

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE

**TITOLO: VARIAZIONE DEL PERMAFROST NELLA TAYLOR
VALLEY, ANTARTIDE, IN FUNZIONE DELLE PROPRIETA'
TERMICHE E GRANULOMETRICHE DEI SUOLI**

Relatore: Prof. Valerio Olivetti

Laureanda: Hellen Canale

Matricola n° 2041742

Anno Accademico 2023/2024

ABSTRACT

A seguito dell'attività di campagna avvenuta nella Taylor Valley in Antartide, durante l'estate australe 2019/2020, con lo scopo di esaminare le concentrazioni di gas serra e il flusso di CO₂ liberati dallo scioglimento del permafrost, ci si è resi conto che la profondità del permafrost non era costante in tutte le zone campionate. Il lavoro qui presentato consente di ottenere dei dati rilevanti per capire come cambia la profondità del permafrost in funzione delle proprietà granulometriche e termiche dei suoli campionati in ambienti polari. Sono state quindi svolte analisi specifiche presso i laboratori del Dipartimento di Geoscienze dell'università di Padova.

I risultati suggeriscono che i suoli più fini mostrano una minore conducibilità termica e un permafrost più superficiale.

Lo studio condotto nella Taylor Valley fa parte di un progetto, esterno al lavoro di tesi, ma che senza esso non si avrebbero i dati necessari per la tesi stessa, chiamato SENECA (Source and impact of greenhouse gasses in Antarctica) che ha lo scopo di dare una stima delle concentrazioni di gas degli strati superficiali scongelati (strati attivi) e delle emissioni dal permafrost in Antartide. I cambiamenti climatici infatti sono una seria minaccia per la stabilità delle regioni polari oltre ad avere ripercussioni non ancora del tutto calcolate per l'intero globo [1].

INDICE

1 INTRODUZIONE	1
1.1 PERMAFROST: DEFINIZIONE	1
1.2 COMPOSIZIONE E STRUTTURA DEL PERMAFROST	2
1.3 COME SI FORMA IL PERMAFROST?	3
1.4 DISTRIBUZIONE DEL PERMAFROST	4
1.5 PERMAFROST E RISCALDAMENTO GLOBALE	4
1.6 DESCRIZIONE DEL SITO: TAYLOR VALLEY	6
1.7 PROGETTO SENECA E PROGETTO DI TIROCINIO	8
2 MATERIALI E METODI	9
2.1 SCELTA DEI CAMPIONI	9
3 RISULTATI	13
3.1 DATI GRANULOMETRICI	13
3.2 DATI PROPRIETA' TERMICHE	27
4 CONCLUSIONI E INTERPRETAZIONI	30
BIBLIOGRAFIA	34

1 INTRODUZIONE

1.1 PERMAFROST: DEFINIZIONE

Il termine permafrost è stato coniato nel 1943 dal geologo e paleontologo Siemon William Muller combinando le parole inglesi *perrma(nent)* e *frost* [2].

Il permafrost è definito come qualsiasi terreno (suolo o roccia e qualsiasi inclusione di ghiaccio e/o materiale organico) che rimane completamente congelato (0°C o più freddo) per almeno due anni senza essere necessariamente ricoperto di neve.

È presente in entrambi gli emisferi alle alte latitudini e, la sua temperatura, spessore e continuità sono controllate dall'ambiente geografico e, in larga scala, dal bilancio energetico di superficie [3].

Il permafrost quindi, può, ma non deve, contenere acqua (intesa qui non come un liquido, ma come sostanza trifase). Quando non contiene acqua è chiamato *permafrost secco (dry permafrost)*. Si riferisce al tipo di congelamento che comprende solido, non contenente acqua, ma roccia. La definizione, tuttavia, non è assolutamente accurata poiché anche il ghiaccio stesso è secco.

Quando contiene acqua, invece, viene chiamato *permafrost umido (wet permafrost)* [4].

L'acqua nel corpo del permafrost può essere congelata, scongelata o solo parzialmente congelata. Ovviamente il permafrost in cui l'acqua è congelata è il più comune ma esiste anche permafrost scongelato ed un esempio ben noto è quello della piattaforma continentale del Mare Artico nell'Alaska settentrionale e in Siberia, dove il punto di congelamento dell'acqua è molto al di sotto di 0°C a causa dell'alto contenuto di sali nell'acqua di mare. Una situazione simile esiste anche sotto spessi ghiacciai, dove un aumento della pressione del ghiaccio sovrastante non consente all'acqua sotto un ghiacciaio di congelare, anche quando la temperatura è inferiore a 0°C [4]. Inoltre, la pressione dell'acqua nei pori e le forze di assorbimento tra particelle di terreno e molecole d'acqua, determinano un cambiamento di fase dell'acqua nei pori che si verifica in un intervallo di temperature inferiori allo zero. Di conseguenza, il terreno a temperature sotto lo zero contiene una quantità significativa di acqua non congelata [5].

Quanto detto sopra dimostra quindi che stabilire un confine tra l'area in cui si verifica il permafrost e quella in cui non si verifica è, in senso fisico, piuttosto semplice e richiede solo la misurazione (monitoraggio) delle temperature nel suolo per due anni consecutivi [4].

1.2 COMPOSIZIONE E STRUTTURA DEL PERMAFROST

Solitamente gli strati di suolo perennemente gelati si trovano a qualche metro di profondità perché la superficie a contatto con l'atmosfera è costituita da un cosiddetto *strato attivo* (*active layer*) che raccoglie gli strati più superficiali che si congelano e scongelano stagionalmente e su cui può crescere la vegetazione.

Gli strati più superficiali contengono infatti grandi quantità di carbonio organico generato dai residui di piante e organismi morti che non vengono decomposti a causa del freddo [2].

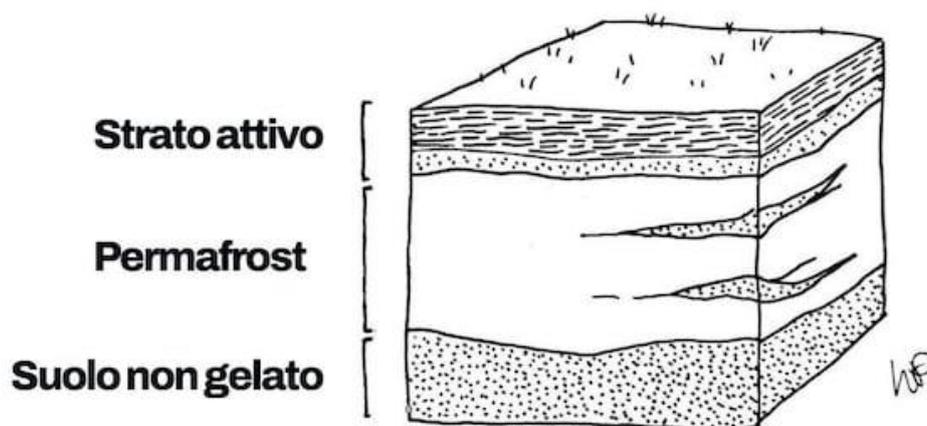
Nei terreni con permafrost, la maggior parte dei processi ecologici ed idrogeologici di interesse si verificano nello strato attivo e, di conseguenza, è necessario misurare e documentare i cambiamenti nello spessore dello strato attivo su lunghi periodi di tempo. Lo spessore dello strato attivo dipende dal bilancio energetico superficiale, che è influenzato da molti fattori, tra cui la temperatura dell'aria, l'accumulo di neve e l'umidità del suolo, la composizione della vegetazione, la radiazione solare, l'altitudine, l'esposizione del pendio ecc... [6].

Quando la superficie è ricoperta di torba, lo spessore di uno strato attivo è molto piccolo a causa delle ottime proprietà di isolamento della torba in estate e di una maggior penetrazione del freddo in inverno. In particolari circostanze, soprattutto nelle zone dove sono presenti grandi quantità di sedimenti grossolani, e dove si verifica un particolare tipo di microcircolazione dell'aria nel terreno, uno strato attivo può avere lo spessore anche di qualche metro [5].

Lo strato attivo è inoltre responsabile della trasmissione di calore (freddo) nella litosfera e, sebbene non faccia parte del permafrost, svolge un ruolo fondamentale nella sua interazione con l'atmosfera.

Nel profilo del permafrost possiamo trovare i cosiddetti "*talik*" che sono definiti come regioni di terreno perennemente scongelate che si trovano in un ambiente di permafrost. Questi talik possono trovarsi tra la base dello strato attivo e il permafrost, o all'interno del permafrost stesso [6]. Se i talik sono interamente circondati da permafrost sono detti chiusi mentre se, invece, connettono zone non congelate sono chiamati aperti. Quest'ultimi, in particolare, possono nascere grazie alla risalita di acque sotterranee dalla profondità come nel caso di sorgenti saline o termali. I taliks agiscono da cuscinetto termico, infatti, l'acqua che ci scorre attraverso può introdurre energia per lo scioglimento del permafrost e può servire a limitare la progressione verso il basso dello strato attivo in inverno. Tuttavia, sono pochi gli studi in campo dei talik.

Le aree del pianeta in cui il permafrost è più spesso sono quelle chiaramente in cui il flusso geotermico terrestre è più debole e dove il congelamento ha luogo da maggior tempo. Ad esempio, nel circolo polare artico come nel Nord del Canada o in Siberia, lo spessore del permafrost può arrivare a centinaia di metri, se non migliaia. Ambienti ancora più favorevoli per l'ispessimento del permafrost sono le zone montane, prive di copertura nevosa, come l'Antartide continentale dove si stima, infatti che il permafrost possa superare i 3000 m di spessore [4].



1.3 COME SI FORMA IL PERMAFROST?

Il permafrost si forma quando il congelamento invernale del terreno supera il disgelo estivo. Si tratta infatti dell'alternarsi di gelo e disgelo durante le stagioni che causa un incremento o un decremento dello strato attivo e quindi della profondità del permafrost.

Nelle aree temperate e subpolari la maggior parte del permafrost attuale è un relitto delle glaciazioni quaternarie. A causa del raffreddamento climatico, si forma uno strato iniziale, solitamente molto sottile, di terreno ghiacciato che rimane lì fino all'inverno successivo. Se il raffreddamento continua, si verifica un aumento dello spessore dello strato anno dopo anno. Con un cambio di stagione, il freddo e il caldo penetrano a loro volta nel terreno. In inverno, quando la temperatura scende molto al di sotto di 0°C, lo strato di terreno ghiacciato si estende dalla superficie alla profondità del massimo congelamento invernale. La profondità del massimo congelamento invernale dipende dalla durata e dalla severità dell'inverno: più lungo è il periodo della temperatura più bassa possibile, più profondo è il congelamento.

La penetrazione del freddo dipende in modo significativo dallo spessore di un manto nevoso, dal tipo di terreno, dalle proprietà fisiche del mezzo come capacità termica e permeabilità al calore, dal grado geotermico ecc. In estate una gran parte del terreno ghiacciato in superficie e una piccola quantità nella base si scongela. Lo strato superficiale, che si scongela stagionalmente, è chiamato strato attivo. Può scongelarsi e ricongelarsi più profondamente o superficialmente, a seconda di quanto è calda l'estate [4].

1.4 DISTRIBUZIONE DEL PERMAFROST

Nelle regioni artiche e boreali, il permafrost si trova in Groenlandia, Alaska, Canada, Nord Europa, Russia e Cina. Nell'emisfero Sud, invece, il permafrost lo troviamo prevalentemente nella zona Antartica e in Sud America [3].

L'area occupata da permafrost nell'emisfero settentrionale riguarda circa il 24.89 % delle terre emerse in quell'emisfero e si trova soprattutto in Groenlandia e nelle montagne dell'Himalaya.

È invece più difficile ottenere dati precisi sulla presenza di permafrost nell'emisfero australe ma possiamo dire che c'è molto meno permafrost rispetto all'emisfero settentrionale a causa della posizione dei continenti sulla Terra: ce ne sono meno nell'emisfero australe. Tuttavia, seguendo le definizioni e le ipotesi adottate, si deve considerare l'intera Antartide una regione interessata dal permafrost. Un'altra regione con ampia presenza di permafrost è quella delle Ande.

Ciò porta a concludere che il permafrost interessa più di un quarto della superficie terrestre (circa il 26%). In ogni caso non è facile stimare la zona interessata dal permafrost in quanto ha carattere "nascosto" essendo che si trova al di sotto dello strato attivo nella litosfera. Inoltre, gli studi sul permafrost avvengono solo da 70 anni e la ricerca in ambiente montuoso è più difficile e costosa. Per questi motivi si pensa che il valore sia sottostimato [4].

