



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI, DEI SUOLI E DEL PAESAGGIO

IMPATTO DELL'EVENTO DI SETTEMBRE
2024 SU SISTEMA IDROLOGICO E
IDROGEOLOGICO NELL'AZIENDA
AGRARIA UNIVPM

IMPACT OF THE SEPTEMBER 2024 EVENT ON
THE HYDROLOGICAL AND
HYDROGEOLOGICAL SYSTEM IN THE
UNIVPM FARM

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
Fabi Alessandro

Relatore:
PROF. ALBERTO TAZIOLI

Correlatore:
DOTT. DAVIDE FRONZI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024
SESSIONE DICEMBRE 2024

Dedico questa tesi a chi mi è stato sempre vicino, a chi mi ha sostenuto nei momenti difficili e ha creduto in me anche quando io stesso faticavo a farlo.
Grazie di cuore.

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	11
CAPITOLO 2 INQUADRAMENTO AREA DI STUDIO	29
2.1 Inquadramento geografico.....	29
2.2 Inquadramento geologico e geomorfologico	36
2.3 Inquadramento idrologico del bacino	40
2.4 Inquadramento climatico.....	41
2.5 Cambiamento climatico nelle Marche	43
2.5.1 Situazione meteorologica.....	44
2.5.2 Severità idrica locale	46
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI.....	47
3.1 Strumenti.....	47
3.1.1 Strumenti meccanici.....	47
3.1.2 Strumenti per la misurazione in situ	50
3.1.3 Strumenti elettronici.....	51
3.1.4 Strumenti informatici	55
3.2 Metodi di indagine	56
3.3 Rilievo in sito e scaricamento dati.....	74
3.4 Ricognizione danni post evento.....	81
CAPITOLO 4 ELABORAZIONE DATI E DISCUSSIONE	91
4.1 Analisi dei Dati scaricati dal Sistema Informativo Regionale Meteo-Idro- Pluviometrico.....	92
4.1.1 Precipitazioni 2004-2024	92
4.1.2 Temperatura 2008-2024	93
4.1.3 Andamento temperature e precipitazioni 2024	94

4.1.4 Analisi intensità della pioggia	95
4.2 Analisi dei dati ottenuti tramite i sensori installati	97
4.2.1 Studio velocità di infiltrazione nel suolo dell'Azienda Agraria.....	97
4.2.2 Studio eventi di luglio e settembre 2024	100
4.2.3 Variazione umidità del suolo durante gli eventi eccezionali.....	103
4.2.4 Variazione temperature del suolo	106
4.3 Valutazione aree allagate	107
CAPITOLO 5 CONCLUSIONI	112
CAPITOLO 6 BIBLIOGRAFIA.....	116

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 Numero alluvioni 2012-2018 (Lastoria B., 2021).....	25
Tabella 2 Tabella descrittiva dei risultati prova infiltrometrica	97
Tabella 3 Tabella con S, A e velocità infiltrazione.....	99
Tabella 4 Tabella con S, A e velocità minima di infiltrazione.....	99

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 La figura rappresenta la sezione trasversale di un corso d'acqua con argini longitudinali maestri, ed argini di golena (APAT Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003).....	18
Figura 2 Serbatoio di piena Vinchiana (LU), foto aerea (APAT Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003)	19
Figura 3 Le due possibili posizioni di un serbatoio di laminazione, rispetto al corso d'acqua. A sinistra la posizione in linea e a destra quella in derivazione (APAT Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003)	20
Figura 4 Scolmatore o diversivo con restituzione allo stesso alveo (APAT Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003)	21
Figura 5 Scolmatore o diversivo con scarico in un recipiente (APAT Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003)	21
Figura 6 Framework proposto (Miao, et al., 2023).....	24
Figura 7 Distretto idrografico dell'Appennino Centrale (Lastoria B., 2021)	26
Figura 8 Inquadramento geografico su scala regionale (d-maps.com, 2007).....	30
Figura 9 Inquadramento geografico su scala nazionale (d-maps.com, 2007)	30
Figura 10 Inquadramento geografico su scala provinciale (d-maps.com, 2007).....	31
Figura 11 Sottobacino che sottende il fosso che scorre all’interno dell'Azienda Agraria .	32
Figura 12 Curve di livello dell’area di studio (tratto da Alberto Pierantoni, Analisi idrogeomorfologica di un versante soggetto a frana nell'area dell'Azienda Agraria universitaria di Borgo Ruffini, Università di Ancona, 2024, p. 76) (Pierantoni, 2024).....	33
Figura 13 Pendenza dell’area di studio (tratto da Alberto Pierantoni, Analisi idrogeomorfologica di un versante soggetto a frana nell'area dell'Azienda Agraria universitaria di Borgo Ruffini, Università di Ancona, 2024, p. 78) (Pierantoni, 2024).....	34
Figura 14 Esposizione dell’area di studio (tratto da Alberto Pierantoni, Analisi idrogeomorfologica di un versante soggetto a frana nell'area dell'Azienda Agraria universitaria di Borgo Ruffini, Università di Ancona, 2024, p. 84) (Pierantoni, 2024).....	35
Figura 15 Formazioni geologiche Dominio umbro-marchigiano (Pierantoni, 2024).....	38

Figura 16 Carta delle formazioni geologiche dell'area di studio (dati da Regione Marche, WMS, 2024) (Regione Marche, 2024).....	39
Figura 17 Zone climatiche dell'Italia (G.M.P.E., 2005).....	43
Figura 18 Temperatura media mensile attuale (rosso) e media del periodo 1991-2020 (grigio) - dati aggiornati al 18/07/2024 (REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024).....	45
Figura 19 Precipitazioni e temperatura medie e anomalia rispetto al periodo 1991-2020 (REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024).....	45
Figura 20 Precipitazione mensile attuale (blu-giallo) e media del periodo 1991-2020 (grigio) - dati aggiornati al 18/07/2024 (REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024).....	46
Figura 21 Sintesi situazione di severità idrica (REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024).....	46
Figura 22 Pompa pressione/vuoto (ECOSEARCH, 2024).....	48
Figura 23 Taniche in plastica di diverse dimensioni (packari.com, 2024).....	48
Figura 24 Freatimetro Geotech (ECOSEARCH, 2024).....	48
Figura 25 Set completo per test infiltrometrico, tre coppie di anelli con diverse dimensioni, una piastra in acciaio, un martello (ECOSEARCH, 2024).....	48
Figura 26 Infiltrazione acqua (ChatGPT, 2024).....	49
Figura 27 Curva di infiltrazione (ECOSEARCH, 2024).....	50
Figura 28 Spostamento dell'acqua dall'anello esterno a quello interno (ECOSEARCH, 2024).....	50
Figura 29 Lisimetro agronomico.....	51
Figura 30 Sonda Drill & Drop prima del posizionamento.....	52
Figura 31 Sistema di acquisizione Sentek Multi (ECOSEARCH, 2024).....	53
Figura 32 Diver Baro (ECOSEARCH, 2024).....	53
Figura 33 CTD-Diver (ECOSEARCH, 2024).....	54
Figura 34 TD Diver (ECOSEARCH, 2024).....	55
Figura 35 Lago e pre-lago.....	56
Figura 36 Distribuzione spaziale del reticolo idrografico minore.....	57
Figura 37 Troppopieno del lago 7/03/24.....	58
Figura 38 Reticolo idrografico secondario 7/03/24.....	58
Figura 39 Reticolo idrografico principale 7/03/24.....	58
Figura 40 Troppopieno del lago 14/03/24.....	59

Figura 41 Reticolo idrografico secondario 14/03/24	59
Figura 42 Reticolo idrografico principale 14/03/24	59
Figura 43 Trivella manuale	60
Figura 44 Posizionamento palo	60
Figura 45 Palo cementato.....	61
Figura 46 Occlusione spazi	62
Figura 47 Posizionamento sensore	62
Figura 48 Apertura foro	62
Figura 49 Trincea con il corrugato	63
Figura 50 Stazione montata.....	63
Figura 51 Stazione in fase di attivazione e controllo	64
Figura 52 Area delimitata.....	64
Figura 53 Posizione stazione completa	65
Figura 54 Posizione stazione.....	65
Figura 55 Misurazione altezza dal bocca tubo del pozzo al piano campagna	66
Figura 56 Posizionamento barometro.....	66
Figura 57 Posizione pozzo	67
Figura 58 Installazione coppia di anelli.....	68
Figura 59 Eliminazione cotico erboso	68
Figura 60 Inizio prova infiltrometrica	69
Figura 61 Posizionamento del Diver	69
Figura 62 Attivazione del Diver	69
Figura 63 Termine prova infiltrometrica	69
Figura 64 Ubicazione della prova infiltrometrica.....	70
Figura 65 Pozzetto in posizione	71
Figura 66 Sensore e tubo di protezione	71
Figura 67 Paratie effetto imbuto.....	71
Figura 68 Sensore reticolo secondario	72
Figura 69 Sensore in posizione	73
Figura 70 Intervento terminato.....	73
Figura 71 Sensore reticolo principale.....	73
Figura 72 Instabilità gravitativa	74
Figura 73 Acqua nel reticolo secondario	74
Figura 74 Accumulo di sedimenti	75

Figura 75 Accumulo di sedimenti su orticole.....	75
Figura 76 Accumulo di sedimenti su pali.....	75
Figura 77 Materiale accumulato sul segnalatore utilizzato per identificare la posizione del sensore	77
Figura 78 Tubo che contiene il sensore	77
Figura 79 Scavo per liberare il sensore	78
Figura 80 Struttura distrutta	78
Figura 81 Sezione superiore.....	79
Figura 82 Sezione terminale.....	79
Figura 83 Scaricamento dati con il Mesa2	80
Figura 84 Vista d'insieme dei primi tre fossi che si incontrano	81
Figura 85 Vista d'insieme dei secondi tre fossi che si incontranoC.....	81
Figura 86 Vista d'insieme dei secondi tre fossi che si incontrano.....	82
Figura 87 Vista dell'ultimo fosso e di sedimenti escavati.....	82
Figura 88 Accumulo di sedimenti e ristagno di acqua.....	83
Figura 89 Prima sezione del reticolo	84
Figura 90 Seconda sezione de reticolo	84
Figura 91 Danni causati dall'evento alluvionale	85
Figura 92 Vista d'insieme dei primi tre fossi che si incontrano	87
Figura 93 Vista d'insieme dei secondi tre fossi che si incontrano.....	87
Figura 94 Vista d'insieme degli ultimi tre fossi che si incontrano	88
Figura 95 Effetti evento alluvionale di settembre.....	89
Figura 96 Effetti evento alluvionale di settembre.....	90
Figura 97 Mappa della Strumentazione.....	91
Figura 98 Precipitazioni annue cumulate nel periodo 2004-2024.....	92
Figura 99 Andamento temperature medie annuali 2008-2014.....	93
Figura 100 Andamento delle precipitazioni cumulate e delle temperature medie nel 2024	94
Figura 101 Massima intensità di precipitazioni di luglio e settembre 2024.....	96
Figura 102 Grafico prova infiltrometrica	97
Figura 103 Velocità di infiltrazione massima.....	98
Figura 104 Velocità minima di infiltrazione	99
Figura 105 Livello idrometrico e temperature dell'acqua registrati dal Diver all'interno del reticolo secondario	100

Figura 106 Profondità del fronte umido nei primi 95 cm del suolo	100
Figura 107 Livello idrometrico e temperature dell'acqua registrati dal Diver all'interno del reticolo principale	100
Figura 108 Soggiacenza dell'acqua di falda con temperatura e conducibilità elettrica delle acque sotterranee.....	101
Figura 109 Umidità del suolo alle varie profondità.....	103
Figura 110 Cumulativo umidità alle varie profondità.....	104
Figura 111 Variazioni temperature alle varie profondità.....	106
Figura 112 Ricognizione danni post evento del 18-20/09/2024	107
Figura 113 Condizione di permanenza allagamento 18-20/09/2024.....	108
Figura 114 Condizioni transitorie di allagamento 18-20/09/24	109
Figura 115 Confronto condizione di permanenza e transitorie dell'allagamento 18-20/09/2024	110
Figura 116 Confronto ricognizione su campo e dati ottenuti da stazioni idrometriche...	111

Capitolo 1

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

L'uso di combustibili fossili, la deforestazione e l'allevamento intensivo di bestiame hanno un impatto crescente sul clima e sulla temperatura del pianeta. Queste attività contribuiscono all'aumento delle concentrazioni di gas serra nell'atmosfera, alimentando l'effetto serra e il riscaldamento globale (Commissione Europea, 2024).

L'effetto serra è il principale responsabile dei cambiamenti climatici. Alcuni gas presenti nell'atmosfera terrestre agiscono come il vetro di una serra: trattengono il calore del sole e impedendogli di ritornare nello spazio e provocando il riscaldamento globale. Sebbene molti di questi gas sono naturalmente nell'atmosfera, le attività umane ne incrementano le concentrazioni di alcuni di essi, in particolare:

- Anidride carbonica (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Ossido di azoto (NO)
- Gas fluorurati.

La CO₂ prodotta dalle attività umane è il principale fattore del riscaldamento globale. Nel 2020 la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera superava del 48% il livello preindustriale (prima del 1750). Il CH₄ sebbene sia un gas serra con un effetto più potente della CO₂, ha una vita atmosferica più breve. L'NO è un gas serra longevo che, come la CO₂, si accumula nell'atmosfera per decenni e anche secoli. Gli inquinanti diversi dai gas serra, compresi gli aerosol come la fuliggine, hanno effetti diversi in termini di riscaldamento e raffreddamento e sono associati anche ad altri problemi quali la scarsa qualità dell'aria. Si stima che le cause naturali, come i cambiamenti della radiazione solare o dell'attività vulcanica, abbiano contribuito al riscaldamento totale in misura minore di 0,1°C tra il 1890 e il 2010 (Commissione Europea, 2024).

Il decennio 2011-2020 è stato il più caldo mai registrato, con una temperatura media globale di 1,1°C al di sopra i livelli preindustriali nel 2019. Il riscaldamento globale causato dalle attività umane è attualmente in aumento a un ritmo di 0,2°C per decennio. Un aumento di 2°C rispetto alla temperatura dell'epoca preindustriale è associato a gravi impatti negativi

sull'ambiente naturale e sulla salute e il benessere umano, compreso un rischio molto più elevato di cambiamenti pericolosi e potenzialmente catastrofici nell'ambiente globale. Per questo motivo la comunità internazionale ha riconosciuto la necessità di mantenere il riscaldamento ben al di sotto dei 2°C e di proseguire gli sforzi per limitarlo a 1,5°C (Commissione Europea, 2024).

Le cause dell'aumento delle emissioni sono molteplici, ma quella che ha il maggiore l'impatto è la combustione di carbone, petrolio e gas, che rilascia nell'atmosfera grandi quantità di CO₂ e NO. Anche la deforestazione rappresenta una causa significativa: gli alberi, infatti, svolgono un ruolo fondamentale nel regolare il clima assorbendo CO₂ dall'atmosfera. Quando vengono abbattuti, non solo si perde questa capacità di assorbimento, ma la CO₂ immagazzinata nelle piante viene rilasciata, contribuendo all'incremento dell'effetto serra. Un'altra fonte importante di gas serra è l'allevamento intensivo, in particolare di bovini e ovini, che durante il processo digestivo emettono grandi quantità di CH₄, un gas serra molto potente. Queste emissioni causano un potente effetto serra, fino a 23 000 volte più forte di quello provocato dalla CO₂ (Commissione Europea, 2024).

I cambiamenti climatici hanno un impatto significativo su tutte le regioni del mondo, con conseguenze che possono essere suddivise in quattro categorie: Conseguenze naturali, Minacce sociali, Minacce per le imprese e Minacce territoriali. (Commissione Europea, 2024)

Per quanto riguarda le conseguenze naturali l'aumento delle temperature è uno dei principali effetti della crisi climatica. La temperatura media globale è in aumento e si verificano temperature estreme sempre più frequenti, come le ondate di calore, che possono causare un aumento della mortalità, una riduzione della produttività e danni alle infrastrutture. Questi cambiamenti alterano la distribuzione e l'abbondanza di molte specie vegetali e animali, influenzando la fenologia, il comportamento e il ciclo di vita delle specie animali e vegetali. Inoltre, temperature elevate possono ridurre le rese e la redditività dell'agricoltura e dell'allevamento o la capacità degli ecosistemi di fornire servizi e beni importanti. L'aumento dell'evaporazione dell'acqua, combinato con la riduzione delle precipitazioni, aumenta il rischio di gravi siccità (Commissione Europea, 2024).

La siccità e gli incendi boschivi sono fenomeni sempre più frequenti in molte regioni europee. La siccità è una carenza temporanea di disponibilità idrica causata dalla mancanza di precipitazioni e da una maggiore evaporazione. Si differenzia dalla carenza idrica, che è la mancanza strutturale di acqua dolce durante l'anno. La siccità ha effetti a catena sull'agricoltura, la silvicoltura, l'acqua e la biodiversità. Riduce i livelli dell'acqua nei fiumi e

nelle acque sotterranee, porta a una crescita stentata di alberi e colture, fa aumentare gli attacchi dei parassiti e alimenta gli incendi boschivi. In Europa, gran parte dei quasi nove miliardi di euro di perdite causate ogni anno dalla siccità danneggia l'agricoltura, il settore energetico e l'approvvigionamento idrico pubblico. Siccità più frequenti e gravi aumenteranno la durata e la gravità della stagione degli incendi boschivi, in particolare nella regione mediterranea. I cambiamenti climatici stanno inoltre ampliando l'area a rischio di incendi boschivi. Regioni che attualmente non sono soggette a incendi potrebbero diventare zone a rischio (Commissione Europea, 2024). Secondo il Copernicus Emergency Management Service (CEMS)³ e il C3S nel corso dell'anno 2023 in Italia gli incendi boschivi hanno bruciato una superficie totale poco inferiore a 1000 km². Ciò ha reso l'Italia la seconda nazione europea con la maggiore estensione di incendi boschivi dopo la Grecia (SNPA, 2024).

La disponibilità di acqua dolce è minacciata dal riscaldamento globale che altera le precipitazioni, aumenta l'evaporazione, i ghiacciai si sciolgono e il livello del mare s'innalza. Le frequenti siccità e le temperature più elevate possono favorire la crescita di alghe e batteri tossici. È inoltre probabile che l'aumento dei nubifragi (precipitazioni estreme improvvise) possa causare l'immissione di acque reflue non depurate nelle acque superficiali. Questi fattori incidono negativamente sulla qualità e quantità dell'acqua dolce. I fiumi europei provengono generalmente da zone montane e il 40% dell'acqua dolce europea proviene dalle Alpi. Tuttavia, i cambiamenti nella dinamica della neve e dei ghiacciai e nell'andamento delle precipitazioni possono provocare carenze idriche temporanee in tutta Europa (Commissione Europea, 2024).

Le inondazioni con impatti significativi sul territorio, un'altra conseguenza dei cambiamenti climatici, sono destinate ad aumentare. L'aumento delle precipitazioni su lunghi periodi porterà principalmente a esondazioni dei fiumi, mentre brevi e intensi nubifragi possono causare inondazioni pluviali, in cui precipitazioni estreme provocano inondazioni senza straripamenti di corpi idrici. Le inondazioni dovute ai fiumi sono una catastrofe naturale comune in Europa. È probabile che i cambiamenti climatici aumentino la frequenza delle inondazioni in tutta Europa nei prossimi anni. Si prevede che i temporali violenti diventino più comuni e intensi a causa delle temperature (Commissione Europea, 2024).

L'innalzamento del livello del mare, è aumentato nel corso del XX secolo e la tendenza si è accelerata negli ultimi decenni. L'aumento è dovuto principalmente all'espansione termica degli oceani a causa del riscaldamento. Ma anche lo scioglimento dei ghiacciai e della calotta glaciale antartica contribuisce al fenomeno. Si prevede che entro la fine del secolo l'Europa subirà un aumento medio del livello del mare compreso tra i 60 e gli 80 cm. Aumenterà il rischio di inondazioni ed erosione intorno alle coste, con conseguenze significative per la

popolazione, le infrastrutture, le imprese e la natura in queste zone. Inoltre, si prevede che l'innalzamento del livello del mare ridurrà la quantità di acqua dolce disponibile, dal momento che l'acqua di mare penetrerà ulteriormente nelle falde acquifere (Commissione Europea, 2024).

La biodiversità è severamente minacciata dai cambiamenti climatici, poiché si stanno verificando a ritmi talmente veloci che numerose specie animali e vegetali stentano ad adattarsi. Vi sono prove evidenti che dimostrano che la biodiversità sta già reagendo ai cambiamenti climatici e continuerà a farlo. Gli impatti diretti comprendono i cambiamenti della fenologia, l'abbondanza e la distribuzione delle specie, la composizione della comunità, la struttura dell'habitat e i processi ecosistemici. Stanno inoltre provocando impatti indiretti sulla biodiversità attraverso cambiamenti nell'uso del suolo e di altre risorse. Questi possono essere più dannosi degli impatti diretti a causa della loro dimensione, portata e velocità (Commissione Europea, 2024).

Il suolo è anch'esso vulnerabile con un aumento dei fenomeni di erosione, la diminuzione della materia organica, la salinizzazione, la perdita di biodiversità, le frane, la desertificazione e le inondazioni (Commissione Europea, 2024).

Le minacce sociali dei cambiamenti climatici includono impatti significativi per la salute umana, per la salute degli animali e delle piante. Gli effetti più importanti sulla salute sono legati ad un aumento della mortalità estiva legata al calore e una diminuzione della mortalità invernale legata al freddo, un aumento del rischio di incidenti e impatti sul benessere generale derivanti da eventi meteorologici estremi, variazione nella distribuzione stagionale di alcune specie di polline allergenico, della gamma di virus e della distribuzione di parassiti e malattie (come la diffusione delle Dengue a Fano (Comune di Fano, 2024)), malattie degli animali emergenti e riemergenti, la presenza di nuovi organismi nocivi per le piante e i rischi connessi al cambiamento della qualità dell'aria (Commissione Europea, 2024).

Le imprese devono affrontare minacce legate all'Impatto su infrastrutture ed edifici, vulnerabili ai cambiamenti climatici a causa della loro progettazione (bassa resistenza alle tempeste) o della loro ubicazione (ad esempio in zone soggette a inondazioni, frane, valanghe). In realtà possono venire danneggiati o resi inadatti all'uso da qualsiasi cambiamento climatico o evento meteorologico estremo (Commissione Europea, 2024).

Anche il settore energetico è a rischio. Si calcola che i cambiamenti climatici ridurranno la domanda di riscaldamento nell'Europa settentrionale e nordoccidentale e aumenteranno notevolmente la domanda di energia per il raffreddamento nell'Europa meridionale, il che

potrebbe aggravare ulteriormente i picchi della domanda di energia elettrica in estate (Commissione Europea, 2024).

In Europa i cambiamenti climatici hanno già e continueranno ad avere nel corso del XXI secolo un notevole impatto negativo sull'agricoltura a causa dell'aumento delle temperature, della siccità, delle inondazioni, dei parassiti e delle malattie e della minore salute dei suoli: perdite sostanziali nella produzione agricola (rese inferiori dei raccolti) riduzione delle superfici idonee alla coltivazione. Le regioni meridionali dell'Europa saranno le più colpite a causa delle elevate temperature e della carenza di risorse idriche. Anche le foreste risentono dei cambiamenti climatici, con maggiori rischi di siccità, tempeste, incendi e altre pressioni distruttive, quali parassiti e malattie. Stando alle previsioni, la biodiversità delle foreste europee tenderà a mutare, poiché i cambiamenti climatici rappresentano una minaccia particolare per le specie legate alle condizioni climatiche e ambientali cui si sono adattate. Inoltre, l'impatto degli incendi boschivi è particolarmente forte sugli ecosistemi già degradati del Sud e dovrebbe aggravarsi ulteriormente con il prolungamento della stagione calda. Le minacce territoriali per la regione mediterranea sono legate alla diminuzione delle precipitazioni e l'aumento delle temperature. I principali effetti sono la diminuzione della disponibilità idrica e della resa delle colture, i crescenti rischi di siccità e perdita di biodiversità, gli incendi boschivi e le ondate di calore. Aumentare l'efficienza dell'irrigazione in agricoltura può ridurre in una certa misura i prelievi di acqua, ma non sarà sufficiente a compensare l'aumento dello stress idrico indotto dal clima. Inoltre, il settore idroelettrico risentirà sempre di più della minore disponibilità di acqua e dell'aumento della domanda di energia (Commissione Europea, 2024).

Un evento meteorologico o climatico estremo è un evento la cui intensità è insolitamente elevata rispetto al tempo e al luogo in cui si verifica. Tra gli esempi di fenomeni che creano eventi meteorologici estremi ci sono tempeste violente, forti piogge e inondazioni, siccità, ondate di caldo e incendi. Come riportato dal Sesto rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (IPCC Sixth Assessment Report The Physical Science Basis, 2021), la misura dell'intensità dipende dal contesto: per esempio è data dalla velocità massima delle raffiche di vento per gli uragani, dal totale delle precipitazioni accumulate, dalle temperature massime o minime giornaliere. Per gli eventi meteorologici estremi c'è tanta preoccupazione perché la nostra società e i sistemi viventi che ci circondano non si sanno adattare bene agli eventi meteorologici e climatici rari ma estremi. La nostra salute e le nostre infrastrutture sono particolarmente sensibili a eventi senza precedenti.

L'Organizzazione meteorologica mondiale (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2023) ha stimato che gli eventi meteorologici e climatici estremi hanno provocato 12.000 disastri segnalati tra il 1970 e il 2021, causando oltre 2 milioni di morti e 4.300 miliardi di dollari di perdite economiche (MUSEO NAZIONALE SCIENZA E TECNOLOGIA LEONARDO DA VINCI, 2024) .

Il monitoraggio delle preoccupazioni ambientali condotto dall'Istat evidenzia che nel 2023 cresce la preoccupazione per i cambiamenti climatici, espressa dal 58,8% della popolazione, oltre due punti in più del 56,7% nel 2022 e oltre sei punti in più del 52,2% del 2021. (ISTAT, 2023) Nel 2022, secondo l'elaborazione di Eurostat dei dati dell'Agenzia europea dell'Ambiente (EEA), l'Italia è al primo posto tra i 27 paesi dell'Ue per danni da eventi meteorologici estremi e legati al clima, con 284 euro per abitante, un valore 2,4 volte la media Ue di 117 euro per abitante. Negli ultimi dieci anni (2013-2022) l'Italia ha accumulato danni per 50 miliardi di euro (valutati a prezzi costanti anno 2022), pari a 5 miliardi di euro all'anno. All'alta esposizione dell'Italia a queste tipologie di rischi contribuiscono la scarsa manutenzione e la riduzione della dotazione di infrastrutture deputate alla difesa del territorio. Il capitolo di spesa per investimenti pubblici che comprende le opere a tutela del territorio nei dieci anni precedenti alla pandemia, in rapporto al PIL, si è dimezzata, per tornare a recuperare a salire dal 2021, anche grazie al sostegno del PNRR. Da segnalare che a valori correnti la spesa di 11,2 miliardi di euro nell'ultimo anno disponibile, il 2022, è pari a quella del 2003 (11,1 miliardi) (Confartigianato, 2024).

Si prevede che, disastri irreversibili, decessi e danni ad altre specie viventi (per esempio lo sbiancamento dei coralli) aumenteranno a causa degli eventi estremi più frequenti e più intensi causati dal riscaldamento globale in corso. Gli eventi estremi sono collegati al riscaldamento globale perché un incremento di 1,5°C della temperatura media può sembrare non essere così elevato; tuttavia, piccoli cambiamenti nella media possono portare ad aumenti sproporzionati nel numero di eventi estremi (MUSEO NAZIONALE SCIENZA E TECNOLOGIA LEONARDO DA VINCI, 2024).

