

C. UBALDI

Unità Tecnica Antartide
Servizio Rapporti Istituzionali,
Ambiente, Promozione e Formazione
Centro Ricerche Casaccia

R. SCIPINOTTI

Unità Tecnica Antartide
Servizio Rapporti Istituzionali,
Ambiente, Promozione e Formazione
Centro Ricerche Bologna

**R. CAPRIOLI, M. DE CASSAN,
M.R. MONTEREALI, M. PROPOSITO,
F. SPAZIANI**

Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento
al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Impatti Antropici e del Cambiamento Climatico
sul Territorio

Laboratorio Impatti sul Territorio e nei Paesi in Via di Sviluppo
Centro Ricerche Casaccia

R. MECOZZI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Divisione Tecnologie e Vettori per la Decarbonizzazione:
accumuli, idrogeno, mobilità, CCUS e usi finali
Centro Ricerche Casaccia

Monitoraggio del particolato atmosferico presso la Base Mario Zucchelli in Antartide durante quattro spedizioni (dalla XXXV alla XXXVIII)

Determinazione del contenuto degli elementi inorganici in traccia

RT/2025/17/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

C. UBALDI

Unità Tecnica Antartide
Servizio Rapporti Istituzionali,
Ambiente, Promozione e Formazione
Centro Ricerche Casaccia

R. SCIPINOTTI

Unità Tecnica Antartide
Servizio Rapporti Istituzionali,
Ambiente, Promozione e Formazione
Centro Ricerche Bologna

R. CAPRIOLI, M. DE CASSAN,
M.R. MONTEREALI, M. PROPOSITO,
F. SPAZIANI

Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento
al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Impatti Antropici e del Cambiamento Climatico
sul Territorio
Laboratorio Impatti sul Territorio e nei Paesi in Via di Sviluppo
Centro Ricerche Casaccia

R. MECOZZI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Divisione Tecnologie e Vettori per la Decarbonizzazione:
accumuli, idrogeno, mobilità, CCUS e usi finali
Centro Ricerche Casaccia

Monitoraggio del particolato atmosferico presso la Base Mario Zucchelli in Antartide durante quattro spedizioni (dalla XXXV alla XXXVIII)

Determinazione del contenuto degli elementi inorganici in traccia

RT/2025/17/ENEA

ENEA

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

**Monitoraggio del particolato atmosferico presso la Base Mario Zucchelli in Antartide durante quattro spedizioni (dalla XXXV alla XXXVIII)
Determinazione del contenuto degli elementi inorganici in traccia**

R. Scipinotti, C. Ubaldi, R. Mecozzi, R. Caprioli, M. De Cassan, M.R. Montereali, M. Proposito, F. Spaziani

Riassunto

In questo report sono presentati i risultati delle attività di monitoraggio ambientale condotte presso la Stazione Mario Zucchelli (MZS) in Antartide nel corso di quattro spedizioni consecutive (dalla 35a alla 38a). Ciascuna campagna è stata svolta durante l'estate australe, che generalmente va da ottobre a febbraio; pertanto, i dati si riferiscono alle estati tra il 2019 e il 2023. Le attività descritte hanno riguardato il campionamento di particolato atmosferico (PM10) e la determinazione analitica del contenuto totale di elementi inorganici in traccia presenti nel particolato stesso. Il materiale particolato è stato raccolto su filtri in fibra di quarzo utilizzando campionatori ad alto volume a flusso costante, posizionati sia presso MZS sia in un sito, Campo Icaro, situato a circa 3 km a sud di MZS. Quest'ultimo sito è stato scelto perché non influenzato da attività antropiche e quindi è considerato un "bianco", vale a dire un sito analogo a quello di MZS, ma privo di sorgenti di emissione di origine antropica. Per entrambi i siti monitorati, analizzando i dati raccolti nel corso degli anni, si osserva che alcuni elementi presentano valori di concentrazione nel particolato atmosferico che non differiscono in modo significativo tra una spedizione e quella successiva, suggerendo una loro possibile origine naturale, geogenica. Al contrario, altri elementi mostrano una tendenza a un aumento progressivo delle loro concentrazioni nel particolato campionato nel tempo. Per questi ultimi, si può ipotizzare che la loro presenza sia maggiormente correlata alle attività umane. Sebbene le concentrazioni misurate per questi elementi di origine antropica siano ampiamente al di sotto dei limiti stabiliti dalla normativa europea riguardante la qualità dell'aria, i risultati mostrati in questo report indicano l'importanza di continuare le attività di monitoraggio del particolato atmosferico per garantire una costante tutela dell'ambiente nell'area in cui è ubicata MZS.

Parole chiave: Particolato atmosferico antartico, metalli in traccia, analisi in ICP-MS, stazione Mario Zucchelli in Antartide.

Abstract

This report presents the results of the environmental monitoring activities conducted at the Mario Zucchelli Station (MZS) in Antarctica during four consecutive expeditions (from the 35th to the 38th expedition). Each campaign was carried out during the austral summer, which generally coincides with the period from October to February, and the results refer to the austral summers between 2019 and 2023. The activities described herein involved sampling of atmospheric particulate matter (PM10) and the analytical determinations of the total content of trace inorganic elements in the samples. Particulate matter was collected on quartz fiber filters using high-volume, constant-flow samplers, positioned at the MZS and at Campo Icaro, a site about 3 km south of the base, not influenced by anthropogenic activities and considered as "blank", i.e., a site similar to MZS, but without anthropogenic emission sources. For both monitored sites, data collected over the years show that some elements exhibit concentrations that do not vary significantly from one expedition to the next, suggesting a likely natural, geogenic origin. In contrast, other elements show a trend of progressively increasing concentrations over time. For these latter elements, it can be hypothesized that their presence is more closely linked to human activities.