1.5 PERMAFROST E RISCALDAMENTO GLOBALE

Negli ultimi decenni, il tema del cambiamento climatico ha assunto sempre maggiore rilevanza all'interno della comunità scientifica, stimolando molteplici attività di ricerca tese sia a ricostruire le vicende climatiche pregresse sia a delineare gli scenari futuri. Il clima, come è noto, è il frutto di una serie di meccanismi molto complessi in cui entrano in gioco diverse componenti, quali l'atmosfera, l'oceano, la biosfera, la litosfera e la criosfera che interagiscono tra di loro su scale spaziali e temporali molto diverse. È inequivocabile che le attività umane abbiano contribuito in maniera particolarmente rilevante ad alterare gli equilibri del sistema climatico terrestre.

In particolare, all'effetto serra naturale si è aggiunto un effetto serra di origine antropogenica, generatosi in virtù della massiccia emissione in atmosfera di gas derivanti dalla combustione e dal consumo di fonti fossili, da alcune attività industriali, dagli allevamenti, dall'agricoltura e dalla gestione dei rifiuti [7].

A causa del riscaldamento globale si osserva, tra le varie conseguenze, anche quella della perdita del permafrost che ha impatti disastrosi per l'ambiente come l'emissione di metano e anidride carbonica che, tra l'altro, favoriscono ulteriormente il riscaldamento globale e quindi la fusione del permafrost. Ciò avviene perché lo scongelamento del permafrost permette a microrganismi come batteri e funghi di moltiplicarsi e nutrirsi della materia organica presente nel suolo scongelato, attivando così il processo di decomposizione con conseguente produzione e rilascio di metano e anidride carbonica.

Un altro fenomeno che genera la rapida fuoriuscita del metano è l'instabilità dei clatrati idrati presenti in giacimenti nel permafrost sotto lo strato sedimentario del letto oceanico, a 3000 m di profondità, quando sono interessati da aumenti sostenuti di temperatura (in Antartide si trovano sotto le calotte glaciali). Per clatrati idrati si intendono molecole di acqua ghiacciata che, ad alte pressioni e basse temperature, racchiudono molecole di gas, con anidride carbonica e metano.

Il rapido scongelamento del permafrost ha inoltre il potenziale di rilasciare batteri resistenti agli antibiotici e virus ad oggi sconosciuti.

Inoltre, la fusione del permafrost porta a cedimenti infrastrutturali di edifici costruiti al di sopra con conseguenti disastri. Ne è esempio la città di Noril'sk (Siberia Settentrionale), nota per uno dei peggiori disastri ambientali verificatosi nel 2020. Infatti, il 29 maggio 2020, i piloni di una cisterna di gasolio sono collassati facendo disperdere circa 21.000 tonnellate di gasolio, che si sono riversate nel fiume Ambarnaya. La contaminazione da gasolio avrebbe riguardato un'area di circa 350 Km² per la quale si è reso necessario dichiarare lo stato di emergenza. Le cause dell'incidente sono da attribuire ad un cedimento del suolo dovuto allo scongelamento del permafrost [8].

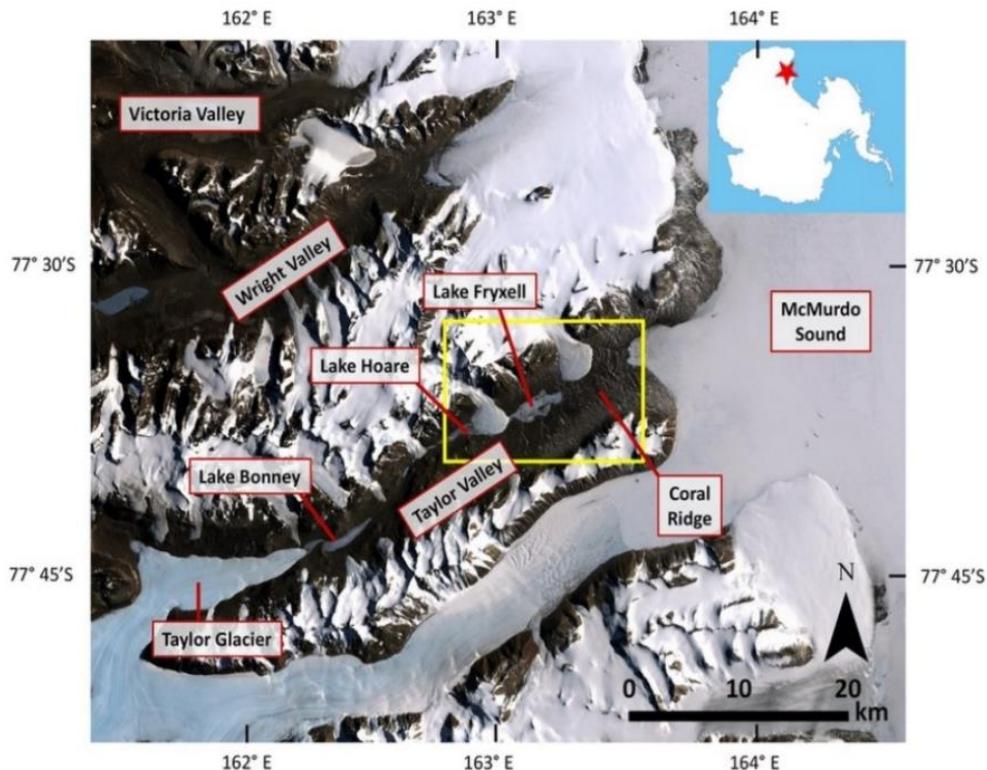
1.6 DESCRIZIONE DEL SITO: TAYLOR VALLEY

La maggior parte dell'Antartide è ricoperta da ghiaccio che può superare i 3000 m di profondità, ma alcune aree del continente sono libere dai ghiacciai. Queste aree sono le valli secche di McMurdo che formano la più grande (circa 4800 Km²) delle aree libere dai ghiacci e sono tra i deserti più estremi del pianeta, molto più freddi e secchi dei deserti altrove [9].

Le McMurdo Dry Vally sono tre valli desertiche che si estendono per 200 Km su una superficie di 4800 Km², nella parte occidentale del continente antartico. Queste tre valli sono: la Victoria Valley, la Wright Valley e la Taylor Valley [10]. Da quest'ultima, la Taylor Valley, provengono i campioni analizzati in questa tesi.

In queste valli la temperatura media annua varia tra i -15°C e i -30°C, l'umidità è scarsissima e le precipitazioni sono esclusivamente nevose e molto limitate [10]. Le valli secche contengono laghi perennemente coperti di ghiaccio, corsi d'acqua effimeri che nei periodi estivi scorrono dai ghiacciai verso i laghi, ghiacciai e vaste aree di roccia esposta [9].

La Taylor Valley è lunga circa 35 Km e contiene tre laghi principali (laghi Bonney, Hoare e Fryxell) e più di 24 corsi d'acqua effimeri. L'aspetto fisico della Taylor Valley è caratterizzato da un fondo valle sabbioso e ghiaioso con grandi distese di roccia esposta. I ghiacciai nella Taylor Valley sono generalmente alpini polari, caratterizzati da temperature del ghiaccio ben al di sotto delle zero, con la base dei ghiacciai congelata fino al substrato roccioso. Tuttavia, il ghiacciaio più grande della Taylor Valley, il ghiacciaio Taylor, non è un ghiacciaio alpino, ma piuttosto un ghiacciaio di sbocco della calotta glaciale antartica orientale [9].



A livello geologico, nella Taylor Valley, si possono osservare depositi glaciali lasciati dall'espansione e dal ritiro della calotta glaciale che durante l'ultima glaciazione occupava il Mare di Ross. Proprio per questo motivo, questi depositi vengono chiamati Ross Sea Drift e si trovano sotto forma di cumuli di ghiaccio e morene lungo le coste della baia di Ross.

La Taylor Valley presenta anche un'interessante geologia legata alle formazioni vulcaniche del Gruppo Vulcanico McMurdo che però non sono di origine locale ma sono state trasportate tramite ghiacciai da aree vulcaniche più distanti.

Analisi petrografiche di campioni vulcanici provenienti dalla Taylor Valley includono prevalentemente basaniti e tefriti (rocce vulcaniche sotto sature in Si), con composizioni variabili da litologiche basiche e intermedie, riflettendo la varietà delle fonti vulcaniche circostanti.

I sedimenti glaciali invece, mostrano una composizione litologica variata, con rocce intrusive di granitoidi e frammenti vulcanici [11].



1.7 PROGETTO SENECA E PROGETTO DI TIROCINIO

Proprio in questa valle, tramite il progetto SENECA (Source and impact of greeNhouse gases in AntarctiCA) che mira a fornire una valutazione delle concentrazioni e delle emissioni di gas dal permafrost e/o derivanti dallo scongelamento degli strati superficiali del suolo, sono stati prelevati 57 campioni di suolo. Di questi 57 campioni, 7 sono stati selezionati per investigare la causa della variazione di profondità del permafrost.

Il progetto di tirocinio è consistito infatti nella selezione di 7 campioni il più rappresentativi possibile sulla quale sono state svolte analisi delle proprietà termiche per capire il legame tra la profondità del permafrost, la granulometria e la conducibilità termica dei campioni. Il tirocinio si è svolto seguendo diverse fasi:

- selezione dei campioni rappresentativi
- analisi granulometrica per classificare il suolo
- analisi delle proprietà termiche dei campioni



2 MATERIALI E METODI

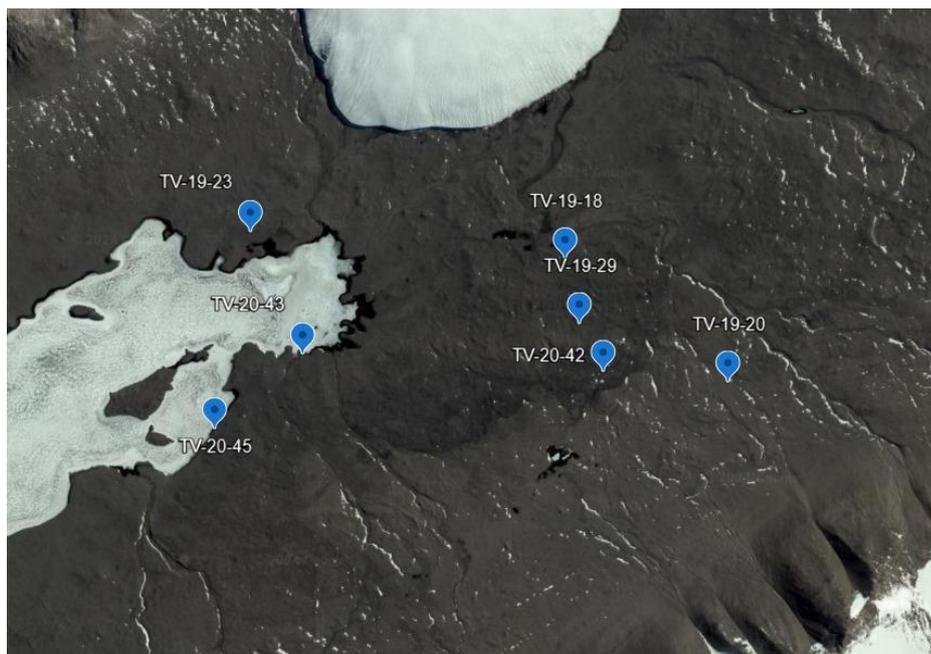
2.1 SCELTA DEI CAMPIONI

La scelta dei 7 campioni è stata effettuata con lo scopo di comprendere una zona il più ampia e rappresentativa possibile della valle. I campioni sono stati scelti in base a:

- Vicinanza/distanza di corsi d'acqua effimeri
- Diversa colorazione dei suoli visibile in campagna
- Diverse caratteristiche chimiche

I sette campioni selezionati sono:

- **TV-19-18** → Campione in cui il permafrost si trova ad una profondità di 17 cm. Il campione si presenta con limo fine color giallo, con limo grossolano e sabbia fine. Al momento della raccolta il campione era quasi completamente bagnato in superficie.
- **TV-19-20** → Campione in cui il permafrost si trova ad una profondità di 35 cm. Il campione si presenta omogeneo. Si trova sabbia fine con poco limo fino a ciottoli fini.
- **TV-19-23** → Campione in cui il permafrost si trova ad una profondità di 24 cm. Il campione si presenta come limo giallo fino con uno strato di ciottoli piatti a 12 cm. Nella parte superiore presenta piccoli ciottoli arrotondati con granulometria da fine a media con sabbia che aumenta verso l'alto.
- **TV-19-29** → Campione in cui il permafrost si trova ad una profondità di 28 cm. Il campione si presenta come sabbia grossolana con rari ciottoli sul fondo di diametro tra i 5 e i 7 cm, successivamente sabbia medio-fine (con lettiera trasversale) seguita da 20 cm di sabbia con ciottoli piatti angolari in aumento
- **TV-20-42** → Campione in cui il permafrost si trova ad una profondità di 38 cm. Il campione si presenta come sabbia da media a grossolana. Presenta piccoli sassi solo in superficie, per lo più rocce vulcaniche nere. Il suolo è moderatamente umido
- **TV-20-43** → Campione in cui il permafrost si trova ad una profondità di 33 cm. Il campione si presenta ricco di limo con ciottoli soprattutto in profondità
- **TV-20-45** → Campione in cui il permafrost si trova ad una profondità di 46 cm. Il campione si presenta con sabbia da media a grossolana con grossi ciottoli soprattutto sul fondo.



