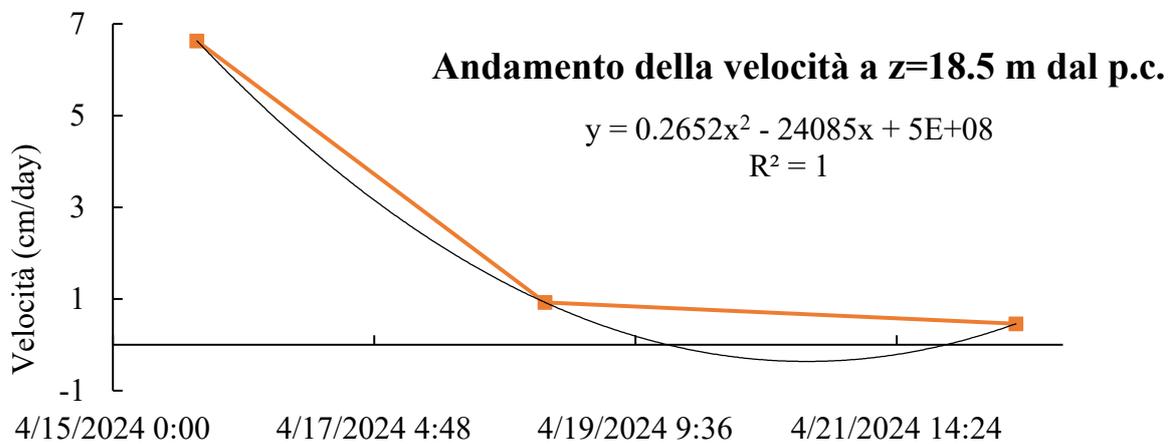


Figura 72, Andamento della velocità di filtrazione nel tempo alla profondità di 18.5m dal p.c., elaborato con microsoft excel

dd/mm/aa – hh/mm delle misurazioni	Z da p.c. (m)	c <sub>0</sub> a t=0 (g/l)	t' (day)	c(t')	α(-)	r(cm)	v <sub>f</sub> (cm/day)	v <sub>f</sub> (cm/s)
15/04/2024- 12:00	19.5	6.61			1.7	5.08		
15/04/2024- 17:00	19.5		0.208	5.25	1.7	5.08	5.198	6.017 x 10 <sup>-5</sup>
18/04/2024- 15:20	19.5		3.139	3.85	1.7	5.08	0.808	9.354 x 10 <sup>-6</sup>
22/04/2024- 14:30	19.5		7.104	3.54	1.7	5.08	0.413	4.776 x 10 <sup>-6</sup>

Figura 73, Dati utilizzati per trovare la velocità di filtrazione alla profondità di 19.5 m dal p.c.

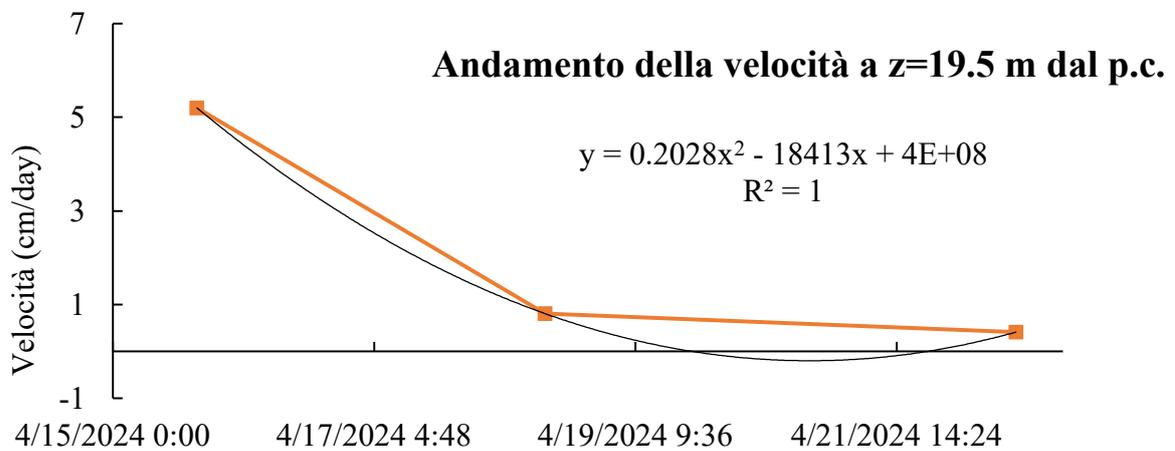


Figura 74, Andamento della velocità di filtrazione nel tempo alla profondità di 19.5m dal p.c., elaborato con microsoft excel

dd/mm/aa – hh/mm delle misurazioni	Z da p.c. (m)	c <sub>0</sub> a t=0 (g/l)	t' (day)	c(t')	α(-)	r(cm)	v <sub>f</sub> (cm/day)	v <sub>f</sub> (cm/s)
15/04/2024- 12:00	23-26	6.86			1.7	5.08		
15/04/2024- 17:00	23-26		0.208	5.31	1.7	5.08	5.179	5.995 x 10 <sup>-5</sup>
18/04/2024- 15:20	23-26		3.139	4.27	1.7	5.08	0.669	7.745 x 10 <sup>-6</sup>
22/04/2024- 14:30	23-26		7.104	3.93	1.7	5.08	0.350	4.057 x 10 <sup>-6</sup>