Moreover, although the measured concentrations for the elements of possible anthropogenic origin are well below the limits set by air quality European legislation, the results presented in this report highlight the importance of continuing the monitoring activities to ensure the ongoing protection of the environment in the area surrounding MZS.

Keywords: Antarctic atmospheric particulate matter, trace metals, ICP-MS analysis, Mario Zucchelli Station in Antarctica.

INDICE

1. Introduzione.....	5
1.1 Monitoraggio ambientale in Antartide	5
1.2 Aspetti relativi alla normativa.....	6
2. Campionamento e analisi	6
2.1 Area di studio	6
2.2 Campionamento del particolato atmosferico	9
2.3 Preparazione dei campioni.....	9
2.4 Determinazioni analitiche	9
3. Risultati e Discussione	11
3.1 Presentazione dei dati	11
3.2 Elementi in traccia nel particolato atmosferico a MZS e Campo Icaro.....	20
4. Conclusioni	27
Riferimenti bibliografici	28
Appendice	29

1. Introduzione

1.1 Monitoraggio ambientale in Antartide

In questo report vengono presentati i risultati delle attività di monitoraggio ambientale condotte presso la Stazione Mario Zucchelli (MZS) in Antartide, riguardanti il campionamento e l'analisi del particolato atmosferico. Queste attività sono state svolte nel corso di quattro spedizioni consecutive (dalla 35^a alla 38^a). Ogni campagna è stata effettuata durante l'estate australe, che generalmente va da ottobre a febbraio, e i risultati si riferiscono alle estati australi tra il 2019 e il 2023. Le attività descritte hanno riguardato il campionamento di particolato atmosferico (PM10) e la determinazione del contenuto totale di elementi inorganici in traccia nel particolato stesso. Il materiale particolato è stato raccolto su filtri in fibra di quarzo impiegando campionatori ad alto volume a flusso costante, posizionati sia presso MZS sia in un sito, Campo Icaro, situato a circa 3 km a sud di MZS. Quest'ultimo sito è stato scelto perché non influenzato da attività antropiche e quindi è considerato un "bianco", vale a dire un sito analogo a quello di MZS, ma privo di sorgenti di emissione di origine antropica.

L'Unità Tecnica Antartide di ENEA, responsabile dell'attuazione del Programma di Ricerche italiano in Antartide (PNRA), ha avviato un piano di monitoraggio ambientale presso MZS fin dalla seconda campagna antartica nel 1986-87. Le attività sono poi proseguite e si sono ampliate nel corso delle successive spedizioni. Il monitoraggio ambientale è una delle azioni stabilite dal Protocollo per la Protezione Ambientale nel trattato Antartico, firmato a Madrid il 4 ottobre 1991 ed entrato in vigore il 18 gennaio 1998. Il Protocollo prevede, all'articolo 3, la necessità di un controllo regolare dei parametri ambientali per identificare tempestivamente eventuali effetti negativi sull'ambiente, consentendo così l'attuazione di opportune azioni di mitigazione. L'attività di monitoraggio della qualità dell'aria viene coordinata ogni anno dal servizio ambientale IAP dell'Unità Tecnica Antartide. Le analisi vengono condotte presso il C.R. ENEA-Casaccia nei laboratori TERPVS della Divisione IMPACT (Dipartimento SSPT).

I metalli pesanti sono considerati inquinanti primari perché vengono emessi direttamente in atmosfera, mantenendo inalterata la loro composizione chimica, e sono rintracciabili prevalentemente nel particolato aereo disperso. Le dimensioni e la composizione chimica delle particelle a cui questi metalli sono associati dipendono dalla sorgente di emissione, che può essere naturale o di origine antropica. Nell'area di MZS, la principale sorgente naturale è l'erosione eolica: polvere e/o strato superficiale di suolo sollevati dal suolo stesso ad opera degli agenti atmosferici o dalle attività antropiche. Un'altra sorgente naturale importante è rappresentata dall'aerosol marino che, come evidenziato in numerosi lavori scientifici, può contenere ioni Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , alcuni metalli (Truzzi et al. 2017) e sostanze derivanti dall'attività del fitoplancton, come l'acido metansolfonico (Udisti et al. 1999), o da alghe e batteri (Pongratz e Heumann, 1999). Inoltre, i vulcani Melbourne e Rittmann, entrambi con attività fumarolica e situati relativamente vicino a MZS, rappresentano possibili sorgenti naturali di emissione di particolato atmosferico. Tra le sorgenti di emissione non naturale, si devono considerare le emissioni generate dal funzionamento continuo dei generatori di corrente presenti a MZS durante tutta la spedizione, così come quelle derivanti dalla combustione di olii e carburanti impiegati dai mezzi di trasporto e per la movimentazione del materiale. Altre fonti sono il consumo degli pneumatici, il logorio delle parti meccaniche, e infine, le emissioni riconducibili alle attività di cantiere e di manutenzione di MZS. Una volta immessi in atmosfera, gli inquinanti sono soggetti a fenomeni di dispersione, trasporto, trasformazione chimica secondaria e deposizione, e le loro concentrazioni variano notevolmente in funzione anche dei processi meteorologici.