2.2 STRUMENTI UTILIZZATI

Gli strumenti utilizzati durante queste analisi sono:

- **Setacciatore meccanico** → si tratta di uno strumento utilizzato a secco in cui il campione, prevalentemente pesato, viene fatto passare attraverso una serie di setacci, a maglie progressivamente più strette, dove alla base è presente un contenitore dal fondo chiuso che raccoglie l'ultima frazione che passa dall'ultimo setaccio. La setacciatura avviene per mezzo di agitazione meccanica dei setacci che dura poco più di una decina di minuti a campione (più il campione è fine, maggiore sarà il tempo di setacciatura per permettere al campione di frazionarsi nei vari setacci). Per ogni setaccio è possibile individuare la frazione trattenuta e la frazione passante. Per frazione trattenuta si fa riferimento alla frazione di campione con granulometria maggiore alle maglie del setaccio considerato mentre, per frazione passante, si fa riferimento alla frazione di campione con granulometria inferiore alle maglie del setaccio considerato. Una volta terminata la setacciatura, le frazioni trattenute all'interno dei vari setacci vengono pesate e, attraverso l'utilizzo di un foglio di calcolo, sono state costruite le curve granulometriche di ogni campione. La setacciatura ha quindi lo scopo di dividere in frazioni granulometriche il campione. Nell'esperimento svolto durante il tirocinio, i setacci utilizzati avevano diametro di: 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm e 63 μm .



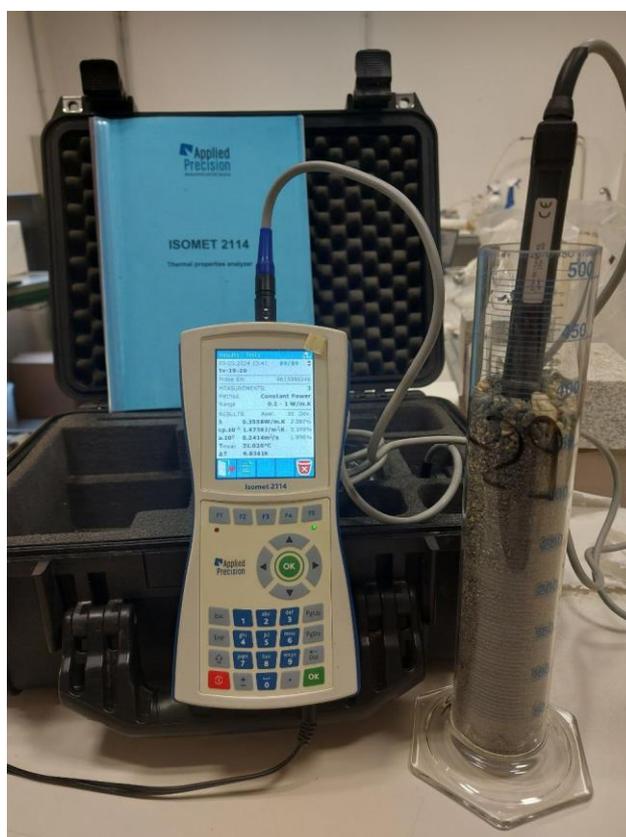
- **Granulometro laser** → durante l'esperimento, tre dei sette campioni sono stati analizzati anche attraverso il granulometro laser in quanto presentavano una frazione < 2 mm molto elevata rispetto agli altri campioni e rispetto al campione stesso. Il granulometro laser basa il suo funzionamento sulla tecnica della diffrazione laser. La diffrazione laser fornisce un'analisi dettagliata della distribuzione delle dimensioni delle particelle in quanto le particelle illuminate da un fascio laser diffondono la luce ad un angolo correlato alla loro dimensione (al diminuire della dimensione delle particelle, l'angolo osservato aumenta in maniera logaritmica) [12]. Le letture con il granulometro laser sono state effettuate dopo un pretrattamento del campione utilizzando un agente deflocculante (soluzione fosfato di sodio) e ultrasuoni. Lo strumento cattura la luce diffusa dalle particelle che si stanno analizzando e traduce gli angoli di diffrazione in dimensione delle particelle [13].

Un tipico sistema è costituito da:

- Un laser per fornire una fonte di luce con lunghezza d'onda fissa coerente ed intensa
- Un sistema di presentazione del campione per garantire che il materiale in prova passi attraverso il raggio laser come un flusso omogeneo di particelle in uno stato di dispersione noto e riproducibile.
- Una serie di rilevatori utilizzati per analizzare la diffusione della luce ottenuta in una vasta gamma di angoli



- **Analizzatore proprietà termiche ISOMET 2114** → la conducibilità termica, il calore specifico e la diffusività termica sono state misurate con l'analizzatore di proprietà termiche ISOMET 2114. Lo strumento è dotato di una sonda, posizionata al centro del campione, che, a seguito di un impulso elettrico, genera calore e riscalda l'interfaccia sonda-campione permettendo di misurare le proprietà sopra elencate.



3 RISULTATI

3.1 DATI GRANULOMETRICI

Le seguenti tabelle e grafici rappresentano i dati granulometrici dei vari campioni.

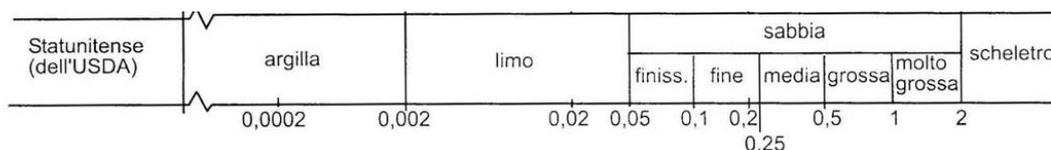
Per i campioni con granulometria fine, i dati vengono rappresentati con i dati forniti dal granulometro laser, con le curve di distribuzione normale e cumulativa.

Per gli altri campioni, le curve granulometriche sono calcolate dalle misure manuali e sono rappresentate in scala logaritmica e lineare.

Per rappresentare visivamente la distribuzione granulometrica, ho costruito un istogramma in cui osserviamo la relazione tra la dimensione delle particelle presenti nel campione e la loro frequenza nel campione stesso.

L'istogramma fornisce una chiara panoramica delle dimensioni delle particelle del campione.

La classe granulometrica viene descritta facendo riferimento alla classificazione USDA.



Un altro dato che viene utilizzato per descrivere il campione è il **Dv90**.

Si definisce Dv90 come la dimensione granulometrica al di sotto della quale la distribuzione cumulativa comprende il 90% del peso.

CAMPIONE TV-19-18

- Massa campione: 319 g

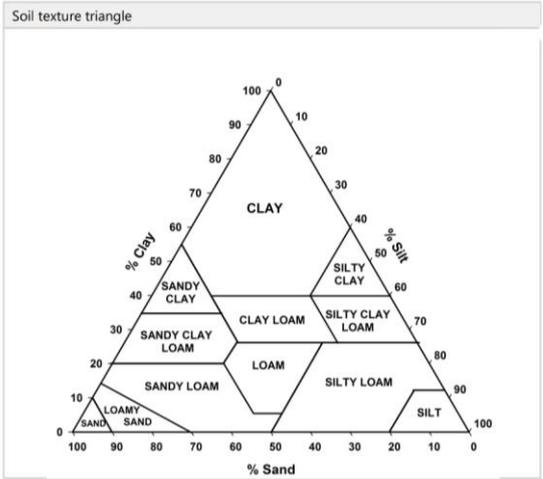
Dimensione griglia	Tara griglia (g)	Lordo griglia (g)	Netto griglia (g)	% sul totale	% sul totale accumulata	% che passa
8 mm	1271,7	1271,7	0	0	0	100
4 mm	1249,5	1249,9	0,4	0,13	0,13	100
2 mm	1096,7	1097,2	0,5	0,16	0,28	99,9
< 2 mm	880,6	1199,3	318,7	99,91	100	0

Analysis	
Particle Name	Antarctic Soil
Particle Refractive Index	1,600
Particle Absorption Index	0,010
Dispersant Name	Water
Dispersant Refractive Index	1,330
Scattering Model	Mie
Analysis Model	General Purpose
Weighted Residual	0,30 %
Laser Obscuration	10,36 %

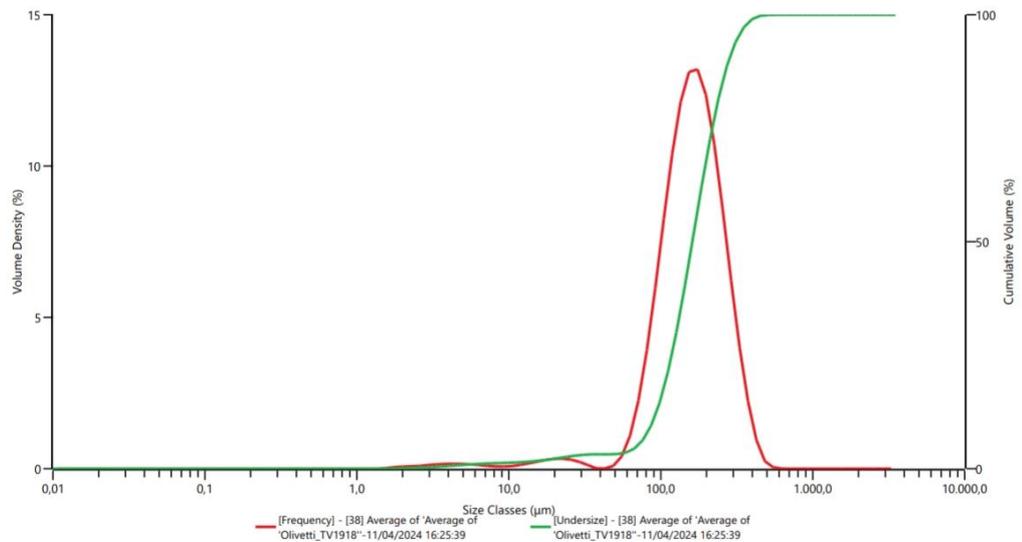
Result	
Concentration	0,1288 %
Span	1,201
Uniformity	0,380
Specific Surface Area	22,65 m ² /kg
D [3;2]	91,353 μm
D [4;3]	173,004 μm
Dv (10)	87,443 μm
Dv (50)	161,219 μm
Dv (90)	281,024 μm

Result													
Size (μm)	% Volume In												
0.010	0.00	0.060	0.00	0.357	0.00	2.131	0.07	12.726	0.15	76.006	3.24	453.960	0.17
0.011	0.00	0.068	0.00	0.405	0.00	2.421	0.08	14.458	0.20	86.355	4.98	515.772	0.03
0.013	0.00	0.077	0.00	0.460	0.00	2.750	0.10	16.427	0.24	98.114	6.88	586.001	0.00
0.015	0.00	0.088	0.00	0.523	0.00	3.125	0.12	18.664	0.27	111.473	8.70	665.793	0.00
0.017	0.00	0.100	0.00	0.594	0.00	3.550	0.13	21.205	0.28	126.652	10.15	756.449	0.00
0.019	0.00	0.113	0.00	0.675	0.00	4.034	0.14	24.092	0.25	143.897	10.99	859.450	0.00
0.022	0.00	0.128	0.00	0.767	0.00	4.583	0.13	27.373	0.19	163.490	11.07	976.475	0.00
0.024	0.00	0.146	0.00	0.872	0.00	5.207	0.12	31.100	0.10	185.752	10.36	1109.435	0.00
0.028	0.00	0.166	0.00	0.991	0.00	5.916	0.11	35.335	0.00	211.044	8.97	1260.499	0.00
0.032	0.00	0.188	0.00	1.125	0.00	6.722	0.08	40.146	0.00	239.780	7.14	1432.133	0.00
0.036	0.00	0.214	0.00	1.279	0.00	7.637	0.06	45.613	0.06	272.430	5.17	1627.136	0.00
0.041	0.00	0.243	0.00	1.453	0.01	8.677	0.06	51.823	0.31	309.525	3.32	1848.692	0.00
0.046	0.00	0.276	0.00	1.651	0.04	9.858	0.07	58.880	0.88	351.670	1.82	2100.416	0.00
0.053	0.00	0.314	0.00	1.875	0.06	11.201	0.11	66.897	1.85	399.555	0.75	2386.415	0.00