Figura 75, Dati utilizzati per trovare la velocità di filtrazione nel tratto di profondità da 23 a 26 m dal p.c.

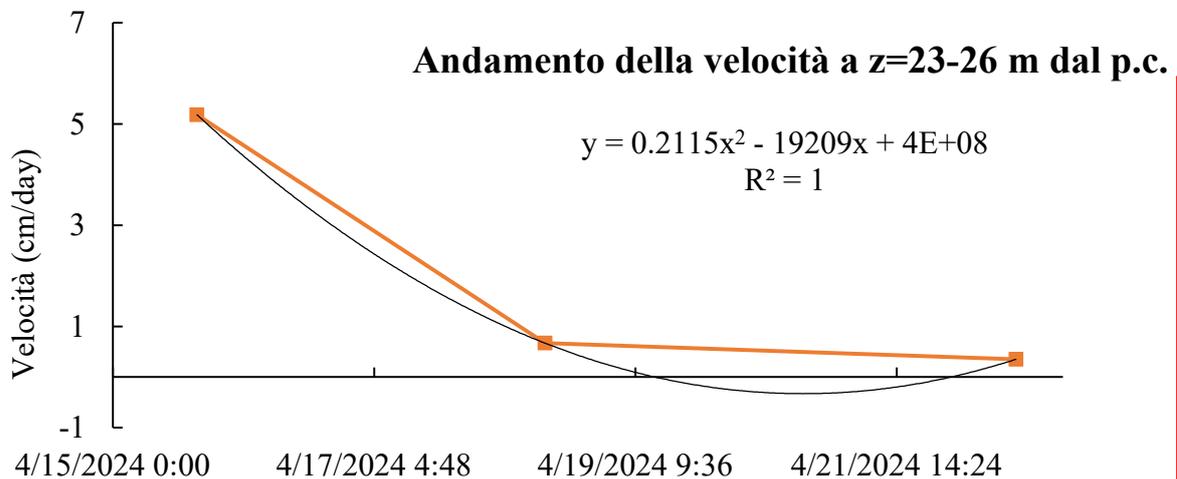


Figura 76, Andamento della velocità di filtrazione nel tempo nel tratto di profondità da 23 a 26 m dal p.c., elaborato con microsoft excel

Al fine di caratterizzare al meglio l'acquifero, vengono utilizzati i risultati di velocità di dispersione del tracciante relativi alla misurazione compiuta 7 giorni dopo l'immissione. Conoscendo tali valori, per applicare la prima equazione riportata nel paragrafo 3.3 e valutare il coefficiente di permeabilità  $k$ , va trovato il gradiente idraulico  $i$ , ricordando che si esprime come differenza di carico su lunghezza del tratto. In Figura 77 viene riportato uno schema semplificato dell'andamento del piano campagna e della superficie piezometrica, ricordando che il piezometro di monte si trova a 80 m s.l.m., quello di valle a 76 m s.l.m., la distanza in linea d'aria tra i due piezometri è di 216,4 m e i livelli di profondità della falda indisturbata (prima delle operazioni di pompaggio) sono di 6,45 m dal p.c. nel piezometro a monte e 6.17 m dal p.c. nel piezometro a valle.