Determinare il contenuto degli elementi in traccia nel particolato atmosferico prelevato in una regione remota come l'Antartide rappresenta una sfida analitica significativa. È fondamentale prestare grande attenzione sia durante il campionamento, per evitare contaminazioni accidentali dei campioni, sia durante le procedure analitiche, per le quali occorre l'impiego di strumentazione di elevata sensibilità e accuratezza. Il monitoraggio ambientale e, in particolare, lo studio del particolato atmosferico campionato in Antartide rivestono un grande interesse scientifico, poiché la distanza dalle sorgenti di emissione continentali, quindi antropiche, rende questa regione un laboratorio naturale ideale per studiare i movimenti e le possibili trasformazioni degli elementi e dei loro composti in atmosfera e per valutare il trasporto a lungo raggio degli inquinanti atmosferici. In questo rapporto saranno discussi i risultati delle analisi del contenuto degli elementi in traccia nel particolato atmosferico antartico, con l'obiettivo di evidenziare eventuali tendenze delle concentrazioni nel corso degli anni.

1.2 Aspetti relativi alla normativa

La valutazione dello stato della qualità dell'aria ambiente è regolamentata dalle direttive europee 2008/50/CE e 2004/107/CE, e a livello italiano dal D.lgs. 155/2010, intitolato "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa" e sue successive modificazioni e integrazioni. Questo decreto regola i limiti di concentrazione in aria per biossido di zolfo (SO₂), biossido di azoto (NO₂), ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), particolato (PM₁₀ e PM_{2.5}), benzene (C₆H₆), ozono (O₃), oltre ai livelli nel particolato PM₁₀ di cadmio (Cd), nichel (Ni), arsenico (As), piombo (Pb) e benzo(a)pirene (BaP). Gli inquinanti atmosferici sono regolati attraverso diverse soglie, che variano in base al tipo di bersaglio da proteggere (salute umana, vegetazione, ecosistemi) e all'orizzonte temporale di riferimento (breve o lungo termine), come previsto dalla direttiva 2008/50/CE. Per quanto riguarda i metalli, il D.lgs. n. 155/2010 stabilisce un valore limite per Pb e valori obiettivo per As, Cd e Ni, calcolati come media su un anno civile. In particolare, i valori obiettivo sono di 6 ng/m³ per As, 5 ng/m³ per Cd e 20 ng/m³ per Ni, mentre il limite massimo per Pb è di 0,5 µg/m³.

2. Campionamento e analisi

2.1 Area di studio

La Stazione Mario Zucchelli è situata nell'area di Baia Terra Nova (74°42'S, 164°07'E), lungo la costa del Mare di Ross, a circa 15 metri sul livello del mare. La stazione è operativa da metà ottobre a metà febbraio, periodo durante il quale le temperature variano tra -25 °C e +5 °C. L'area è frequentemente soggetta a venti catabatici, forti e persistenti, che soffiano dal plateau verso est-sudest. In media, nella stazione sono ospitate circa 85 persone al giorno; tuttavia, durante le spedizioni 36 e 37 (2020/21 e 2021/22), condotte durante la pandemia da Covid-19, il numero medio di persone presenti è stato inferiore, rispettivamente 47 e 64 al giorno. La stazione è dotata di una centrale elettrica, di un impianto di cogenerazione, di un sistema di dissalazione dell'acqua di mare, di un inceneritore e di un depuratore delle acque di scarico. I rifiuti prodotti vengono differenziati e riportati in Italia, ad eccezione del materiale organico, della carta e dei fanghi del depuratore, che vengono smaltiti nell'inceneritore. I campioni sono stati prelevati da tre campionatori, posti ai tre punti cardinali (Nord, Est e Ovest) rispetto al centro della stazione, a circa 200 m di distanza (Figura 1). Per ottenere valori di riferimento

non influenzati dalle attività antropiche, è stato installato un quarto campionatore in località Campo Icaro, situata a circa 3 km a sud della stazione (Figura 2). Questa zona è la più remota fornita di elettricità, così da evitare l'utilizzo di generatori. Tuttavia, non si può escludere del tutto, anche per questo sito, la possibilità di contaminazione proveniente dalla stazione o causata dalla movimentazione di mezzi, soprattutto considerando che, in località Boulder Clay, a circa 4 km in linea d'aria da Campo Icaro, durante il periodo considerato è stata costruita una nuova pista di atterraggio per aeromobili, che ha comportato un ingente movimento di terra. Per servire la pista, è stata inoltre aperta una strada a circa 750 m da Campo Icaro.