Soil classification		
Fraction	% in	
Clay (<2μm)	0.09	
Silt (2 - 50μm)	3.13	
Very fine sand (50-100μm)	12.29	
Fine sand (100-250μm)	68.42	
Medium sand (250-500μm)	15.99	
Coarse sand (500-1000μm)	0.07	
Very coarse sand (1000-2000μm)	0	
Total sand (50-2000μm)	96.78	



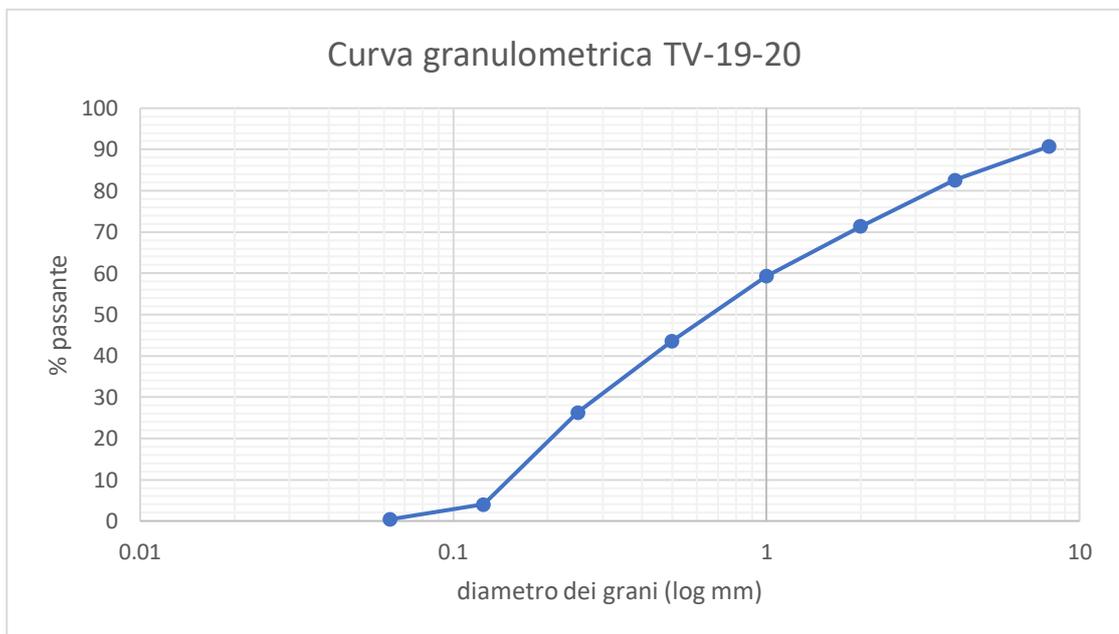
Soil Texture	
Soil Texture:	sand

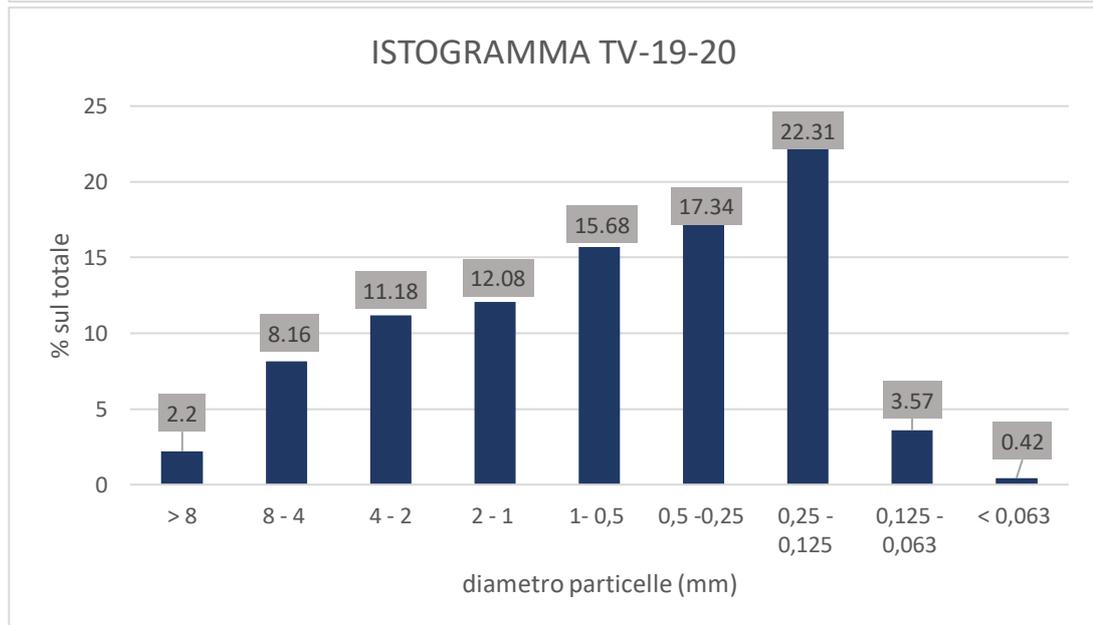
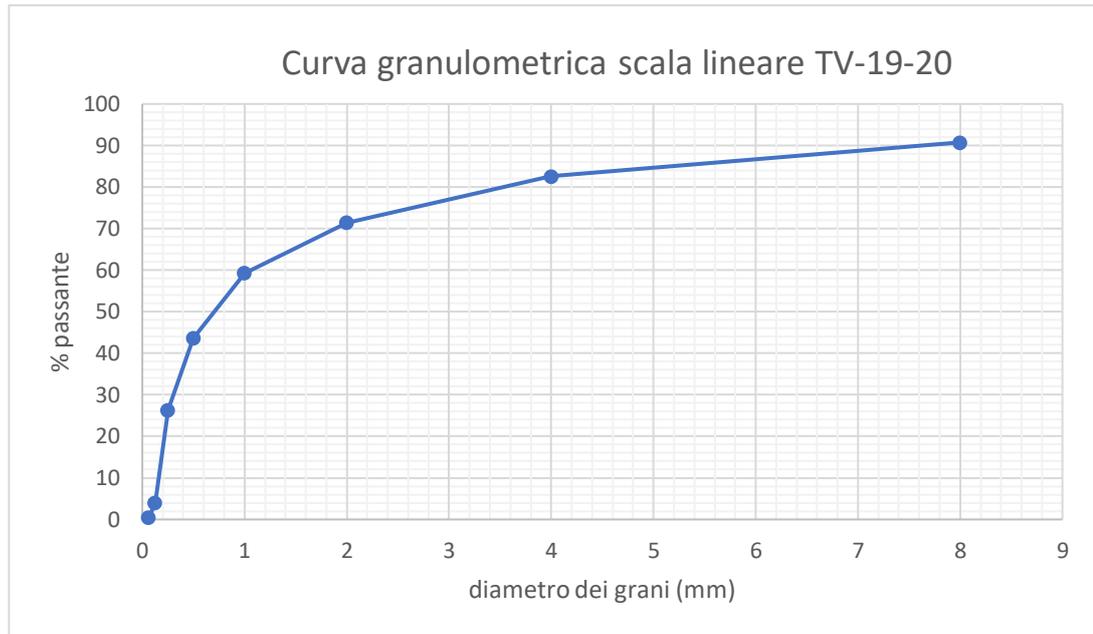


CAMPIONE TV-19-20

- Massa campione: 1409,5 g

Dimensione griglia	Tara griglia (g)	Lordo griglia (g)	Netto griglia (g)	% sul totale	% sul totale accumulata	% che passa
8 mm	1271,7	1302,7	31	2,20	2,20	90,75
4 mm	1249,4	1364,4	115	8,16	10,36	82,59
2 mm	1096,5	1254,1	157,6	11,18	21,54	71,41
1 mm	995,9	1166,1	170,2	12,08	33,61	59,33
500 µm	920,6	1141,7	221,1	15,68	49,30	43,65
250 µm	884,3	1128,7	244,4	17,34	66,64	26,31
125 µm	828,9	1143,4	314,5	22,31	88,95	3,99
63 µm	915,5	965,9	50,4	3,58	92,53	0,42
0 mm	880,4	886,3	5,9	0,42	92,95	0





Da questo istogramma si può osservare che si ha un quantitativo maggiore di particelle con diametro compreso tra 0,25 mm e 0,125 mm. Secondo la classificazione USDA si tratta di sabbia fine (*“fine sand”*)

Per comprendere da quali particelle principali è costituito il campione TV-19-20, utilizziamo però un altro dato: il D_{v90} che ricaviamo per interpolazione grafica dalla curva granulometrica con scala lineare. In questo caso, il D_{v90} è pari a 8 mm

CAMPIONE TV-19-23

- Massa campione: 330,9 g

Dimensione griglia	Tara griglia (g)	Lordo griglia (g)	Netto griglia (g)	% sul totale	% sul totale accumulata	% che passa
8 mm	1271,7	1275,4	3,7	1,12	1,12	98,91
4 mm	1249,5	1259	9,5	2,87	3,99	96,04
2 mm	1096,7	1102	5,3	1,60	5,59	94,44
< 2 mm	880,6	1193,1	312,5	94,44	100	0

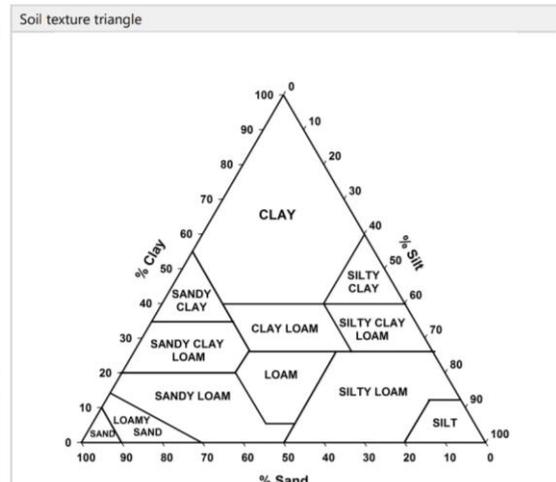
Result											
Size (µm)	% Volume In										
0.010	0.00	0.060	0.00	0.357	0.00	2.131	0.62	12.726	0.77	76.006	5.83
0.011	0.00	0.068	0.00	0.405	0.00	2.421	0.67	14.458	0.80	86.355	6.68
0.013	0.00	0.077	0.00	0.460	0.00	2.750	0.71	16.427	0.82	98.114	7.29
0.015	0.00	0.088	0.00	0.523	0.00	3.125	0.76	18.664	0.84	111.473	7.56
0.017	0.00	0.100	0.00	0.594	0.00	3.550	0.79	21.205	0.85	126.652	7.45
0.019	0.00	0.113	0.00	0.675	0.00	4.034	0.80	24.092	0.86	143.897	6.97
0.022	0.00	0.128	0.00	0.767	0.00	4.583	0.79	27.373	0.90	163.490	6.19
0.024	0.00	0.146	0.00	0.872	0.08	5.207	0.77	31.100	1.00	185.752	5.19
0.028	0.00	0.166	0.00	0.991	0.14	5.916	0.74	35.335	1.22	211.044	4.09
0.032	0.00	0.188	0.00	1.125	0.21	6.722	0.72	40.146	1.60	239.780	3.00
0.036	0.00	0.214	0.00	1.279	0.31	7.637	0.71	45.613	2.16	272.430	2.01
0.041	0.00	0.243	0.00	1.453	0.40	8.677	0.71	51.823	2.91	309.525	1.17
0.046	0.00	0.276	0.00	1.651	0.49	9.858	0.72	58.880	3.83	351.670	0.55
0.053	0.00	0.314	0.00	1.875	0.57	11.201	0.74	66.897	4.83	399.555	0.12
										453.960	0.04
										2711.357	0.00
										3080.544	0.00
										3500.000	0.00