Le alluvioni sono tra le manifestazioni più tipiche del dissesto idrogeologico e si verificano quando le acque di un fiume non vengono contenute dalle sponde e si riversano nella zona circostante arrecando danni a edifici, insediamenti industriali, vie di comunicazione, zone agricole. Le alluvioni più importanti che hanno interessato l'Italia e che hanno comportato un

pesante bilancio sia in termini di perdita di vite umane che di danni sono state quelle del Po nel Polesine (1951), dell'Arno (1966) e del Po nel Nord Italia (1994 e 2000). Tuttavia, in Italia sono frequenti alluvioni che si verificano in bacini idrografici di piccole dimensioni a causa di precipitazioni intense e localizzate che sono difficili da prevedere. Tali bacini, sono caratterizzati da tempi di sviluppo delle piene dell'ordine di qualche ora che determinano alluvioni di elevata pericolosità che spesso provocano vittime, danni all'ambiente e possono compromettere gravemente lo sviluppo economico delle aree colpite. Le alluvioni sono fenomeni naturali, tuttavia tra le cause dell'aumento della frequenza delle alluvioni ci sono senza dubbio l'elevata antropizzazione e la diffusa impermeabilizzazione del territorio, che impedendo l'infiltrazione della pioggia nel terreno aumentano i quantitativi e le velocità dell'acqua che defluisce verso i fiumi. La mancata pulizia di questi ultimi e la presenza di detriti o di vegetazione che rendono meno agevole l'ordinario deflusso dell'acqua sono un'altra causa importante. È possibile ridurre i rischi di conseguenze negative derivanti dalle alluvioni sia attraverso interventi strutturali quali argini, invasi di ritenuta, canali scolmatori, drizzagni, sia attraverso interventi non strutturali, come quelli per la gestione del territorio o la gestione delle emergenze: in quest'ultimo caso, sono fondamentali la predisposizione del sistema di allertamento, la stesura dei piani di emergenza, la realizzazione di un efficiente sistema di coordinamento delle attività previste nei piani stessi. In particolare, un efficiente sistema di allertamento basato su modelli di previsione collegati ad una rete di monitoraggio è fondamentale per allertare gli organi istituzionali presenti sul territorio con il maggior anticipo possibile e ridurre l'esposizione delle persone agli eventi nonché limitare i danni al territorio attraverso l'attuazione di misure di prevenzione in tempo reale. Tra queste si ricordano le attività del presidio territoriale idraulico e la regolazione dei deflussi degli invasi presenti nel bacino per laminare la piena (Dipartimento della Protezione Civile, 2024).

Le opere di difesa contro le inondazioni, gli allagamenti e le alluvioni sono degli interventi strutturali che hanno l'obiettivo di difendere gli insediamenti. La difesa di un'area esposta all'esonazione di un corso d'acqua può attuarsi in due modi: aumentando la capacità di portata dell'alveo e riducendo gli effetti della portata di piena. Per permettere un aumento della capacità idrica di un corso d'acqua le opere che si possono eseguire sono i drizzagni e l'innalzamento degli argini. Per la riduzione delle portate, eseguibile in aree fortemente urbanizzate, si costruiscono serbatoi di piena, casse di espansione o diversi e scolmatori (APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003).

Gli argini sono costituiti da rilevati artificiali in terra con funzione di tenuta d'acqua, di altezza generalmente inferiore ai 10-12 m, che si realizzano specialmente nel bacino inferiore di corsi d'acqua, allo scopo di contenere le acque di piena, e preservare da inondazioni le aree poste lateralmente. Esistono due tipologie di argini: longitudinali e trasversali. I primi (Figura 1) corrono continui lungo le sponde, mentre i secondi sono disposti a coppie gli uni di fronte agli altri normalmente alla corrente, e si innestano con una estremità al terreno sommersibile, e con l'altra simmetricamente verso l'alveo (APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003).

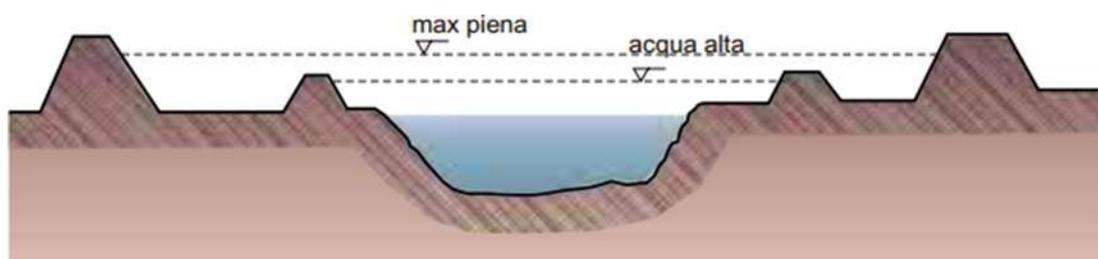


Figura 1 La figura rappresenta la sezione trasversale di un corso d'acqua con argini longitudinali maestri, ed argini di golenia (APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003)

L'apertura di drizzagni, ossia tratti di alveo scavati con andamento rettilineo, mediante i quali si ottiene un aumento di pendenza e quindi una maggiore velocità della corrente. La sezione può essere aumentata anche mediante l'abbassamento del fondo, con l'asportazione periodica (svasi) di materiale del fondo. Si tratta di un'operazione delicata che può comportare erosioni regressive con danni alle opere di attraversamento e la riduzione del materiale trasportato a valle con conseguente erosione delle spiagge (APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003).

La riduzione delle portate può ottenersi con:

- Serbatoi di piena
- Casse di espansione
- Diversivi e scolmatori

Serbatoi di piena, nella parte medio alta dei bacini, e casse di espansione, nella parte medio bassa, sono veri e propri invasi posti sull'asta principale o su un suo affluente. Le due tipologie di opere trovano applicazioni in condizioni geologiche e topografiche molto diverse.

I serbatoi di piena (Figura 2) si tratta di opere generalmente molto impegnative sia sotto il profilo tecnico o economico ed in considerazione del fatto che vengono utilizzate completamente con tempi di ritorno lunghi (anche più di 100 anni), sono opere per le quali è

conveniente un impiego multiplo oltre alla difesa idraulica (irrigazione, approvvigionamento idrico o produzione di energia) (APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003).



Figura 2 Serbatoio di piena Vinchiana (LU), foto aerea (APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003)

Le casse di espansione (Figura 3) consentono di gestire un volume d'acqua che di norma è tenuto libero così da ridurre la portata al colmo. Il volume invasato viene restituito quando le condizioni idrometriche del corso d'acqua non siano più pericolose. La posizione più naturale per questi serbatoi è all'interno dello stesso alveo del fiume, approfittando magari di una configurazione morfologica favorevole, costituita da una strettoia preceduta a monte da un allargamento della valle. Si crea uno sbarramento che determina un rigurgito che consente di riempire l'invaso in occasione di piene ed al tempo stesso è dotato di organi che permettono il deflusso delle acque in condizioni normali. Una seconda configurazione consiste in un serbatoio posizionato fuori dall'alveo del fiume, accanto ad esso, in una cosiddetta cassa di espansione "in derivazione"; in questa situazione, l'ingresso dell'acqua nel serbatoio è controllato da un'opera di presa e lo scarico avviene attraverso un'opera apposita, che in generale è diversa da quella di presa. In alcuni casi lo scarico delle acque avviene in un corso d'acqua diverso da quale vengono derivate (APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003).

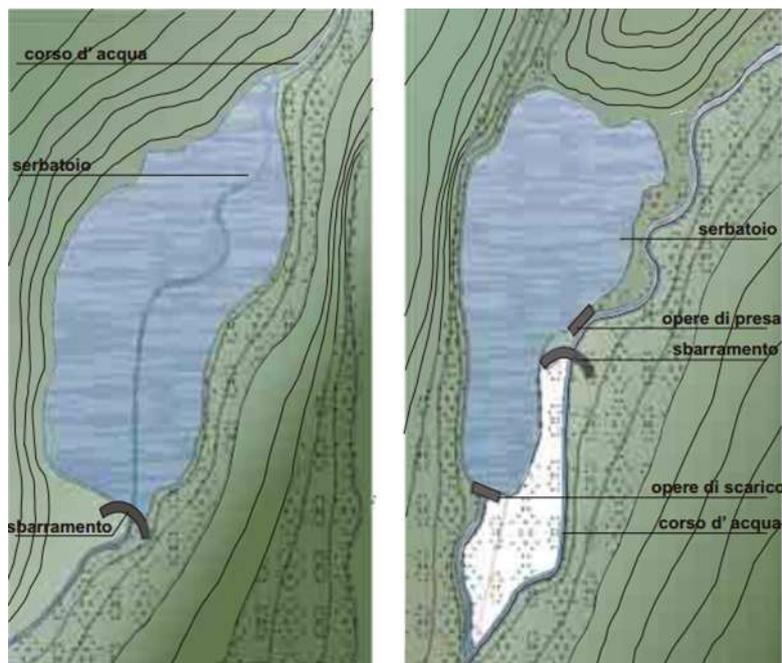


Figura 3 Le due possibili posizioni di un serbatoio di laminazione, rispetto al corso d'acqua. A sinistra la posizione in linea e a destra quella in derivazione (APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003)

I diversivi e gli scolmatori (Figura 4, Figura 5) sono manufatti che sottraggono una parte della portata di piena ad un corso d'acqua avviandola verso un altro recipiente o restituendola più a valle nel medesimo corso d'acqua. I canali scolmatori vengono più frequentemente usati nelle parti medio-basse del bacino e sono opere tecnicamente meno impegnative delle casse di espansione. Gli scolmatori hanno generalmente all'imbocca una soglia fissa, talvolta regolata con paratoie. La soglia fissa assicura la massima affidabilità di funzionamento ma quella presidiata permette una migliore regolazione della ripartizione delle portate (APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003).

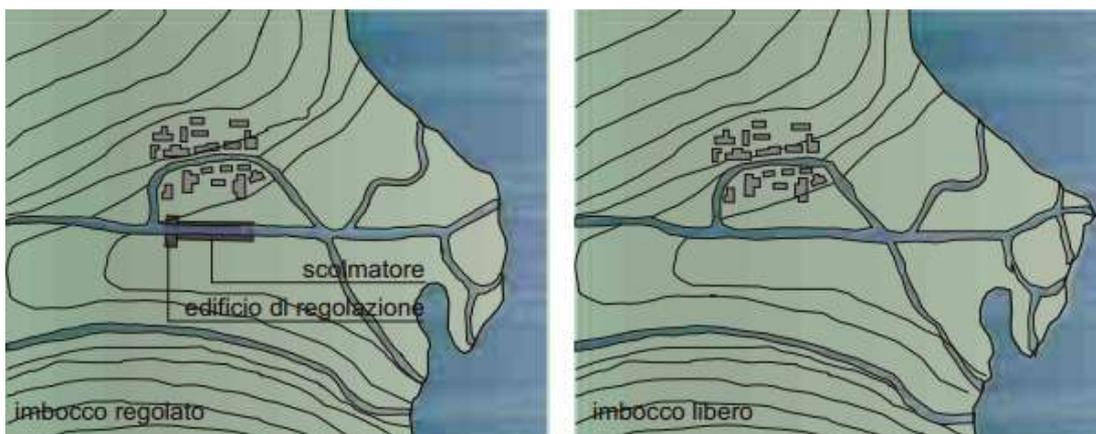


Figura 4 Scolmatore o diversivo con restituzione allo stesso alveo (APAT Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003)



Figura 5 Scolmatore o diversivo con scarico in un recipiente (APAT Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003)

L'impatto delle inondazioni sta diventando sempre più significativo a causa della loro crescente frequenza e ampiezza, nonché della concentrazione di popolazione e attività socioeconomiche nei bacini fluviali. I danni causati dalle inondazioni possono essere valutati quantitativamente sulla base dell'analisi del pericolo, dell'esposizione e della vulnerabilità. Attraverso la valutazione dei danni da inondazione, è possibile quantificare l'efficacia delle contromisure nella riduzione dell'intensità di un pericolo alluvionale confrontando i danni simulati prima e dopo l'implementazione delle contromisure. I danni causati dalle inondazioni si riferiscono a varie forme di distruzione e perdite, vengono solitamente categorizzati come

danni diretti e indiretti e ulteriormente classificati come danni tangibili e intangibili, a seconda che i danni possano essere valutati in termini monetari.

I danni diretti sono quelli causati dal contatto fisico diretto delle acque di inondazione, come i danni alle strutture e alle proprietà residenziali; le perdite di colture, bestiame e vite umane; gli impatti immediati sulla salute; e le perdite di beni ecologici. I danni indiretti da inondazione sono quelli che non sono direttamente dovuti all'esposizione alle inondazioni, ma causati principalmente dalla interruzione dei legami fisici ed economici e da altre perdite, come la perdita di produzione nelle fabbriche e aziende colpite dalle inondazioni e i costi per l'interruzione del traffico e dei servizi di emergenza. I danni tangibili sono quelli che possono essere facilmente quantificati in valori monetari, come i danni a edifici, proprietà residenziali, beni e colture agricole, e le perdite di produzione. I danni intangibili sono quelli che non possono essere specificati in valori monetari, come le vittime, gli impatti sulla salute e i danni ai beni ecologici e a tutti i tipi di beni e servizi. La valutazione del rischio e dei danni da inondazione è essenziale per la gestione del rischio di inondazione. Lo scopo principale della valutazione dei danni da inondazione è identificare le aree a rischio in cui sono necessarie azioni di mitigazione. Un metodo per valutare i danni è basato su griglie, considerando tre fattori principali di rischio: pericolo, esposizione e vulnerabilità. La valutazione dei danni da inondazione inizia con l'identificazione dell'area target e degli elementi esposti a un pericolo alluvionale utilizzando i risultati della simulazione del pericolo di inondazione, e prosegue con la valutazione dei danni che potrebbero verificarsi agli elementi esposti. L'identificazione delle aree a rischio di inondazione e l'intensità di un pericolo attraverso la valutazione del pericolo è il primo passo per la valutazione del rischio. Dopo l'identificazione delle aree target i danni possibili possono essere calcolati utilizzando indicatori di rischio. Ogni indicatore di rischio rappresenta la vulnerabilità di ciascun elemento mostrando la correlazione tra l'intensità di un pericolo e i danni quantificati tramite una curva di danno. Pertanto, le curve di danno da inondazione sono importanti nella stima dei danni da inondazione. Per stimare i danni da inondazione alle coltivazioni di riso, si utilizzano normalmente le curve delle funzioni di profondità-durata-danno. Le curve di danno da inondazione possono derivare principalmente da due approcci: utilizzando dati di danno effettivi di inondazioni passate oppure utilizzando dati sintetici. Le curve di danno da inondazione per le coltivazioni di riso variano a seconda di ciascuna fase di crescita del riso; quindi, è possibile identificare la fase di crescita delle piante di riso durante un evento di inondazione, e questo permette di applicare una curva di danno appropriata corrispondente alla fase di crescita delle piante di riso per la stima dei danni. Quando si verifica un'inondazione durante la fase iniziale di crescita delle piante di riso, ossia

dalla fase di semenzaio a quella vegetativa, durante la quale non si prevede alcuna produzione di riso, i contadini normalmente ripiantano le coltivazioni di riso. In questo caso, i danni da inondazione alle coltivazioni di riso possono essere stimati come perdite dei costi di input. D'altra parte, quando si verifica un'inondazione durante le fasi riproduttive e di maturità, durante le quali si prevede normalmente una produzione di riso, non c'è tempo per ripiantare le coltivazioni di riso. In questo caso, i danni da inondazione alle coltivazioni di riso possono essere stimati in base al volume delle perdite di produzione, cioè la perdita di resa, e quindi il valore delle perdite di produzione può essere stimato sulla base del prezzo di vendita al produttore (Badri Bhakta Shrestha, 2018).

Con l'avvento del telerilevamento e della scienza delle informazioni geografiche, il monitoraggio e la valutazione tempestiva delle inondazioni e dei loro impatti sono diventati possibili. L'acquisizione rapida di informazioni sulle inondazioni utilizzando osservazioni satellitari, unitamente a una valutazione scientifica delle perdite da disastro, può promuovere risposte rapide ed emergenti alle inondazioni. Pertanto, l'estrazione dei corpi idrici dalle immagini satellitari è essenziale nel monitoraggio e nella valutazione dei disastri causati dalle inondazioni. Le osservazioni satellitari radar ad apertura sintetica (SAR), riuscendo a penetrare le nuvole e la pioggia, producono delle immagini chiare. Pertanto, sono la principale fonte di dati per la rilevazione dell'acqua durante le inondazioni. Sono stati condotti molti studi utilizzando il retro-scatter dai dati SAR per la mappatura delle inondazioni. È stato trovato che la luminosità delle aree sommerse (ad es., strade, piazze e altre aree aperte) è diminuita rispetto allo stato precedente l'inondazione a causa della riduzione del coefficiente di scattering. Questi studi hanno sottolineato che, quando il suolo asciutto e nudo viene sommerso, il coefficiente di retro-scatter derivato da SAR scende improvvisamente, rendendolo più facile da identificare dalle immagini satellitari. Attualmente, la relazione tra i coefficienti di retro-scatter dai dati SAR e il grado di inondazione non è stata valutata in modo completo, specialmente per quanto riguarda la determinazione automatica della soglia ottica per il monitoraggio tempestivo delle inondazioni. È stato valutato il grado di danno e la resilienza delle colture utilizzando il framework proposto in Figura 6. In primo luogo, è stata identificata l'estensione approssimativa dell'acqua prima e dopo le inondazioni utilizzando immagini SAR multi-temporali. Durante questo passaggio è stato proposto un approccio auto-adattivo con il modello a doppia gaussiana per identificare la soglia ottica per la mappatura dell'estensione dell'acqua. Successivamente, utilizzando congiuntamente i dati di indagine raccolti sul campo e le immagini ottiche delle osservazioni del Sentinel-2, è stato mappato il

grado di danno delle colture (lieve, medio e grave) causato dall'evento di inondazione estrema. Infine, è stata valutata la resilienza delle colture (cioè, il mais) all'inondazione quantificando il recupero della crescita delle colture nelle regioni con diversi gradi di danno (Miao, et al., 2023).

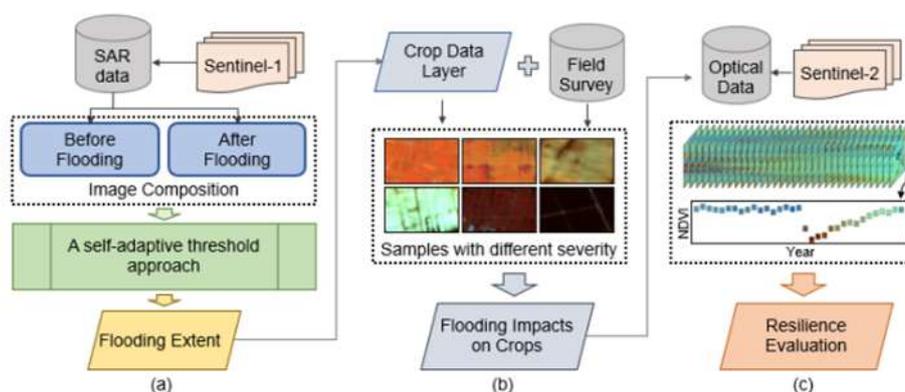


Figura 6 Framework proposto (Miao, et al., 2023)

L'art. 1 della “Direttiva Alluvioni 2007/60/CE” definisce lo scopo per cui essa è stata adottata: istituire un quadro di riferimento per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni, finalizzato alla riduzione delle conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche potenzialmente interessate dagli eventi alluvionali. Tale definizione rende immediatamente chiara la rilevanza attribuita agli aspetti conoscitivi (valutazione) connessi alle alluvioni come fondamento essenziale per un corretto approccio alla mitigazione dei loro effetti (gestione) (Lastoria B., 2021).

L'art. 3 della “Direttiva Alluvioni” detta l'assetto amministrativo per gli scopi della direttiva stessa, definendo gli ambiti territoriali a cui si applicano i vari adempimenti e stabilendo che vengano individuate le corrispondenti autorità competenti responsabili a vario titolo dell'implementazione della Direttiva stessa. L'ultimo aggiornamento riguardante tale adempimento è stato riportato alla CE (Commissione Europea) nel 2019 (Lastoria B., 2021).

La Valutazione Preliminare si propone di individuare (art. 5) aree a potenziale rischio significativo (Areas of Potential Significant Flood Risk – APSFR) a partire da informazioni disponibili o facilmente reperibili su eventi del passato (past flood o past event) e su scenari di possibili alluvioni future (future flood o future event) (Lastoria B., 2021).

Per le informazioni sugli eventi del passato le ABD (Autorità di Bacino Distrettuale) hanno fatto riferimento a quanto caricato dalle Regioni e dalle Province Autonome sulla piattaforma WebGIS FloodCat (Flood Catalogue) il cui accesso è riservato alle sole CA (Competent Authority) designate ai sensi dell'art. 3 della Direttiva Alluvioni. FloodCat svolge le funzioni

di catalogo nazionale degli eventi alluvionali. In FloodCat gli eventi alluvionali sono descritti in termini di localizzazione (dell'inondazione e/o dei danni), data di occorrenza e durata, intensità, tipologia di fenomeno (origine, caratteristiche e meccanismi della piena), conseguenze avverse (con qualificazione e quantificazione del tipo e del livello di danno) e reference (documenti o link a pagine web ove sono rintracciabili le informazioni utilizzate per il popolamento di ciascun evento all'interno della piattaforma) (Lastoria B., 2021).

La Tabella 1 indica il numero di eventi alluvionali del passato nell'Appennino centrale nel periodo 2012-2018:

Distretto	Flu	Plu	seaW	AWBI	Other	Totale
Idrografico						
Appennino centrale	28	8	0	1	6	43

Tabella 1 Numero alluvioni 2012-2018 (Lastoria B., 2021)

- Flu (Fluvial): alluvione dovuta all'esonazione delle acque del reticolo idrografico
- Plu (Pluvial): allagamento provocato direttamente dalle acque di pioggia
- seaW (Sea Water): inondazioni marine delle aree costiere
- AWBI (Artificial Water Bearing Infrastructure): inondazione/allagamento da insufficienza delle infrastrutture di collettamento/drenaggio
- Other: altri

L'art. 6 della "Direttiva Alluvioni" stabilisce che gli Stati Membri (SM) preparino mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni a livello di bacino distrettuale o di unità di gestione, per le aree identificate ai sensi dell'art. 5 come quelle aree in cui, in base agli esiti della Valutazione Preliminare del rischio (art. 4) esiste, o è probabile che esista, un rischio potenziale significativo di alluvioni (APsFR). Le mappe di pericolosità da alluvione devono mostrare l'estensione delle aree allagabili e fornire informazioni sulla profondità o livello delle acque e sulle velocità del flusso o sulle portate (dove opportuno), con riferimento a tre diversi scenari di probabilità:

- Scarsa probabilità o scenari di eventi estremi
- Media probabilità di alluvioni (tempo di ritorno ≥ 100 anni)

- Elevata probabilità di alluvioni, se opportuno

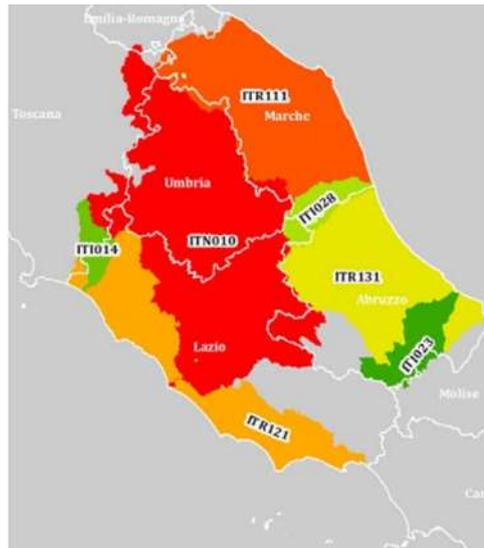


Figura 7 Distretto idrografico dell'Appennino Centrale (Lastoria B., 2021)

Secondo l'art. 64 del D.lgs. 152/2006 il Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale comprende i seguenti bacini idrografici presenti nelle Marche: Potenza, Chienti, Tenna, Ete, Aso, Menocchia, Tesino e bacini minori delle Marche, già bacini regionali ai sensi della legge 18 maggio 1989, n. 183 (Lastoria B., 2021).

La Regionale Marche è caratterizzata da fiumi che ricevono i contributi di un numero ridotto di affluenti che, scorrendo parallelamente in direzione nord-est, dall'Appennino Umbro-Marchigiano sfociano nel Mare Adriatico. I principali corsi d'acqua sono: Foglia, Metauro, Cesano, Misa, Esino, Musone, Potenza, Chienti, Tenna, Aso e Tesino. I corsi d'acqua della UoM (Unit of Management) presentano per la loro quasi totalità un regime di tipo torrentizio, ad eccezione dei tre maggiori il Metauro, l'Esino e il Chienti che superano i 1.000 km² di bacino drenato e che possono definirsi a regime "misto". La gran parte dei corsi d'acqua della UoM (Unit of Management) oltre ad avere un regime tipicamente torrentizio, è caratterizzata da ampi alvei ghiaiosi con sponde asimmetriche e tempi di corrivazione molto ridotti, ulteriormente diminuiti nel tempo a seguito della progressiva e generalizzata impermeabilizzazione/antropizzazione del territorio, che ha interessato sia le porzioni di bacino montano, sia quelle di fondovalle (depositi alluvionali) dove per altro è posta la maggior parte delle strutture/infrastrutture e degli elementi a rischio (Lastoria B., 2021).

Nel Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale sono considerate significative le alluvioni di origine fluviale e marina. Per le alluvioni di origine fluviale i tempi di ritorno utilizzati nelle modellazioni variano all'interno del Distretto tra 30 e 50 anni (ad eccezione del Tronto) per lo scenario di probabilità elevata, tra 100 e 200 anni per lo scenario di probabilità media e sono compresi tra 200 e 500 anni per lo scenario di probabilità bassa. Per la regione Marche i Bacini regionali presentano uno scenario di media pericolosità, il tempo di ritorno è ≤ 200 anni (Lastoria B., 2021).

In Italia, oltre alla Direttiva Alluvioni 2007/60/CE, sono presenti altre normative legate al dissesto idrogeologico a causa della particolare geologia del territorio e della frequenza di eventi idrogeologici. Le principali sono:

- Piano di Tutela delle Acque, un documento che stabilisce gli obiettivi di tutela delle risorse idriche e della gestione delle acque e include misure per la prevenzione e la gestione dei rischi legati al dissesto idrogeologico (Regione Marche, 2010);
- Legge 183/1989, che delinea il Piano per l'Assetto Idrogeologico (PAI) e il cui scopo è quello di "assicurare la difesa del suolo, il risanamento delle acque, la fruizione e la gestione del patrimonio idrico per gli usi di razionale sviluppo economico e sociale, la tutela degli aspetti ambientali ad essi connessi" (Repubblica Italiana, 1989);
- Legge 267/1998, che definisce agli articoli 1 e 2 piani per la tutela dal rischio idrogeologico e misure di prevenzione per le aree a rischio, nonché il potenziamento delle strutture tecniche per la difesa del suolo e la protezione dell'ambiente (Repubblica Italiana, 1998);
- Direttiva n. 2007/60/CE. Approvazione del contributo regionale per l'approvazione dei Piani di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) del Distretto dell'Appennino settentrionale e del Distretto dell'Appennino centrale e designazione del rappresentante regionale per il Comitato tecnico dell'Autorità di bacino del fiume Arno (Regione Marche, 2010).

Il comportamento da tenere durante un'alluvione varia a seconda se ci si trova in un luogo chiuso o all'aperto. In un luogo chiuso non si deve scendere in cantine, seminterrati o garage per mettere al sicuro i beni, non uscire per mettere a sicuro l'automobile. Se ci si trova in un locale semiinterrato o al piano terra bisogna salire ai piani superiori, chiudere il gas e disattivare l'impianto elettrico, limitare l'uso del cellulare e non bere l'acqua dal rubinetto perché potrebbe essere contaminata. Nel caso ci si trova all'aperto bisogna allontanarsi dalla

zona allagata e raggiungere l'area vicina più elevata. Fare attenzione a dove si cammina evitando sottopassaggi, argini e ponti ed evitare l'uso dell'automobile. Terminato l'evento bisogna seguire le indicazioni delle autorità prima di intraprendere qualsiasi azione, non transitare lungo strade allagate, fare attenzione nelle zone dove l'acqua si è ritirata poiché il fondo stradale potrebbe essere indebolito e cedere. Verifica se si può riattivare il gas, l'impianto elettrico e i sistemi di scarico, se necessario chiedere il parere di un tecnico. E in fine prima di bere l'acqua dal rubinetto assicurarsi che ordinanze o avvisi comunali non lo vietino (Dipartimento della Protezione Civile, 2024).

Per valutare gli impatti di eventi meteorici significativi all'interno di territori caratterizzati da coperture argillose in cui il ruscellamento superficiale è prevalente rispetto all'infiltrazione, è stata selezionata un'area della Regione Marche, occupata dall'Azienda Agraria Didattico Sperimentale "Pasquale Rosati" di UNIVPM. Il presente lavoro ha lo scopo di condurre un'analisi approfondita dell'evento di settembre 2024 a seguito dell'integrazione di diversi fonti di dati. Nello specifico, l'analisi si basa su dati meteorologici scaricati dal Sistema Informativo Regionale Meteo-Idro-Pluviometrico che riguardano l'area di studio, dati acquisiti tramite sensori installati in loco e dati sperimentali raccolti mediante prove in campo. L'obiettivo è quello di caratterizzare con precisione l'evento analizzato e valutarne l'impatto sul territorio. I risultati ottenuti contribuiranno ad arricchire la conoscenza riguardo fenomeni estremi e sostenere la creazione di strategie di mitigazione del rischio idrogeologico.