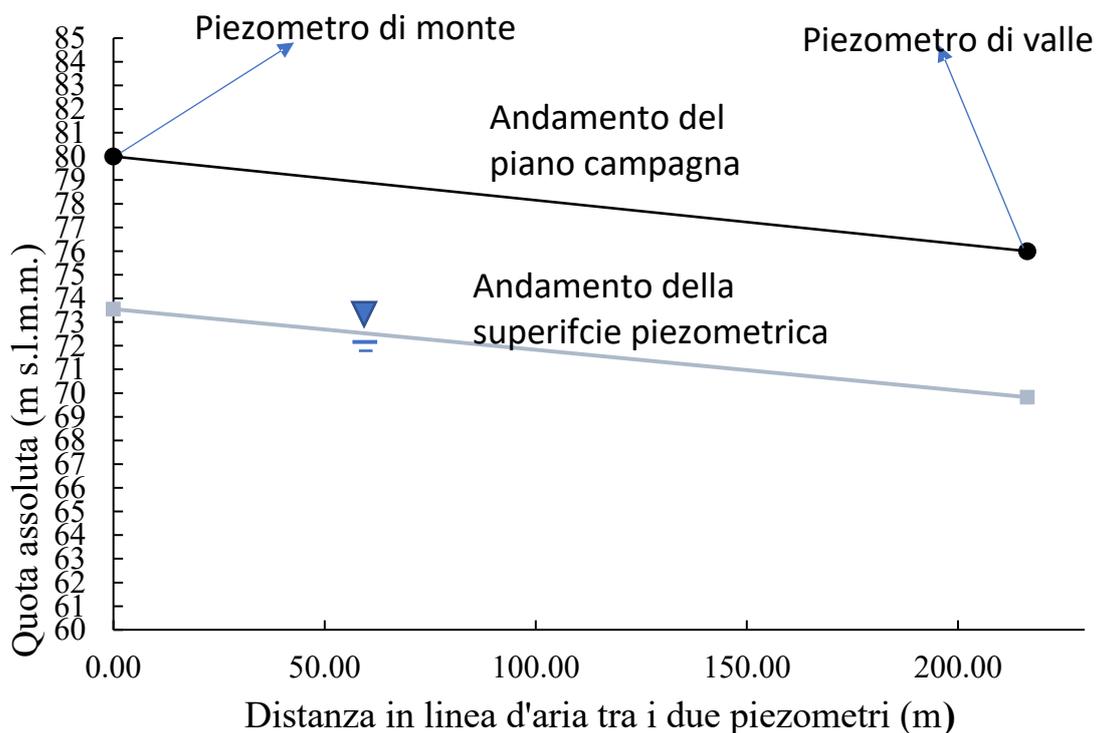


Figura 77, Andamento schematizzato del piano campagna e della superficie piezometrica lungo la distanza che intercorre tra i due piezometri, sviluppato tramite microsoft excel

Per ottenere dunque il valore della differenza di carico  $\Delta h$ , basta sottrarre la quota assoluta s.l.m.m della superficie piezometrica a monte alla quota assoluta s.l.m.m della superficie piezometrica a valle:  $(80-6,45) - (76-6,17) = 3,72\text{m}$ . Da cui il gradiente idraulico  $i = \frac{\Delta h}{l} = \frac{3,72}{216,4} = 0,0172 = 1,7\%$ .

A questo punto risulta essere possibile applicare la prima equazione riportata nel paragrafo 3.3, per conoscere il coefficiente di conducibilità idraulica del mezzo alle varie profondità, come riportato in Figura 788.

	Profondità da p.c. (m)	Velocità a 7 giorni dall'immissione v (cm/s)	Gradiente idraulico i (-)	Coefficiente di conducibilità idraulica k (cm/s)
	15,5	$1.135 \times 10^{-6}$	0,0172	$6,60 \times 10^{-5}$
	17,5	$3.648 \times 10^{-6}$	0,0172	$2,12 \times 10^{-4}$
	18,5	$5.333 \times 10^{-6}$	0,0172	$3,10 \times 10^{-4}$
	18,5	$4.776 \times 10^{-6}$	0,0172	$2,78 \times 10^{-4}$
	23-26	$4.057 \times 10^{-6}$	0,0172	$2,36 \times 10^{-4}$
Media		$3.79 \times 10^{-6}$		$2,20 \times 10^{-4}$
Scarto quadratico medio		$1,449 \times 10^{-6}$		$8,423 \times 10^{-5}$

Figura 78, Tabella relativa ai valori utilizzati per il calcolo del coefficiente di conducibilità idraulica

In tale tabella vengono inoltre, per la velocità e per il coefficiente di conducibilità idraulica, riportati i valori di media e di scarto quadratico medio, indice utilizzato per valutare lo

scostamento dei dati dal valore medio centrale. Tale parametro, in un'analisi di prima approssimazione che verrà nel seguito approfondita, essendo molto piccolo (nell'ordine del  $10^{-6}$  per la velocità e nell'ordine del  $10^{-5}$  per la conducibilità idraulica), rende immediatamente l'idea dell'omogeneità del terreno, della non fratturazione degli strati presenti e della conducibilità idraulica quasi costante alle varie profondità.

#### 4.4 CONFRONTO DEI VALORI DI PERMEABILITA' OTTENUTI

Avendo dunque caratterizzato la permeabilità a varie profondità, risulta essere particolarmente utile ai fini dell'analisi, effettuare in prima battuta un confronto con le analisi stratigrafiche e successivamente un confronto con i risultati ottenuti dalle analoghe prove di tracciamento nel medesimo piezometro.