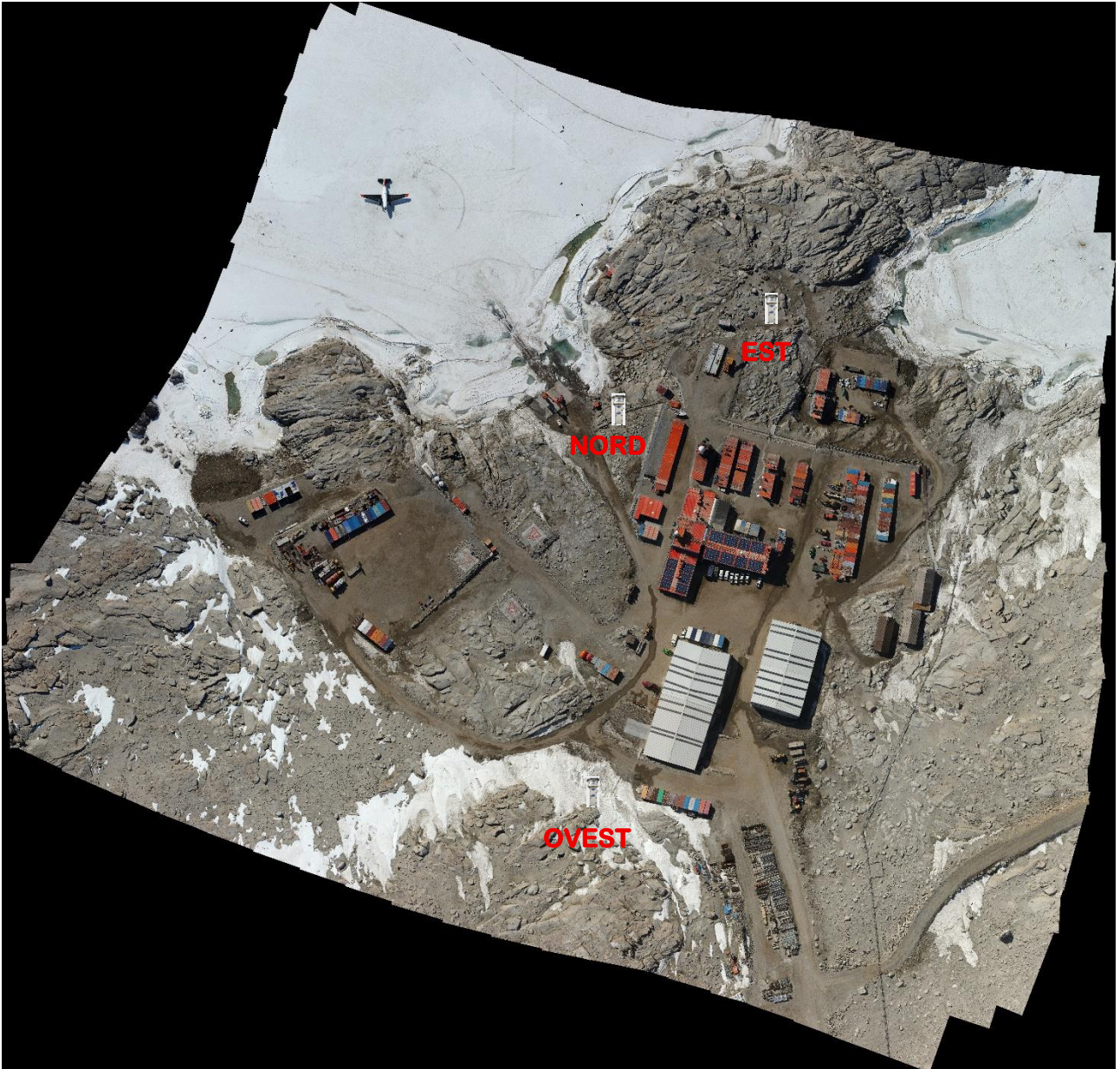


Fig. 1: Posizione campionatori PM10 a MZS

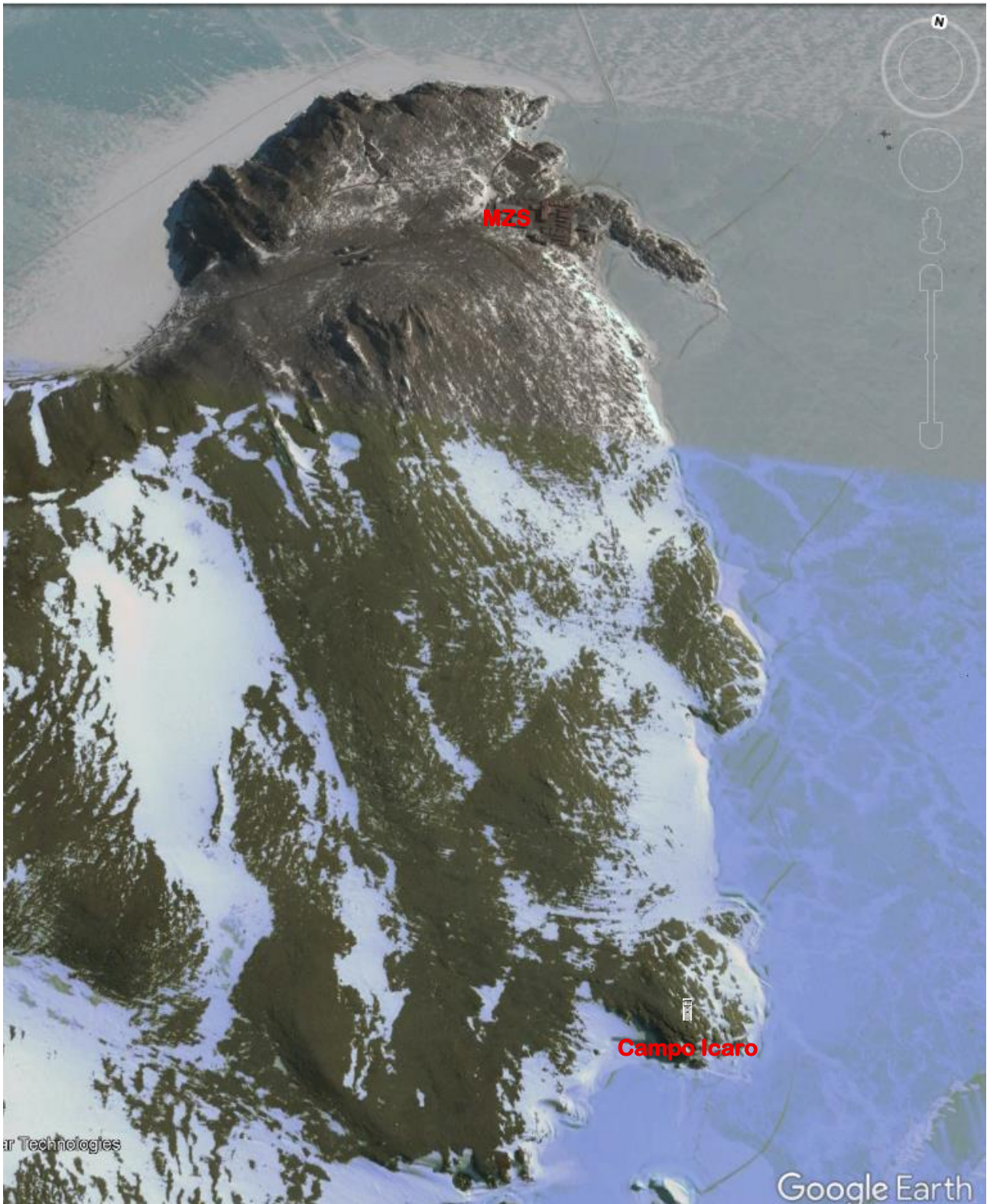


Fig. 2: Posizione campionatore PM10 a Campo Icaro

2.2 Campionamento del particolato atmosferico

I campioni di particolato atmosferico sono stati raccolti utilizzando campionatori ad alto volume (AIR FLOW PM-10-HVS) specifici per la frazione inalabile PM10. Questi dispositivi aspirano aria a una portata costante di circa 1,13 metri cubi al minuto. L'apparecchiatura impiegata è conforme ai requisiti della norma UNI-EN 12341 per il campionamento delle particelle di PM10.

I campionamenti sono stati effettuati a intervalli di 6 giorni per tutta la durata dei periodi di misura, in tutte le spedizioni considerate, risultando in circa 9-10 periodi di campionamento per ogni stagione. Il particolato atmosferico PM10 è stato raccolto su filtri in fibra di quarzo Whatman QM-A, di dimensioni 8 x 10 inches (20 x 25 cm). Al termine del campionamento i filtri sono stati collocati in capsule Petri, inseriti in sacchetti sigillati di polietilene e conservati a 4 °C prima di essere inviati in Italia per le analisi. In Italia, i campioni di PM10 sono stati analizzati per il contenuto di idrocarburi policiclici aromatici (IPA) (non oggetto di questo rapporto tecnico) e di metalli pesanti.

2.3 Preparazione dei campioni

Tutto il materiale di laboratorio in plastica e in vetro, prima dell'uso, è stato immerso per 24 ore in acido nitrico ultrapuro al 15% (v/v) e successivamente lavato più volte con acqua Milli-Q. Dai filtri in fibra di quarzo, utilizzando una fustella in teflon, sono state prelevate due aliquote di campione del diametro di 5,3 cm. Questi campioni sono stati solubilizzati tramite un processo di digestione acida assistita dalle microonde. Ai due dischi, posti direttamente nei vessel in Teflon di un sistema a microonde (Ethos Easy, Milestone, FKV), sono stati aggiunti 8 mL di acido nitrico ultrapuro al 60% e 2 mL di perossido di idrogeno al 30%. Le soluzioni ottenute dopo il trattamento in microonde sono state trasferite quantitativamente in matracci tarati, portate al volume finale con acqua ultrapura e conservate a 4 °C fino al momento delle analisi. I filtri bianchi di campo sono stati analizzati seguendo la stessa procedura descritta per i filtri dei campioni, così come sono stati sempre valutati i bianchi di procedura.