Capitolo 2

INQUADRAMENTO AREA DI STUDIO

Ora si procede con l'identificazione delle caratteristiche del bacino del fiume Esino e del sottobacino in cui è situata l'area di studio posta all'interno dell'“Azienda Agraria Università Politecnica delle Marche UNIVPM”, da vari punti di vista: geografico, geologico, geomorfologico, idrologico e climatico,

2.1 Inquadramento geografico

Il bacino del fiume Esino, e di conseguenza il sottobacino in cui è situata l'Azienda Agraria sono situati nel centro Italia, (Figura 9) a est, nella regione Marche (Figura 8).

Le sorgenti del Fiume Esino sono collocate a circa 925.0 m s.l.m., lungo il versante nord-occidentale di Monte Cafaggio (1.116 m s.l.m.) ad Esanatoglia (MC) e ha una lunghezza di 101 km. Il bacino idrografico del Fiume Esino ha una superficie di 1.219.0 km² compresi nelle province di Macerata e Ancona (Università di Camerino, 2019). In quest'ultima è situato il comune di Agugliano (An) all'interno del quale ricade l'Azienda Agraria (Figura 10).



Figura 9 Inquadramento geografico su scala nazionale (d-maps.com, 2007)



Figura 8 Inquadramento geografico su scala regionale (d-maps.com, 2007)



Figura 10 Inquadramento geografico su scala provinciale (d-maps.com, 2007)

L’Azienda Agraria Università Politecnica delle Marche (Università Politecnica delle Marche, 2024) è situata nel comune Agugliano (An). Nasce nel 1993 come struttura speciale dell’Università a servizio delle Facoltà per attività di didattica e di ricerca. Negli anni ha ampliato le sue attività: collaborando con ditte esterne, come fattoria didattica e ospitando visite delle scuole di ogni grado. Si estende su una superficie complessiva di circa 140 ha investiti a:

- Colture arboree
- Colture erbacee
- Progetti di ricerca e sperimentazione
- Centro di conservazione e valutazione del germoplasma locale marchigiano

Il sottobacino (Figura 11) dove verranno condotte le analisi, copre un’estensione di 229 ettari. Tale superficie risulta più ampia rispetto a quella dell’azienda poiché include alcuni appezzamenti privati. La decisione di includerle questi appezzamenti è stata presa per ottenere una visione completa del reticolo primario, secondario e delle scoline presenti nel sottobacino,

permettendo così di avere una panoramica dettagliata del percorso dell'acqua piovana. Le caratteristiche zonali dell'area sono state in parte estrapolate tramite il DEM fornito dal servizio WMS della Regione Marche, mentre altre informazioni sono state acquisite da tesi prodotte contemporaneamente alla mia, che hanno utilizzato i dati di un volo con drone eseguito dal gruppo di Geomatica dell'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM) (Pierantoni, 2024).

L'area presenta un'altezza media di 117,11 metri, un'altezza massima è di 193,79 m e un'altezza minima è di 40,44 m. Le informazioni grafiche sono state rappresentate attraverso cartografie che mostrano l'esposizione (Figura 14), le pendenze (Figura 13) e le curve di livello (Figura 12).



Figura 11 Sottobacino che sottende il fosso che scorre all'interno dell'Azienda Agraria

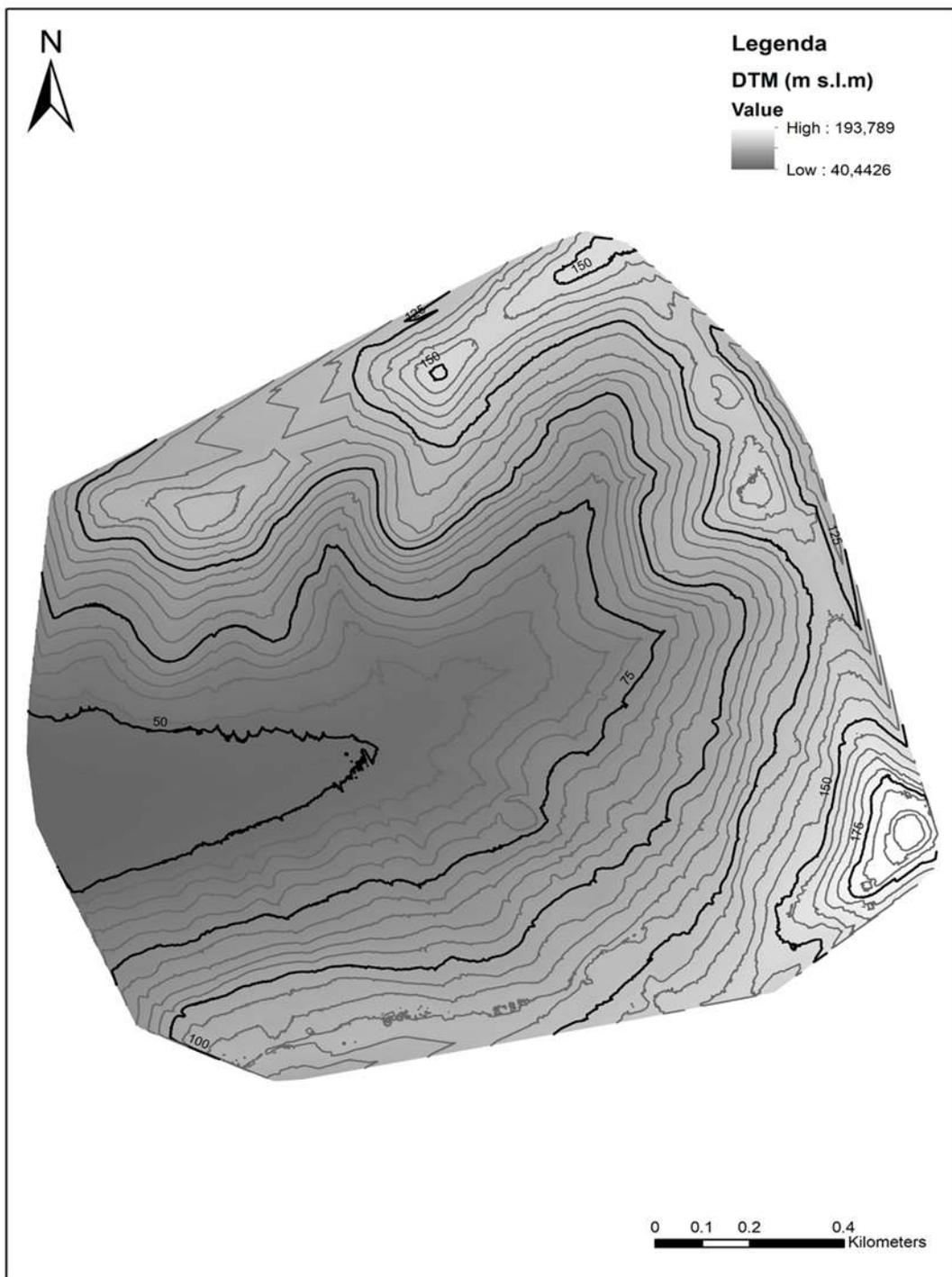


Figura 12 Curve di livello dell'area di studio (tratto da Alberto Pierantoni, *Analisi idrogeomorfologica di un versante soggetto a frana nell'area dell'Azienda Agraria universitaria di Borgo Ruffini, Università di Ancona, 2024, p. 76*) (Pierantoni, 2024)

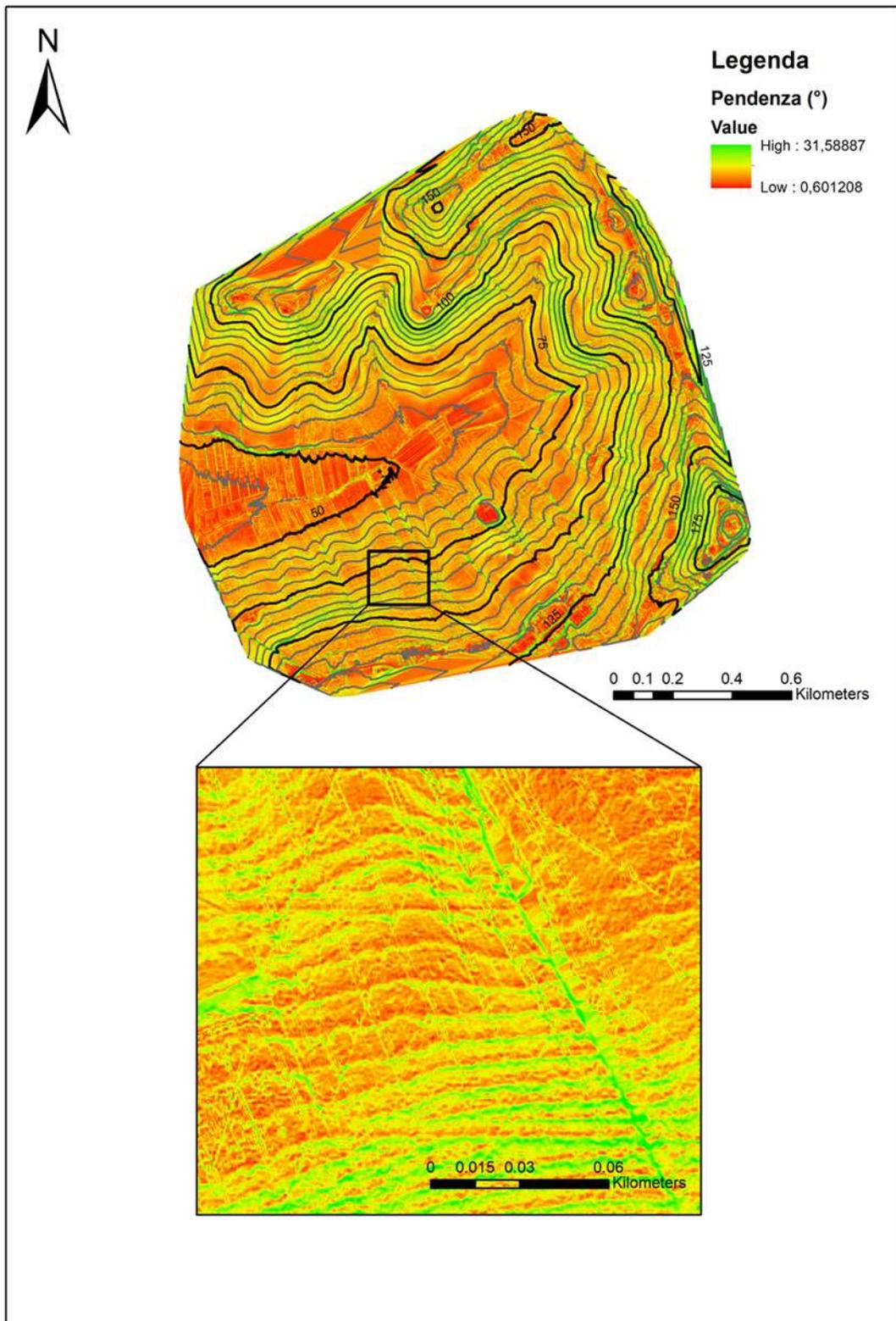


Figura 13 Pendenza dell'area di studio (tratto da Alberto Pierantoni, Analisi idrogeomorfologica di un versante soggetto a frana nell'area dell'Azienda Agraria universitaria di Borgo Ruffini, Università di Ancona, 2024, p. 78) (Pierantoni, 2024)

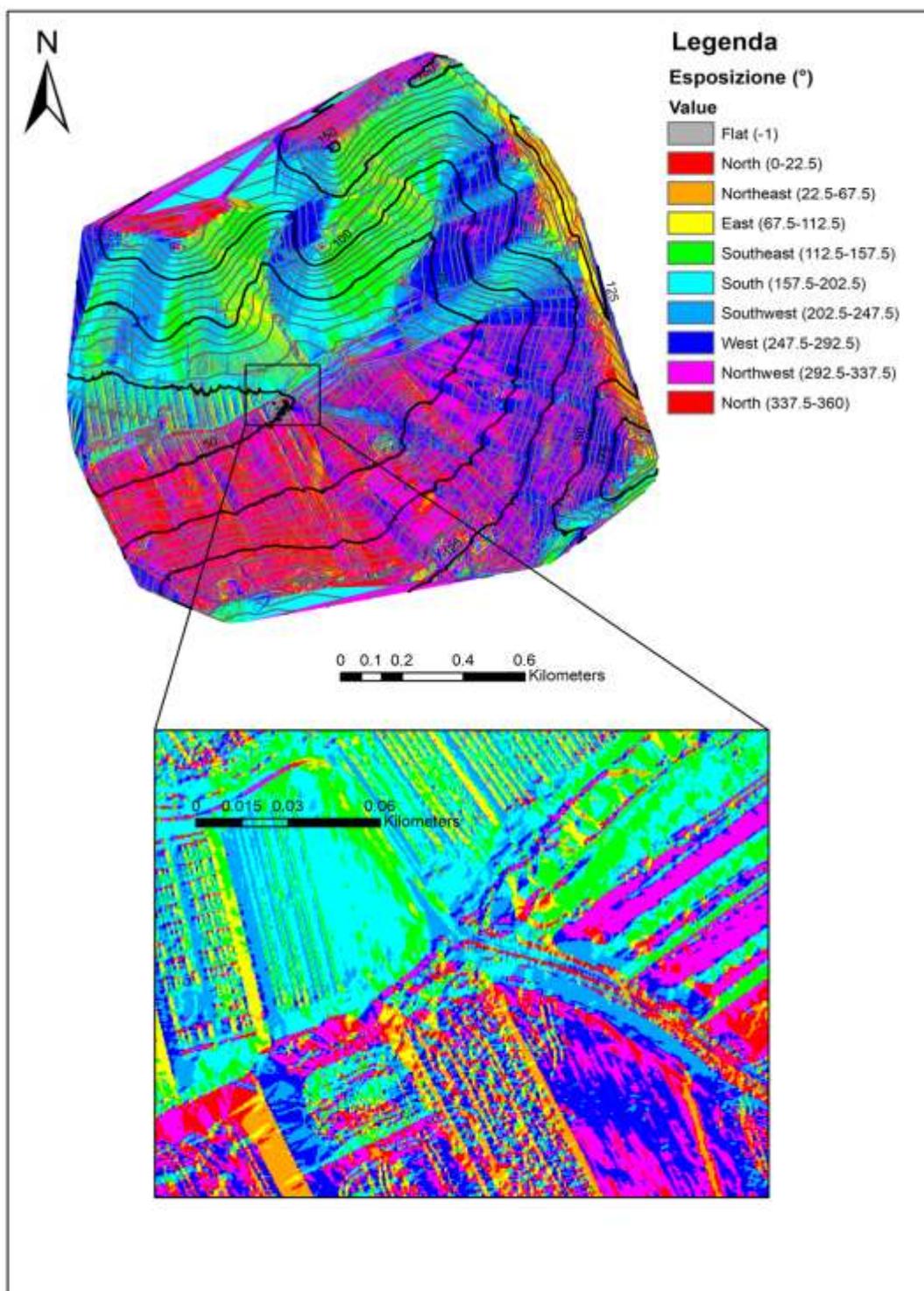


Figura 14 Esposizione dell'area di studio (tratto da Alberto Pierantoni, Analisi idrogeomorfologica di un versante soggetto a frana nell'area dell'Azienda Agraria universitaria di Borgo Ruffini, Università di Ancona, 2024, p. 84) (Pierantoni, 2024)

2.2 Inquadramento geologico e geomorfologico

La geologia è la scienza che studia il pianeta Terra con riferimento alla sua composizione, alla sua struttura e configurazione, alla sua superficie e ai processi che vi operano, cercando di giungere alla conoscenza dell'evoluzione che esso ha avuto sin dai primordi della sua formazione (circa 4,7 miliardi di anni fa). Costituisce un punto di convergenza di numerose discipline che hanno come scopo lo studio della Terra nei suoi molteplici aspetti (Treccani, 2024).

Il bacino idrografico del Fiume Esino, situato nelle Marche (Italia centrale) è caratterizzato da una stratigrafia denominata “umbro-marchigiana”. Questa successione sedimentaria che forma l'ossatura dell'Appennino Umbro-Marchigiano fu deposta su crosta di tipo continentale appartenente alla cosiddetta “microplacca di Adria”; questa rappresenta un frammento disarticolato dal margine settentrionale della grande zolla continentale africana (Geo Umbria, 2018).

Le formazioni geologiche presenti nell'area oggetto di studio posso essere descritte come segue (Pierantoni, 2024) (Figura 15):

- Anidriti di Burano
- Calcare Massiccio
- Bugarone
- Corniola
- Rosso ammonitico, Calcari e Marne a Posidonia e Calcari Diasprigni
- Maiolica
- Marne a Fucoidi
- Scaglia bianca
- Scaglia rossa
- Scaglia variegata
- Scaglia cinerea
- Bisciario
- Schlier, Marne Corregna, Marne a Pteropodi
- Deformazioni appenniniche con formazioni con sedimenti torbiditici come la Marnoso Arenacea
- Unità Gessoso Solfifera
- Argille azzurre
- Depositi Pliocenici che si trovano nelle attuali zone costiere

Nel Triassico superiore, l'area umbro-marchigiana era occupata da un vasto bacino evaporitico di acque basse, rappresentato dalla Formazione delle Anidridi di Burano. La fine del Triassico (Retico superiore) fu segnata da significative variazioni climatiche, che portarono alla scomparsa dei sedimenti evaporitici, sostituiti da sedimenti calcareo-argillosi.

Durante il Giurassico inferiore (Lias), si sviluppò una piattaforma carbonatica, nota come Formazione del Calcere Massiccio, che si estendeva dalla Toscana fino al sud del Gran Sasso, interessando l'intera Umbria e le Marche. L'annegamento della piattaforma del Calcere Massiccio non avvenne contemporaneamente in tutta la regione: in molte zone dell'Appennino Umbro-Marchigiano, la sedimentazione del Calcere Massiccio continuò fino al Carixiano.

L'annegamento della piattaforma fu accompagnato da movimenti tettonici estensionali legati all'apertura dell'oceano Ligure – Piemontese che disarticolò il fondale marino in un insieme di blocchi sollevati, abbassati e variamente ruotati. Le aree rialzate presentarono sedimentazioni condensate e lacunose (Formazione del Bugarone), mentre le aree abbassate mostrarono successioni più potenti e complete, con transizioni intermedie tra i due estremi.

Le successioni giurassiche estese e complete, caratterizzate in ordine stratigrafico dalla Corniola, dalle Marne di Monte Serrone, dal Rosso Ammonitico, dai Calcari e dalle Marne a Posidonia e de Calcari Diasprigni, si formarono durante l'apertura e l'espansione dell'Oceano Ligure – Piemontese.

In questo periodo grandi quantità di fango calcareo provenienti dal Dominio Laziale – Abruzzese (Piattaforma Carbonatica), rifornirono il bacino Umbro – Marchigiano contiguo, arricchendo molte successioni giurassiche umbro-marchigiane con corpi calcarenitici e calciruditici.

Dal Giurassico superiore all'Eocene, l'Appennino Umbro – Marchigiano rimase in condizioni di sedimentazione pelagica, dando origine Maiolica, Marne a Fucoidi e Scaglia. In questo periodo la maggior parte del fango carbonatico venne prodotto in situ (Geo Umbria, 2018).

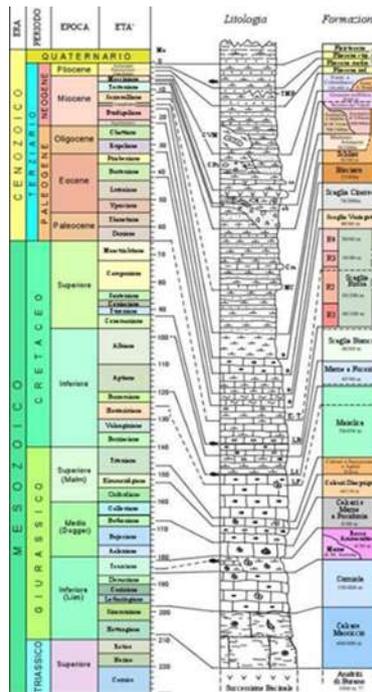


Figura 15 Formazioni geologiche Dominio umbro-marchigiano (Pierantoni, 2024)

Nel bacino di interesse (Figura 16) affiorano due formazioni: le Formazioni delle Argille Azzurre (Litofacies arenacea, Litofacies arenaceo-pelitica e pelitico-arenacea) e il Sintema del Musone (Depositi alluvionali terrazzati, Depositi di frana senza indizi di evoluzione e Depositi eluvio-colluviali).

Le argille Azzurre risalgono al Pliocene inferiore e sono legate alla sedimentazione in ambiente marino poco profondo, dove l'energia delle onde e delle correnti era ridotta. Il loro nome deriva dal colore grigio-azzurro dovuto alla presenza di minerali come smectite e illite (Pierantoni, 2024).

Depositi eluvio-colluviali: originati dall'alterazione fisica e chimica del substrato e al trasporto dei detriti attraverso ruscellamento superficiale o movimenti di massa. La composizione litologica di questa copertura varia in base alla natura del substrato, ed è prevalentemente costituita da limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie limose, riferibili in particolare al periodo Olocene-Pleistocene superiore, inclusi arenacei e/o calcarei eterometrici (Pierantoni, 2024).

Depositi alluvionali terrazzati: Depositi alluvionali più antichi (e debolmente cementati), posti a quote più alte rispetto l'attuale livello del corso d'acqua. Nel caso dell'area studio sono prevalentemente composti da sabbie e sabbie ghiaiose (Pierantoni, 2024).

Depositi di frana senza indizi di evoluzione: Diversamente alle frane attive che continuano a muoversi e modellare il terreno, le frane senza indizi di evoluzione nell'ultimo ciclo stagionale sono considerate sospese (Pierantoni, 2024).

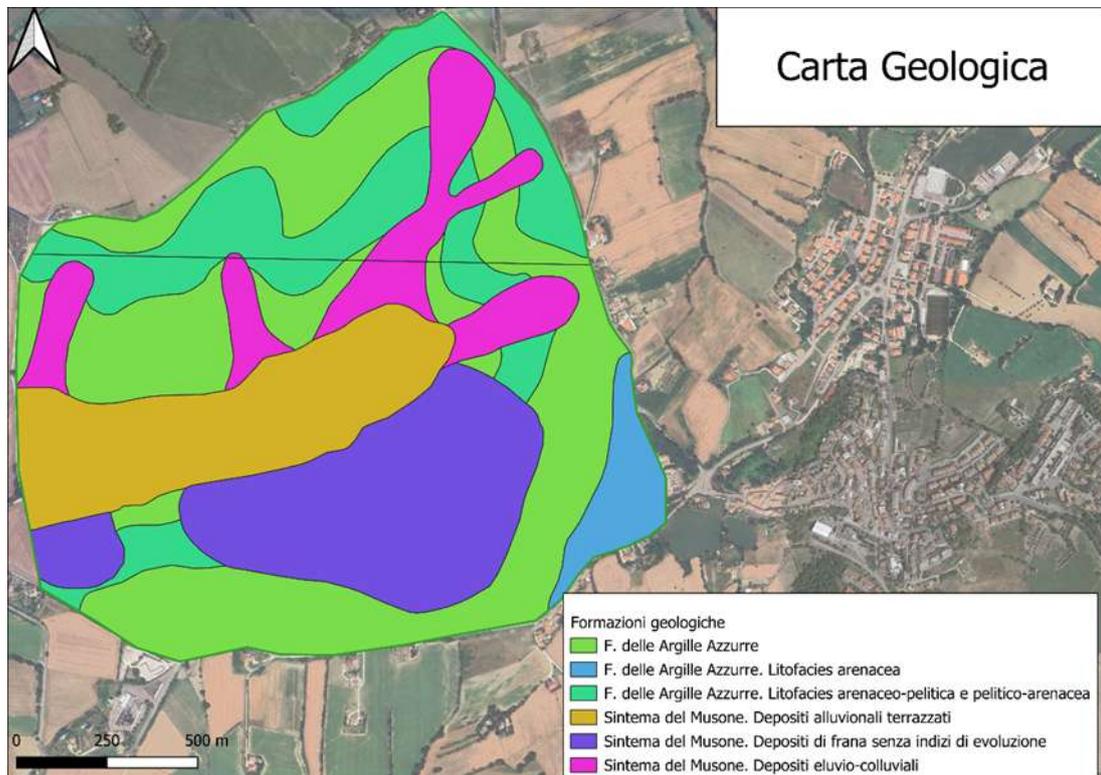


Figura 16 Carta delle formazioni geologiche dell'area di studio (dati da Regione Marche, WMS, 2024) (Regione Marche, 2024)

La Geomorfologia è la scienza che studia la morfologia della superficie terrestre, investigandone l'origine e l'evoluzione. In particolare, essa esamina le correlazioni tra la morfologia del terreno, le caratteristiche litologiche e i processi che ne hanno modellato la struttura.

Gli aspetti geomorfologici risultano estremamente legati alle caratteristiche litostrutturali dei terreni affioranti e alla storia tettonico-evolutiva del Quaternario. Le morfologie più accidentate si osservano nella porzione occidentale dell'area del fiume, dove affiorano le rocce calcaree e calcareo-marnose della successione Umbro-marchigiana. L'erosione selettiva, indotta dal sollevamento generalizzato dell'area e influenzata dalla diversa resistenza dei materiali, ha evidenziato rilievi costituiti da strutture calcaree mesozoiche. Inoltre, l'interazione tra la litologia e la struttura del substrato ha portato alla formazione di versanti con inclinazioni diverse.

Nella porzione centro orientale dell'area del fiume si riconosce invece, il caratteristico paesaggio collinare, modellato su sedimenti torbiditici silico-clastici della trasgressione medio-pleiocenica e sui successivi sedimenti arenaceo-pelitici e pelitico-arenacei.

L'assetto monoclinale (immergente verso NE) e la composizione litologica hanno favorito nel tempo lo sviluppo di numerosi fenomeni franosi, caratterizzati da una varietà di tipologie e cinematismi.

Localmente sono presenti morfologie a calanchi presenti nei terreni argillosi disposti soprattutto a reggipoggio.

I depositi alluvionali sono sviluppati in particolar modo nella piana del Fiume Esino e in misura minore lungo le pianure del Fiume Sentino. Nel Fiume Esino sono riconoscibili gli ordini terrazzati, ben documentati in letteratura e risalenti al Pleistocene medio e superiore. Nei materiali ghiaiosi dei diversi terrazzi alluvionali (sintemi) si trovano frequentemente intercalazioni argillose di origine fluvio-lacustre (Università di Camerino, 2019).

Il bacino di interesse è caratterizzato principalmente da una morfologia collinare, distinguibile in due tipologie principali; Zone di versante e Zone di fondo valle. Nei versanti sono presenti numerosi fenomeni di instabilità, come frane per scorrimento in fase inattiva e frane per colamento, sia attive che inattive e questi fenomeni sono influenzati dalla natura litologica delle formazioni affioranti. La combinazione di questi litotipi conferisce al terreno un'elevata erodibilità, rendendo i versanti particolarmente vulnerabili a movimenti gravitativi (Pierantoni, 2024).

2.3 Inquadramento idrologico del bacino

Prendendo ora in considerazione le caratteristiche geoidrologiche dei terreni descritti, si può affermare che la permeabilità delle unità calcaree mesozoiche sia diretta conseguenza della loro intensa fratturazione e della presenza dei canali di dissoluzione carsica («scaglia rosata», «maiolica», «livello a Posidonia», «corniola», «calcare massiccio», «calcarei nodulari» delle serie condensate). I sottili livelli argillosi e marnosi intercalati in queste unità, pur essendo di per sé impermeabili, non costituiscono in generale un ostacolo alla circolazione delle acque soprattutto a causa delle numerose fratture che ne interrompono la continuità.

I terreni di origine terziaria e pleistocenica, costituiti da strati arenacei o sabbiosi, risultano permeabili per porosità e fessurazione o esclusivamente per porosità. Tuttavia, l'alternanza frequente con strati argillosi, talvolta spessi, rende complessivamente impermeabili questi depositi. Un'elevata permeabilità interstiziale si riscontra nei detriti di falda e nelle alluvioni

ghiaioso-sabbiose che però, come già accennato, contengono localmente talora strati argillosi impermeabili.

Gli acquicludi più importanti sono dati dalla Scaglia Cinerea, dalle Marne a Fucoidi (in particolare dalla parte basale, essendo quella superiore spesso permeabile per fessurazione) e dal Rosso Ammonitico. Quest'ultimo è però spesso discontinuo per l'esistenza dei due tipi di sedimentazione giurassica. Localmente, i sondaggi hanno evidenziato la presenza di un acquicluda alla base del Calcarea Massiccio, noto come Formazione di Burano.

Gli acquiferi mesozoici sono collegati alle più importanti sorgenti della regione, generalmente sorgenti di trabocco semplice o sbarrate su fianchi anticlinali. Talvolta, si osservano emergenze carsiche legate a canali di circolazione preferenziale. Le sorgenti più rilevanti, come quelle di Gorgovivo, sono associate al Calcarea Massiccio, mentre le sorgenti nei terreni terziari e pleistocenici risultano di minore importanza, a causa della limitata dimensione dei bacini di alimentazione e della presenza di numerosi strati impermeabili.