##### CONFRONTO CON LE ANALISI STRATIGRAFICHE

Per l'esecuzione di tale confronto, risulta essere necessario definire la tipologia di terreno in base alla conducibilità idraulica. Verranno usate due classificazioni, riportate in Figura 79<sup>30</sup> e in Figura 8080<sup>31</sup>, in modo tale da verificare la veridicità della prima confrontandola con la seconda e viceversa. Per l'utilizzo della prima tabella, occorre valutare il coefficiente di conducibilità idraulica in m/s relativo ai depositi non consolidati.

---

<sup>30</sup> Freeze, R.A., & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*, Cap.2.

<sup>31</sup> <https://www.progeosas.net/misure-di-permeabilita-in-sito/>

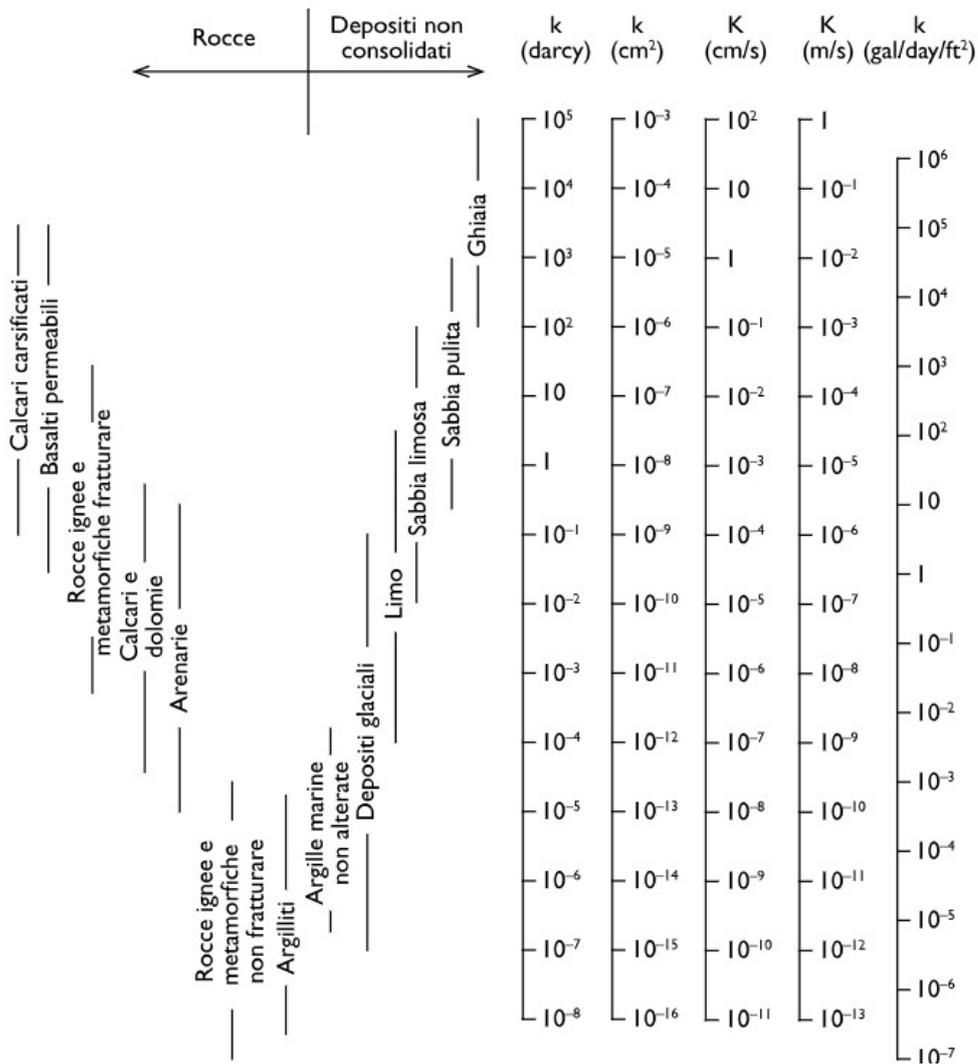


Figura 79, Range di valori di conducibilità idraulica K e permeabilità k

TIPO DI TERRENO	k (m/s)
Ghiaia pulita	10 <sup>-2</sup> - 1
Sabbia pulita, sabbia e ghiaia	10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-2</sup>
Sabbia molto fine	10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-4</sup>
Limo e sabbia argillosa	10 <sup>-9</sup> - 10 <sup>-5</sup>
Limo	10 <sup>-8</sup> - 10 <sup>-6</sup>
Argilla omogenea sotto falda	< 10 <sup>-9</sup>
Argilla sovraconsolidata fessurata	10 <sup>-8</sup> - 10 <sup>-4</sup>
Roccia non fessurata	10 <sup>-12</sup> - 10 <sup>-10</sup>