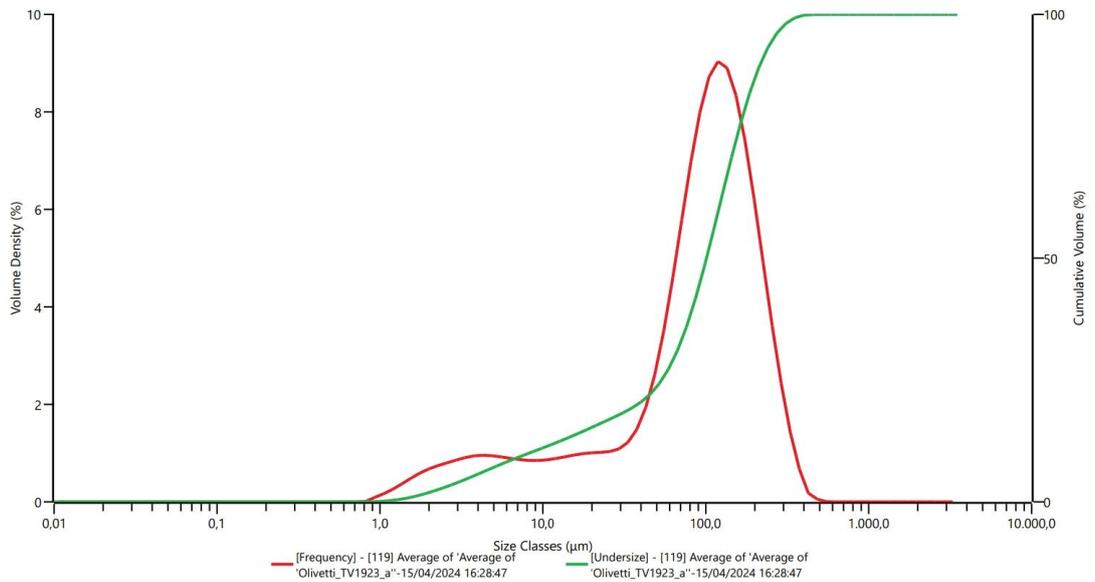
Analysis	
Particle Name	Antarctic Soil
Particle Refractive Index	1,600
Particle Absorption Index	0,010
Dispersant Name	Water
Dispersant Refractive Index	1,330
Scattering Model	Mie
Analysis Model	General Purpose
Weighted Residual	0,75 %
Laser Obscuration	11,73 %

Result	
Concentration	0,0286 %
Span	2,074
Uniformity	0,611
Specific Surface Area	98,54 m ² /kg
D [3;2]	20,996 µm
D [4;3]	110,504 µm
Dv (10)	8,242 µm
Dv (50)	100,985 µm
Dv (90)	217,654 µm

Soil classification		
Fraction	% in	
Clay (<2µm)	1.92	
Silt (2 - 50µm)	21.74	
Very fine sand (50-100µm)	25.78	
Fine sand (100-250µm)	44.64	
Medium sand (250-500µm)	5.91	
Coarse sand (500-1000µm)	0.01	
Very coarse sand (1000-2000µm)	0	
Total sand (50-2000µm)	76.34	

Soil Texture	
Soil Texture:	loamy sand



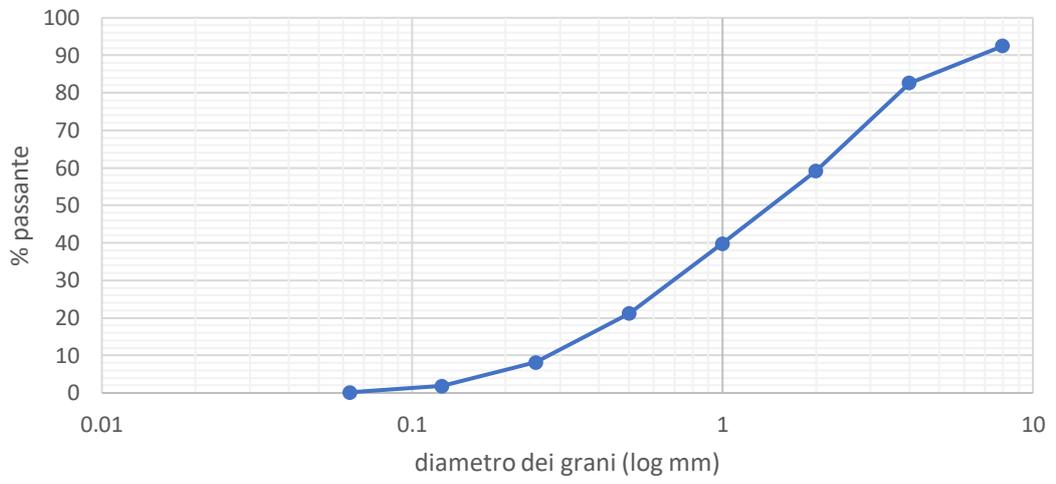


CAMPIONE TV-19-29

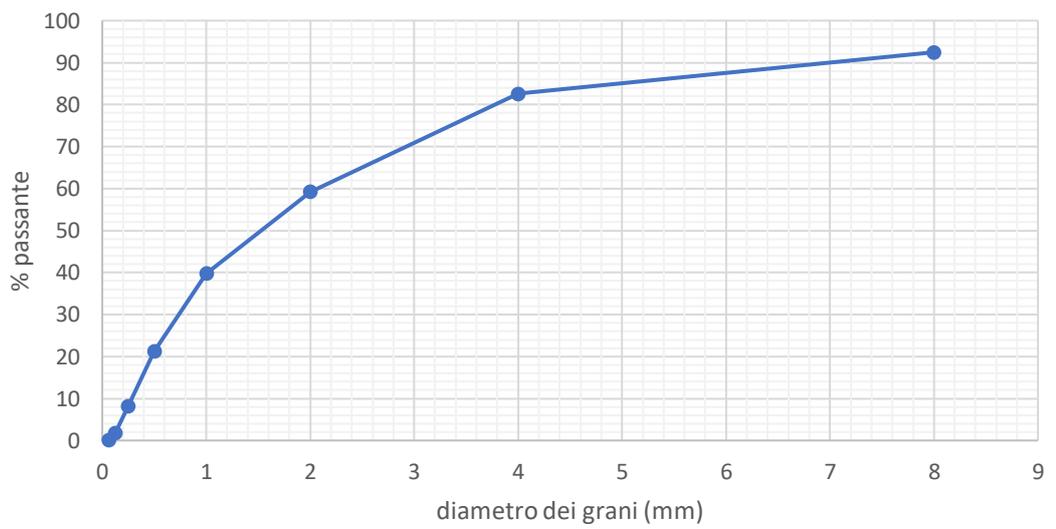
- Massa campione: 928,7 g

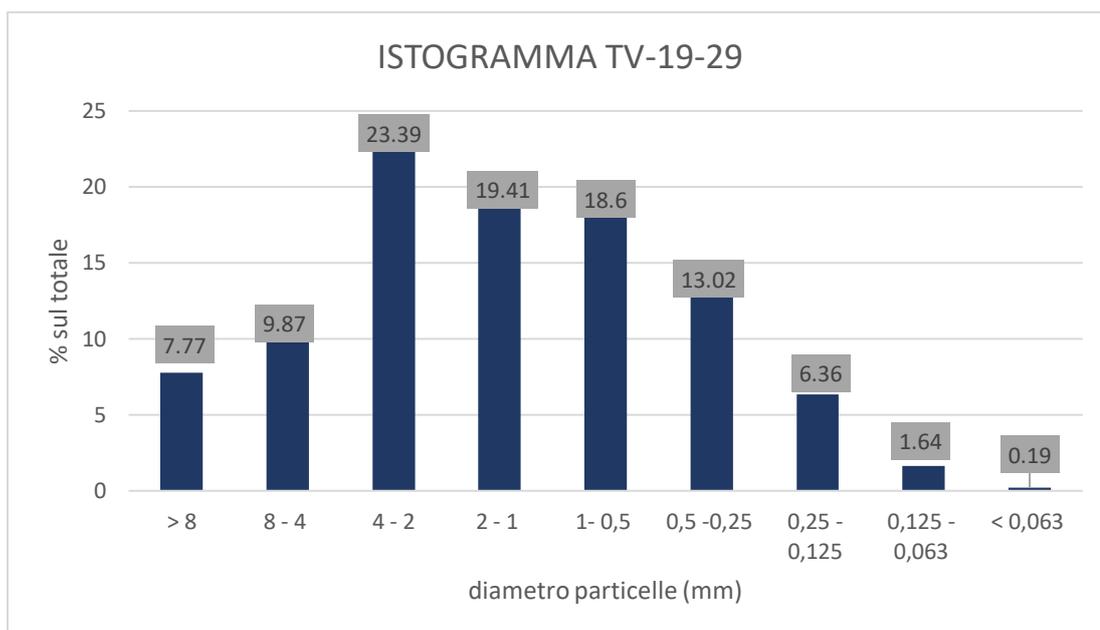
Dimensione griglia	Tara griglia (g)	Lordo griglia (g)	Netto griglia (g)	% sul totale	% sul totale accumulata	% che passa
8 mm	1271,9	1344,1	72,2	7,77	7,77	92,48
4 mm	1249,7	1341,4	91,7	9,87	17,65	82,61
2 mm	1096,6	1313,8	217,2	23,39	41,04	59,22
1 mm	996	1176,3	180,3	19,41	60,45	39,80
500 µm	920,7	1093,4	172,7	18,60	79,05	21,21
250 µm	883,5	1004,4	120,9	13,02	92,06	8,19
125 µm	828,1	887,2	59,1	6,36	98,43	1,83
63 µm	914,8	930	15,2	1,64	100,06	0,19
0 mm	880,7	882,5	1,8	0,19	100,26	0

Curva granulometrica TV-19-29



Curva granulometrica TV-19-29





Dall'istogramma del campione TV-19-29 si osserva che si ha un quantitativo maggiore di particelle con diametro compreso tra 4 mm e 2 mm. Secondo la classificazione USDA si tratterebbe quindi di ghiaia molto fine (“*granule*”)

Per comprendere da quali particelle principali è costituito il campione TV-19-29, utilizziamo il Dv90 che ricaviamo per interpolazione grafica dalla curva granulometrica con scala lineare. In questo caso, il Dv90 è pari a 7,9 mm

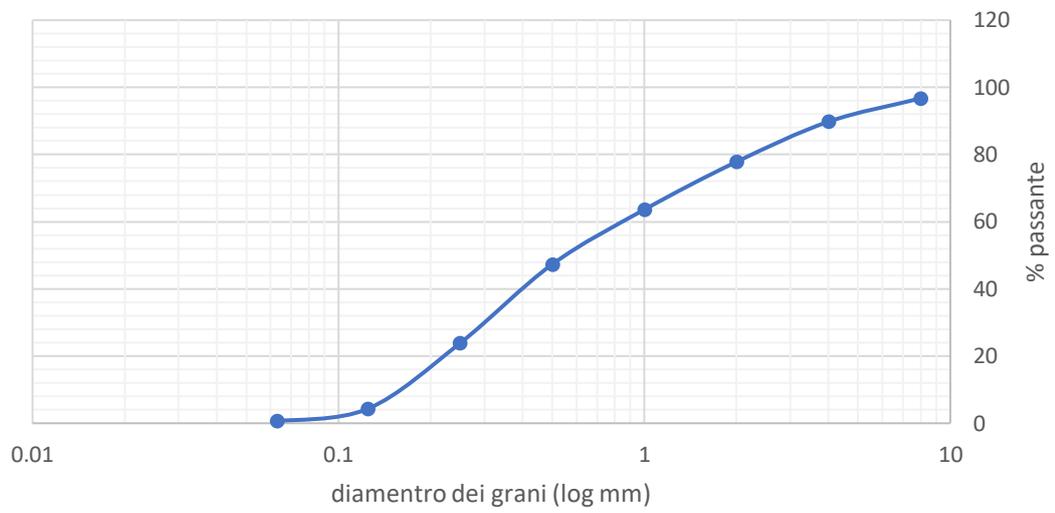
Dall'istogramma possiamo anche dire che il campione è mal classato, la distribuzione infatti non è di tipo normale, ci sono sedimenti abbondanti in tutte le classi.