Un aspetto significativo dell'area è l'assetto tettonico, che favorisce la formazione di falde profonde in pressione nelle sinclinali e nella monoclinale esterna, dove gli acquiferi calcarei si trovano a notevole profondità sotto i terreni impermeabili più recenti

I terreni alluvionali nella parte esterna dei bacini hanno una discreta rilevanza idrogeologica, con numerosi pozzi perforati per uso irriguo, industriale e potabile, soprattutto nelle pianure alluvionali dei fiumi e nei primi livelli terrazzati. Gli orizzonti acquiferi sono costituiti da ghiaie e sabbie, intervallati da strati argillosi frammentari, che danno origine a locali falde in pressione. Tuttavia, queste falde comunicano tra loro su brevi distanze, formando accumuli acquiferi relativamente continui lungo le valli. Nei tratti terminali dei bacini, a maggiore profondità, si trovano falde artesiane, legate alla presenza di un'ampia copertura argillosa continua e spessa (Università di Camerino, 2019).

2.4 Inquadramento climatico

L'Italia (G.M.P.E., 2005) si trova tra i 36° e i 47° di latitudine nord, rientrando così nella fascia temperata. Il 45° parallelo attraversa l'intera Pianura Padana, da ovest a est, posizionando una buona parte del territorio italiano all'interno dei climi temperati caldi, di tipo mediterraneo. Tuttavia, la parte settentrionale presenta già caratteristiche più continentali o, in alcuni casi, di transizione, con climi di montagna nelle aree più elevate.

Il clima italiano è caratterizzato da una notevole variabilità ed è frequentemente soggetto a eventi anomali, come siccità, precipitazioni violente, grandinate e trombe d'aria, che talora si traducono in calamità naturali. Diversi fattori influenzano queste condizioni climatiche:

- La vicinanza al mare, che attenua in misura diversa gli eccessi climatici.
- La contiguità con il resto d'Europa: sebbene la barriera alpina offra una certa protezione, non impedisce il passaggio di correnti d'aria fredda che scendono dalla valle del Rodano fino al Mar Ligure e al Mar Tirreno, né blocca le masse d'aria gelida provenienti dall'Europa orientale e dalla Russia, che si espandono nell'Adriatico.
- La vicinanza dell'Africa, da cui provengono aria e venti subtropicali, sempre caldi, che spesso si caricano di umidità attraversando il Mediterraneo e che contribuiscono a mitigare le temperature della penisola, specialmente in inverno.

In Italia si possono distinguere sei principali regioni climatiche: zona alpina, zona padana, zona appenninica, zona tirrenica, zona adriatica e zona mediterranea (Figura 17) (G.M.P.E., 2005). Ognuna di queste regioni presenta caratteristiche particolari, che le differenzia dalle altre, con alcune differenze più marcate e altre più lievi. La regione di nostro interesse è la zona Adriatica, dove le temperature sono generalmente più basse rispetto a quelle della zona tirrenica. Questo è dovuto sia al fatto che il Mar Adriatico, meno profondo ed esteso del Tirreno, esercita un'azione mitigatrice meno significativa, sia al passaggio dei venti freddi attraverso le Alpi Giulie, provenienti dall'Europa settentrionale e orientale. Le precipitazioni sono scarse e distribuite in modo irregolare (G.M.P.E., 2005).



Figura 17 Zone climatiche dell'Italia (G.M.P.E., 2005)

2.5 Cambiamento climatico nelle Marche

Negli ultimi anni il cambiamento climatico è diventato un problema crescente che l'Italia, così come il resto d'Europa, sta affrontando. Si tratta di un fenomeno complesso, influenzato da molteplici fattori di origine sia naturale che antropogenica. Tra gli effetti più rilevanti possiamo citare:

1. Scioglimento dei ghiacciai
2. Aumento delle temperature
3. Eventi meteorologici estremi
4. Cambiamenti nella biodiversità
5. Riscaldamento dei mari
6. Alterazione dei modelli meteorologici
7. Impatti sull'agricoltura, sulla sicurezza alimentare e sulla salute

Di seguito vengono riportati alcuni dati estrapolati dai documenti prodotti dalle autorità competenti della regione Marche: **“Stato della risorsa idrica e della severità idrica aggiornamento fine giugno-metà luglio 2024”** (REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024).

2.5.1 Situazione meteorologica

A livello regionale, da luglio 2023 a maggio 2024, le temperature medie mensili sono state generalmente superiori alla media storica, con anomalie che hanno raggiunto o superato i 2°C.

A partire da dicembre 2023, le precipitazioni sono state complessivamente inferiori alla norma, con anomalie negative significativamente a dicembre 2023 e febbraio 2024.

Anche nel mese di giugno le precipitazioni a livello regionale sono state inferiori alla media, specialmente nelle aree di pianura e costiere, e nella zona centro-settentrionale della regione.

Tuttavia, nella zona meridionale, in alcune aree della dorsale marchigiana e dell'alta collina, le precipitazioni sono risultate superiori alla media.

Mese	Temperatura media (°C)			Precipitazione (mm)		
	2023	1991-2020	Anomalia	2023	1991-2020	Anomalia
Gennaio	6.6	5.2	1.4	137	56	81
Febbraio	6.5	5.9	0.6	47	60	-13
Marzo	11.0	9.0	2.0	72	74	-2
Aprile	11.5	12.2	-0.7	66	75	-9
Maggio	16.4	16.7	-0.3	193	73	120
Giugno	21.5	21.1	0.4	123	61	62
Luglio	26	23.7	2.3	23	43	-20
Agosto	24.2	23.6	0.4	58	50	8
Settembre	21.3	18.8	2.5	37	84	-46
Ottobre	19.1	14.5	4.6	27	80	-53
Novembre	11.9	9.9	2.0	109	101	8
Dicembre	9	6.1	2.9	25	86	-61
MEDIE/TOTALI	15.4	13.9	1.5	917	843	74

Mese	Temperatura media (°C)			Precipitazione (mm)		
	2024	1991-2020	Anomalia	2024	1991-2020	Anomalia
Gennaio	7.1	5.2	1.9	45.1	56.9	-11.8
Febbraio	9.4	5.9	3.5	27.9	61.2	-33.3
Marzo	11.3	9.0	2.3	75.9	74.6	1.3
Aprile	13.5	12.2	1.5	53.6	76.22	-22.6
Maggio	17.1	16.7	0.4	63.0	72.6	-9.6
Giugno	22.5	21.1	1.4	47.8	61.4	-13.6
Luglio						
Agosto						
Settembre						
Ottobre						
Novembre						
Dicembre						
MEDIE/TOTALI	13.5	11.7	1.8	313.3	402.9	-89.6

Figura 19 Precipitazioni e temperatura medie e anomalia rispetto al periodo 1991-2020 (REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024)

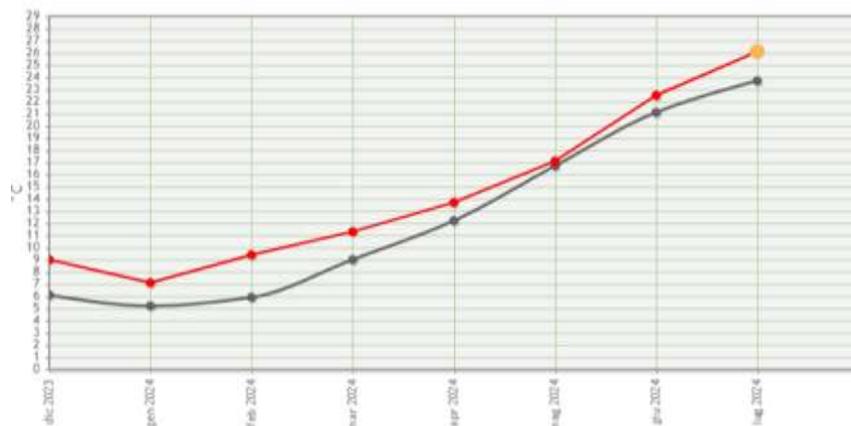


Figura 18 Temperatura media mensile attuale (rosso) e media del periodo 1991-2020 (grigio) - dati aggiornati al 18/07/2024 (REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024)

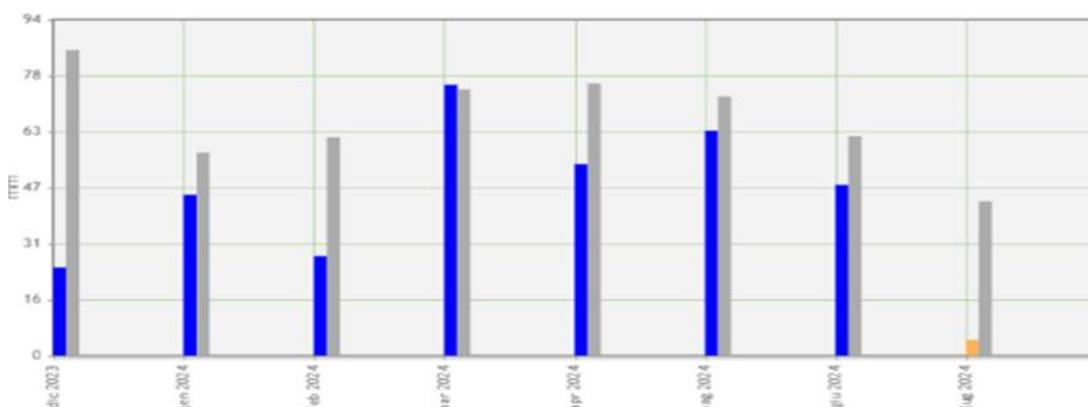


Figura 20 Precipitazione mensile attuale (blu-giallo) e media del periodo 1991-2020 (grigio) - dati aggiornati al 18/07/2024 (REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024)

2.5.2 Severità idrica locale

La situazione idrologica nella Regione Marche ha subito in genere un peggioramento a giugno rispetto a maggio. Le precipitazioni cumulate dai mesi autunnali/invernali risultano comunque inferiori alla norma e nel caso di precipitazioni inferiori alla norma anche nei prossimi mesi, la situazione idrologica sarà particolarmente gravosa (Figura 21)

Territorio	Siccità meteo	Siccità idrologica	Stato severità locale	Tendenza severità locale stimata	Stato severità regionale (3)
ATO 1 - Prov PU	Severa	Severa	Media	↓	Media
ATO 2 - Prov AN	Moderata	Moderata	Bassa	↓	
ATO 3 - Prov MC (AN)	Moderata	Severa	Media	↓	
ATO 4 - Prov FM - MC	Severa	Severa	Bassa	↓	
ATO 5 - Prov AP - FM	Severa	Severa (1) / Estrema (2)	Alta	↓	

Figura 21 Sintesi situazione di severità idrica (REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024)

Capitolo 3

MATERIALI E METODI

Per monitorare ed analizzare il deflusso delle acque, superficiali e sotterranee, nell'area di studio è stato costruito un campo prove. Sono stati impiantati diversi strumenti che permettono la raccolta dei dati per valutarne il comportamento.

Di seguito vengono illustrati gli strumenti utilizzati e le loro caratteristiche, e a seguire un'esplicazione sui metodi d'indagine.

3.1 Strumenti

Suddividiamo la strumentazione in più categorie: strumenti meccanici, strumenti per la misurazione in situ, strumenti elettronici e strumenti informatici.

3.1.1 *Strumenti meccanici*

Taniche in plastica: per il trasporto dell'acqua da utilizzare nella prova infiltrometrica a doppio anello (Figura 23)

Pompa pressione/vuoto: utilizzata per la creazione del vuoto all'interno del lisimetro al fine di raccogliere il campione di acqua dal terreno. Con un semplice meccanismo, si trasforma in una pompa a pressione per consentire la suzione del campione dal lisimetro. La pompa è dotata del proprio manometro per verificare lo stato pneumatico del sistema (Figura 22).

Freatimetro: è uno strumento portatile utilizzato per misurare con precisione i livelli d'acqua in pozzi di monitoraggio e perforazioni. Il sensore è costituito da una sonda in acciaio inossidabile e PTFE (chiamata anche puntale) collegata a un nastro o a un cavo graduato (millimetrato o centimetrato) rivestito in polietilene montato su un avvolgitore. Il sensore si basa sulla conducibilità del fluido per determinare la presenza di acqua. Quando la sonda entra in contatto con l'acqua, viene attivato un segnale acustico e un LED rosso visibile. Dispone di sensibilità regolabile, utilizzata per prevenire attivazioni false (Figura 24)



Figura 23 Pompa pressione/vuoto (ECOSEARCH, 2024)



Figura 22 Taniche in plastica di diverse dimensioni (packari.com, 2024)



Figura 24 Freatimetro Geotech (ECOSEARCH, 2024)

Strumenti manuali: pala, zappa, piccone, martello, scalpello, trivella manuale, trapano a percussione utilizzati per il posizionamento dei vari sensori.

Infiltrometro a doppio anello: l'infiltrometro (Figura 25) è uno strumento che consente di valutare l'infiltrazione dell'acqua nel terreno.

L'intensità di questo processo è chiamata velocità di infiltrazione, la quale è espressa in termini di volume d'acqua per unità di tempo (L/T, ad esempio mm/min) (ECOSEARCH, 2024).

Un terreno strutturato (Figura 26) presenta una struttura stabile con aggregati ben definiti. L'acqua si infiltra facilmente, poiché la porosità è omogenea e riesce a penetrare in profondità e a essere trattenuta (buona ritenzione idrica). Un terreno destrutturato, al contrario, ha perso la sua struttura. Quindi l'infiltrazione e la ritenzione idrica sono molto ridotte e questo porterà alla formazione di ristagni.



Figura 25 Set completo per test infiltrometrico, tre coppie di anelli con diverse dimensioni, una piastra in acciaio, un martello (ECOSEARCH, 2024)

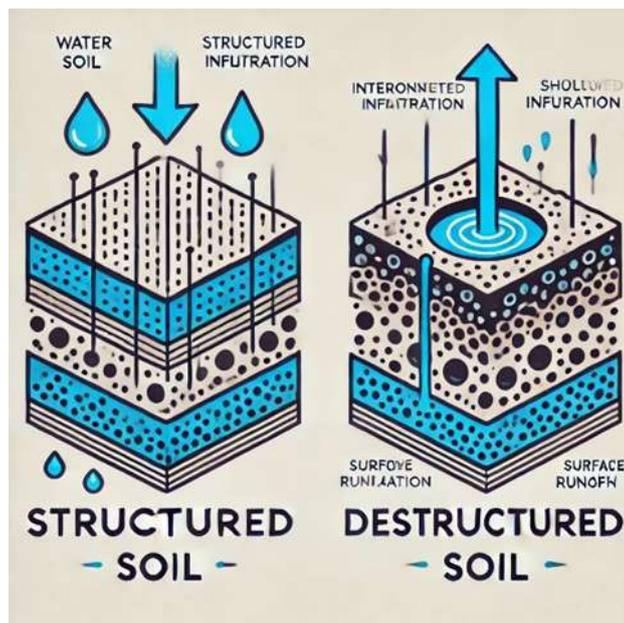


Figura 26 Infiltrazione acqua (ChatGPT, 2024)

La capacità di infiltrazione dell'acqua nel suolo diminuisce nel tempo e l'andamento viene espresso tramite la curva di infiltrazione (Figura 27).

I fattori che influenzano la capacità di infiltrazione dell'acqua nel suolo sono: la compattazione, la presenza di croste superficiali, lavorazioni errate e l'assenza di sostanza organica.

La velocità di infiltrazione dipende da diversi fattori: tessitura, dalla struttura e dalla stratificazione (eterogeneità) del suolo, dal contenuto di umidità del suolo e dal livello della falda freatica (ECOSEARCH, 2024).

Per una misurazione infiltrometrica sarebbe sufficiente la sola presenza dell'anello interno, ma il tasso di infiltrazione, risulterebbe sovrastimato a causa del deflusso orizzontale dell'acqua infiltrata nel terreno. Quindi l'anello esterno serve per limitare il deflusso orizzontale dell'acqua proveniente dall'anello interno.

Il livello dell'acqua nei due anelli deve essere uguale perché, se il livello dell'acqua dell'anello esterno è superiore rispetto a quello interno, l'acqua dall'esterno andrà verso l'interno (Figura 28). Viceversa, se il livello interno è superiore, l'acqua andrà verso l'esterno.

Di conseguenza è necessario controllare in maniera ripetuta nel tempo il livello interno ed esterno in modo da non ottenere risultati alterati (ECOSEARCH, 2024).

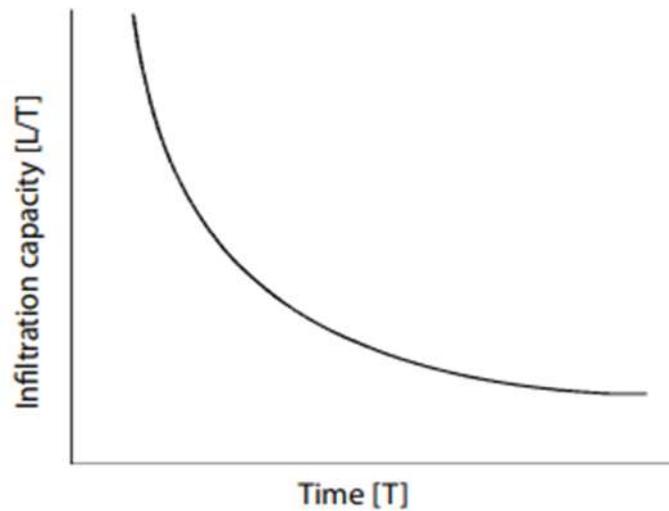


Figura 27 Curva di infiltrazione (ECOSEARCH, 2024)

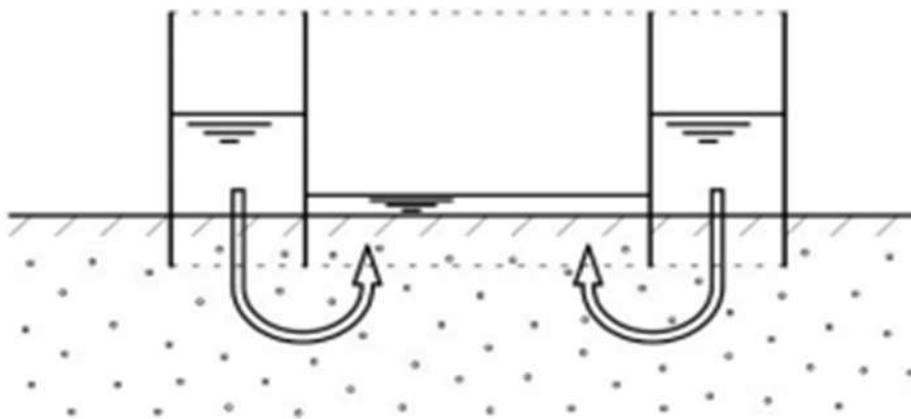


Figura 28 Spostamento dell'acqua dall'anello esterno a quello interno (ECOSEARCH, 2024)

3.1.2 Strumenti per la misurazione *in situ*

Lisimetro agronomico: i lisimetri (Figura 29) sono strumenti in grado di prelevare la soluzione circolante del terreno e vengono principalmente utilizzati in ambito agricolo per valutare la presenza di sostanze nutrienti nella soluzione stessa e sul loro movimento all'interno del suolo. È costituito da un tubo cavo e da una coppa porosa in ceramica posta all'estremità. Una volta inserito nel suolo alla profondità desiderata, viene creata una depressione nello strumento (mediante l'impiego di una pompa a vuoto) che instaura un gradiente di potenziale tra il terreno e l'interno del lisimetro.

Il campione di soluzione circolante del suolo passa quindi all'interno del tubo e viene successivamente trasferito in un contenitore di raccolta per essere sottoposto ad analisi (Ecosearch, 2024).



Figura 29 Lisimetro agronomico

3.1.3 *Strumenti elettronici*

Sentek - Drill & Drop: la sonda Drill and Drop (Figura 30) misura con precisione l'umidità del suolo, la temperatura e la salinità. La sonda è completamente incapsulata, facile da installare e può essere interamente interrata per ridurre il rischio di danni causati da macchinari.

Può essere utilizzata per colture arboree, erbacee, progetti di ricerca e gestione del paesaggio.

La sonda Drill & Drop è disponibile in lunghezze da 30 cm (12 pollici) fino a 120 cm (48 pollici) con sensori ogni 10 cm o quattro pollici, nel nostro caso abbiamo utilizzata la sonda di lunghezza: 90 cm.

Presenta una forma affusolata che consente un'installazione rapida senza alterare il terreno e grazie ai sensori posti ravvicinati è possibile avere i dati sull'intero profilo. I quali verranno poi visualizzati in tempo reale tramite l'applicazione IrriMAX (Sentek, 2024) (ECOSEARCH, 2024).



Figura 30 Sonda Drill & Drop prima del posizionamento

Sentek MULTI: è un sistema di acquisizione (Figura 31) e trasmissione dati wireless che combina il monitoraggio pluri-livello di umidità e salinità del suolo delle sonde con altri parametri utili alla gestione dell'irrigazione come: pioggia, flusso di acqua in condotta e temperatura aria e suolo.

La disponibilità in tempo reale dei dati di umidità e salinità del suolo correlati alle principali variabili agro-meteorologiche costituisce uno strumento di gestione e di supporto alle decisioni estremamente utile.

Le informazioni vengono trasmesse autonomamente su server via GPRS e possono essere scaricati da qualsiasi postazione internet utilizzando il software IrriMAX. Le sonde utilizzano un protocollo di comunicazione RS485 e sono collegate via cavo all'unità centrale di trasmissione dati, per una lunghezza massima di 200 metri, offrendo una notevole flessibilità d'installazione (ECOSEARCH, 2024).



Figura 31 Sistema di acquisizione Sentek Multi (ECOSEARCH, 2024)

Diver Baro (Figura 32): è stato sviluppato con lo scopo di misurare la pressione ambientale, consentendo così al software di compensare le misure rilevate dai sensori inseriti in acqua. In questo modo non si rende più necessario l'utilizzo dei cavi di compensazione, inoltre un solo Baro DIVER può fornire il dato di compensazione per un numero teoricamente infinito di sensori. L'unica condizione è che siano installati in un'area barometricamente omogenea (area in cui non ci sono grandi variazioni di pressione).

Il Baro ha una grandezza di 22x110 mm, ha un peso di 104 g, è composto di acciaio inox 316L e la batteria ha una durata di massimo 10 anni (in funzione dell'utilizzo). Ha la capacità di memorizzare 72000 misure, sovrascrivibili ad anello o blocco a piena capacità, la frequenza di campionamento va da 0.5 sec a 99 ore, presenta un sensore piezoresistivo in ceramica (AL203) con compensazione termica, Accuratezza T: $\pm 0.1^\circ \text{C}$ e Risoluzione T: 0.01°C . (AquaSEARCH, 2024).



Figura 32 Diver Baro (ECOSEARCH, 2024)

CTD- Diver (Figura 33): effettua misure di livello, temperatura e conducibilità elettrica dell'acqua in qualsiasi ambiente. Ideale per studi su intrusioni saline o siti contaminati con sostanze altamente aggressive.

Il sensore ha una grandezza di 22x135 mm, ha un peso di 95g, è composto da materiale ceramico (ZrO_2) e la batteria ha una durata di massimo 10 anni (in funzione dell'utilizzo).

Ha la capacità di memorizzare 48000 misure (non volatile), la frequenza di campionamento va da 1 sec a 99 ore, presenta un sensore in alluminia (Al_2O_3), Accuratezza T: $\pm 0.1^\circ C$ e Risoluzione T: $0.01^\circ C$ (AquaSEARCH, 2024) (vanEssen Instruments, 2024).



Figura 33 CTD-Diver (ECOSEARCH, 2024)

TD-Diver (Figura 34): è un datalogger subacqueo per il monitoraggio a lungo termine e ininterrotto del livello dell'acqua in tempo reale, utilizzando un sensore di pressione quando è immerso a un livello fisso sotto la superficie dell'acqua. Il sensore di pressione misura la pressione idrostatica equivalente dell'acqua sopra il diaframma del sensore per calcolare la profondità totale dell'acqua. Il Diver misura autonomamente la pressione e la temperatura, registrandole nella sua memoria interna. Il Diver è ideale per applicazioni di monitoraggio del livello delle acque sotterranee e superficiali.

Il sensore ha una grandezza di 22x110 mm, ha un peso di 104g, è composto da acciaio inox (316L) e la batteria ha una durata di massimo 10 anni (in funzione dell'utilizzo).

Ha la capacità di memorizzare 72000 misure, sovrascrivibili ad anello o blocco a piena capacità, la frequenza di campionamento va da 0.5 sec a 99 ore, presenta un sensore piezoresistivo in ceramica (Al_2O_3) con compensazione termica, Accuratezza T: $\pm 0.1^\circ C$ e Risoluzione T: $0.01^\circ C$. (AquaSEARCH, 2024) (vanEssen Instruments, 2024).



Figura 34 TD Diver (ECOSEARCH, 2024)

3.1.4 *Strumenti informatici*

La strumentazione informatica impiegata nel presente lavoro comprende:

- QGIS 3.34.4: utilizzato per l'analisi dell'area di studio e la produzione di cartografie
- Excel: impiegato per l'elaborazione dei dati raccolti e scaricati

3.2 Metodi di indagine

Il processo di indagine ha seguito una serie di fasi cronologiche.

Prima fase: rilievo dell'area.

Il primo rilievo è stato eseguito in data 7 marzo 2024 con il supporto del tecnico Mirco Palpacelli, referente tecnico del centro aziendale di Agugliano, il quale ha illustrato la conformazione dell'azienda e fornito informazioni sul reticolo idrografico minore e sul laghetto presenti all'interno dell'azienda.

L'obiettivo del rilievo era rappresentare graficamente, su carta tecnica regionale, il reticolo, il lago, il pre-lago e valutare la presenza di acqua all'interno del reticolo.

Il laghetto, situato nella parte alta dell'azienda, presenta un pre-lago che originariamente aveva la funzione di sedimentare le particelle di terreno per impedire il riempimento del lago. Nel corso del tempo, a causa di eventi franosi e dell'incuria, tale funzione è andata perduta (Figura 35).



Figura 35 Lago e pre-lago

Il lago ha un diametro di 70 metri e presenta una recinzione intorno, il cui obiettivo è impedire l'ingresso di persone e animali. A livello regionale non esiste alcuna legge che obblighi all'installazione di una recinzione, ma, ad esempio, il "Testo Unico sulla Sicurezza sul Lavoro, D.lgs. 81/2008" (Repubblica Italiana, 2008) impone ai datori di lavoro, inclusi gli agricoltori, di valutare i rischi presenti nei luoghi di lavoro e di adottare misure preventive adeguate. Sul lato che costeggia la strada è presente l'uscita del troppo pieno, che, tramite una serie di elementi in cemento, allontana l'acqua in eccesso facendola confluire nel fosso.

Nel sottobacino, è presente un reticolo principale e un reticolo secondario esteso (Figura 36). Il reticolo principale ha un'estensione di 1570 metri e attraversa l'azienda da nord-est a sud-ovest. Il reticolo secondario, con un'estensione complessiva di 2409 metri, costeggia e delimita gli appezzamenti e confluisce nel reticolo principale.



Figura 36 Distribuzione spaziale del reticolo idrografico minore

Attraverso questo primo rilievo è stata rilevata la presenza di acqua in tutto il reticolo (Figura 38, Figura 39) nonché la fuoriuscita dell'acqua dal troppopieno del lago (Figura 37). Ciò indica che, nei giorni precedenti al sopralluogo, si sono verificati eventi piovosi di varia intensità, i quali hanno contribuito alla saturazione del terreno e all'innalzamento del livello dell'acqua nel lago.



Figura 38 Reticolo idrografico secondario 7/03/24



Figura 37 Troppopieno del lago 7/03/24



Figura 39 Reticolo idrografico principale 7/03/24

Il secondo rilievo, effettuato il 14 marzo 2024, ha evidenziato la presenza di acqua esclusivamente nel reticolo principale (Figura 42). Nel reticolo secondario (Figura 41) non è stata riscontrata acqua libera in movimento, sebbene il terreno risultasse ancora molto umido

al tatto. La fuoriuscita di acqua dal troppopieno (Figura 40) del lago era ancora presente, ma in quantità significativamente ridotte rispetto alla settimana precedente.

Ciò indica che, nel periodo compreso tra il primo e il secondo rilievo, non si sono verificati eventi piovosi intensi o, se presenti, sono stati molto leggeri. Di conseguenza, non si è verificato un allontanamento dell'acqua tramite il reticolo, poiché essa è stata assorbita dal terreno.



Figura 41 Reticolo idrografico secondario 14/03/24



Figura 42 Reticolo idrografico principale 14/03/24



Figura 40 Troppopieno del lago 14/03/24

Seconda fase: installazione sensori nel pozzo, stazione Sentek e lisimetro

L'installazione del sensore Sentek - Drill & Drop e del sistema di acquisizione Sentek MULTI è avvenuta il 21 marzo 2024. Si è proceduto innanzitutto con la scelta del luogo, individuato tra il campo prove dell'azienda agraria dell'Università Politecnica delle Marche e la strada sterrata che attraversa l'intera campagna. Le motivazioni alla base di questa scelta sono state la facile accessibilità per le autovetture e l'assenza di interferenze con le lavorazioni del terreno.