Figura 80, Tipi di terreno in base alla conducibilità idraulica K

Profondità da p.c. (m)	Coefficiente di conducibilità idraulica k (m/s)	Tipologia di terreno valutata dalla prima tabella	Tipologia di terreno valutata dalla seconda tabella
15,5	$6,60 \times 10^{-7}$	Limo	Limo e sabbia argillosa/ limo
17,5	$2,12 \times 10^{-6}$	Limo/Sabbia limosa	Sabbia molto fine/ limo e sabbia argillosa/ limo
18,5	$3,10 \times 10^{-6}$	Limo/Sabbia limosa	Sabbia molto fine/ limo e sabbia argillosa/ limo
19,5	$2,78 \times 10^{-6}$	Limo/Sabbia limosa	Sabbia molto fine/ limo e sabbia argillosa/ limo
23-26	$2,36 \times 10^{-6}$	Limo/Sabbia limosa	Sabbia molto fine/ limo e sabbia argillosa/ limo

*Figura 81, Classificazione del tipo di terreno alle profondità analizzate in base al valore di conducibilità idraulica mediante tabelle*

La classificazione riportata in Figura 8181, evidenzia coerenza tra i due metodi di stima utilizzati. Inoltre, riportando i risultati ottenuti in uno schema semplificato di un piezometro e confrontandoli con la stratigrafia nota, si delinea un corretto inquadramento stratigrafico del terreno, come riportato in Figura 882.

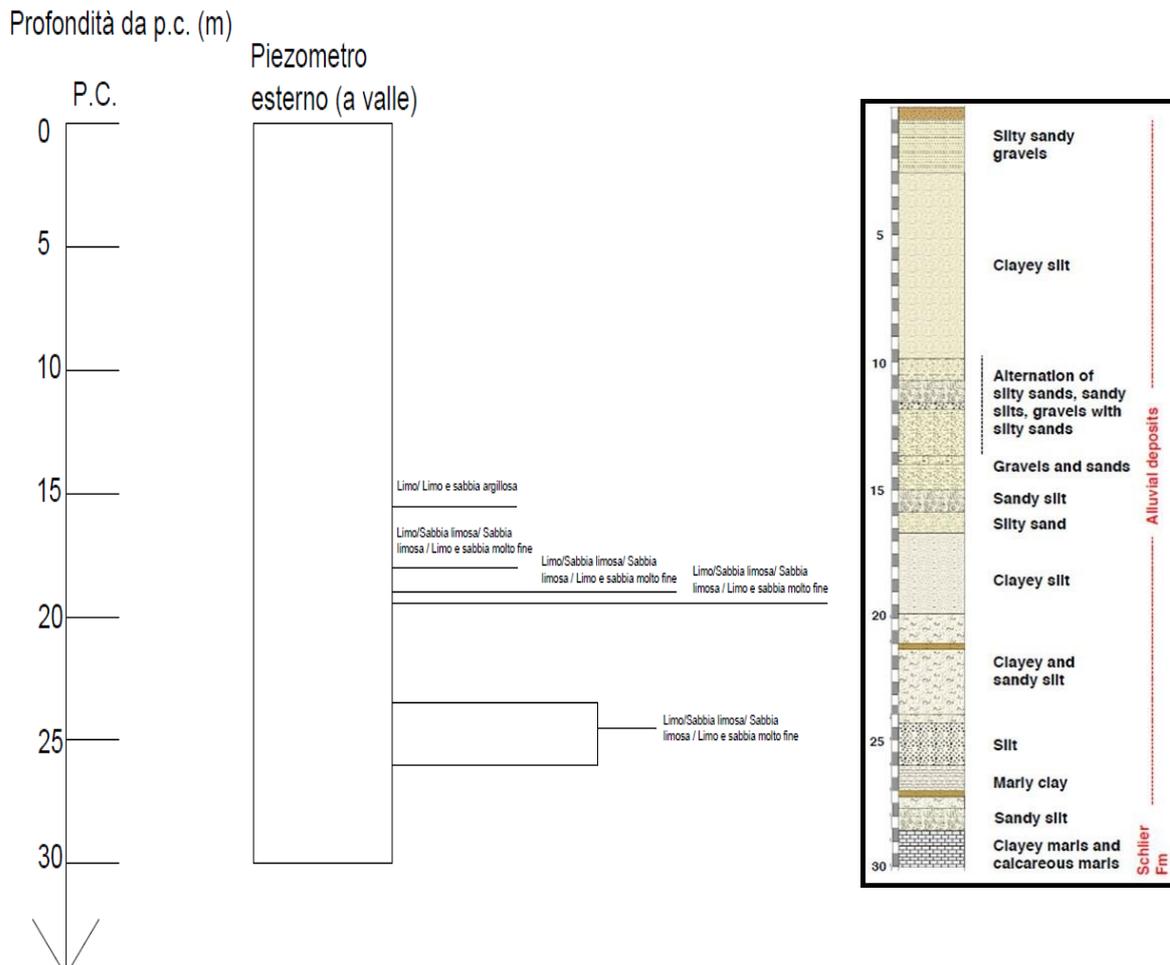


Figura 822, Schema semplificato del piezometro a valle, con riportati i risultati ottenuti, elaborato mediante AutoCad, a confronto con l'analisi stratigrafica disponibile