CAMPIONE TV-20-42

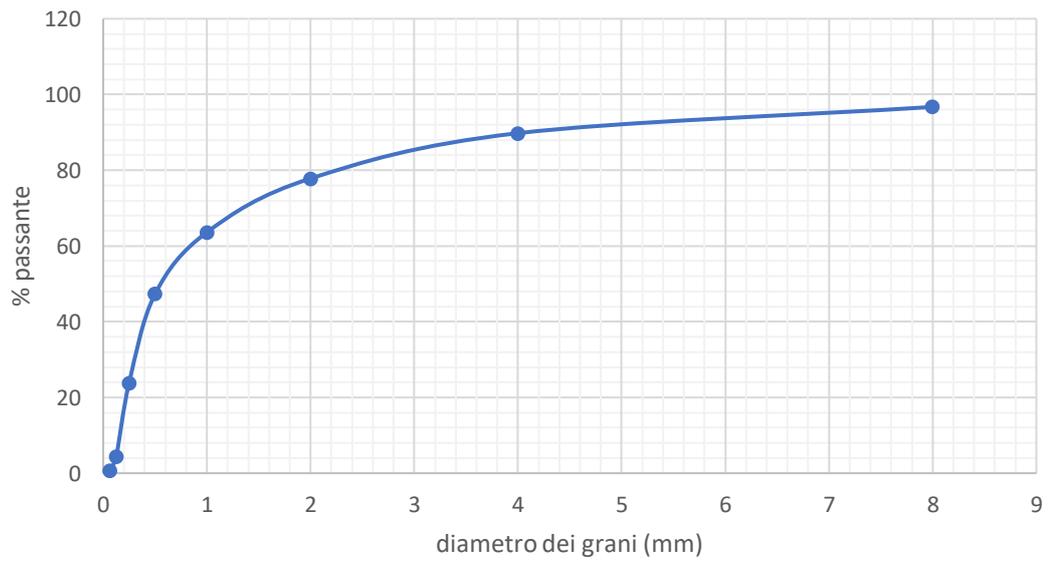
- Massa campione: 479,3 g

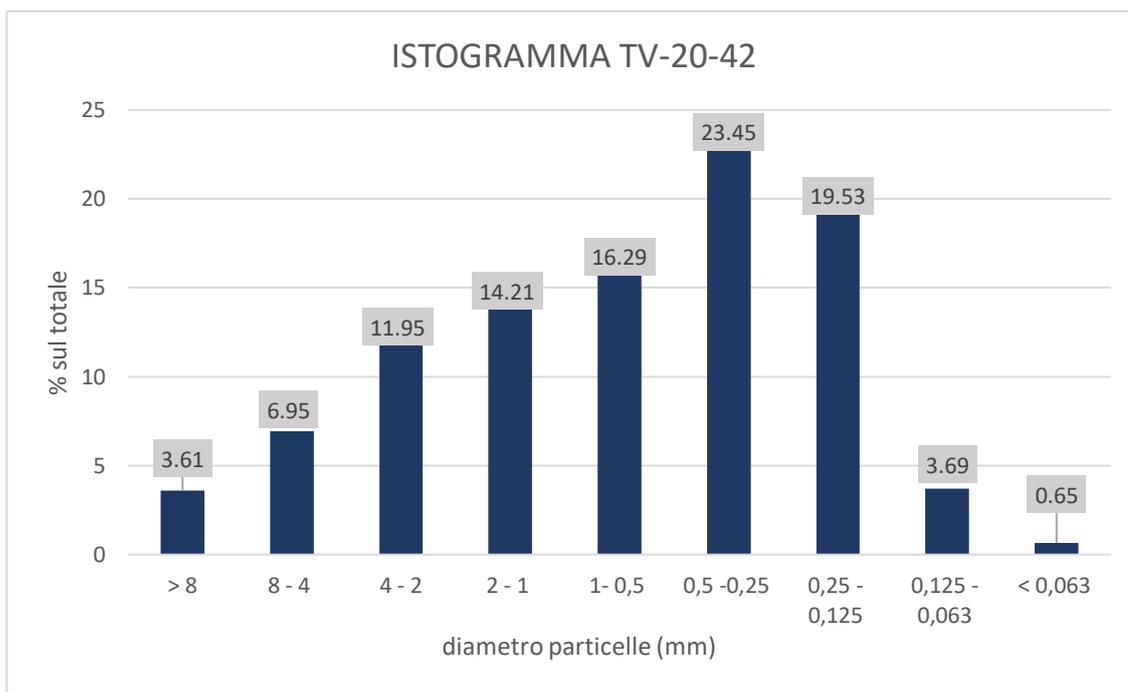
Dimensione griglia	Tara griglia (g)	Lordo griglia (g)	Netto griglia (g)	% sul totale	% sul totale accumulata	% che passa
8 mm	1271,7	1289	17,3	3,61	3,61	96,72
4 mm	1249,4	1282,7	33,3	6,95	10,56	89,78
2 mm	1096,5	1153,8	57,3	11,95	22,51	77,82
1 mm	995,9	1064	68,1	14,21	36,72	63,61
500 µm	920,6	998,7	78,1	16,29	53,01	47,32
250 µm	884,3	995,6	112,4	23,45	76,47	23,87
125 µm	828,9	922,5	93,6	19,53	95,99	4,34
63 µm	915,5	933,2	17,7	3,69	99,69	0,65
0 mm	880,4	883,5	3,1	0,65	100,33	0

Curva granulometrica TV-20-42



Curva granulometrica TV-20-42





Dall'istogramma del campione TV-20-42 si osserva che si ha un quantitativo maggiore di particelle con diametro compreso tra 0,5 mm e 0,25 mm. Secondo la classificazione USDA si tratterebbe quindi di sabbia media.

Per comprendere da quali particelle principali è costituito il campione TV-20-42, utilizziamo il D_{v90} che ricaviamo per interpolazione grafica dalla curva granulometrica con scala lineare. In questo caso, il D_{v90} è pari a 4,2 mm.

CAMPIONE TV-20-43

- Massa campione: 216,2 g

Dimensione griglia	Tara griglia (g)	Lordo griglia (g)	Netto griglia (g)	% sul totale	% sul totale accumulata	% che passa
8 mm	1271,7	1334	62,3	28,82	28,82	71,65
4 mm	1249,5	1264,8	15,3	7,08	35,89	64,57
2 mm	1096,7	1105,9	9,2	4,26	40,15	60,31
< 2 mm	880,6	1011	130,4	60,31	100,46	0

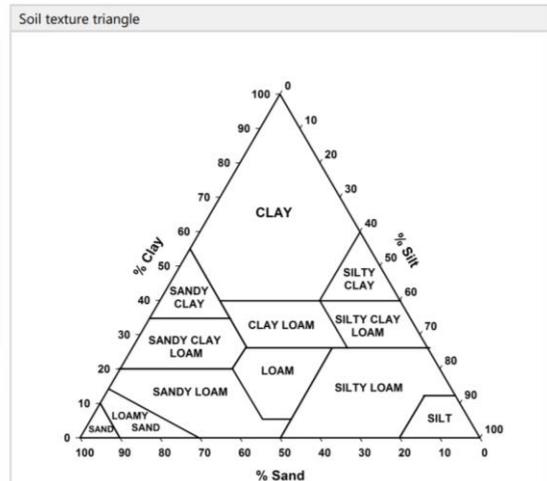
Analysis	
Particle Name	Antarctic Soil
Particle Refractive Index	1,600
Particle Absorption Index	0,010
Dispersant Name	Water
Dispersant Refractive Index	1,330
Scattering Model	Mie
Analysis Model	General Purpose
Weighted Residual	0,59 %
Laser Obscuration	12,57 %

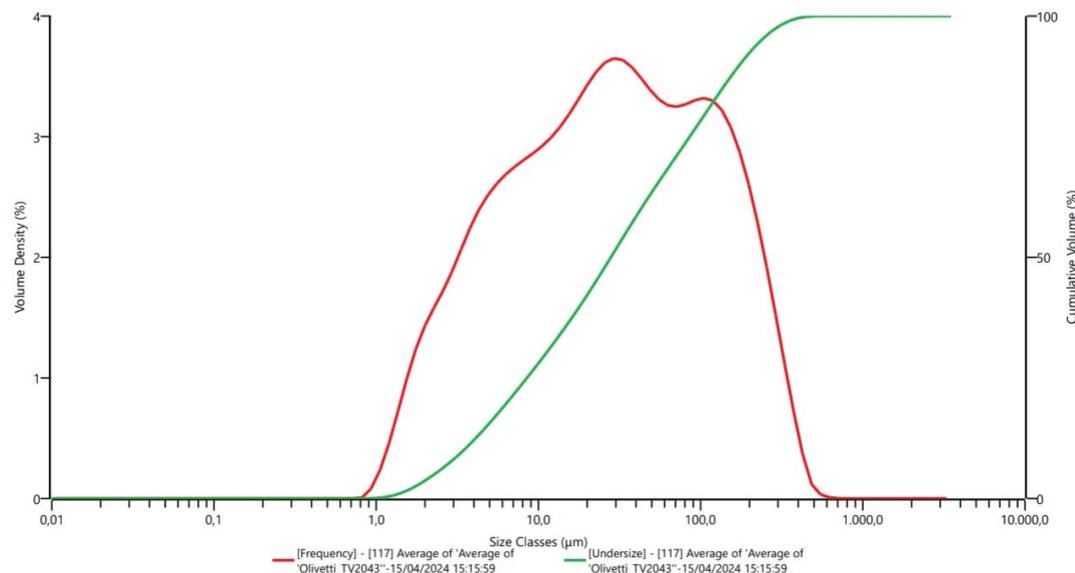
Result	
Concentration	0,0147 %
Span	6,133
Uniformity	1,842
Specific Surface Area	207,0 m ² /kg
D [3;2]	9,993 μm
D [4;3]	62,130 μm
Dv (10)	3,460 μm
Dv (50)	27,987 μm
Dv (90)	175,115 μm

Result															
Size (μm)	% Volume In														
0.010	0.00	0.060	0.00	0.357	0.00	2.131	1.32	12.726	2.57	76.006	2.72	453.960	0.09	2711.357	0.00
0.011	0.00	0.068	0.00	0.405	0.00	2.421	1.43	14.458	2.65	86.355	2.75	515.772	0.02	3080.544	0.00
0.013	0.00	0.077	0.00	0.460	0.00	2.750	1.57	16.427	2.75	98.114	2.77	586.001	0.01	3500.000	
0.015	0.00	0.088	0.00	0.523	0.00	3.125	1.72	18.664	2.85	111.473	2.75	665.793	0.00		
0.017	0.00	0.100	0.00	0.594	0.00	3.550	1.87	21.205	2.95	126.652	2.69	756.449	0.00		
0.019	0.00	0.113	0.00	0.675	0.00	4.034	2.00	24.092	3.02	143.897	2.57	859.450	0.00		
0.022	0.00	0.128	0.00	0.767	0.00	4.583	2.10	27.373	3.05	163.490	2.40	976.475	0.00		
0.024	0.00	0.146	0.00	0.872	0.06	5.207	2.18	31.100	3.03	185.752	2.18	1109.435	0.00		
0.028	0.00	0.166	0.00	0.991	0.19	5.916	2.24	35.335	2.98	211.044	1.91	1260.499	0.00		
0.032	0.00	0.188	0.00	1.125	0.38	6.722	2.30	40.146	2.91	239.780	1.60	1432.133	0.00		
0.036	0.00	0.214	0.00	1.279	0.60	7.637	2.34	45.613	2.83	272.430	1.27	1627.136	0.00		
0.041	0.00	0.243	0.00	1.453	0.83	8.677	2.39	51.823	2.76	309.525	0.93	1848.692	0.00		
0.046	0.00	0.276	0.00	1.651	1.04	9.858	2.43	58.880	2.71	351.670	0.60	2100.416	0.00		
0.053	0.00	0.314	0.00	1.875	1.20	11.201	2.49	66.897	2.71	399.555	0.30	2386.415	0.00		

Soil classification		
Fraction	% in	
Clay (<2μm)	3.71	
Silt (2 - 50μm)	59.76	
Very fine sand (50-100μm)	14.86	
Fine sand (100-250μm)	17.38	
Medium sand (250-500μm)	4.24	
Coarse sand (500-1000μm)	0.05	
Very coarse sand (1000-2000μm)	0	
Total sand (50-2000μm)	36.52	