Dopo aver scelto il luogo, è iniziata l'installazione vera e propria. Si è proceduto con l'apertura di un foro nel terreno per il posizionamento del palo di sostegno del Sentek MULTI. Il foro è stato aperto utilizzando una trivella a mano (Figura 43). Il terreno, essendo argilloso, molto compatto e mai lavorato, ha reso l'operazione di scavo particolarmente lunga.

Una volta aperto il foro, il palo in acciaio inox è stato inserito e cementato alla base (Figura 44) per garantire stabilità nel tempo e sigillare lo spazio tra il terreno e il palo (Figura 45).



Figura 44 Posizionamento palo



Figura 43 Trivella manuale



Figura 45 Palo cementato

Durante il tempo di asciugatura del cemento, è stato posizionato il sensore Sentek - Drill & Drop, collocato a circa 4 m di distanza dal palo. La prima operazione eseguita è stata la realizzazione di una micro-trincea per occultare i fili (posti all'interno di un corrugato) che collegano il sensore alla stazione. Questa operazione di occultamento è stata effettuata per evitare danneggiamenti ai fili e per garantire un'estetica migliore.

Utilizzando un trapano con una punta a trivella (Figura 48) è stato aperto il foro per il sensore. Le operazioni di scavo sono state difficoltose a causa della tenacia del terreno.

Dopo l'inserimento del sensore (Figura 47), lo spazio tra la sommità del sensore e il terreno è stato chiuso con il materiale di risulta (Figura 46).



Figura 48 Apertura foro



Figura 47 Posizionamento sensore



Figura 46 Occlusione spazi

Il corrugato, che permette il trasferimento di informazioni dal sensore alla stazione di acquisizione, è stato posizionato all'interno della trincea, successivamente ricoperto con il materiale di risulta (Figura 49).

Dopo la solidificazione del cemento, è stato effettuato il montaggio del Sentek MULTI, che comprende un pannello solare per ricaricare le batterie, e il corpo principale, dal quale partono i cavi per il collegamento con i sensori.



Figura 49 Trincea con il corrugato

L'insieme è stato montato su un tubo curvo in acciaio inox, che presenta una base su una dell'estremità. Tramite l'uso di due cavallotti e quattro dadi, il tutto è stato fissato al palo ancorato al terreno (Figura 50).

Completato il montaggio, si è proceduto con l'attivazione del sistema e il controllo della comunicazione tra il MULTI e il software Irrimax (Figura 51). Al termine del controllo generale, è stata effettuata la delimitazione dell'area utilizzando quattro picchetti e il nastro rosso e bianco (Figura 52).



Figura 50 Stazione montata



Figura 52 Area delimitata



Figura 51 Stazione in fase di attivazione e controllo

L'installazione del lisimetro (Figura 53) è avvenuta il giorno 21 marzo 2024. L'area scelta per il montaggio coincide con l'area del Sentek, posizionata all'interno della zona delimitata al fine di avere un campo prove compatto e che non creasse problemi con la viabilità (Figura 54).

L'apertura del foro è stata effettuata utilizzando una trivella manuale. Anche in questo caso, la tenacia del terreno ha creato delle difficoltà, e, dato che il lisimetro è particolarmente lungo (90 cm), per facilitare le operazioni di scavo è stata aggiunta acqua all'interno del foro durante le fasi di scavo.

Terminate le operazioni di scavo, è stato inserito all'interno del foro del materiale inerte, silicio, per creare un continuum tra la coppa porosa ed il suolo circostante. Successivamente, è stato inserito il lisimetro e, utilizzando il materiale di risulta dello scavo, sono stati chiusi gli spazi tra il terreno e il corpo dello strumento.

L'operazione di montaggio si è conclusa con la messa in pressione dello strumento tramite l'utilizzo di una pompa a vuoto, collegata ad un tappo di plastica morbida con una valvola, che consente di creare un vuoto all'interno del lisimetro e quindi un gradiente tra l'interno del lisimetro, la malta di silicio ed il suolo.

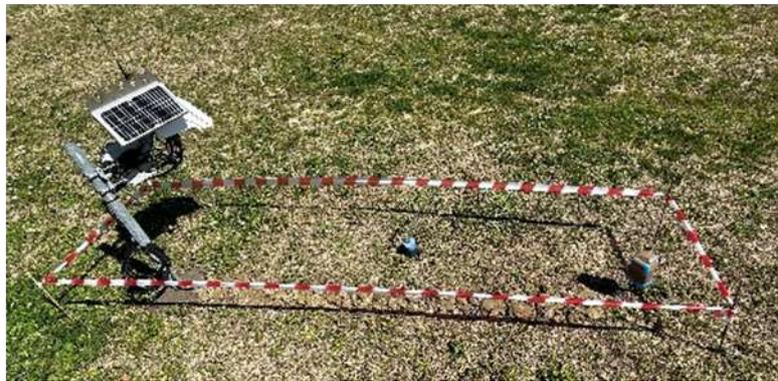


Figura 53 Posizione stazione completa



Figura 54 Posizione stazione

L'installazione dei sensori (Diver Baro e il TD-Diver) nel pozzo (Figura 57) è avvenuta il 2 marzo 2024. Le prime operazioni eseguite hanno riguardato la caratterizzazione del sistema pozzo – falda:

- Misura della distanza tra il Piano Campagna e il bocca tubo: 0.85 m dal piano campagna. Eseguita tramite un metro da carpenteria (Figura 55);
- Profondità pozzo: 5.2 m dal bocca tubo al fondo, misurata tramite un freatometro utilizzato come cordella metrica;
- Profondità falda: il 20 marzo 2024, la falda si trova a una profondità di 1.65 m dal bocca tubo, misurata tramite freatometro.

Una volta completate le misure, sono stati posizionati il Diver Baro e il TD-Diver. Il Diver Baro è stato fissato, tramite una fune, alla grata che protegge e chiude il bocca tubo (Figura 56). Il TD-Diver è stato calato, sempre tramite una fune, all'interno del pozzo a una profondità di 4 m dalla bocca del pozzo. Questa profondità è stata scelta per evitare che il sensore rimanesse fuori all'acqua o venisse aspirato, dato che l'azienda agraria Università Politecnica delle Marche preleva acqua dal pozzo per i trattamenti delle colture arboree.

Entrambi i sensori, prima di essere posizionati, sono stati attivati tramite la loro basetta collegata al Mesa². Per il TD-Diver è stata impostata una frequenza di campionamento di 1 ora e l'avvio è stato programmato per il 21 marzo alle ore 11:00.



Figura 56 Posizionamento barometro



Figura 55 Misurazione altezza dal bocca tubo del pozzo al piano campagna



Figura 57 Posizione pozzo

Terza fase: prova infiltrometrica (esecuzione prova 17/05/2024) e installazione sensore nel reticolo secondario.

L'infiltrometro utilizzato è composto da una coppia di anelli concentrici in acciaio inossidabile. I due anelli hanno un'altezza di 25 cm e i diametri interni sono: 40 e 60 cm,

L'installazione dell'infiltrometro prevede varie fasi:

- 1) Scelta del luogo per la prova: è stato posizionato nell'area di studio tra il pozzo e i filari di vite, in una zona pianeggiante (Figura 64);
- 2) Eliminazione del cotico erboso e degli ostacoli: il cotico, essendo molto rigoglioso, avrebbe potuto creare problemi durante la prova. Gli ostacoli, come sassi e rametti, sono stati rimossi per facilitare l'ingresso del bordo tagliente nel terreno (Figura 59);
- 3) Installazione della coppia di anelli: l'installazione è avvenuta tramite l'utilizzo di una piastra in acciaio inossidabile posta sopra gli anelli e di un martello. Si è proceduto con il posizionamento prima dell'anello interno e poi dell'anello esterno e fatti penetrare nel terreno per circa 5 cm. Inseguito è stato posizionato il feltro (composto da residui di foglie, radici, culmi e parti vegetali di lenta decomposizione) e le piantine del tappeto erboso intorno al cerchio esterno per limitare ulteriormente la fuoriuscita dell'acqua (Figura 58);

- 4) Attivazione del Diver: il sensore, utilizzato per immagazzinare i dati e facilitare le operazioni di misura, è stato attivato tramite l'apposita basetta collegata al Mesa². Il qualche ci consentirà di scaricare i dati e di osservare una prima elaborazione. La registrazione del livello è stata impostata ogni due secondi (Figura 62);
- 5) Posizionamento del Diver: il sensore è stato collocato nell'anello centrale (con diametro più piccolo), attraverso un apposito sostegno in acciaio inossidabile, in grado di mantenere il sensore nella giusta posizione durante tutto l'arco della prova (Figura 61);
- 6) Inizio test infiltrometrico: il test è iniziato inserendo acqua all'interno della coppia di anelli, facendo attenzione a mantenere il pelo dell'acqua tra l'anello interno ed esterno sullo stesso livello. La prova ha avuto inizio alle ore 11:00 (Figura 60);
- 7) Ripetizione dell'operazione di riempimento: dopo un certo periodo di tempo, non definibile a priori, ma relativo al valore del tasso di infiltrazione presente nel punto esaminato, è stato necessario ripetere l'operazione di riempimento, pareggiando nuovamente i livelli. Nel caso specifico, è stato necessario ri-riempire una sola volta.
- 8) Termine prova: la prova è stata considerata terminata alle ore 11:30, con un totale di 45 litri di acqua inseriti (Figura 63).



Figura 59 Eliminazione cotico erboso



Figura 58 Installazione coppia di anelli



Figura 62 Attivazione del Diver



Figura 61 Posizionamento del Diver



Figura 60 Inizio prova infiltrometrica



Figura 63 Termine prova infiltrometrica



Figura 64 Ubicazione della prova infiltrometrica

L'installazione del sensore (TD-Diver) nel reticolo secondario è avvenuta il 17 maggio 2024. La scelta del luogo ha previsto il posizionamento del sensore all'interno di un tratto del reticolo secondario che raccoglie l'acqua proveniente dal campo prove dell'azienda agraria (Figura 68).

Per il posizionamento del sensore si è proceduto con la costruzione di una micro-cascata tramite l'utilizzo di un pozzetto (40x40 cm) in cemento.

Il pozzetto presenta su un lato un tubo in acciaio, fissato tramite delle staffe, dadi e bulloni, all'interno del quale verrà introdotto il sensore protetto da un altro tubo, di dimensioni inferiori.

Per posizionare il pozzetto a filo con il fondo del fosso si è proceduto con lo scavo di una buca di dimensione adeguate.

Lo scavo è avvenuto tramite l'utilizzo di strumenti manuali, e poiché il terreno non era tenace, le operazioni si sono semplificate.

Una volta posizionato il pozzetto (Figura 65), gli spazi tra il pozzetto e il terreno sono stati riempiti con la terra.

Utilizzando delle pietre, dei calcinacci e dei picchetti è stato creato un imbuto per garantire che tutta l'acqua finisse all'interno del pozzetto e venisse registrata dal sensore (Figura 67).

Il sensore (Figura 66), prima di essere messo in posizione, è stato attivato tramite la basetta collegata al Mesa².



Figura 66 Sensore e tubo di protezione



Figura 65 Pozzetto in posizione



Figura 67 Paratie effetto imbuto



Figura 68 Sensore reticolo secondario

Quarta fase: installazione sensore nel reticolo principale alla sezione di chiusura del bacino indagato (Figura 71).

L'installazione del sensore (CTD-Diver) presso il reticolo principale è avvenuta il 16 luglio 2024. Il sensore è stato posizionato al di sotto di un ponte che attraversa il reticolo, il quale raccoglie tutte le acque del sottobacino in cui è situata l'azienda agraria.

Per il posizionamento del sensore, si è proceduto con lo scavo di una trincea per assicurare che il sensore sia allo stesso livello del fondo del reticolo (Figura 69). L'apertura della trincea è avvenuta tramite utensili manuali e di un trapano a percussione per facilitare le operazioni di scavo, rese difficoltose dalla tenacia del terreno.

Il sensore è stato fissato al ponte utilizzando un tubo e delle staffe in metallo, per impedire il suo movimento (Figura 70). Prima di essere messo in posizione, il sensore è stato attivato tramite la basetta collegata al Mesa².

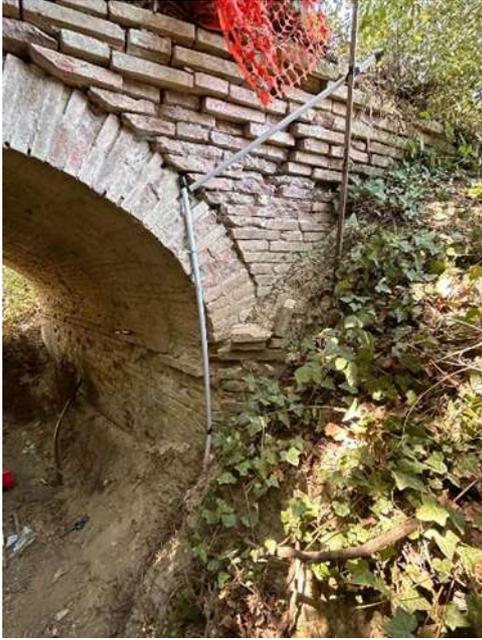


Figura 70 Intervento terminato



Figura 69 Sensore in posizione



Figura 71 Sensore reticolo principale

3.3 Rilievo in sito e scaricamento dati

La raccolta dati è stata effettuata il 24 settembre 2024. L'area in cui erano posizionati i sensori è stata interessata da un evento di pioggia intenso il 18 e 20 settembre. All'arrivo, l'area si presentava con acqua presente in tutti i fossi (Figura 73), eventi franosi su piccole scarpate (Figura 72), trasporto e accumulo di sedimenti su culture orticole (Figura 75) che risultano completamente sommerse e materiale detritico, fango e materiale legnoso accumulato su pali (Figura 76) e recinzioni (Figura 74).



Figura 72 Instabilità gravitativa



Figura 73 Acqua nel reticolo secondario



Figura 76 Accumulo di sedimenti su pali



Figura 75 Accumulo di sedimenti su orticole



Figura 74 Accumulo di sedimenti

Il primo sensore scaricato era posizionato all'interno del pozzo, e l'operazione è stata eseguita utilizzando il dispositivo Mesa² e l'apposita bassetta.

Il sensore è stato dismesso in previsione dell'imminente avvio dei lavori di ristrutturazione dell'abitazione. La ditta incaricata dei lavori necessitava di utilizzare il pozzo per il prelievo di acqua e, al fine di evitare il rischio di danneggiamento e perdita del sensore, questo è stato rimosso.

Il Baro, anch'esso collocato all'interno del pozzo, è stato rimosso per la stessa motivazione e successivamente riposizionato sulla stazione Sentek situata nelle immediate vicinanze.

L'altezza della falda è stata misurata mediante l'utilizzo del freatimetro, registrando un valore di 2,1 metri dalla grata alle 10:35 del 24 settembre 2024.

Il sensore successivo era quello posizionato nel reticolo secondario (Figura 77). L'operazione ha presentato maggiori difficoltà a causa dell'evento di pioggia straordinario dei giorni precedenti. Era installato all'interno di una struttura costituita da un pozzetto in cemento e dei tubi in acciaio, progettata per raccogliere l'acqua che scorreva nel reticolo, permettendo così la misurazione da parte del sensore. Tuttavia, a causa dell'intensa pioggia che ha interessato l'area, l'intera stazione è stata sommersa da quasi 30 cm di fango (Figura 78) proveniente dall'appezzamento sovrastante.



Figura 77 Materiale accumulato sul segnalatore utilizzato per identificare la posizione del sensore



Figura 78 Tubo che contiene il sensore

Per eseguire l'estrazione del sensore dal tubo di protezione, è stato necessario rimuovere parte del fango che ricopriva la stazione, al fine di accedere alla vite che collegava il tubo di protezione del sensore al tubo fissato al pozzetto di cemento (Figura 79).



Figura 79 Scavo per liberare il sensore

Il sensore posizionato nel reticolo principale ha causato le maggiori problematiche. La struttura predisposta per mantenere il sensore in posizione e facilitare lo scaricamento dei dati è stata completamente distrutta dalla forza dell'acqua e dal materiale detritico trasportato (Figura 80).



Figura 80 Struttura distrutta

Prima di procedere con il recupero dei dati, è stato necessario localizzare il tubo di plastica che proteggeva il sensore e il cavo per lo scaricamento. Il tubo in plastica, originariamente tagliato e modellato per aderire bene al ponte, era suddiviso in tre sezioni di lunghezza differente. La parte centrale, fissata al ponte tramite una placca in metallo, è rimasta ancorata, mentre le altre due sezioni sono state trascinate distanti dal sensore.

La sezione superiore del tubo (Figura 81), contenente la porta per lo scarico dei dati, è stata rinvenuta oltre il ponte, sulla destra idrografica, tra materiali legnosi di varie dimensioni e rifiuti elettrici.



Figura 81 Sezione superiore

La sezione terminale del tubo (Figura 82), che conteneva il sensore, è stata ritrovata più a valle, all'interno di un meandro sinistrorso, anche essa collocata tra detriti legnosi e rifiuti edili.



Figura 82 Sezione terminale

Una volta recuperati entrambi i sensori, questi sono stati trasportati nel vano bagagli del veicolo, dove sono stati rimossi dalle protezioni e sottoposti a pulizia. Tale operazione si è resa necessaria per garantire una corretta connessione tra i sensori e la basetta del dispositivo Mesa² (Figura 83).



Figura 83 Scaricamento dati con il Mesa2

3.4 Ricognizione danni post evento

Il giorno 28 ottobre 2024 è stato eseguito un ultimo rilievo presso l'Azienda Agraria, al fine di valutare e mappare gli effetti causati dall'evento eccezionale di settembre. I danni presenti non sono circoscritti ma diffusi sull'intero bacino. I seguenti danni saranno analizzati in base alla suddivisione territoriale determinata dalla strada e dal reticolo principale che attraversano il bacino, tale divisione permetterà un'analisi dettagliata e differenziata dell'impatto nelle varie aree.

Il tratto di strada iniziale, posto alla destra idrografica, che va dalla sezione di chiusura del bacino all'infrastruttura in fase di ristrutturazione, è fiancheggiato da due appezzamenti suddivisi in sotto appezzamenti, ciascuno caratterizzato da modalità di gestione diverse, con conseguenti effetti distinti dell'alluvione. L'area posta a sinistra della sezione di chiusura è organizzata in sotto appezzamenti separati da fossi per l'allontanamento delle acque. Il primo fosso (Figura 84 A) presenta acqua ma non ha subito ampliamenti per effetto dell'erosione e non è stato oggetto di interventi di ripristino. Il secondo fosso (Figura 84 B), invece, ha subito un ampliamento nel tratto finale a causa dell'erosione e presenta sedimenti e acqua al suo interno. Il terzo fosso (Figura 84 C) mostra caratteristiche analoghe a quelle del fosso precedente, ma con una caratteristica curvatura nel tratto finale. Nel quarto fosso (Figura 86 A), l'Azienda Agraria ha eseguito la rimozione di materiale sedimentario nel tratto finale, con accumulo dello stesso a sinistra del fosso. Analogamente, i fossi cinque (Figura 86 B) e sei (Figura 86 C) sono stati ampliati nel tratto finale tramite escavazione di materiale, con accumulato dei sedimenti a sinistra del fosso stesso. In contrasto, il fosso sette (Figura 87 A) non è stato ripulito né ampliato, e presenta vegetazione spontanea al suo interno.



Figura 84 Vista d'insieme dei primi tre fossi che si incontrano

I fossi, in quest'area evidenziano un accumulo di materiale nel tratto finale, a partire da metà campo in poi, dove si verifica una riduzione della pendenza.

Il fosso che delimita l'appezzamento e raccoglie le acque provenienti dai fossi precedentemente descritti presenta sezioni in cui il materiale è stato rimosso meccanicamente, mentre altre risultano ancora intatte.



Figura 86 Vista d'insieme dei secondi tre fossi che si incontrano



Figura 87 Vista dell'ultimo fosso e di sedimenti scavati

L'area posta a destra è suddivisa in due appezzamenti; il primo, situato immediatamente dopo il cancello, è di proprietà privata ed è destinato alla produzione di ortaggi stagionali e all'allevamento di animali da cortile. In questa zona si osserva un considerevole accumulo di sedimenti limosi e di materiale legnoso disperso, trasportato dall'acqua (Figura 88). Alcuni ricoveri per gli animali presenti risultano danneggiati, mentre altri sono completamente distrutti causando la possibile morte di diversi animali o la loro fuga facilitata dall'apertura delle strutture. È presente inoltre una rimessa agricola, all'interno della quale uno spesso strato di sedimenti ha compromesso la salubrità delle derrate alimentari e dei mangimi per gli animali. Elettrodomestici e attrezzature manuali per la gestione dell'orto risultano anche essi danneggiati.



Figura 88 Accumulo di sedimenti e ristagno di acqua

Il secondo tratto, che si estende dalla rimessa all'infrastruttura in ristrutturazione, ospita un frutteto misto, interamente ricoperto da uno spesso strato di sedimenti. Quest'area è costeggiata da un tratto del reticolo secondario che, nella prima sezione (Figura 89), presenta acqua stagnante e vegetazione spontanea al suo interno. Nella seconda sezione il reticolo è stato ampliato (Figura 90), per facilitare il deflusso delle acque nel reticolo principale, e ora ha una larghezza di circa 1 metro e una profondità stimata di 30 cm.

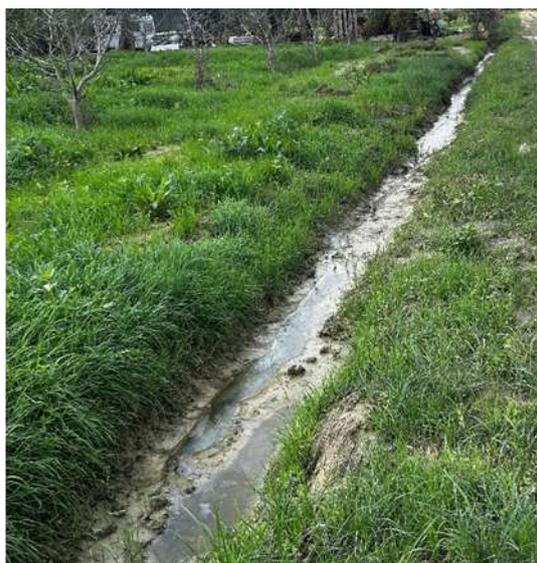


Figura 89 Prima sezione del reticolo



Figura 90 Seconda sezione de reticolo

La strada situata a monte del primo appezzamento descritto, che successivamente si ricongiunge alla strada principale attraversante l'intero bacino, è affiancata sul lato sinistro (alla destra idrografica) da un fosso che raccoglie le acque provenienti dall'area sovrastante. Queste vengono poi convogliate tramite condotte cilindriche in cemento e scaricate nei reticoli del primo appezzamento.

Lungo questo tratto stradale sono stati individuati tre punti critici in cui si sono concentrati i danni maggiori causati dall'alluvione.

Il primo punto (Figura 91 A) evidenzia gli effetti di un'instabilità gravitativa, che causa l'occlusione parziale del tubo durante l'evento alluvionale. L'occlusione ha causato il ristagno di acqua che ha saturato il terreno al piede, portando al movimento della sezione sovrastante.

Il secondo punto (Figura 91 B e C), presenta una rottura parziale del tubo, con conseguente crollo del tratto stradale sovrastante. Il frammento del tubo e la zolla di terreno hanno provocato l'occlusione quasi totale della sezione, che ha causato il ruscellamento dell'acqua sopra la strada contribuendo alla sua erosione.

Il terzo punto (Figura 91 D), mostra un forte accumulo di terreno che ha occluso il tubo, impedendo il passaggio dell'acqua, la quale è stata deviata sopra la strada ed è confluita in un fosso che delimita i campi sottostanti, causandone l'erosione nel tratto iniziale.



Figura 91 Danni causati dall'evento alluvionale

Il tratto di strada che conduce verso la motopompa è affiancato, sul lato sinistro, dalla prosecuzione del fosso precedentemente descritto, il quale risulta occluso da sedimenti nel tratto finale, causando ristagno d'acqua.

Sul lato destro si trovano appezzamenti separati da fossi che confluiscono nel reticolo principale. Anche in quest'area gli appezzamenti presentano modalità di gestione differenti.

Il primo fosso (Figura 92 A) presenta ampliamenti in tutta la sua lunghezza causati dal passaggio dell'acqua; al suo interno si osserva acqua stagnante in alcuni punti, ma è assente la vegetazione spontanea.

Il secondo fosso (Figura 92 B) è occluso da sedimenti nel primo tratto; invece, nel tratto finale presenta un ampliamento. Presenta vegetazione spontanea al suo interno, il terreno è umido ma non si riscontra acqua stagnante.

Il terzo fosso (Figura 92 C) ha subito una forte erosione lungo tutta la sua lunghezza, con conseguente approfondimento e ampliamento. Presenta acqua corrente ma è privo di vegetazione spontanea.

Il quarto fosso (Figura 93 A) è eroso nel tratto iniziale, il che ha modificato il percorso da rettilineo a curvilineo. Nel tratto restante, l'erosione delle sponde è presente ma in modo più circoscritto.

Il quinto fosso (Figura 93 B) risulta colmo di sedimenti nel tratto iniziale, rendendo difficile individuarlo a una prima osservazione. Nel tratto finale, invece, l'assenza di accumuli e l'erosione spondale hanno causato un ampliamento.

Il sesto fosso (Figura 93 C) presenta una significativa erosione spondale nel primo tratto, con la formazione di una curva. Nel tratto successivo, l'erosione ha generato ampliamenti non uniformi.

I fossi settimo (Figura 94 A), ottavo (Figura 94 B) e nono (Figura 94 C) presentano caratteristiche simili al quinto, con presenza di vegetazione spontanea lungo tutta la loro lunghezza.



Figura 92 Vista d'insieme dei primi tre fossi che si incontrano



Figura 93 Vista d'insieme dei secondi tre fossi che si incontrano



Figura 94 Vista d'insieme degli ultimi tre fossi che si incontrano

Il tratto di strada che va dall'attraversamento del reticolo principale (posizione attuale motopompa) al punto più in alto del bacino è costeggiato su entrambi i lati da campi, gestiti in modo differente. L'area può essere suddivisa in tre sezioni distinte per pendenza e impatti causati dall'inondazione.

Nel tratto più vicino al reticolo principale, caratterizzato da una pendenza ridotta, si osservano alcuni effetti dell'alluvione, come ristagno di acqua e accumulo di sedimenti (Figura 95 B). Nell'area a destra della strada è visibile il limite raggiunto dall'acqua, segnalato dalla presenza di limo e dalla vegetazione (sia spontanea sia coltivata) sono prostrate a terra. Una differenza tra gli appezzamenti è la presenza di una fascia di rispetto, presente in alcuni e assente in altri.

Nell'area di sinistra (Figura 96 C e D) si riscontra un accumulo di sedimenti maggiore rispetto all'area di destra, da attribuire alla mancanza di colture in crescita, che avrebbero potuto limitare la forza di impatto delle gocce e migliorato l'infiltrazione.

La fascia con pendenza intermedia mostra sia fenomeni di sedimentazione e ristagno, sia erosione del terreno (Figura 96 E), con intensità variabile a seconda delle aree (Figura 96 F).

Nei fossi che delimitano gli appezzamenti sono riscontrabili fenomeni erosivi di maggiore intensità (Figura 95 D), mentre i fossi o scoline interni ai campi presentano un'erosione ridotta e una sedimentazione accentuata.

In alcuni appezzamenti, dove il terreno è stato lavorato più finemente, si nota la formazione di ruscelli che seguono la linea di massima pendenza. Il fosso accanto all'area recintata e alla casa diroccata presenta fenomeni erosivi intensi (Figura 96 A), con tratti fortemente erosi sulle sponde e sul fondo (Figura 96 B), che hanno portato alla formazione di bacini di forma ellittica. In questa fascia è presente il lago, il quale presenta due aree con sedimentazione e ristagno di acqua: una a sinistra con accumulo di terra e una a destra, di forma circolare (Figura 95 C) con ristagno di acqua. Il troppopieno del lago, al momento del rilievo era in funzione e consentiva il corretto allontanamento delle acque; tuttavia, sulla strada sterrata sono visibili ruscelli e solchi probabilmente dovuti al deflusso eccedente non gestito dal troppopieno.

Infine, la fascia più a monte presenta soltanto fenomeni di erosione, ma con un'intensità inferiore rispetto alla fascia centrale. Questa ridotta erosione può essere attribuita alla presenza di ulivi e dell'area industriale del comune di Agugliano.