2.4 Determinazioni analitiche

Durante le campagne di monitoraggio condotte nelle spedizioni descritte in questo report, sono stati determinati nel PM10 i seguenti elementi: As, Ba, Be (solo nella 35^a e 36^a spedizione) Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, U, V e Zn.

La misura delle concentrazioni degli elementi in traccia nei campioni di particolato atmosferico è stata effettuata mediante ICP-MS Agilent 7800 con cella di collisione a He.

Le soluzioni dei campioni sono state opportunamente diluite con 1% HNO₃. Le soluzioni standard di calibrazione, per le rette di taratura di ciascun elemento analizzato, sono state preparate per diluizione di una soluzione standard multielemento. Durante le analisi, è stata impiegata una soluzione mix di standard interni (Bi, Ge, In, ⁶Li, Sc, Tb, and Y in HNO₃ 5%,) per correggere eventuali variazioni della risposta strumentale nel corso delle misure.

Le concentrazioni di ciascun elemento nel particolato sono state corrette per i corrispondenti valori misurati nei filtri bianchi di campo.

I valori di PDL (*Practical Detection Limit*), che rappresentano il limite di rivelabilità dell'intera procedura analitica, sono stati calcolati per ciascun elemento impiegando la seguente formula:

$$PDL = \frac{IDL \times D \times V}{m^3}$$

dove:

IDL (*Instrumental Detection Limit*) è pari a 3 volte la deviazione standard delle letture di dieci bianchi di procedura,

D è il fattore di diluizione impiegato (pari a 10),

V è il volume finale della soluzione ottenuta dalla dissoluzione del campione,

m³ indica la media dei metri cubi di aria campionata.

Per valutare accuratezza e ripetibilità delle misure condotte in ICP-MS, insieme ai campioni è stato analizzato il materiale standard di riferimento 1648a - Urban Particulate Matter NIST Standard Reference Material, impiegando la stessa procedura di dissoluzione dei filtri descritta in precedenza. Le misure ripetute (quattro repliche) sul materiale di riferimento hanno fornito i valori medi ± deviazione standard mostrati in Tabella A: questi dati sono stati confrontati con i valori medi certificati ± 95% livello di confidenza (Tabella A). I risultati ottenuti sono in buon accordo con i valori di riferimento certificati, entro gli errori sperimentali, mostrando una buona accuratezza delle misure. I valori di recupero variano dal 63% per Cr al 106% per As.