Soil Texture	
Soil Texture:	silty loam



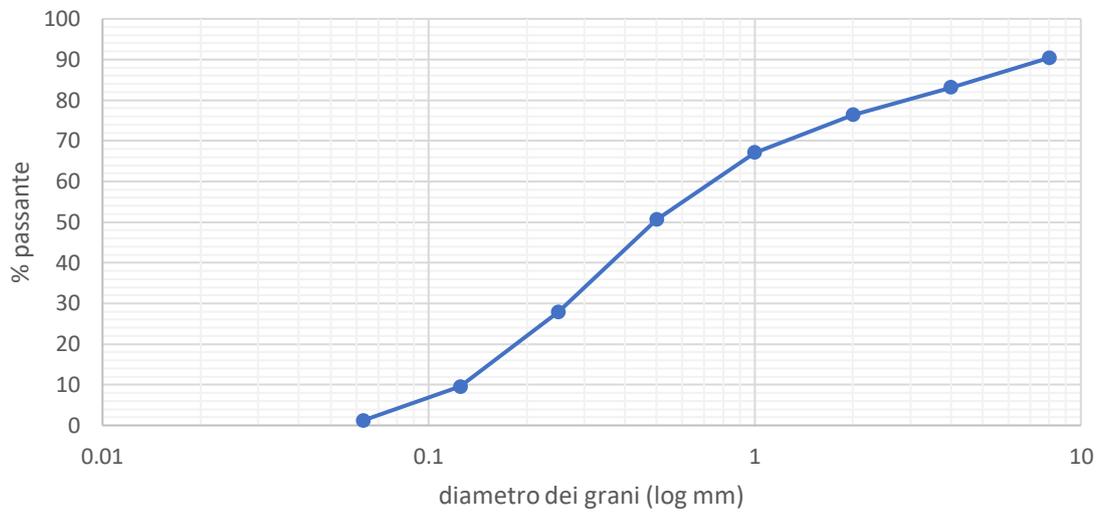


CAMPIONE TV-20-45

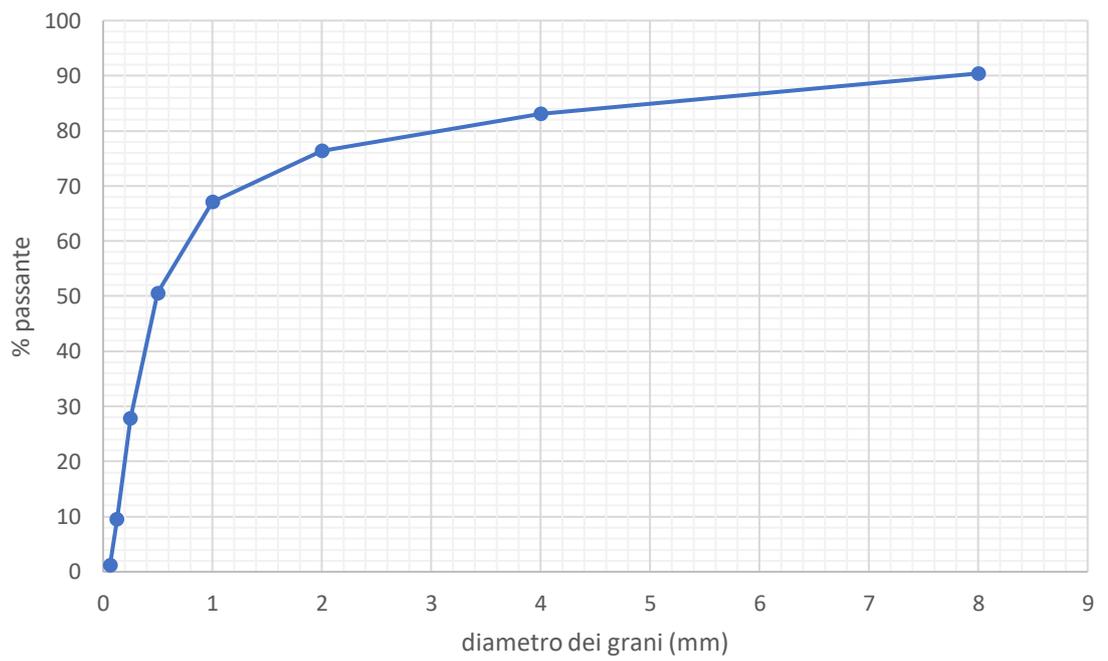
- Massa campione: 559,4 g

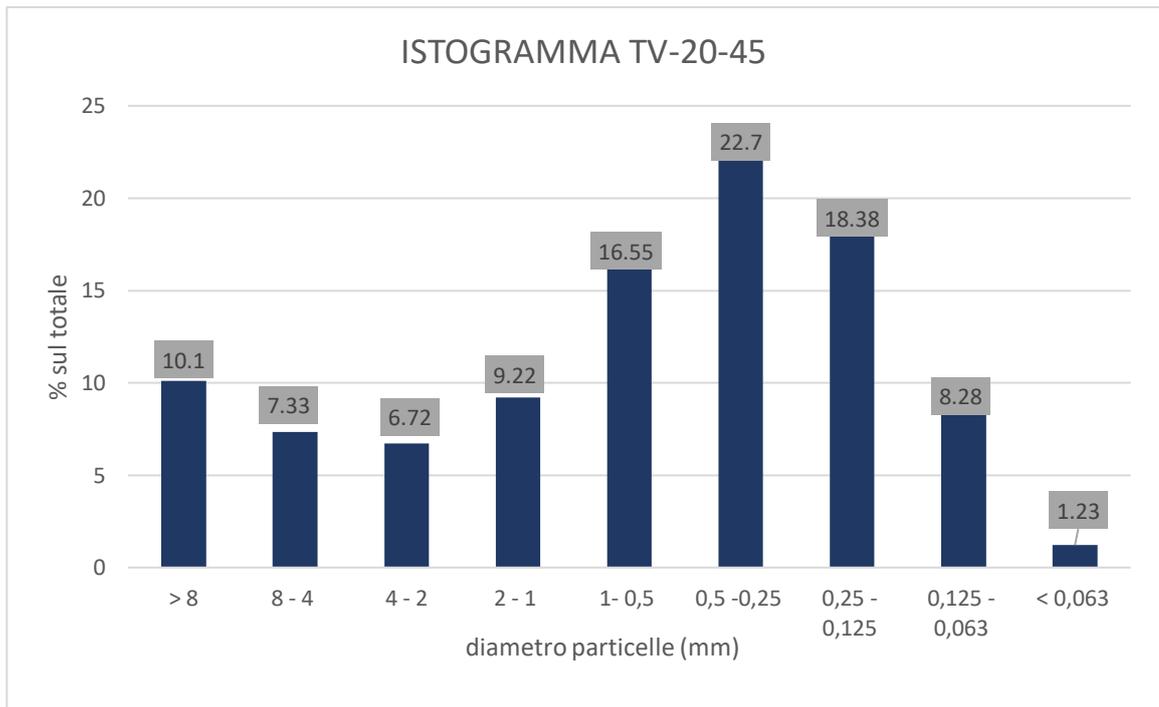
Dimensione griglia	Tara griglia (g)	Lordo griglia (g)	Netto griglia (g)	% sul totale	% sul totale accumulata	% che passa
8 mm	1271,9	1328,4	56,5	10,10	10,10	90,42
4 mm	1249,7	1290,7	41	7,33	17,43	83,09
2 mm	1096,6	1134,2	37,6	6,72	24,15	76,37
1 mm	996	1047,6	51,6	9,22	33,38	67,14
500 µm	920,7	1013,3	92,6	16,55	49,93	50,59
250 µm	883,5	1010,5	127	22,70	72,63	27,89
125 µm	828,1	930,9	102,8	18,38	91,01	9,51
63 µm	914,8	961,1	46,3	8,28	99,28	1,23
0 mm	880,7	887,6	6,9	1,23	100,52	0

Curva granulometrica TV-20-45



Curva granulometrica TV-20-45





Dall'istogramma del campione TV-20-45 si osserva che si ha un quantitativo maggiore di particelle con diametro compreso tra 0,5 mm e 0,25 mm. Secondo la classificazione USDA si tratterebbe quindi di sabbia media.

Per comprendere da quali particelle principali è costituito il campione TV-20-45, utilizziamo il D_{v90} che ricaviamo per interpolazione grafica dalla curva granulometrica con scala lineare. In questo caso, il D_{v90} è pari a 8 mm.

Dall'istogramma possiamo comprendere anche che il campione è molto mal classato in quanto la distribuzione è bimodale.

3.2 DATI PROPRIETA' TERMICHE

La presente tabella riporta i risultati dell'esperimento condotto sui campioni della Taylor Valley, in Antartide, con lo scopo di studiare le caratteristiche termiche in relazione alla profondità del permafrost e della granulometria dei campioni stessi. I dati raccolti includono misurazioni della conducibilità termica (λ) e della diffusività termica (a), che descrivono rispettivamente la capacità del terreno di condurre e dissipare calore.

CAMPIO NE	CONDUCIBILI TA' TERMICA λ (W/m*K)	DIFFUSIVI TA' TERMICA a (m ² /s)	PROFONDI TA' PERMAFRO ST (cm)	GRANULOMET RIA
TV-19-18	0,2024	0,1387*10 ⁶	17	Limo/sabbia per lo più fine. Al momento della raccolta era quasi completamente bagnato
TV-20-43	0,2289	0,1588*10 ⁶	33	Limo con ciottoli in profondità
TV-19-23	0,2373	0,1649*10 ⁶	24	Granulometria da fine a media salendo. Si trovano ciottoli fini in superficie e uno strato di grossolani a 12 cm
TV-19-20	0,3305	0,2214*10 ⁶	35	Sabbia, poco limo e ciottoli fini
TV-20-42	0,3316	0,2157*10 ⁶	38	Sabbia medio grossolana. Il suolo era umido alla raccolta
TV-20-45	0,3378	0,2175*10 ⁶	46	Sabbia medio grossolana con ciottoli sul fondo
TV-19-29	0,3558	0,2414*10 ⁶	28	Sabbia grossolana con ciottoli grandi in superficie

Commento sui dati:

- **Conducibilità termica (λ):** i valori di conducibilità termica misurati variano da 0,2024 W/m*K, conducibilità più bassa, a 0,3558 W/m*K, conducibilità più alta. Si osserva una correlazione con la granulometria del suolo. Infatti, granulometrie più grosse corrispondono anche a conducibilità termiche più elevate. Ciò è dovuto al fatto che terreni con una porosità elevata, come quelli con granulometria più fine, tendono ad intrappolare molta aria nei pori. L'aria ha una conducibilità termica inferiore a solidi e liquidi e quindi riduce la capacità del terreno di condurre il calore.
- **Diffusività termica (a):** i valori di diffusività termica misurati variano da $0,1387 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ a $0,2414 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ e hanno un andamento simile a quello della conducibilità termica mettendo in evidenza che terreni con granulometria più grossolana tendono a dissipare meglio il calore.
- **Profondità del permafrost:** la profondità del permafrost dei campioni varia da 17 cm a 46 cm e si può notare anche in questo caso che i suoli con granulometria più fine, che trattengono più aria, presentano un permafrost più superficiale rispetto a campioni con granulometria più grossolana che presentano un permafrost più profondo. Questo è coerente con l'ipotesi che terreni più porosi trattengano più aria, isolando meglio lo stato di permafrost.
- **Granulometria:** i campioni analizzati hanno granulometria variabile da limo/sabbia, a sabbia più grossolana e presenza di ciottoli. La granulometria gioca un ruolo importante nel comportamento termico del suolo. Si osserva infatti una correlazione con la conducibilità termica e con la profondità del permafrost.

Un caso interessante è il campione TV-20-42 che nonostante abbia una conducibilità termica inferiore al campione TV-19-29 e una granulometria simile ma con assenza di ciottoli in superficie, presenta una profondità del permafrost maggiore. L'ipotesi più attendibile per spiegare questo fatto è la distribuzione granulometria. Infatti, un terreno con sabbia medio-grossolana (TV-20-42) potrebbe essere meno poroso rispetto ad uno con ciottoli in superficie (TV-19-29), che potrebbe avere spazi d'aria che agiscono come isolante. Inoltre, una stratificazione più omogenea del campione TV-20-42 potrebbe facilitare la conduzione del calore in profondità rispetto ad una distribuzione più disomogenea del campione TV-19-29.

Un altro fattore da tenere in considerazione è che il campione TV-20-42, al momento della raccolta, era moderatamente bagnato. L'acqua conduce maggiormente il calore rispetto all'aria e questo spiega il perché di una profondità maggiore del permafrost.

Quindi la differenza di profondità del permafrost nei due campioni potrebbe essere dovuta ad un insieme di combinazioni di differenza granulometrica, presenza di ciottoli superficiali, omogeneità e umidità del campione.