Figura 95 Effetti evento alluvionale di settembre



Figura 96 Effetti evento alluvionale di settembre

Capitolo 4

ELABORAZIONE DATI E DISCUSSIONE

Nel presente capitolo sono presentati e analizzati i risultati delle indagini condotte attraverso gli strumenti installati nel campo prove, oltre ai dati scaricati dal Sistema Informativo Regionale Meteo-Idro-Pluviometrico (Figura 97)(Regione Marche - Servizio Protezione civile, 2024).

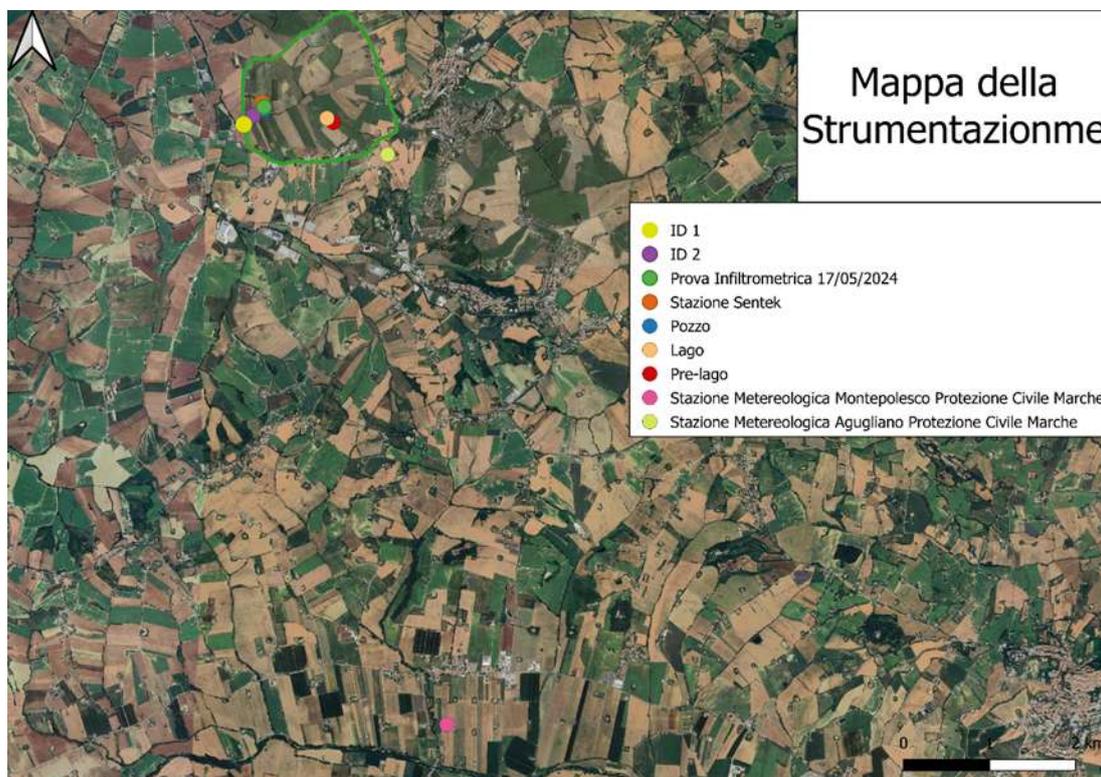


Figura 97 Mappa della Strumentazione

4.1 Analisi dei Dati scaricati dal Sistema Informativo Regionale Meteo-Idro-Pluviometrico

4.1.1 Precipitazioni 2004-2024

Il grafico presente nella Figura 98, relativo alle precipitazioni annue cumulate nel periodo 2004-2024, è stato realizzato a partire dai dati raccolti dalla stazione meteorologica N. 111, situata nel comune di Agugliano (AN), ad una quota di 170 m, con coordinate geografiche di 13°22' N e 43°32' E.

L'asse delle Y riporta i valori delle precipitazioni annuali, che variano da un minimo di 539.2 mm registrato nel 2009 a un massimo di 1030.4 mm nel 2006. L'asse delle X, invece, indica gli anni di riferimento compresi nell'intervallo considerato.

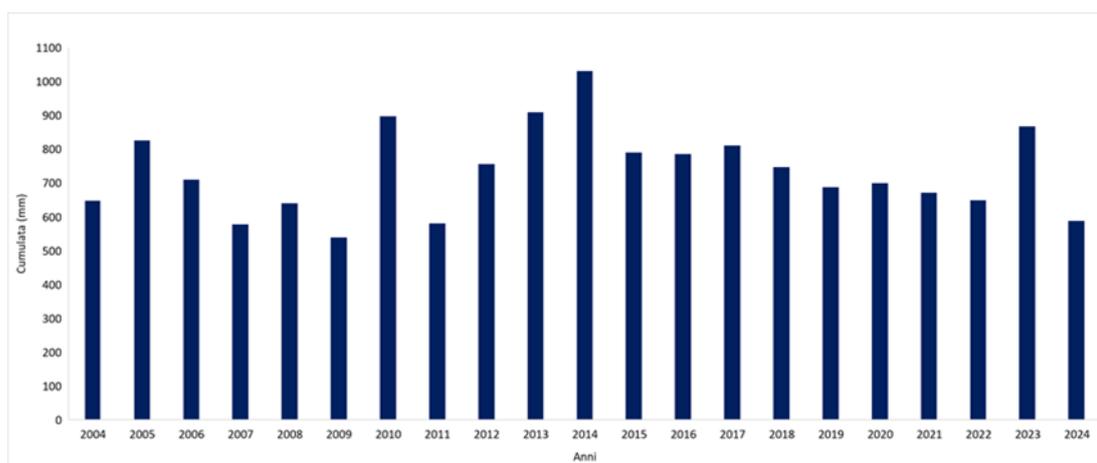


Figura 98 Precipitazioni annue cumulate nel periodo 2004-2024

L'analisi dei dati mette in evidenza una significativa variabilità delle precipitazioni annue nel periodo considerato. Si osserva un'alternanza di anni con precipitazioni abbondanti e anni con precipitazioni relativamente più scarse, segnalando una marcata instabilità nel regime pluviometrico nel lungo periodo, ma con una generale tendenza alla diminuzione delle precipitazioni totali.

Sono stati rilevati picchi di precipitazioni elevate in anni specifici, quali il 2005, 2010, 2014 e nel 2023, mentre altri anni, come il 2007, 2009, 2011, 2022 e il 2024, presentano valori sensibilmente inferiori.

Tale variabilità può essere legata a una molteplicità di fattori climatici e ambientali che influenzano le condizioni meteorologiche annuali nella zona in esame. Non emerge una tendenza chiara di aumento o diminuzione costante delle precipitazioni nel periodo considerato.

L'anno 2014 si distingue per l'elevata quantità di precipitazioni, con un valore cumulato di 1030.4 mm. Questo dato evidenzia che è stato un anno particolarmente piovoso rispetto agli altri anni considerati.

L'ultimo biennio, 2023-2024, si caratterizza per valori che si avvicinano ai minimi storici raggiunti nel 2009, indicando una nuova fase di siccità.

Tali osservazioni suggeriscono che le precipitazioni annue sono soggette a fluttuazioni naturali piuttosto che a un cambiamento lineare.

4.1.2 Temperatura 2008-2024

Il grafico presente nella Figura 99 illustra l'andamento delle temperature medie annuali, espresse in gradi Celsius (°C), nel periodo compreso tra il 2008 e il 2024. I dati utilizzati per il grafico sono stati raccolti dalla stazione metereologica n. 7 denominata "Montepolesco", situata ad una quota di 83.8 m e localizzata a 13°23' N, 43°28' E.

La stazione metereologica utilizzata differisce da quella impiegata per le precipitazioni, in quanto quest'ultima non registra le temperature.

Nella stessa area è presente anche la stazione metereologica "Ponte della Barchetta", ma non è stata utilizzata in questo studio a causa della limitata disponibilità di dati storici, che coprivano solo il periodo dal 23 maggio 2023 al 9 ottobre 2024.

Il grafico riporta sull'asse X gli anni, mentre sull'asse Y le temperature, che variano da -5°C a +35°C.

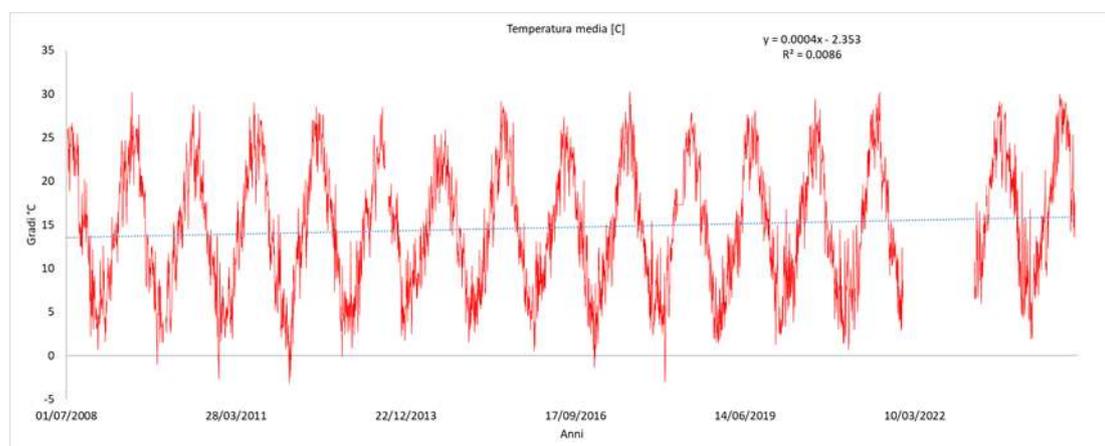


Figura 99 Andamento temperature medie annuali 2008-2014

Il trend generale ci mostra una tendenza generale di aumento delle temperature medie, visibile anche tramite l' R^2 , nel periodo considerato. Questo incremento può essere attribuito ai cambiamenti climatici. È possibile ipotizzare, che le temperature continueranno a salire.

Dall'analisi del grafico emerge una ciclicità stagionale ben definita, con picchi di temperatura che raggiungono i 30°C durante i mesi estivi, in particolare ad agosto, e minimi che scendono fino a -3°C nei mesi invernali, specialmente a febbraio. L'oscillazione regolare delle temperature è attribuita ai normali cambiamenti stagionali, con periodi più caldi nei mesi estivi e periodi più freddi nei mesi invernali.

I dati relativi all'anno 2022 sono stati esclusi dal grafico poiché, in quel periodo, il sensore non era correttamente calibrato, il risultato erano misurazioni di temperatura errate. Tale esclusione è stata necessaria per mantenere l'accuratezza dei dati analizzati.

Si possono riscontrare anche dell'anomalia, in alcuni anni sono presenti dei picchi di temperatura, massima e minima, che si discostano dalla media pluriennale. Questi picchi potrebbero essere il risultato di eventi climatici estremi, come ondate di calore o inverni particolarmente rigidi.

4.1.3 *Andamento temperature e precipitazioni 2024*

Il grafico rappresentato nella Figura 100 illustra l'andamento annuale delle precipitazioni cumulate e della temperatura media per l'anno 2024. Sull'asse delle Y a sinistra si trovano le precipitazioni cumulate, espresse in millimetri (mm), mentre sull'asse Y di destra sono presenti le temperature medie, espresse in gradi Celsius (°C). L'asse delle X copre l'intero anno 2024, con una risoluzione temporale che consente di osservare le variazioni giorno per giorno.

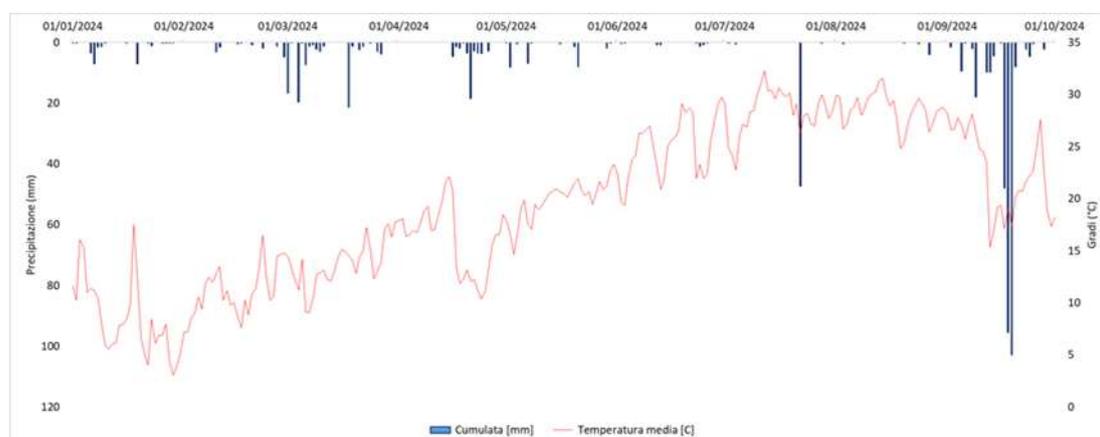


Figura 100 Andamento delle precipitazioni cumulate e delle temperature medie nel 2024

Le colonne blu, che rappresentano le precipitazioni cumulate, mostrano un andamento discontinuo, caratterizzato da picchi improvvisi seguiti da periodi di relativa stabilità o assenza di pioggia. All'inizio dell'anno, tra gennaio e marzo si osservano modesti eventi di precipitazione. Il periodo primaverile, da marzo a maggio, evidenzia più episodi di precipitazione, con un'intensità moderata ma distribuita nel tempo. Con l'ingresso dell'estate, tra giugno e agosto, si nota un cambiamento evidente nel regime delle precipitazioni: gli eventi piovosi diventano più rari e isolati. Tuttavia, nel mese di luglio si osserva un singolo evento piovoso di grande intensità, con un picco elevato delle precipitazioni cumulate. Dopo questo episodio, si registra un lungo periodo di siccità fino a settembre, quando si verifica un altro significativo evento con un picco oltre i 100 mm, che corrisponde all'evento piovoso di settembre, più prolungato rispetto a quello estivo.

La linea rossa, indica le temperature medie, mostra una chiara variazione stagionale. Nel primo trimestre dell'anno, le temperature rimangono relativamente basse, oscillando tra i 5°C e i 15°C, tipiche del periodo invernale. Con l'avvicinarsi della primavera, le temperature aumentano gradualmente, stabilizzandosi su valori compresi tra 15°C e 20°C nel periodo di aprile e maggio. Nel periodo estivo, tra giugno e agosto, le temperature raggiungono i valori massimi annuali, con oscillazioni costanti intorno ai 25-30°C. L'estate del 2024 appare particolarmente calda, come evidenziato dalla prolungata permanenza delle temperature a valori elevati, soprattutto nel mese di luglio e agosto. Con l'inizio dell'autunno, a partire da settembre, le temperature medie cominciano a scendere in modo progressivo, raggiungendo nuovamente valori inferiori ai 20°C. Questo abbassamento è associato all'arrivo delle prime piogge autunnali, con l'evento piovoso di settembre che coincide con una diminuzione marcata delle temperature. L'andamento decrescente delle temperature continua fino a ottobre, confermando l'inizio della stagione fredda.

Valutando in maniera congiunta la curva delle precipitazioni cumulate e delle temperature medie si possono identificare dei periodi critici per l'agricoltura e la gestione delle risorse idriche. Un'estate calda e secca comporta uno stress idrico per le colture quindi una riduzione della produzione sia a livello qualitativo che quantitativo.

4.1.4 *Analisi intensità della pioggia*

Il grafico rappresentato nella Figura 101 rappresenta la massima intensità delle precipitazioni, misurata in millimetri al minuto (mm/min), per i mesi di luglio, agosto e settembre 2024.

Il grafico evidenzia diversi picchi di intensità, i più significativi sono quelli di luglio con un'intensità di 3,16 mm/min e quello di settembre con un'intensità di 2,22 mm/min.

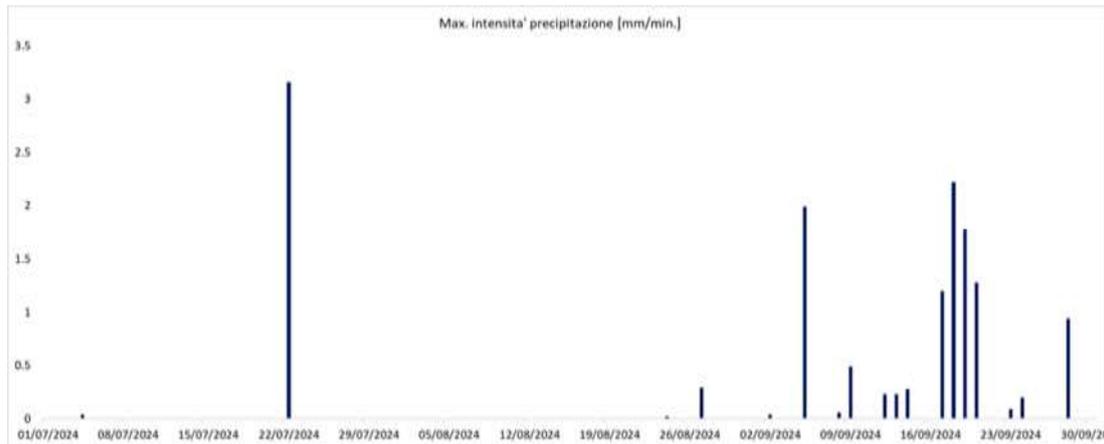


Figura 101 Massima intensità di precipitazioni di luglio e settembre 2024

Convertendo l'intensità di pioggia dei due eventi nei rispettivi valori standard utilizzati in meteorologia, ovvero millimetri per ora si ottengono i seguenti risultati:

- 3,16 mm/min corrisponde a 189,6 mm/ora
- 2,22 mm/min corrisponde a 133, 2 mm/ora

Questi valori si collocano ben al di sopra delle soglie tipiche degli eventi pluviometrici ordinari. In base a questi dati, entrambi gli eventi possono essere classificati come nubifragi, avendo un'intensità superiore a 30 mm/ora (Cosmari, 2021).

Eventi di questo tipo sono legati a temporali violenti, con la capacità di provocare inondazioni lampo, come avvenuto nella zona sud della Baraccola a settembre (Ansa, 2024), significativi deflussi superficiali e danni strutturali.

4.2 Analisi dei dati ottenuti tramite i sensori installati

4.2.1 Studio velocità di infiltrazione nel suolo dell'Azienda Agraria

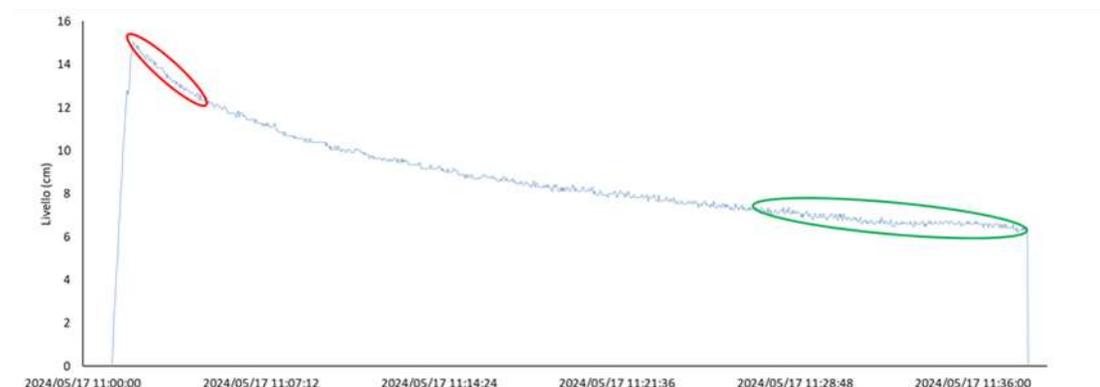


Figura 102 Grafico prova infiltrometrica

min	cm	delt cm	delta m	delta minuti	delta secondi	m/s	cm/s	
11:02:03	14.88	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
11:05:21	12.03	2.86	0.03	3.18	190.8	1.50E-04	1.50E-02	k max
11:27:01	7.35	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
11:38:11	6.43	0.93	0.01	11.09	665.4	1.39E-05	u	k min

Tabella 2 Tabella descrittiva dei risultati prova infiltrometrica

Il grafico presente nella Figura 102 rappresenta la velocità di infiltrazione dell'acqua nel suolo presso l'Azienda Agraria, con una durata complessiva della prova di circa 35 minuti, come evidenziato dal grafico.

Nella parte iniziale della curva, indicata dal cerchio rosso, si osserva una pendenza marcata, che riflette un'elevata velocità di infiltrazione iniziale. Questo comportamento è tipico delle fasi iniziali dell'infiltrazione, poiché i pori del suolo sono asciutti e in grado di accogliere rapidamente grandi quantità d'acqua. La prova è stata condotta il 17 maggio, in condizioni di suolo asciutto, con una velocità di infiltrazione iniziale pari a $1.50 \cdot 10^{-4}$ m/s (0.000150 m/s).

Con il progressivo saturarsi del suolo, la pendenza della curva si riduce, indicando una diminuzione della capacità del terreno di assorbire acqua. Nella parte finale della curva, evidenziata dal cerchio verde, la pendenza diventa quasi orizzontale, segnalando il raggiungimento della capacità massima di infiltrazione del terreno. In questo tratto finale, la velocità di infiltrazione si è ridotta significativamente, fino a un valore di $1.39 \cdot 10^{-5}$ m/s (0.0000139 m/s).

Per confermare i risultati ottenuti e affinare la determinazione della velocità massima e minima di infiltrazione, i dati sono stati analizzati successivamente in laboratorio utilizzando l'equazione di infiltrazione di Philip. Tale equazione descrive la relazione tra infiltrazione cumulativa (i) e tempo (t):

$$i(t) = S\sqrt{t} + At$$

Dove S è detto "Sorptivity", una misura della capacità del suolo di assorbire acqua per capillarità, e A è un parametro costante correlato alla conduttività idraulica del terreno in condizioni sature.

A partire dai dati sperimentali relativi a t e i, si possono determinare i valori di S e A (Tabella 2) tramite il metodo dei minimi quadrati. Tali parametri sono stati successivamente utilizzati per calcolare la velocità di infiltrazione in condizioni transitorie, impiegando una seconda equazione di Philip:

$$v(t) = \frac{0,5S}{\sqrt{t}} + A$$

Attraverso questa formula, è stata determinata la velocità massima d'infiltrazione, pari a $1.86 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.000186 m/s), un valore molto simile a quello ottenuto dal semplice rapporto $\Delta m / \Delta s$. Questo risultato è rappresentato nella Figura 103 che illustra la velocità di infiltrazione nel tratto iniziale della curva, prima che venga raggiunto il culmine.

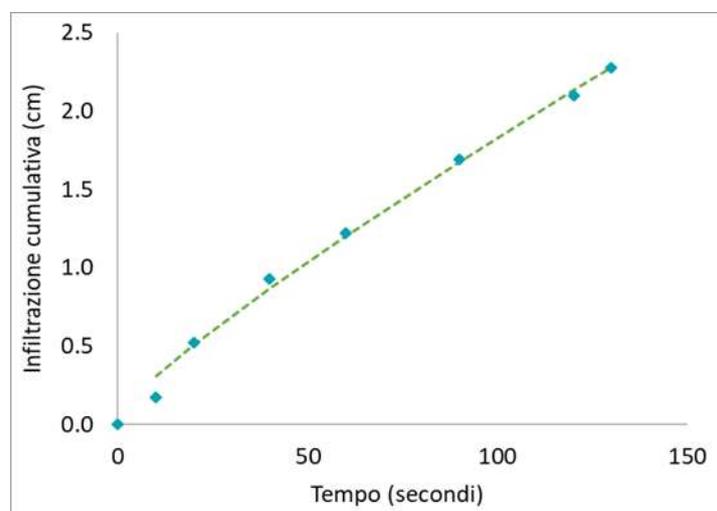


Figura 103 Velocità di infiltrazione massima

S	A	K (cm/s)	K (mm/hr)
0.0585	0.0124	0.0186355	670.9

Tabella 3 Tabella con S, A e velocità infiltrazione

D'altra parte, la velocità di infiltrazione calcolata con l'equazione di Philip nel tratto finale risulta pari a $4.98 \cdot 10^{-6}$ m/s (0.00000498 m/s), sensibilmente inferiore rispetto a quella derivata dal rapporto tra $\Delta m/\Delta s$, con una discrepanza di quasi un ordine di grandezza. Il grafico presente nella Figura 104 rappresenta la velocità di infiltrazione nella fase finale della curva.

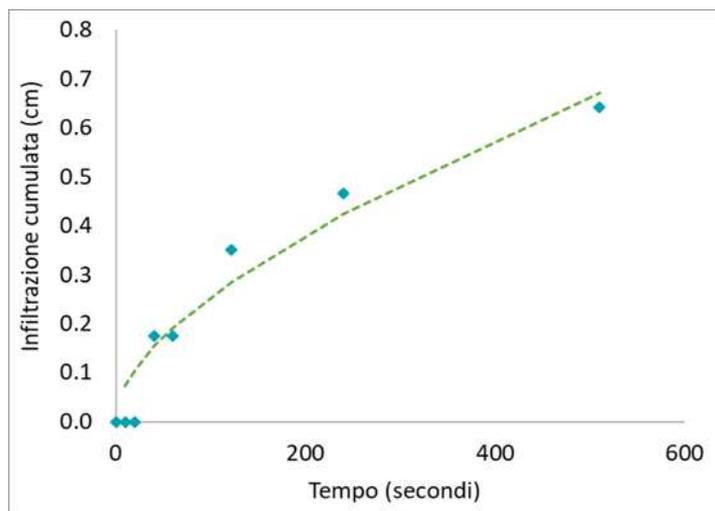


Figura 104 Velocità minima di infiltrazione

S	A	K (cm/s)	K (mm/hr)
0.0222	0.0003	0.0004989	18.0

Tabella 4 Tabella con S, A e velocità minima di infiltrazione

4.2.2 Studio eventi di luglio e settembre 2024

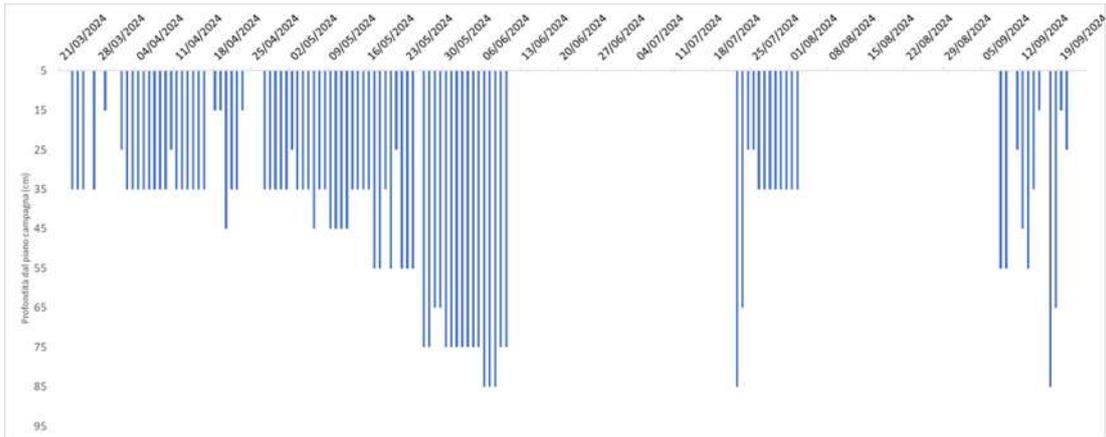


Figura 106 Profondità del fronte umido nei primi 95 cm del suolo

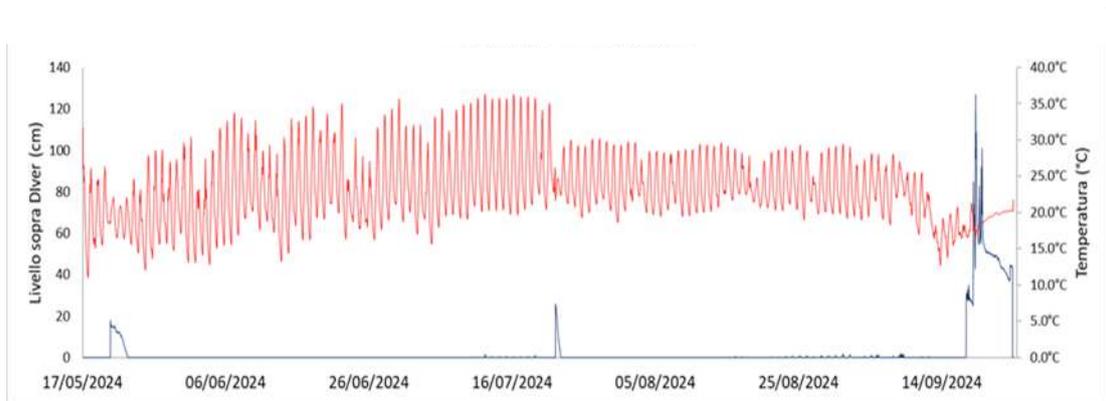


Figura 105 Livello idrometrico e temperature dell'acqua registrati dal Diver all'interno del reticolo secondario

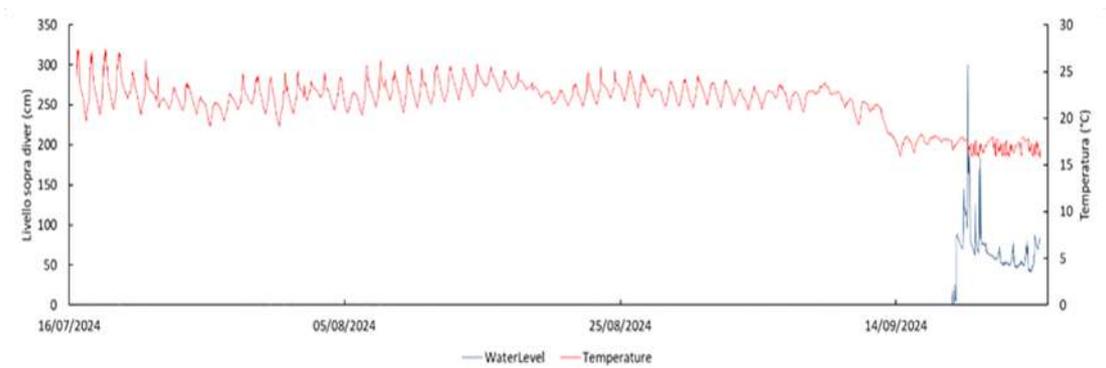


Figura 107 Livello idrometrico e temperature dell'acqua registrati dal Diver all'interno del reticolo principale

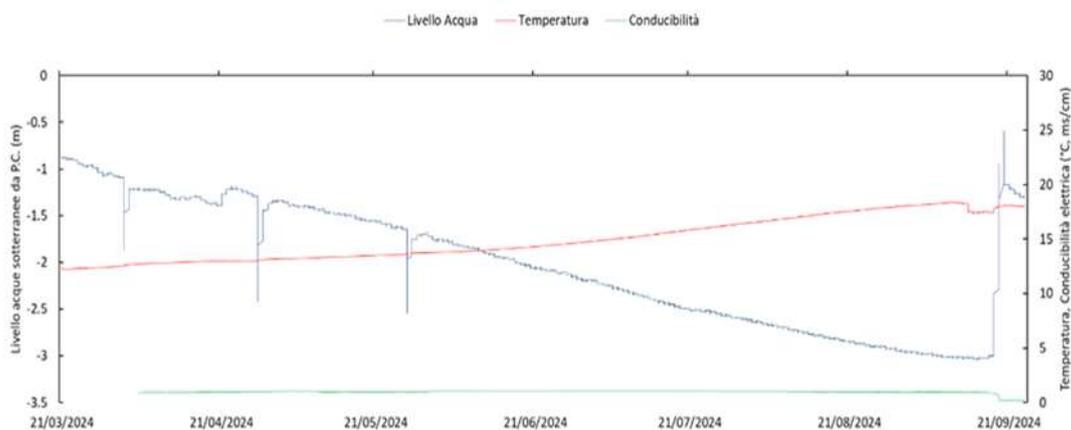


Figura 108 Soggiacenza dell'acqua di falda con temperatura e conducibilità elettrica delle acque sotterranee

L'analisi dei due eventi eccezionali, avvenuti a luglio e a settembre, può essere effettuata sovrapponendo i grafici relativi all'infiltrazione (Figura 106), al reticolo secondario (Figura 105), al reticolo primario (Figura 107) e al pozzo (Figura 108), confrontando l'intensità della pioggia con la capacità di infiltrazione del suolo.