Elementi	Valore medio (mg/kg)	St. dev (mg/kg)	Valore certificato (mg/kg)
V	105	6	127 ± 11
Cr	254	18	402 ± 13
Mn	749	42	790 ± 44
Ni	72,9	11,9	81,1 ± 6,8
Cu	616	10	610 ± 70
Zn	4221	217	4800 ± 270
As	122,6	4,1	115,5 ± 3,9
Cd	65	1,7	73,7 ± 2,3
	Valore medio (%)	St dev (%)	Certificato (%)
Pb	0,624	0,018	0,655 ± 0,033
Fe	3,24	0,10	3,92 ± 0,2

Tab. A: Confronto tra i valori certificati e i valori medi determinati (numero di repliche, n=4) con le relative deviazioni standard per il materiale standard di riferimento NIST 1648a

3. Risultati e Discussione

3.1 Presentazione dei dati

Nelle Tabelle da 1 a 4, da 5 a 8, da 9 a 12 e da 13 a 16, riportate in Appendice, sono presentati i dati relativi alle concentrazioni degli elementi nel particolato atmosferico raccolto sui filtri in fibra di quarzo dai campionatori Nord, Est e Ovest presso MZS, nonché a Campo Icaro, rispettivamente, nel corso delle quattro spedizioni considerate.

Nelle Tabelle 1a, 2a, 3a e 4a, che seguono, sono invece illustrate le concentrazioni medie degli elementi, le deviazioni standard, i valori minimo e massimo, gli intervalli di concentrazione, il numero (N) di filtri in fibra di quarzo analizzati in ciascuna campagna e i valori di PDL per ciascun elemento, determinati nel particolato campionato ai campionatori Nord, Est, Ovest della stazione MZS e di Campo Icaro, nel corso delle quattro spedizioni oggetto di questo studio.

NORD	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
	<i>pg/m³</i>													<i>ng/m³</i>			
Media	2,71	166	102	1804	40,9	117	397	26,0	924	0,77	458	78,0	3,29	51,0	30,3	14,8	108
35a Dev. stand	1,45	147	89,8	1106	29,7	72,5	320	19,3	904	0,71	872	44,1	3,18	25,3	23,7	10,5	90,8
N=10 Min	<PDL	16,0	<PDL	208	9,70	<PDL	127	7,01	<PDL	<PDL	<PDL	25,4	<PDL	18,8	<PDL	5,27	12,0
Max	6,83	499	339	3991	106	232	1178	63,2	2438	2,11	2924	162	11,1	93,1	82,1	41,6	322
Range	4,6	483	276	3783	96,3	197	1051	56,2	2500	1,70	2790	137	10,7	74,5	76,0	36,3	310
PDL	4,50	1,90	127	33,0	2,20	70,0	23,0	1,00	22,0	0,86	266	8,10	0,87	17,5	12,0	0,22	0,70
Media	ND	244	ND	2497	57,0	97,7	1203	21,6	2862	3,10	634	73,2	4,98	73,3	45,8	15,8	175
36a Dev. stand	ND	231	ND	2123	47,5	97,2	1777	13,4	2799	2,45	739	29,5	6,25	42,0	47,2	12,1	172
N=9 Min	<PDL	67,0	<PDL	615	24,9	<PDL	409	7,21	917	<PDL	<PDL	52,0	<PDL	38,8	15,2	6,65	41,9
Max	10,1	831	518	6983	179	338	5909	48,5	9829	6,79	2401	143	21,1	180	167	45,6	611
Range	7,95	764	457	6368	154	304	5500	41,3	8912	6,00	2273	91	20,3	141	152	39,1	569
PDL	4,33	1,79	123	31,7	2,15	67,4	22,3	3,03	21,2	1,48	257	7,79	1,61	17	12	0,21	0,70
Media	-	262	200	2566	61,6	247	650	31,8	1066	3,37	2876	103	7,58	105	66,0	12,3	191
37a Dev. stand	-	299	171	2302	61,9	231	385	18,0	1049	2,37	4167	74,5	9,51	75,2	58,0	12,0	207
N=9 Min	-	17,6	<PDL	589	7,12	32,3	276	11,9	170	1,37	<PDL	33,5	<PDL	22,4	93,1	3,00	30,9
Max	-	861	542	7230	187	715	1463	57,3	3391	7,99	13392	246	27,2	231	184	41,0	608

Range	-	843	522	6641	180	683	1187	45,4	3221	6,62	13087	212	26,9	209	91	38,0	577
PDL	-	1,31	41,0	43,7	2,38	11,0	19,3	1,18	15,7	0,48	610	17,8	0,57	1,30	2,43	0,14	0,23
Media	-	194	207	1741	46,1	203	544	29,4	830	8,43	723	140	5,06	64,0	40,7	6,11	122
38a Dev. stand	-	199	118	1404	37,1	146	330	9,09	613	6,26	544	77,6	4,80	25,4	28,7	4,05	122
N=8 Min	-	25,7	78,3	313	9,88	46,8	225	16,2	277	0,81	174	45,5	0,81	35,0	9,47	2,08	16,1
Max	-	645	432	4693	130	516	1320	40,4	1974	19,5	1890	287	15,4	112	102	14,8	396
Range	-	619	354	4380	120	469	1095	24,2	1697	18,7	1716	242	14,6	77,0	92,5	12,7	380
PDL	-	1,62	27,6	21,1	1,62	16,2	24,4	1,46	18,9	1,62	114	4,87	1,62	2,11	3,12	0,12	0,34

Tab 1a.: Concentrazione media degli elementi, deviazione standard, valore minimo e massimo, range di concentrazione determinati nel particolato campionato al campionario Nord della base MZS nel corso di ciascuna delle quattro spedizioni considerate; valori di PDL (*Practical/Detection Limit*) di ciascun elemento analizzato in ogni singola campagna di monitoraggio. Tutti i valori sono espressi in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e, per gli elementi Mg, K, Zn e Fe, in ng/m^3 . N = numero di filtri in quarzo analizzati nelle quattro spedizioni considerate.