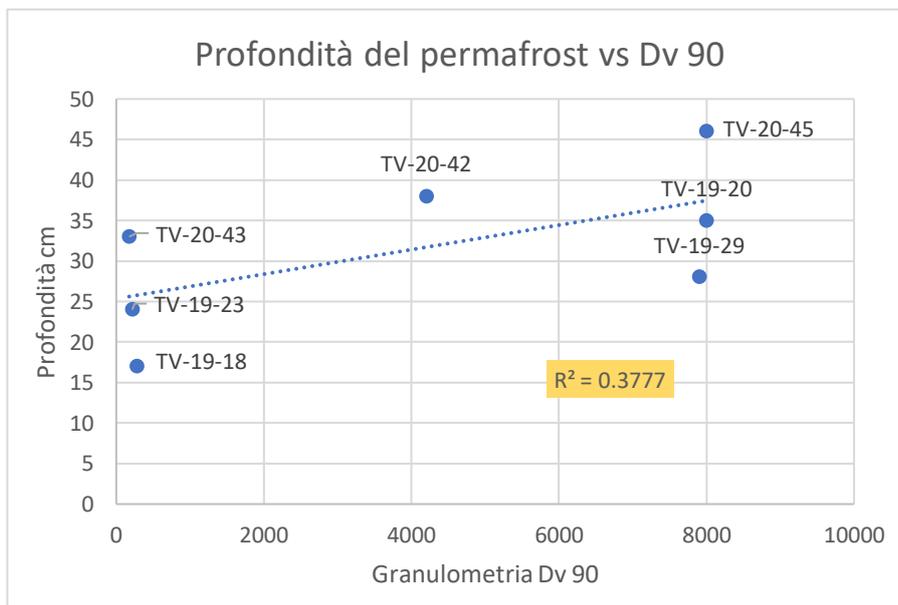
4 CONCLUSIONI E INTERPRETAZIONI

Lo studio condotto sui campioni della Taylor Valley, Antartide, ha permesso di raccogliere dati preziosi per comprendere la variazione di profondità del permafrost. In particolar modo, attraverso l'analisi di sette campioni antartici, è stato possibile correlare la granulometria del suolo e le proprietà termiche, in particolare di conducibilità termica, alla variazione di profondità del permafrost ottenendo una visione più chiara del comportamento del suolo congelato in ambienti polari.

I risultati ottenuti indicano un legame tra la conducibilità termica e la diffusività con la granulometria. Infatti si è osservato che queste proprietà termiche aumentano all'aumentare della granulometria, e questa correlazione sembra influire sulla profondità del permafrost.

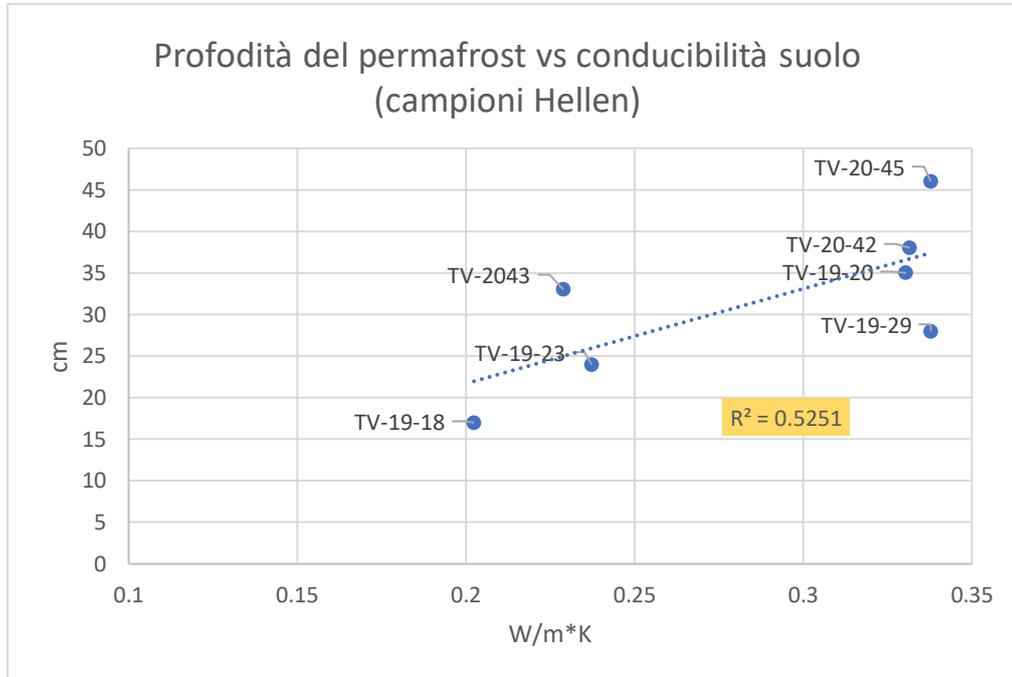
Questo fenomeno può essere spiegato dalla maggior porosità dei suoli a granulometria fine, che intrappolano l'aria, che ha bassa conducibilità termica, e non permette la diffusione del calore in profondità. Infatti suoli con granulometria più fine, come limo o sabbia fine, presentano un permafrost più superficiale rispetto a suoli con granulometria più grossolana, come presenza di ghiaia, ciottoli e sabbia grossolana.

Dal seguente grafico è possibile osservare la relazione tra la profondità del permafrost e il Dv90:



Si vede bene che i suoli fini, con un Dv90 inferiore, hanno il permafrost più superficiale. Ciò è dovuto dalla loro capacità di trattenere più aria che agisce da isolante termico evitando la dispersione del calore in profondità.

Un altro grafico utile a confermare la tesi è il grafico che mette in relazione la profondità del permafrost con la conducibilità del suolo:



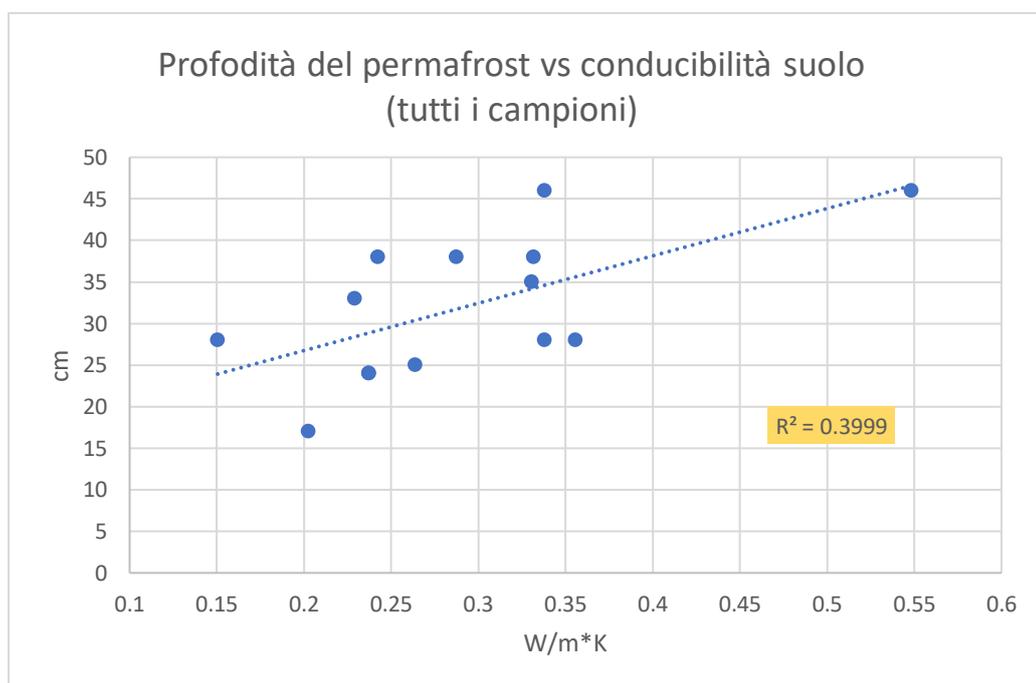
I dati dimostrano che suoli con conducibilità termica minore sono gli stessi suoli evidenziati nel precedente grafico con granulometria fine e tendono quindi ad avere un permafrost più superficiale. Questo conferma l'ipotesi che i suoli con granulometria più fine siano in grado di condurre meno calore verso gli strati più profondi favorendo il mantenimento del permafrost.

In entrambi i grafici si mostra la linea di regressione, che serve a mostrare la correlazione tra i dati. Il livello di correlazione viene indicato con il valore R^2 ($R^2 = 1$ indica una correlazione perfetta). Nei due grafici, il valore di R^2 è di 0.4 e 0.5 che indica una buona correlazione diretta.

Alcuni dati che escono un po' fuori da questo andamento (come il TV-19-29 o il TV-19-45) potrebbero essere condizionati da una granulometria molto irregolare (mal classati), una forte stratificazione con ciottoli in superficie e sabbia più fine sotto la superficie, quindi un suolo isolante, oppure dalla presenza di acqua liquida nel suolo.

In conclusione, l'analisi condotta conferma l'importanza della granulometria e delle proprietà termiche nel predire la profondità del permafrost. Ulteriori studi, focalizzati su un maggior numero di campioni, potrebbero migliorare la comprensione di questi processi e contribuire a sviluppare modelli predittivi più accurati per il futuro del permafrost nelle regioni polari.

Ad esempio, prendendo in esame altri sette campioni sulla quale si sono svolte le medesime analisi e unendo i dati si osserva la conferma della correlazione della profondità con la conducibilità del suolo:



Quest'analisi è cruciale per comprendere come i diversi tipi di terreno possano influire sulla stabilità e la distribuzione del permafrost, fornendo informazioni utili per predire le conseguenze delle variazioni climatiche in ambienti polari come l'Antartide. Infatti, proprio l'Antartide, a causa della vasta area ricoperta da suolo ghiacciato, rappresenta una minaccia crescente se le temperature continuassero ad alzarsi. La fusione del permafrost infatti, non solo ha un impatto locale, ma può avere ripercussioni globali dovuti al rilascio di gas serra intrappolati nel suolo ghiacciato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] INGV Ambiente, 13 gennaio 2022, *La nuova campagna di SENECA in Antartide*. Disponibile in: <https://ingvambiente.com/2022/01/13/la-nuova-campagna-di-seneca-in-antartide/>
- [2] Pillepich, N, *Cos'è e come si forma il permafrost: minacce e rischi futuri*, 2022. Disponibile in: <https://www.geopop.it/cose-e-come-si-forma-il-permafrost-minacce-e-rischi-futuri/>
- [3] Ruggiero, I.; Sciarra, A.; Mazzini, A.; Florindo, F.; Wilson, G.; Tartarello, M.C.; Mazzoli, C.; Anderson, J.T.H.; Romano, V.; Wortington, R.; Bigi, R.; Sassi, R.; Ciotoli, G.; *Antarctic permafrost degassing in Taylor Valley by extensive soil gas investigation*, 2023.
- [4] Dobinski, W.; *Permafrost*, in: Earth-science reviews, 2011, volume 108, pagine 158-169. Disponibile in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825211000894>
- [5] Devo, E.; Connon, R.F.; Beddoe, R.; Goordial, J.; Quinton, W.L.; Craig, J.R.; *Disconnected active layers and unfrozen permafrost: A discussion of permafrost-related terms and definitions*, in: Science of The Total Environment, 2024, volume 912. Disponibile in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723076465>
- [6] Connon, R.; *The influence of Shallow Taliks on Permafrost Thaw and Active Layer Dynamics in Subarctic Canada*, in: Earth Surface, 2018, volume 123, pagine 281 – 297. Disponibile in: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017JF004469>
- [7] Capozzi, V.; Budillon, G.; *Cambiamenti climatici*, 2023.
- [8] Secci, G.; *Le conseguenze della perdita del permafrost*, 2024. Disponibile in: <https://www.osservatorioartico.it/retroazione-climatica-positiva/>
- [9] Fontana, G.A.; Lione, W.B.; Burkins, M.B.; Dana, G.L.; Doran, P.T.; Lewis, K.J.; McKnight, D.M.; Moorhead, D.L.; Parsons, A.N.; Priscu, G.C.; Muro, D.H.; Wharton, R.A.; Virginia, R.A.; *Physical controls on the Taylor Valley Ecosystem, Antartica*, 1999, BioScience, volume 49, pagine 961 – 971. Disponibile in: <https://academic.oup.com/bioscience/article/49/12/961/247325>
- [10] Polastro, I.; *Il luogo più arido sulla Terra si trova in Antartide: le valli secche di McMurdo*, 2023. Disponibile in: <https://www.geopop.it/il-luogo-piu-arido-sulla-terra-si-trova-in-antartide-le-valli-secche-di-mcmurdo/>

[11] Perotti, M.; Zurili, L.; Sandroni, S.; Cornamusini, G.; Talarico, F.; *Provenance of Ross Sea Drift i McMurdo Sound (Antartica) and implications for middle – Quaternary to LGM glacial transport: New evidence from petrographic data*, in: *Sedimentary Geology*, 2018.

[12] Alfatest, *Granulometria Laser: come funziona*. Disponibile in:
[https://www.alfatest.it/tecniche/granulometria-laser-laboratorio/#:~:text=La%20tecnica%20si%20basa%20sul,diffusione\)%20aumenta%20in%20maniera%20logaritmica](https://www.alfatest.it/tecniche/granulometria-laser-laboratorio/#:~:text=La%20tecnica%20si%20basa%20sul,diffusione)%20aumenta%20in%20maniera%20logaritmica)

[13] Silva, S.H.G.P.; et al.; *Granulometria laser: una tecnica avanzata di analisi del suolo*, in: *SciELO*, 2021. Disponibile in:
<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/Fp8dYsvhYTmXcRMSSYNSJvD/?format=html&lang=en>