### CONFRONTO CON I RISULTATI DI UNA PROVA DI TRACCIAMENTO SVOLTA NEL MEDESIMO PIEZOMETRO

Come riportato nella sezione 1.4, nello stesso piezometro è stata condotta la medesima analisi. Risulta essere dunque importante confrontare i risultati ottenuti nell'analisi corrente, come visibile in Figura 8383, al fine di poter valutarne la veridicità. Le profondità analizzate, e dunque confrontabili con i risultati attuali, nella passata prova di tracciamento risultano essere 15,5m, 17,5 m e 19,5 m dal p.c.

Profondità da p.c. (m)	Coefficiente di conducibilità idraulica k della prova corrente(m/s)	Tipologia di terreno valutata dalla prima tabella	Tipologia di terreno valutata dalla seconda tabella	Coefficiente di conducibilità idraulica k della prova passata (m/s)	Tipologia di terreno valutata dalla prima tabella	Tipologia di terreno valutata dalla seconda tabella
15,5	$6,60 \times 10^{-7}$	Limo	Limo e sabbia argillosa/ limo	$3,35 \times 10^{-6}$	Sabbia limosa / Limo	Sabbia molto fine / Limo / Limo e sabbia argillosa
17,5	$2,12 \times 10^{-6}$	Limo/Sabbia limosa	Sabbia molto fine/ limo e sabbia argillosa/ limo	$2,01 \times 10^{-5}$	Sabbia pulita / Sabbia limosa/ Limo	Sabbia molto fine / Limo / Limo e sabbia argillosa
19,5	$2,78 \times 10^{-6}$	Limo/Sabbia limosa	Sabbia molto fine/ limo e sabbia argillosa/ limo	$1,2 \times 10^{-5}$	Sabbia pulita / Sabbia limosa/ Limo	Sabbia molto fine / Limo / Limo e sabbia argillosa

Figura 83, Confronto tra i risultati ottenuti dalla corrente analisi e quelli ottenuti nella passata analisi relativa alla prova di tracciamento

Tale confronto dunque, mette in risalto la veridicità dei risultati ottenuti dalla corrente prova, essendo che la tipologia di terreno valutata mediante le due tabelle sopra riportate risulta essere analoga a quella valutata nella prova eseguita nel 2016.

## CONCLUSIONI

La presente tesi ha evidenziato l'importanza cruciale della caratterizzazione degli acquiferi per una gestione sostenibile delle risorse idriche. Lo studio è stato condotto nella zona di Betelico, tra le campagne dell'Anconetano, dove sono stati installati in precedenza da parte dell'Univpm due piezometri per monitorare le caratteristiche dell'acquifero locale. Attraverso un'approfondita analisi geologica e idrogeologica, si è dimostrato come una conoscenza dettagliata delle formazioni geologiche e delle dinamiche degli acquiferi possa contribuire significativamente alla pianificazione e alla gestione efficiente delle risorse idriche, specialmente in contesti caratterizzati da stress idrico e cambiamenti climatici.

I risultati ottenuti dalle prove di pompaggio hanno fornito dati preziosi sulla permeabilità del terreno. Durante la prova di pompaggio, è stato osservato che il piezometro di monte non è stato influenzato dal pompaggio di quello a valle, indicando una separazione idraulica significativa e fornendo ulteriori informazioni sulla struttura e il comportamento dell'acquifero. Le prove di pompaggio sono state eseguite utilizzando una pompa elettrica posizionata a diverse profondità, con monitoraggio in tempo reale dei dati di livello dell'acqua, conducibilità elettrica e temperatura mediante l'uso di diver e conducimetro.

La prova di immissione di tracciante ha fornito informazioni fondamentali sulla stratigrafia e la permeabilità del terreno. Sono stati utilizzati 620 grammi di cloruro di sodio (NaCl) come tracciante, e la conducibilità elettrica è stata misurata per monitorare la diffusione del tracciante all'interno del piezometro. I dati raccolti hanno mostrato che il tracciante si è diffuso principalmente attraverso strati di limo, sabbia limosa e argilla, confermando la presenza di una stratigrafia complessa. L'aumento della conducibilità elettrica misurato ha

indicato che il tracciante ha raggiunto diverse profondità, rivelando variazioni minime nella permeabilità tra i diversi strati testati. Questo risultato è essenziale per comprendere meglio le dinamiche di trasporto all'interno dell'acquifero e per sviluppare modelli idrogeologici più precisi.