Osservando il grafico della precipitazione cumulata (Figura 100), emerge che l'evento di luglio è stato preceduto da un prolungato periodo di siccità e da temperature elevate che oscillano tra il 20 e i 30 °C.

Tali condizioni hanno determinato una significativa perdita di umidità del suolo e la formazione di fessure, particolarmente evidenti su terreni argillosi come quello presente nell'area di studio. La scarsità di acqua, unita al passaggio frequente di mezzi agricoli, ha accentuato il compattamento del suolo, riducendo la porosità e, di conseguenza, la sua capacità di trattenere l'acqua.

Questi fattori hanno comportato una riduzione della capacità di infiltrazione, poiché i terreni, in condizioni di secchezza, tendono a diventare idrofobi, respingendo l'acqua e aumentando il rischio di deflusso superficiale (runoff), soprattutto in caso di piogge intense.

L'evento di luglio ha registrato un'intensità significativa, compresa tra 3 e 3,5 mm/min, con una precipitazione cumulata di 47 mm, caratteristica che lo qualifica come evento eccezionale rispetto a quelli avvenuti nello stesso anno, nei mesi invernali. Il grafico della profondità mostra che i sensori hanno rilevato acqua fino a una profondità di 85 cm. Tale profondità può essere correlata alla prima infiltrazione della pioggia attraverso le fessure nel terreno o alla percolazione dell'acqua una volta terminato l'evento.

Tuttavia, nei giorni successivi, l'acqua è stata rilevata solo fino a 35 cm di profondità, indicando che la maggior parte dell'acqua caduta è stata persa per deflusso superficiale o evaporazione, come confermato dal confronto tra le curve delle precipitazioni cumulate e della profondità. Durante la primavera, nonostante precipitazioni meno intense e quantitativamente inferiori, i sensori hanno registrato acqua a profondità maggiori per un periodo più lungo, a differenza di quanto avvenuto a luglio, dove l'acqua è stata registrata a profondità elevate solo per un breve periodo.

Per quanto riguarda i fossi, solo il reticolo secondario ha ricevuto acqua, con un livello registrato di 23 cm, mentre il fosso primario e il pozzo non hanno registrato significative variazioni, suggerendo una perdita d'acqua per deflusso superficiale o evaporazione senza un effettivo ricarico della falda.

L'evento di settembre presenta somiglianze con quello di luglio, poiché anch'esso è stato preceduto da un lungo periodo di siccità e temperature elevate. Tuttavia, a differenza di luglio, l'evento si è protratto per 3-4 giorni, dal 18 al 20 settembre, con un'intensità decrescente: 2,22 mm/min il 18 settembre, 1,78 mm/min il 19 e 1,28 mm/min il 20. La precipitazione cumulata è invece aumentata progressivamente, passando da 48 mm il 18 settembre, a 95 mm il 19, e a 102 mm il 20.

Una differenza sostanziale tra i due eventi è rappresentata dalla presenza di piogge antecedenti l'evento di settembre, di modesta intensità e cumulata, che hanno contribuito alla saturazione parziale del suolo.

Durante l'evento, il reticolo secondario ha raggiunto un livello di 126 cm, mentre il fosso primario registrava un livello di 297 cm. Inoltre, il livello dell'acqua nel pozzo è aumentato da -3,3 m, prima dell'evento, a -0,6 m dal piano campagna, dopo l'evento, evidenziando una significativa ricarica della falda, influenzata dalla scarsa ricarica estiva e dell'attività di prelievo idrico da parte dell'azienda agraria.

Un'ulteriore differenza osservabile riguarda la variazione delle temperature. Durante l'evento di luglio, le temperature hanno subito una lieve diminuzione temporanea per poi risalire, mentre nel mese di settembre si è verificato un abbassamento più marcato e prolungato, iniziato con le piogge antecedenti l'evento eccezionale. Questo comportamento può essere correlato all'abbassamento stagionale delle temperature al termine dell'estate.

L'intensità della pioggia di luglio, pari a 3,16 mm/min, corrisponde a $5,267 \cdot 10^{-5}$ m/s. e confrontando questo valore con la capacità di infiltrazione del suolo, con velocità massima di $1,86 \cdot 10^{-4}$ m/s e minima di $4,98 \cdot 10^{-6}$ m/s, si osserva che l'intensità iniziale della pioggia era inferiore alla capacità di infiltrazione, permettendo l'assorbimento senza ruscellamento

superficiale. Tuttavia, con il progressivo saturarsi del terreno, la capacità di infiltrazione è diminuita, causando un deflusso superficiale.

Anche l'evento di settembre, con un'intensità massima di $3,7 \cdot 10^{-5}$ m/s, ha inizialmente mostrato un'intensità inferiore alla velocità di infiltrazione, ma, come a luglio con il progressivo accumulo di pioggia, si è verificato ruscellamento.

La principale differenza tra i due eventi è la durata. L'evento di luglio si è concentrato in una sola giornata, mentre quello di settembre è stato preceduto da precipitazioni lievi e temperature più basse, che hanno ridotto l'evaporazione e favorito una saturazione parziale del suolo prima del picco di precipitazione. In sintesi, l'evento di luglio, caratterizzato da una maggiore intensità, potrebbe aver causato danni localizzati come erosione superficiale e ruscellamento rapido, sebbene non vi siano informazioni dirette o testimonianze che confermino tali danni. La durata limitata dell'evento non ha tuttavia sconsentito all'acqua di infiltrarsi in profondità, limitando la possibilità di danni più diffusi.

Al contrario, l'evento di settembre, con la sua durata prolungata, ha avuto un impatto maggiore sulle infrastrutture, come strade e campi agricoli, a causa dell'accumulo costante di acqua e della saturazione del terreno generando danni più estesi e persistenti.

4.2.3 *Variatione umidità del suolo durante gli eventi eccezionali*

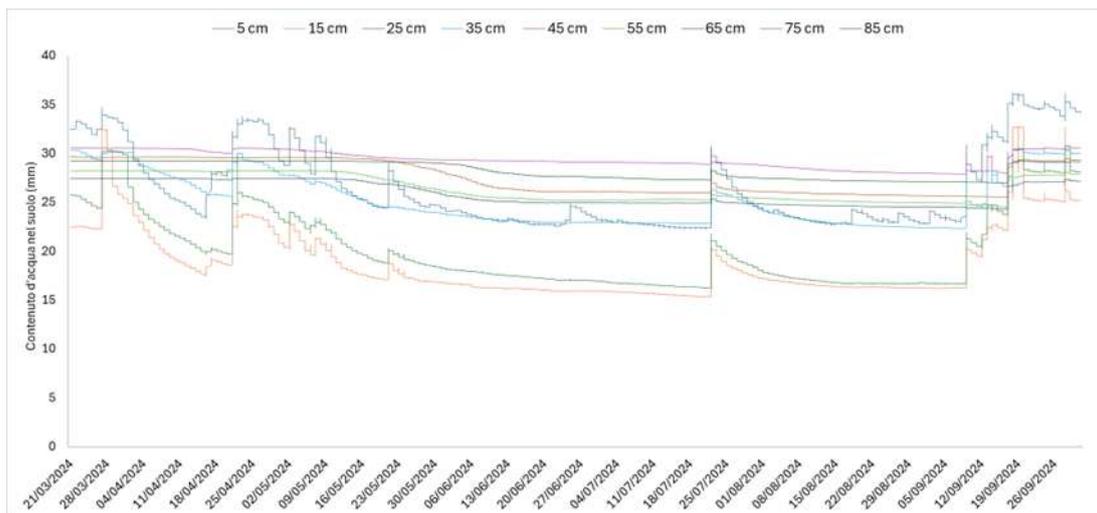


Figura 109 Umidità del suolo alle varie profondità

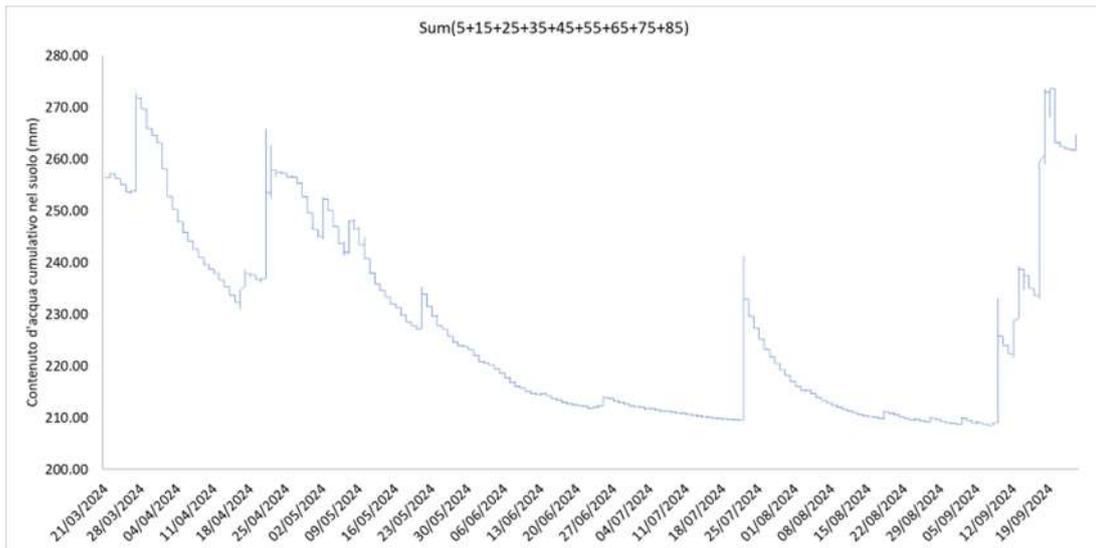


Figura 110 Cumulativo umidità alle varie profondità

Il grafico rappresentato nella (Figura 110) rappresenta l'andamento cumulativo dell'umidità presente nel suolo, misurata a differenti profondità. Esso evidenzia una diminuzione costante dell'umidità nel periodo primaverile ed estivo, compreso tra aprile e agosto. Sono presenti oscillazioni dovute a eventi piovosi, visibili sia nel periodo primaverile che durante l'estate e l'inizio dell'autunno.

Questi picchi temporanei indicano periodi di risalita dell'umidità, seguiti da una discesa graduale, tipica del comportamento del suolo durante le stagioni calde, quando l'evaporazione e la traspirazione delle piante superano la capacità del terreno di trattenere l'acqua.

Durante luglio, l'umidità cumulativa mostra un calo continuo, con un unico picco significativo associato all'evento del 22-23 luglio che il livello di umidità fino a 240.

Questo aumento è stato tuttavia di breve durata, e il grafico indica chiaramente che, in assenza di ulteriori eventi piovosi rilevanti, il terreno ha continuato a perdere umidità. L'assenza di altri picchi conferma che la perdita d'acqua durante il mese estivo è stata principalmente dovuta all'evaporazione intensa e alla traspirazione delle piante, fenomeni comuni durante i mesi più caldi.

A settembre, invece, si nota un comportamento diverso. Dopo aver raggiunto un minimo nei primi giorni del mese, l'umidità registra un aumento repentino tra il 18 e il 20 settembre, dovuto a un evento di pioggia significativo.

Successivamente, l'umidità scende gradualmente, ma senza tornare a livelli precedenti all'evento, suggerendo che il terreno ha trattenuto l'acqua per un periodo prolungato. Questo

fenomeno può essere attribuito a temperature più basse e a una minore evaporazione, tipica del passaggio all'autunno.

L'analisi del grafico presente in Figura 109, che mostra l'andamento dell'umidità alle varie profondità, conferma la volatilità maggiore degli strati superficiali 5 cm, dove l'umidità risponde rapidamente agli eventi atmosferici. La linea associata a questa profondità mostra picchi e discese marcate, indicando che il suolo superficiale è fortemente influenzato dalle piogge, ma anche che tende a perdere rapidamente l'acqua accumulata.

Alle profondità intermedie (15-45 cm), l'umidità è più stabile, con oscillazioni meno brusche rispetto alla superficie. Questi strati mostrano una maggiore capacità di trattenere l'acqua, sebbene siano anch'essi influenzati dagli eventi piovosi, con un ritardo temporale rispetto agli strati superiori.

Nelle profondità maggiori (55-85 cm), l'andamento dell'umidità è ancora più stabile, con variazioni molto lente, gli strati più profondi sono meno soggetti alle condizioni atmosferiche immediate, ma mostrano comunque gli effetti degli eventi di pioggia significativi, sebbene con ritardi più marcati rispetto agli strati superiori. L'umidità in queste profondità diminuisce più lentamente, suggerendo che il terreno trattiene l'acqua per un periodo prolungato dopo gli eventi piovosi.

Analizzando gli eventi di luglio e settembre, emergono alcune differenze principali:

- 1) Profondità di penetrazione: l'evento di luglio ha avuto un impatto principalmente sugli strati superficiali e intermedi, mentre gli strati più profondi sono stati meno influenzati. Al contrario, l'evento di settembre ha avuto un impatto significativo anche negli strati più profondi, mostrando un accumulo d'acqua più marcato a tutte le profondità;
- 2) Velocità di diminuzione dell'umidità: dopo l'evento di luglio, l'umidità è calata rapidamente, soprattutto negli strati superficiali a causa dell'evaporazione intensa tipica dei mesi estivi. Invece, l'evento di settembre ha mostrato un calo più graduale dell'umidità, grazie alle temperature più basse che hanno ridotto il tasso di evaporazione e favorito un'infiltrazione più duratura nel suolo;
- 3) Entità dell'aumento dell'umidità: in luglio, l'aumento dell'umidità è stato rapido e di breve durata, limitato agli strati più superficiali. In settembre, invece, l'aumento è stato più graduale e diffuso su più giorni, con un accumulo d'acqua più significativo anche negli strati profondi, confermando la maggiore durata delle piogge.

4.2.4 Variazione temperature del suolo

Il grafico presente in Figura 111 rappresenta la variazione della temperatura, espressa in gradi Celsius ($^{\circ}\text{C}$), a diverse profondità nel tempo. I sensori presenti nella sonda Sentek, sono posti uno ogni 10 cm, quindi uno a 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65,75 cm, consentendo un'analisi dettagliata delle variazioni termiche a diverse profondità. Le temperature registrate variano da circa 10°C a poco più di 45°C .

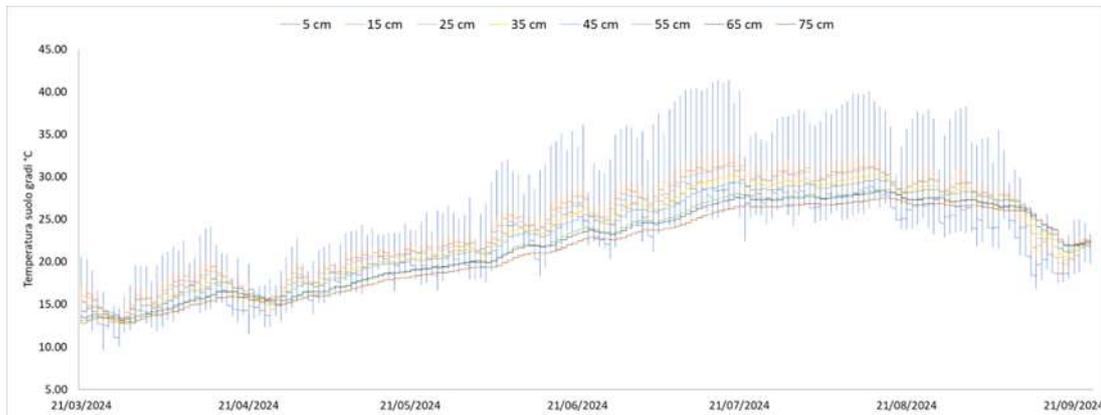


Figura 111 Variazioni temperature alle varie profondità

Da una prima analisi, le curve evidenziano fluttuazioni simili tra le diverse profondità, suggerendo una coerenza nelle tendenze termiche, nonostante le oscillazioni giornaliere.

Un aspetto rilevante è che l'ampiezza delle variazioni termiche diminuisce man mano che aumenta la profondità. Questo fenomeno può essere attribuito al gradiente geotermico, alla capacità termica del suolo e all'isolamento termico naturale della terra.

Le oscillazioni giornaliere della temperatura si attenuano con la profondità per via del gradiente geotermico, che comporta un aumento medio della temperatura terrestre di circa 3°C ogni 100 metri di profondità (Wikipedia L'enciclopedia libera, 2022).

Questo fenomeno crea un ambiente termicamente più stabile a profondità maggiori, riducendo l'influenza delle fluttuazioni superficiali.

Inoltre, il suolo e le rocce, grazie alla loro elevata capacità termica, assorbono e rilasciano calore lentamente, smorzando le variazioni giornaliere e rendendo le temperature più stabili nelle zone più profonde.

Gli strati superficiali del suolo agiscono anche come un isolante naturale, proteggendo gli strati più profondi dalle rapide variazioni di temperatura indotte dall'irraggiamento solare e dalle condizioni atmosferiche (Wikipedia L'enciclopedia libera, 2024).

4.3 Valutazione aree allagate

Tramite l'utilizzo del DTM è stato possibile eseguire una valutazione del livello raggiunto dall'acqua, impiegando i dati provenienti dai sensori installati nel reticolo principale e in quello secondario. Il DTM utilizzato ha una risoluzione di 0,5x0,5 m, ridotta rispetto alla versione originale, che presentava un grado di dettaglio elevato non necessario e rendeva l'elaborato troppo pesante per le capacità di elaborazione dei sistemi informatici disponibili.

Il DTM è stato ottenuto da tesi contemporanee al rilievo (28 ottobre 2024); realizzato tramite volo da drone dal gruppo di Geomatica dell'Università Politecnica delle Marche (Pierantoni, 2024).

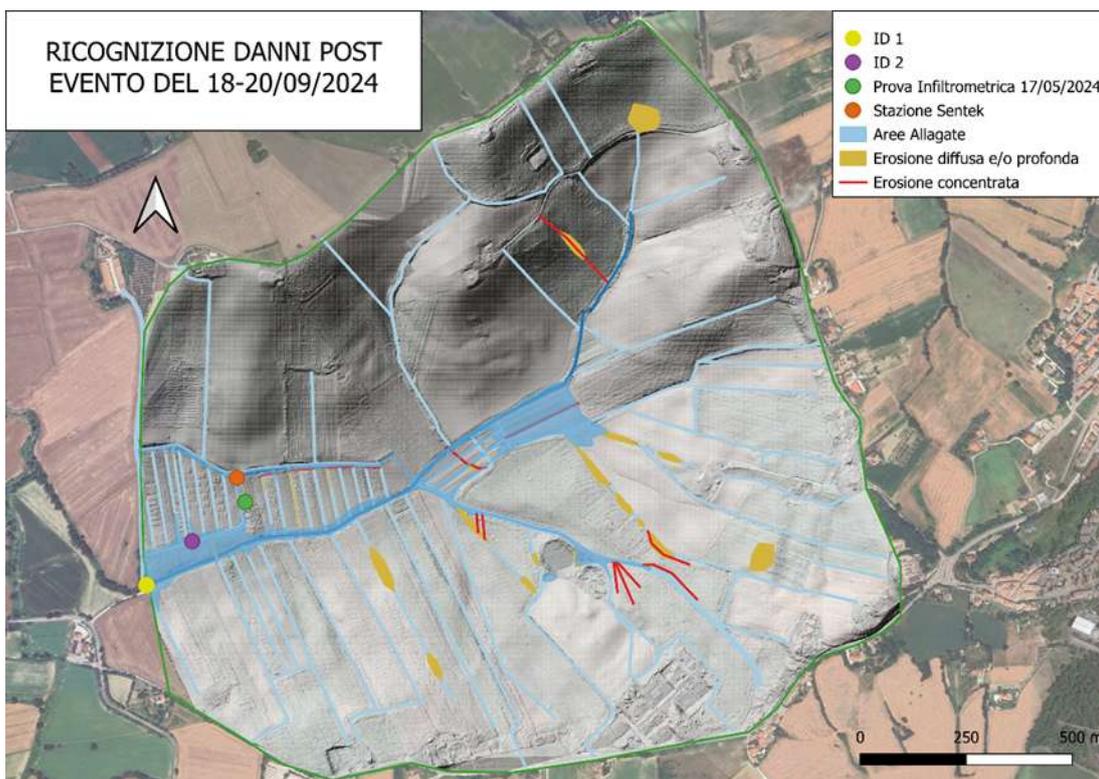


Figura 112 Ricognizione danni post evento del 18-20/09/2024

La mappa rappresenta (Figura 112) un'analisi dei danni conseguenti all'evento meteorologico del 18-20 settembre 2024. Nello specifico vengono rappresentate le aree allagate, i fenomeni di erosione del suolo, e la posizione di ognuno di essi.

Le aree soggette ad allagamento, identificate in azzurro, seguono il corso del reticolo principale fino al punto in cui si verifica un cambio di pendenza.

I fenomeni erosivi sono distinti in erosione diffusa e/o profonda, indicata in giallo, ed erosione concentrata, rappresentata tramite linee rosse. La prima si riferisce a fenomeni di erosione del suolo più estesi, osservabili in diverse aree della mappa, con una maggiore prevalenza nella sinistra idrografica. Mentre l'erosione concentrata, invece, evidenzia aree di deflusso concentrato in cui l'erosione è risultata più intensa e localizzata generando degli scavi profondi.

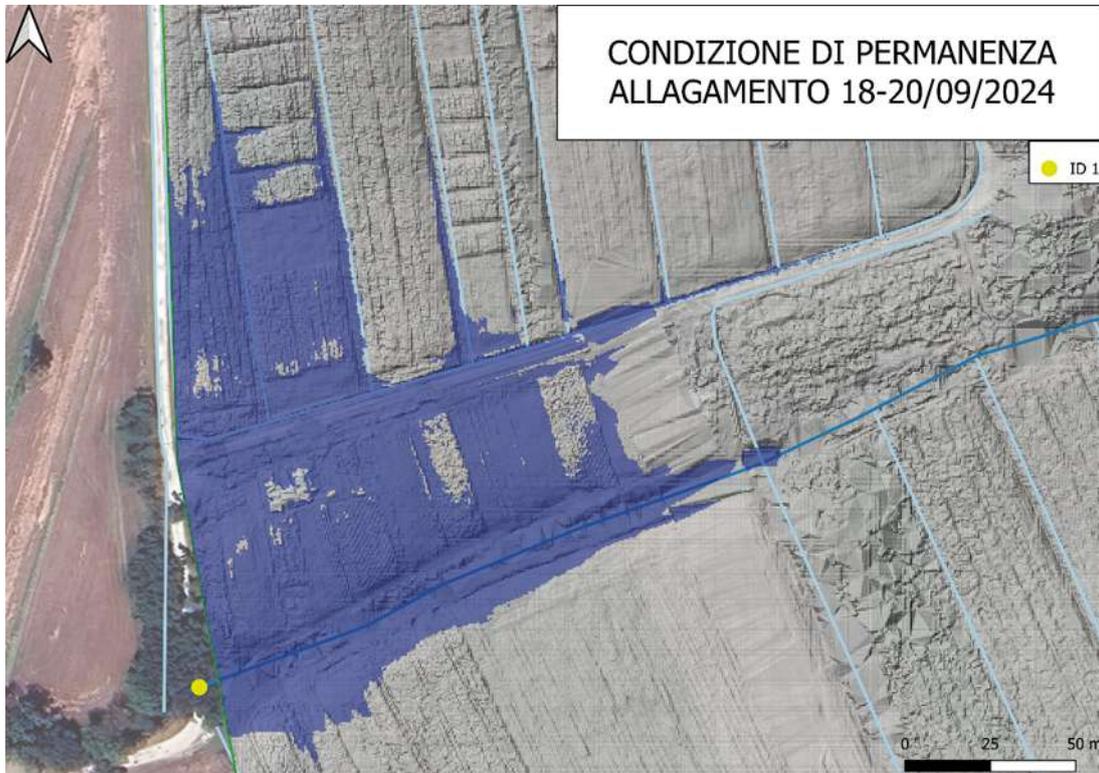


Figura 113 Condizione di permanenza allagamento 18-20/09/2024

La mappa (Figura 113) rappresenta le condizioni di permanenza dell'allagamento verificatosi dal 18 al 20 settembre 2024. In essa viene illustrata l'estensione dell'area allagata, evidenziata in blu scuro, basandosi sui dati del livello dell'acqua forniti dal sensore posto nel reticolo principale alla sezione di chiusura (ID1).