EST	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
	<i>pg/m³</i>													<i>ng/m³</i>			
	3,33	186	145	1640	42,6	101	417	13,2	170	1,79	627	63,3	3,98	54,7	35,2	8,66	108
35a	2,72	266	175	2153	58,8	105	458	9,26	186	1,87	1324	66,7	5,86	47,6	44,7	10,8	163
N=10	2,25	5,55	<PDL	60,0	<PDL	<PDL	71,0	4,93	<PDL	<PDL	<PDL	13,0	<PDL	19,4	<PDL	0,460	3,00
	10,8	874	618	6832	195	349	1603	36,4	534	6,14	4376	191	18,9	172,1	144	34,7	539
	8,60	869	554	6772	194	314	1532	31,5	533	603	4376	178	14,9	153	138	34,3	536
	4,50	1,90	127	33,0	2,2	70,0	23,0	1,0	22,0	0,86	266	8,10	0,87	17,5	12,0	0,22	0,70
	ND	197	ND	1734	45,7	ND	529	16,6	1571	3,42	499	62,6	4,35	60,8	34,8	8,77	145
36a	ND	251	ND	2050	56,2	ND	491	13,5	1383	4,92	669	52,5	6,32	54,2	48,5	7,85	187
N=9	<PDL	33,9	<PDL	329	6,53	<PDL	<PDL	<PDL	233	<PDL	<PDL	7,86	<PDL	<PDL	<PDL	1,53	25,9
	9,19	688	431	5677	152	252	1425	37,0	4006	15,6	1882	153	16,7	157	127	22,6	512
	7,0	654	369	5348	145	218	1414	35,0	3773	14,9	1754	145	15,9	149	121	21,1	486
	4,33	1,79	123	31,7	2,15	67,4	22,3	3,03	21,2	1,48	257	7,79	1,61	16,9	11,5	0,21	0,68
	-	194	177	2031	52,2	102	1308	19,6	888	3,17	ND	118	5,52	100	63,1	8,77	134
37a	-	324	302	3016	82,7	167	2746	14,9	927	3,26	ND	196	9,86	84,8	75,9	7,41	251
N=9	-	15,6	<PDL	177	6,89	<PDL	90,9	2,97	97,9	0,69	<PDL	23,6	<PDL	21,8	17,8	3,04	7,66
	-	1019	953	9616	261	523	8612	50,9	2968	11,4	3104	634	30,4	297	249	25,0	781

Range	-	1003	74,8	9439	254	517	8521	48,0	2870	10,7	2799	610	30,1	275	231	22,0	773
PDL	-	1,31	41,0	43,7	2,38	11,0	19,3	1,18	15,7	0,48	610	17,8	0,57	1,3	2,43	0,14	0,23
Media	-	265	233	1947	52,8	126	3551	46,8	1125	35,3	894	211	6,67	81,4	52,8	7,09	160
38a Dev. stand	-	464	379	3209	90,2	162	7619	74,4	2613	59,0	1418	393	11,1	75,4	77,0	14,2	278
N=8 Min	-	17,0	11,2	132	4,42	26,9	175	3,86	6,40	0,81	1,82	27,6	0,81	33,7	9,78	0,217	8,77
Max	-	1362	1128	9472	266	507	22276	225	7570	166	4224	1172	32,6	255	234	42,1	816
Range	-	1348	1117	9340	262	480	22101	221	7564	165	4222	1144	31,8	221	224	41,9	807
PDL	-	1,62	27,6	21,1	1,62	16,2	24,4	1,46	18,9	1,62	114	4,87	1,62	2,11	3,12	0,12	0,34

Tab 2a.: Concentrazione media degli elementi, deviazione standard, valore minimo e massimo, range di concentrazione determinati nel particolato campionato al campionatore Est della base MZS nel corso di ciascuna delle quattro spedizioni considerate; valori di PDL (*Practical Detection Limit*) di ciascun elemento analizzato in ogni singola campagna di monitoraggio. Tutti i valori sono espressi in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e, per gli elementi Mg, K, Zn e Fe, in ng/m^3 . N = numero di filtri in quarzo analizzati nelle quattro spedizioni considerate.

OVEST	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
	<i>pg/m³</i>													<i>ng/m³</i>			
Media	4,76	336	263	2457	69,4	180	305	22,9	17,2	1,36	489	65,7	6,63	80,4	56,9	3,50	220
35a Dev. stand	7,92	724	557	4380	147	285	529	24,7	14,3	1,23	624	98,4	14,9	151	120	3,42	486
N=10 Min	<PDL	15,0	<PDL	174	4,37	<PDL	49,0	4,00	<PDL	<PDL	<PDL	16,3	<PDL	<PDL	<PDL	0,451	11,0
Max	27,3	2384	1843	14776	485	966	1799	85,6	54,6	4,03	2047	344	48,9	509	398	10,9	1596
Range	25,0	2369	1780	14602	481	931	1750	82,0	44,0	3,60	1914	328	48,5	500	392	10,5	1585
PDL	4,50	1,90	127	33	2,2	70,0	23,0	1,0	22,0	0,86	266	8,10	0,87	17,5	12,0	0,22	0,70
Media	ND	204	ND	1732	46,5	108	230	14,2	59,0	4,80	425	50,4	4,99	56,6	38,8	1,68	101
36a Dev. stand	ND	78,3	ND	670	15,5	120	74,7	3,33	27,6	5,81	237	11,8	2,57	15,1	14,5	0,817	50,2
N=9 Min	<PDL	135	<PDL	945	29,1	<PDL	108	8,83	15,2	<PDL	<PDL	31,5	1,78	38,2	20,4	0,736	26,2
Max	6,66	378	286	2958	80,7	386	335	19,1	94,6	18,3	835	65,8	9,33	85,1	69,5	3,03	157
Range	4,50	243	225	2013	51,6	352	227	10,3	79,4	17,6	707	34,3	7,55	46,9	49,1	2,29	131
PDL	4,33	1,79	123	31,7	2,15	67,4	22,3	3,03	21,2	1,48	257	7,79	1,61	16,9	11,5	0,22	0,70
Media	-	122	121	1311	27,6	116	276	17,7	95,4	1,80	ND	57,4	4,13	56,6	33,6	7,47	86,2
37a Dev. stand	-	83,3	50,3	784	16,2	89,5	152	10,8	81,7	1,23	ND	59,3	5,01	22,1	15,1	12,1	54,4
N=9 Min	-	29,5	41,7	469	12,6	13,8	95,0	7,07	19,8	0,68	<PDL	19,8	<PDL	24,1	12,6	0,500	17,2
Max	-	288	200	2689	60,7	329	601	40,8	278	4,56	1338	211	16,5	95,2	60,6	33,1	187