Questi dati sono fondamentali per sviluppare strategie di gestione che bilancino il prelievo e la ricarica delle falde acquifere, prevenendo fenomeni di sovrasfruttamento e contaminazione. In particolare, la gestione delle risorse idriche durante i periodi di siccità emerge come una sfida complessa che richiede un approccio integrato e basato su solide conoscenze scientifiche. La normativa vigente e gli strumenti di pianificazione, come gli Ambiti Territoriali Ottimali (ATO), rappresentano un passo avanti nella tutela della qualità e dell'equilibrio quantitativo del ciclo idrico, ma è essenziale che tali strumenti siano costantemente aggiornati e implementati con dati accurati e strategie innovative.

La ricerca svolta ha inoltre messo in evidenza come la contaminazione delle falde acquifere e l'intrusione salina in acquiferi costieri costituiscano problemi significativi che necessitano di monitoraggio continuo e interventi tempestivi. L'adozione di metodologie di calcolo avanzate e l'uso di tecnologie moderne per il monitoraggio e la gestione delle risorse idriche possono offrire soluzioni efficaci per affrontare queste sfide.

In conclusione, questa tesi ha dimostrato che una gestione efficace e sostenibile delle risorse idriche non può prescindere da una solida base scientifica e da un approccio interdisciplinare. La geologia applicata e le indagini idrogeologiche svolgono un ruolo fondamentale nella comprensione e nella gestione degli acquiferi, garantendo la disponibilità e la qualità delle risorse idriche per le generazioni future. Solo attraverso un impegno costante nella ricerca scientifica e nella pianificazione strategica sarà possibile affrontare con successo le sfide

legate alla gestione delle risorse idriche, promuovendo il benessere delle comunità e la protezione degli ecosistemi naturali.

I risultati di questa ricerca possono essere utilizzati come base per ulteriori studi e applicazioni pratiche. In futuro, tali dati potrebbero essere impiegati per sviluppare modelli predittivi più accurati che permettano una gestione proattiva delle risorse idriche, prevenendo crisi idriche e migliorando la resilienza delle comunità locali. Inoltre, le metodologie adottate potrebbero essere applicate in altre regioni con problematiche simili, contribuendo a una gestione globale più sostenibile delle risorse idriche. Infine, questa ricerca potrebbe stimolare l'adozione di nuove politiche e normative basate su evidenze scientifiche, promuovendo un uso più responsabile e consapevole delle risorse idriche a livello regionale e nazionale.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ambrosetti (2023) - *The european*. Libro bianco 2023
- [2] Aquilanti L. et al., (2017) - *Parameters of flow in porous alluvial aquifers evaluated by tracers*. Flowpath, 3<sup>rd</sup> National meeting on hydrogeology, Cagliari, 14-16 June 2017.
- [3] Australian Museums
- [4] Boccaletti et alii, (1990).
- [5] Bowles J.E., (1991) – *Foundation analysis and design*. RmacGraw Hill Libri Italia Ed., Milano.
- [6] Calamita F. et al., (1986) – *Studi geol. Camerti*, volume speciale “La Geologia delle Marche”.
- [7] Casadio M. & Elmi C., (1999) – *Il manuale del Geologo*. Pitagora Editrice Bologna.
- [8] Cello G. et al., (1995) - *Tettonica attiva in Appennino centrale ed implicazioni per l'analisi della pericolosità sismica del settore assiale della catena Umbro-Marchigiana-Abruzzese*. Studi Geol. Camerti, XIII, 115-138.
- [9] Centamore E. et al., (1986) - *Carta Geologica delle Marche in scala 1:250'000* a cura di Centamore E., L.A.C. Firenze.
- [10] Centamore E. & Deiana G., (1986) - *La geologia delle Marche*. Studi geol. Camerti, Vol. Spec.: 1-145.
- [11] Centamore E. et al., (1991) – *Rappresentazione cartografica alla scala 1:100'000 in: L'Ambiente Fisico delle Marche*. Regione Marche, Assessorato Urbanistica-Ambiente: allegato.
- [12] Cestari F., (1990) – *Prove geotecniche in sito*. Geo-Graph Ed., Segrate.
- [13] Cestelli Guidi C., 1981 – *Geotecnica e tecnica delle fondazioni*. Ulrico Hoepli, Milano. Vol. 1 e 2.
- [14] Colalongo et Al., 1979.
- [15] Colombo P., 1974 – *Elementi di geotecnica*. Zanichelli, Bologna.