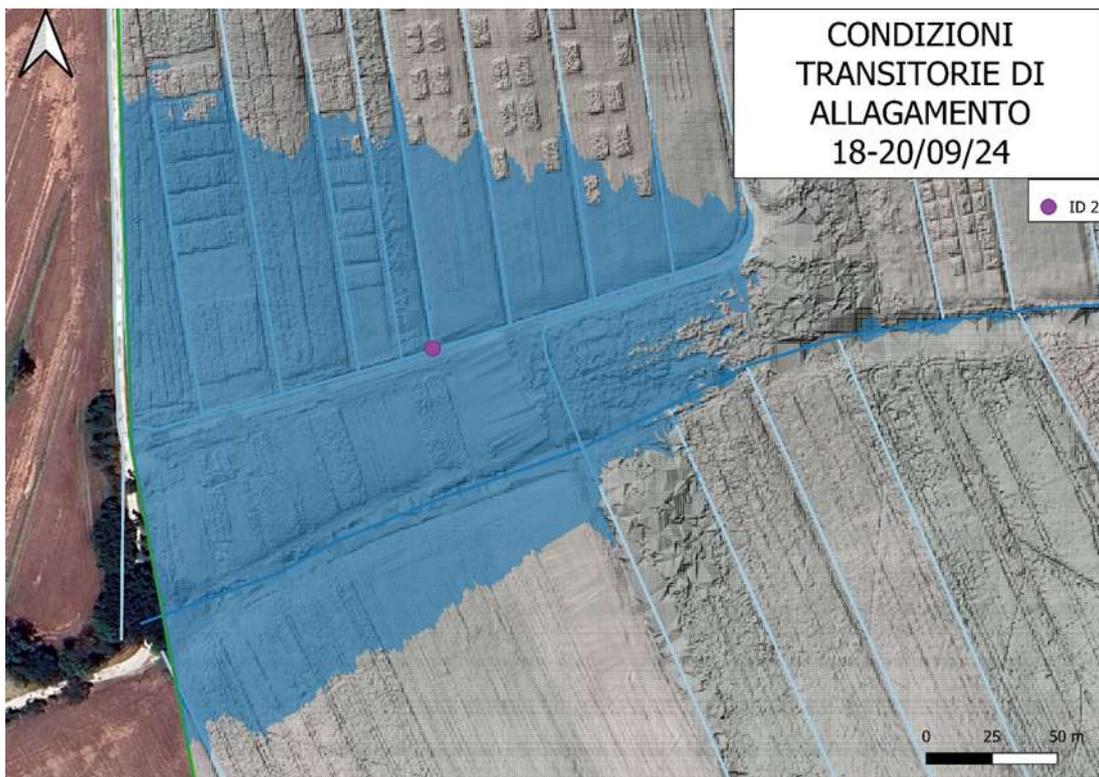


Figura 114 Condizioni transitorie di allagamento 18-20/09/24

La mappa (Figura 114) illustra le condizioni transitorie di allagamento avvenuto tra il 18 e il 20 settembre 2024. L'area allagata è evidenziata in blu chiaro, mostra l'estensione massima dell'area allagata basandosi sui dati forniti dal sensore posto nel reticolo secondario (ID2).

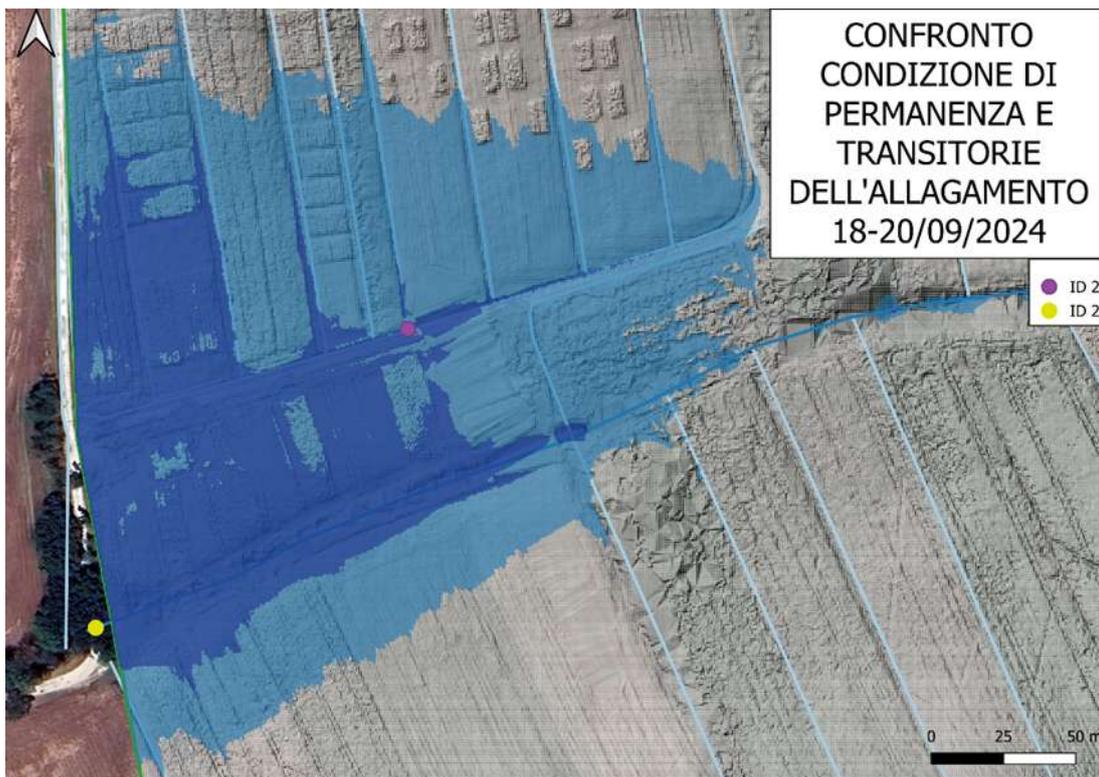


Figura 115 Confronto condizione di permanenza e transitorie dell'allagamento 18-20/09/2024

La mappa (Figura 115) illustra il confronto tra le condizioni di permanenza e transitorie dell'allagamento avvenuto tra il 18 e il 20 settembre 2024, sovrapponendo l'area allagata ricavata con i dati del reticolo principale (ID1) e quella derivata dai dati del reticolo secondario (ID2). Le aree in blu scuro rappresentano le parti del territorio dove l'allagamento è stato più persistente, indicando ristagni d'acqua duraturi, al contrario, le aree in blu chiaro evidenziano zone interessate da allagamenti di carattere transitorio, dove l'acqua si è ritirata più rapidamente.

Dalla sovrapposizione delle due aree emerge una differenza di superficie, attribuibile alla differenza di acqua registrata dai due sensori e alla loro posizione. Il reticolo principale, grazie alla sezione più ampia, ha potuto allontanare un maggiore volume d'acqua, limitando l'esonazione. Invece il reticolo secondario, avendo una sezione notevolmente inferiore, e parzialmente ostruito da sedimenti trasportati, non è stato in grado di smaltire l'acqua in modo efficace, provocando un'inondazione dell'area circostante.

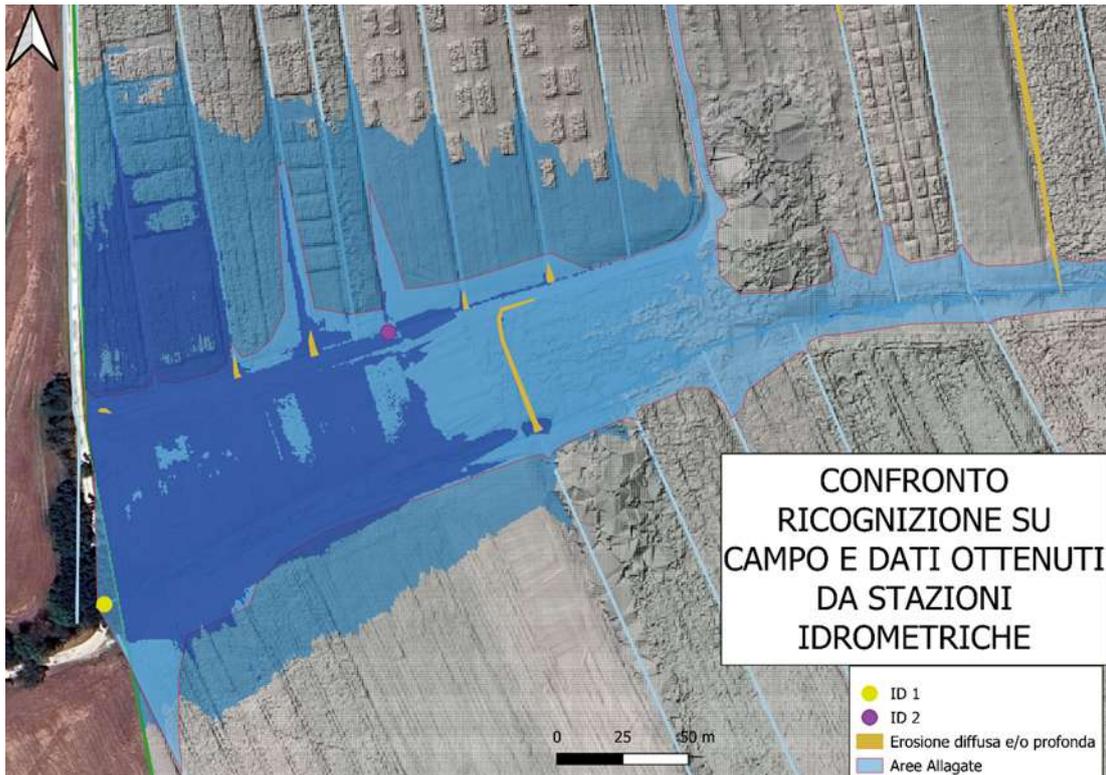


Figura 116 Confronto ricognizione su campo e dati ottenuti da stazioni idrometriche

La mappa (Figura 116) illustra il confronto tra le aree allagate rilevate durante la ricognizione del 28 ottobre e quelle ottenute dai dati dalle stazioni idrometriche. La sovrapposizione dei dati conferma che l'impiego di sensori consente una rappresentazione accurata delle aree allagate in seguito a un evento eccezionale, senza la necessità di un intervento diretto da parte di un operatore. L'intervento sul campo diventa così necessario solo per l'accertamento e la valutazione dei danni alle strutture.

Capitolo 5

CONCLUSIONI

A conclusione del lavoro di tesi si sintetizzano i principali risultati e le conclusioni raggiunte dallo studio, che si inserisce in un ambito di valutazione del rischio idrogeologico in un'area collinare caratterizzata da versanti di natura argillosa.

L'area di interesse è situata ad Agugliano (AN), all'interno di un sottobacino del fiume Esino, in cui si trova l'Azienda Agraria dell'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM). Questo bacino, con un'estensione di 229 ettari, include sia appezzamenti privati sia terreni appartenenti all'Azienda Agraria. L'inclusione dei terreni privati è stata finalizzata a garantire una visione complessiva del reticolo idrografico inferiore. Dal punto di vista geologico, l'area è caratterizzata dalla presenza delle Argille Azzurre e del Sintema del Musone, che fanno parte della successione stratigrafica Umbro-Marchigiana. La morfologia è tipicamente collinare e si articola in zone di versante e aree di fondo valle.

La ricerca è stata svolta in un contesto caratterizzato da un elevato rischio idrogeologico, causato dalla natura litologica delle formazioni affioranti e dalla presenza di fenomeni di instabilità del suolo, come frane per scorrimento in fase inattiva, frane per colamento, sia attive che inattive. La vulnerabilità del territorio è stata ulteriormente accentuata dalla mancata manutenzione del reticolo idrografico, che ha compromesso la capacità di mitigare gli effetti degli eventi estremi. Inoltre, in alcune aree prossime al reticolo principale, è stata rilevata l'assenza delle fasce di rispetto fluviale. Fino al presente studio, non erano stati condotti lavori specifici sulla valutazione dell'impatto di eventi estremi in quest'area agricola, particolarmente vulnerabile ad alluvionamenti e fenomeni di erosione.

L'obiettivo principale della ricerca è stato la caratterizzazione dell'evento alluvionale di settembre 2024, analizzandone gli effetti sul territorio e definendo le aree maggiormente vulnerabili. Per il raggiungimento di tale obiettivo, è stata condotta un'analisi basata sull'integrazione di diverse fonti di dati: meteorologici, sensori installati in loco e prove sperimentali. I dati meteorologici sono stati acquisiti tramite il Sistema Informativo Regionale Meteo-Idro-Pluviometrico, mentre i dati sperimentali sono stati raccolti tramite idrometri installati direttamente sul campo e tramite una prova infiltrometrica.

L'acqua, il suolo e la vegetazione costituiscono un sistema complesso che, in assenza di una gestione integrata, può determinare gravi fenomeni di instabilità quali frane, oltre a fenomeni alluvionali e di erosione del suolo. In questo contesto, la valutazione del rischio idrogeologico e la gestione corretta del territorio assumono un ruolo fondamentale per l'identificazione delle aree vulnerabili e l'adozione di misure preventive volte a ridurre i costi di riparazione, i danni economici e i rischi per la sicurezza di persone e animali.

L'analisi condotta ha evidenziato come gli eventi estremi rappresentino un fattore critico per l'equilibrio e le condizioni di stabilità del bacino idrografico. Nel caso specifico, le aree collinari, maggiormente predisposte ai processi erosivi sono risultate particolarmente vulnerabili, soprattutto in presenza di precipitazioni intense, presentando in alcune zone fenomeni gravitativi. L'analisi dettagliata del bacino ha permesso di identificare le aree a maggior rischio e di proporre soluzioni agricole sostenibili idonee per ridurre l'impatto di questi eventi.

Il processo di indagine è stato strutturato in fasi cronologiche, che comprendono innanzitutto rilievi conoscitivi del reticolo idrografico inferiore, seguiti da misure dirette in campo, come le prove infiltrometriche, ed il successivo posizionamento di sensori nelle aree di maggiore interesse e infine l'analisi dei dati raccolti.

Nella prima fase, sono stati eseguiti due rilievi del bacino per la mappatura del reticolo idrografico minore, sia primario che secondario, e del laghetto presente.

Nella fase successiva, sono stati installati sensori specifici: un sensore nel pozzo per monitorare la soggiacenza della falda e una stazione Sentek per la misurazione di umidità, temperatura e salinità del suolo a diverse profondità.

La terza fase ha previsto l'esecuzione di una prova infiltrometrica, mediante un infiltrometro a doppio anello, per determinare la velocità di infiltrazione dell'acqua nel suolo, parametro fondamentale per comprendere quando l'acqua inizia a defluire superficialmente. La posizione della prova è stata selezionata per garantire dati rappresentativi nell'area di maggiore interesse.

Successivamente, sono stati installati due idrometri per il monitoraggio dei livelli idrici nel reticolo idrografico, in particolare in due punti chiave: uno nel reticolo secondario, che raccoglie l'acqua proveniente dal campo prove dell'azienda agraria, e l'altro nel fosso in prossimità della sezione di chiusura del bacino.

Il recupero dei sensori e lo scaricamento dei dati, avvenuti il 24 settembre 2024, hanno presentato difficoltà a causa dell'evento eccezionale che ha danneggiato la struttura situata nel

reticolo primario e sommerso la stazione nel reticolo secondario. L'analisi dei dati successivamente scaricati ha confermato la vulnerabilità delle aree in cui i sensori erano posti.

L'analisi dei dati pluviometrici ha evidenziato che l'evento ha comportato una precipitazione cumulata superiore a 100 mm, con un'intensità massima di 2,22 mm/min (3.7×10^{-5} m/s). I risultati della prova infiltrometrica hanno mostrato che la capacità di infiltrazione iniziale del suolo era di 1.86×10^{-4} m/s, ma tale capacità è diminuita rapidamente con il passare del tempo, scendendo fino a 4.98×10^{-6} m/s. Questo ha provocato il ruscellamento superficiale, con il suolo incapace di assorbire ulteriori quantità d'acqua. Inoltre, la saturazione preesistente del suolo ha contribuito a ridurre ulteriormente la capacità di assorbimento, favorendo il deflusso superficiale.

Il monitoraggio dei livelli idrometrici nel reticolo e nella falda ha evidenziato un incremento significativo e molto rapido. Durante l'evento, il reticolo secondario ha raggiunto un livello di 126 cm, mentre il fosso primario registrava un livello di 297 cm. Inoltre, il livello dell'acqua sotterranea nel pozzo è aumentato da -3,3 m, prima dell'evento, a -0,6 m dal piano campagna, dopo l'evento, indicando una significativa ed improvvisa ricarica della falda, influenzata dalla scarsa ricarica estiva e dell'attività di prelievo idrico da parte dell'azienda agraria.

La risposta delle diverse componenti del sistema idrologico è stata molto varia. L'evento di pioggia eccezionale è iniziato il 17 settembre alle 11:45. Il reticolo idrografico secondario ha iniziato a reagire dopo quasi 10 ore, con il livello dell'acqua che è salito a 28 cm alla 21:28. Il picco massimo, 126 cm, è stato registrato il 19 settembre alle 5:08. Nello stesso periodo, il reticolo primario ha toccato il massimo di 297 cm alle 5:15. In pratica, i livelli più alti si sono visti circa 41 ore dopo l'inizio della pioggia. La falda, più lenta rispetto al reticolo, ha raggiunto il suo massimo il 20 settembre alle 3:00, con il livello rilevato a -0,6 m dal piano campagna. Ci ha messo 63 ore per arrivarci. Inizialmente il suolo era saturo fino a 85 cm di profondità, ma il livello è salito gradualmente fino a 15 cm il 19 settembre, poi il 20 si è stabilizzato a 25 cm. L'evento può essere considerato concluso il 20 settembre e ha una durata complessiva di 3 giorni.

Il 28 ottobre è stato eseguito un rilievo finale post-evento per mappare le aree allagate e i fenomeni erosivi, caratterizzati da severità variabile in funzione della pendenza. I dati forniti dagli idrometri hanno consentito di valutare l'estensione effettiva delle aree allagate, distinguendo tra aree in cui la permanenza dell'acqua è stata transitoria e aree soggette ad allagamenti persistenti. Tali informazioni sono state confrontate con i dati rilevati sul campo, confermando che l'area lungo il tratto del reticolo principale, vicino alla sezione di chiusura,

rappresenta la zona maggiormente a rischio di inondazioni. Inoltre, durante il rilievo sul campo, sono state identificate numerose aree con fenomeni di erosione diffusa e/o profonda, nonché aree con erosione concentrata.

Durante l'evento, il reticolo idrografico ha subito ostruzioni in vari punti, dovute a smottamenti, legname e rifiuti, i quali hanno impedito il corretto deflusso delle acque, provocando la formazione di piccole dighe naturali che hanno ostacolato o ritardato l'allontanamento dell'acqua.

In conclusione, l'analisi dei risultati ottenuti sottolinea l'importanza di un monitoraggio continuo del bacino e la necessità di interventi di manutenzione per ridurre l'impatto del rischio idrogeologico. È cruciale adottare tecniche agricole conservazioniste, come l'adozione delle cover crops, che stabilizzano il suolo e riducono l'erosione, e la minima lavorazione che, in ambiente collinare, contribuisce a proteggere il terreno dai fenomeni di ruscellamento superficiale. Le fasce tampone, costituite da vegetazione arborea e arbustiva, offrono una protezione aggiuntiva, aumentando la capacità di infiltrazione dell'acqua e riducendo il deflusso superficiale.

In definitiva, una corretta gestione dei versanti e delle zone di pianura all'interno di un bacino idrografico va preceduta ed accompagnata da un'analisi accurata sia degli aspetti pedologici, litologici e geomorfologici, sia degli aspetti vegetazionali e dallo studio dei fenomeni atmosferici che possono provocare un aumento significativo del rischio idrogeologico.

Capitolo 6

BIBLIOGRAFIA

- Ansa, 2024. *Allagamenti ad Ancona, problemi per i soccorsi del 118*. [Online]
Available at: https://www.ansa.it/sito/notizie/cronaca/2024/09/19/allagamenti-ad-ancona-problemi-per-i-soccorsi-del-118_f9e5a17d-770b-474f-b0a4-7fef098213c0.html
[Consultato il giorno ottobre 2024].
- APAT Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003. *Atlante delle opere di sistemazione fluviale - Manuali e linee guida*. [Online]
Available at: http://www.idrologia.polito.it/didattica/PIT/2014/Blocco_3/139867_Atlante_delle_opere_di_sistemazione_fluviale.pdf
[Consultato il giorno 23 ottobre 2024].
- AquaSEARCH, 2024. *Campionamento*. [Online]
Available at: <https://www.aquasearch.it/diver-baro>
[Consultato il giorno Settembre 2024].
- Badri Bhakta Shrestha, H. S. M. O. Y. Y. a. Y. T., 2018. *Methodology for Agricultural Flood Damage Assessment*. [Online]
Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/63555>
[Consultato il giorno 22 ottobre 2024].
- ChatGPT, g. t. D., 2024. *Schema dell'infiltrazione dell'acqua in terreno strutturato e destrutturato*. [Online]
Available at: <https://chatgpt.com/c/e50da0e5-0760-49a7-b0bb-1679fc928845>
- Commissione Europea, 2024. *Conseguenze dei cambiamenti climatici*. [Online]
Available at: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_it
[Consultato il giorno 22 ottobre 2024].
- Commissione Europea, 2024. *Le cause dei cambiamenti climatici*. [Online]
Available at: https://climate.ec.europa.eu/climate-change_it
[Consultato il giorno 22 ottobre 2024].

- Comune di Fano, 2024. *INTERVENTO DI DISINFESTAZIONE ZANZARA TIGRE aree verdi pertinenziali plessi scolastici e aree cimiteriali*. [Online] Available at: https://www.comune.fano.pu.it/ocmultibinary/download/5371/146156/1/e9cef5c9c9bf358361a538221d518bdb.pdf/file/Documento_principale.pdf [Consultato il giorno ottobre 2024].
- Confartigianato, 2024. *STUDI – Italia più esposta in Ue ai danni da climate change. Pesa la caduta degli investimenti per la tutela del territorio e le reti idriche*. [Online] Available at: <https://www.confartigianato.it/2024/08/studi-italia-piu-esposta-in-ue-ai-danni-da-climate-change-pesa-la-caduta-degli-investimenti-per-la-tutela-del-territorio-e-le-reti-idriche/> [Consultato il giorno 22 ottobre 2024].
- Cosmari, 2021. *Che cos'è una bomba d'acqua e cosa signifca questo termine*. [Online] Available at: <https://www.cosmari.it/che-cose-una-bomba-dacqua-e-cosa-significa-questo-termine/#:~:text=2%2D6%20mm%2Fhr%20%3D,30mm%2Fhr%20%3D%20%E2%80%9Cnubifragio%E2%80%9C> [Consultato il giorno ottobre 2024].
- Dipartimento della Protezione Civile, 2024. *Alluvioni*. [Online] Available at: <https://www.protezionecivile.gov.it/it/approfondimento/alluvioni/#:~:text=Le%20alluvioni%20sono%20tra%20le,vie%20di%20comunicazione%2C%20zone%20agricole>. [Consultato il giorno 22 Ottobre 2024].
- Dipartimento della Protezione Civile, 2024. *In caso di alluvione*. [Online] Available at: <https://www.protezionecivile.gov.it/it/approfondimento/in-caso-di-alluvione/> [Consultato il giorno 22 ottobre 2024].
- d-maps.com, 2007. *d-maps.com*. [Online] Available at: https://d-maps.com/continent.php?num_con=12&lang=it [Consultato il giorno Settembre 2024].
- ECOSEARCH, 2024. *ECOSEARCH*. [Online] Available at: <https://www.ecosearch.info/home.php> [Consultato il giorno settembre 2024].

- Ecosearch, 2024. *Lisimetri agronomici*. [Online]
Available at: <https://www.campionamentoambientale.it/lisimetri-agronomici>
[Consultato il giorno Settembre 2024].
- G.M.P.E., 2005. *Il clima in Italia*. [Online]
Available at: <https://www.gmpe.it/node/169>
[Consultato il giorno Settembre 2024].
- Geo Umbria, 2018. *Appennino Umbro Marchigiano "Inquadramento geologico"*. [Online]
Available at: <https://www.didalms.it/wordpress/2018/01/29/appennino-umbro-marchigiano-inquadramento-geologico/>
[Consultato il giorno 15 novembre 2024].
- Geo Umbria, 2018. *Inquadramento geologico del bacino Umbro – Marchigiano*. [Online]
Available at: <https://www.didalms.it/wordpress/2018/01/29/appennino-umbro-marchigiano-inquadramento-geologico/>
[Consultato il giorno 16 09 2024].
- IPCC Sixth Assessment Report The Physical Science Basis, 2021. *Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate*. [Online]
Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/>
[Consultato il giorno ottobre 2024].
- ISTAT, 2023. *AMBIENTE, CLIMA ED ENERGIA*. [Online]
Available at: <https://www.istat.it/storage/ASI/2023/capitoli/C02.pdf>
[Consultato il giorno OTTOBRE 2024].
- Lastoria B., B. M. M. S. P. F. B. G., 2021. *Rapporto sulle condizioni di pericolosità da alluvione in Italia e indicatori di rischio associati*. , Roma: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Rapporti 353/21.
- Miao, S. et al., 2023. *A Comprehensive Evaluation of Flooding's Effect on Crops Using Satellite Time Series Data*. [Online]
Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/5/1305>
[Consultato il giorno 22 ottobre 2024].
- MUSEO NAZIONALE SCIENZA E TECNOLOGIA LEONARDO DA VINCI, 2024. *Eventi climatici estremi (Royal Statistical Society)*. [Online]
Available at: <https://www.museoscienza.org/it/fatti-per-capire/pc/eventi-climatici-estremi>
[Consultato il giorno 10 ottobre 2024].

packari.com, 2024. *packari.com*. [Online]
Available at: <https://www.packari.com/it/>
[Consultato il giorno Settembre 2024].

Pierantoni, A., 2024. *ANALISI IDROGEOMORFOLOGICA DI UN VERSANTE SOGGETTO A FRANA NELL'AREA DELL'AZIENDA AGRARIA UNIVERSITARIA DI BORGO RUFFINI* Tesi di Laurea in Ingegneria Civile ed Ambientale 2024, s.l.: s.n.

Regione Marche - Servizio Protezione civile, 2024. *Sistema Informativo Regionale Meteo-Idro-Pluviometrico*. [Online]
Available at: <http://app.protezionecivile.marche.it/sol/indexjs.sol?lang=it>
[Consultato il giorno 22 ottobre 2024].

REGIONE MARCHE, Direzione Ambiente e Risorse Idriche, 2024. *STATO DELLA RISORSA IDRICA E DELLA SEVERITA' IDRICA, AGGIORNAMENTO fine giugno-metà luglio 2024*. [Online]
Available at: <https://aubac.it/osservatorio/bollettino-siccita>

Regione Marche, 2010. *Direttiva 2007/60/CE - D.Lgs.vo 49/2010 – D. Lgs.vo 219/2010*. [Online]
Available at: <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica-Genio-Civile/Direttiva-alluvioni#:~:text=La%20Direttiva%202007%2F60%2FCE,gestione%20dei%20rischi%20di%20alluvioni.>
[Consultato il giorno 22 ottobre 2024].

Regione Marche, 2010. *Piano tutela acque Relazione di Sintesi (PTA)*. [Online]
Available at: https://www.regione.marche.it/Portals/0/Ambiente/PTA/2010_DACR_145.pdf
[Consultato il giorno 22 ottobre 2024].

Regione Marche, 2024. *Servizi WMS*. [Online]
Available at: <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Ambiente/Cartografia-e-informazioni-territoriali/WMS>
[Consultato il giorno ottobre 2024].

Repubblica Italiana, 1989. *LEGGE 18 maggio 1989, n. 183*. [Online]
Available at: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1989/05/25/089G0240/sg>
[Consultato il giorno 22 ottobre 2024].

- Repubblica Italiana, 1998. *LEGGE 3 agosto 1998, n. 267*. [Online]
Available at: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1998/08/07/098G0314/sg>
[Consultato il giorno 22 ottobre 2024].
- Repubblica Italiana, 2008. *DECRETO LEGISLATIVO 9 aprile 2008, n. 81*. [Online]
Available at: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2008/04/30/008G0104/sg>
[Consultato il giorno Settembre 2024].
- Sentek, 2024. *Drill & Drop*. [Online]
Available at: <https://sentektechnologies.com/products/soil-data-probes/drill-drop/>
[Consultato il giorno Settembre 2024].
- SNPA, 2024. *Il clima in Italia nel 2023*. [Online]
Available at: <https://www.snambiente.it/wp-content/uploads/2024/07/Rapporto-SNPA-clima-2023.pdf>
[Consultato il giorno ottobre 2024].
- Treccani, 2024. *Geologia*. [Online]
Available at: <https://www.treccani.it/enciclopedia/geologia/>
[Consultato il giorno 11 novembre 2024].
- Università di Camerino, 2019. *Relazioni Bacino Idrografico Del Fiume Esino*. [Online]
Available at: <https://www.bonificamarche.it/>
- Università Politecnica delle Marche, 2024. *Azienda Agraria Didattico Sperimentale "Pasquale Rosati"*. [Online]
Available at: <https://www.azienda.agraria.univpm.it/presentazione>
[Consultato il giorno Settembre 2024].
- vanEssen Instruments, 2024. *CTD-Diver*. [Online]
Available at: <https://www.vanessen.com/>
[Consultato il giorno Settembre 2024].
- Wikipedia L'enciclopedia libera, 2022. *Gradiente geotermico*. [Online]
Available at: https://it.wikipedia.org/wiki/Gradiente_geotermico
[Consultato il giorno ottobre 2024].
- Wikipedia L'enciclopedia libera, 2024. *Termoclino*. [Online]
Available at: <https://it.wikipedia.org/wiki/Termoclino>
[Consultato il giorno ottobre 2024].

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2023. *Climate change undermines nearly all sustainable development goals.* [Online]

Available at: <https://wmo.int/media/news/climate-change-undermines-nearly-all-sustainable-development-goals>

[Consultato il giorno OTTOBRE 2024].