- [16] Consiglio Nazionale Ricerche (C.N.R.). Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (G.N.D.C.I.), Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nell'Italia centrale (I.R.P.I.): “*Carta Inventario dei Movimenti Franosi della Regione Marche ed Aree Limitrofe*. Scala 1:100'000”. Pubblicazione G.N.D.C.I. n° 580.
- [17] Desio A., (1973) – *Geologia applicata all'ingegneria*. Hoepli, Milano.
- [18] Freeze, R.A., & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*, Cap.2.
- [19] Fronzi D. et al., (2022) - *A permanent field laboratory to monitor water quality and fluxes in the vadose zone*. GIT 2022, Fondi.
- [20] Fronzi D. et al., (2022) - *Groundwater-surface water interaction revealed by meteorological trends and groundwater fluctuations on stream water level*, Flowpath.
- [21] Fronzi D. et al., (2023) - *Towards Groundwater-Level Prediction Using Prophet Forecasting Method by Exploiting a High-Resolution Hydrogeological Monitoring System*. Water 2024.
- [22] Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2023
- [23] Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2023
- [24] Han, Y. Et al., (2023) - *Exposure, Distribution, and Ecological Risk of Four New Bisphenol Analogs in the Typical Lake Region of Taihu Lake*. *Expo. Health*; early access.
- [25] Istat
- [26] Lambe W.T. & Whitman R.V., (1997) – *Meccanica dei terreni*. Dario Flaccovio Ed., Palermo.
- [27] Lancellotta R., (1987) – *Geotecnica*. Zanichelli, Bologna.
- [28] Leibundgut C. et alii, (2009)- *Traces in Hydrology*, 221-223.
- [29] Mussi M. et al., (2017) - *The Mt Conero limestone ridge: the contribution of stable isotopes to the identification of the recharge area of aquifers*. *Ital. J. Geosci.*, Vol. 136, No. 2, 186-197.
- [30] Osservatorio permanente sugli utilizzi idrici

- [31] Palpacelli S. (2021), stratigrafia fino a 6 m di profondità del piezometro interno (a monte).
- [32] Papa, F. et al., (2020) - *Water Resources in Africa under Global Change: Monitoring Surface Waters from Space. Surv. Geophys* , 43–93.
- [33] Regione marche, (2004) - Autorità di Bacino Regionale: “Piano stralcio di bacino per l’Assetto Idrogeologico dei bacini di rilievo regionale (PAI)”.
- [34] Ricci Lucchi F., (1978) – *Sedimentologia, Parte I, II e III*. Cooperativa Libreria Universitaria Editrice, Bologna.
- [35] Rossi G., (2020) -*Drought mitigation measures: a comprehensive framework*, in J.V. Vogt, F. Somma, (eds.), *Drought and Drought mitigation in Europe*, Kluwer Academy Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 223-246.
- [36] Sachs, J.D. et al., (2022) - *Sustainable Development Report 2022*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2022.
- [37] Schilling, J et al., (2020) - *Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. Reg. Environ. Chang*, 15.
- [38] Tazioli A. (2022), *Materiale didattico relativo al corso di geologia applicata*, presso Univpm.
- [39] Tazioli et al., (2017), stratigrafia del piezometro esterno (a valle).
- [40] Vörösmarty, C.J. et al., (2000) - *Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth*, 284–288.
- [41] WRI

## SITOGRAFIA

- [1] <https://paolapozzolo.it/coefficiente-determinazione-r-quadro/>
- [2] [https://it.wikipedia.org/wiki/Marna\\_\(roccia\)#:~:text=La%20marna%20%C3%A8%20una%20roccia,\(CO3\)2%5D](https://it.wikipedia.org/wiki/Marna_(roccia)#:~:text=La%20marna%20%C3%A8%20una%20roccia,(CO3)2%5D)
- [3] <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/acqua/gestione-delle-risorse-idriche-in-italia/usi>
- [4] [https://www.isprambiente.gov.it/pre\\_meteo/idro/idro.html#osservatori](https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/idro.html#osservatori)
- [5] [https://www.isprambiente.gov.it/pre\\_meteo/idro/SeverIdrica.html#PrevStag](https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/SeverIdrica.html#PrevStag)
- [6] <https://www.mase.gov.it/>
- [7] <https://www.progeosas.net/misure-di-permeabilita-in-sito/>
- [8] [www.comune.camerano.it](http://www.comune.camerano.it)
- [9] [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)
- [10] [www.ingv.it](http://www.ingv.it)
- [11] [www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it)
- [12] [www.normattiva.it](http://www.normattiva.it)
- [13] [www.parlamento.it](http://www.parlamento.it)
- [14] [www.regione.marche.it](http://www.regione.marche.it)