Range	-	259	158	2220	48,1	315	506	33,7	258	455	1033	191	16,2	71,0	48,0	33,0	170
PDL	-	1,31	41,0	43,7	2,38	11,0	19,3	1,18	15,7	0,48	610	17,8	0,57	1,3	2,43	0,14	0,23
Media	-	196	206	1703	42,9	116	310	18,0	37,2	6,49	724	63,6	4,54	55,6	37,6	3,73	121
38a Dev. stand	-	89,9	189	805	16,7	53,8	83,4	7,38	38,8	12,0	318	18,5	2,33	14,6	14,5	4,85	59,1
N=8 Min	-	49,6	52,9	909	27,6	72,5	175	12,1	3,02	0,81	431	39,4	0,81	28,8	9,44	0,433	35,7
Max	-	337	613	2870	69,8	213	409	32,4	124	35,7	1212	87,6	8,45	68,5	56,8	15,2	219
Range	-	287	560	1961	42,2	141	234	20,3	121	35,0	781	48,2	7,64	39,7	47,4	14,8	183
PDL	-	1,62	27,6	21,1	1,62	16,2	24,4	1,46	18,9	1,62	114	4,87	1,62	2,11	3,12	0,12	0,34

Tab 3a.: Concentrazione media degli elementi, deviazione standard, valore minimo e massimo, range di concentrazione determinati nel particolato campionato al campionatore Ovest della base MZS nel corso di ciascuna delle quattro spedizioni considerate; valori di PDL (*Practical/Detection Limit*) di ciascun elemento analizzato in ogni singola campagna di monitoraggio. Tutti i valori sono espressi in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e, per gli elementi Mg, K, Zn e Fe, in ng/m^3 . N = numero di filtri in quarzo analizzati nelle quattro spedizioni considerate.

Campo Icaro	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
	<i>pg/m³</i>													<i>ng/m³</i>			
	Media	ND	32,9	ND	330	7,40	ND	155	4,59	ND	ND	19,3	0,87	21,5	10,8	0,163	19,7
35a	Dev. stand	ND	28,4	ND	270	6,16	ND	137	1,02	ND	ND	7,94	0,57	12,6	5,18	0,113	16,5
N=10	Min	<4,50	6,04	<127	66,0	<2,20	<70,0	<23,0	2,82	<22,0	<0,86	<8,10	<0,87	<17,5	<12,0	<0,217	2,00
	Max	<4,50	83,2	<127	812	18,0	<70,0	399	6,00	<22,0	<0,86	28,7	1,80	40,6	17,4	0,388	46,0
	range	-	77,2	-	746	16,9	-	387	3,20	-	-	24,7	1,36	31,9	11,4	0,280	44,0
	Media	ND	19,5	ND	208	5,45	ND	341	4,20	24,9	ND	29,4	ND	25,7	ND	0,585	8,79
36a	Dev. stand.	ND	14,3	ND	156	3,44	ND	198	2,32	12,6	ND	14,0	ND	18,6	ND	0,410	4,57
N=7	Min	<4,33	9,69	<123	99,0	2,37	<67,4	137	<3,03	<21,2	<1,48	14,2	<1,61	<16,9	<11,5	<0,209	1,52
	Max	<4,33	49,7	138	548	13,0	233	570	7,78	46,6	<257	45,2	<1,61	60,4	<11,5	1,19	14,2
	range	-	40,0	76,5	449	10,6	199	433	6,27	36,0	-	31,0	-	51,9	-	1,08	12,7
	Media	-	29,0	ND	298	7,67	35,0	343	5,51	<15,7	1,82	41,9	ND	45,8	17,5	0,483	18,8
37a	Dev. stand	-	29,2	ND	333	7,11	35,4	245	3,07	ND	1,31	26,8	ND	23,0	8,78	0,239	19,7
N=8	Min	-	8,18	<41,0	51,2	2,65	<11,0	70,7	<1,18	<15,7	<0,48	<17,8	<0,57	22,3	10,1	0,172	5,32
	Max	-	92,4	46,9	953	22,8	106	697	9,61	43,8	3,77	95,2	3,33	83,8	33,9	0,843	60,0

range	-	84,2	26,4	902	20,2	100	626	9,00	35,9	3,53	765	86,0	3,10	61,5	23,7	0,671	54,7
Media	-	22,1	134	436	5,70	68,5	401	5,14	ND	4,00	ND	64,4	ND	31,1	8,57	0,396	12,8
38a Dev. stand.	-	18,2	145	402	4,24	39,5	353	2,58	ND	3,78	ND	51,4	ND	19,3	6,38	0,329	11,5
N=8 Min	-	9,25	<27,6	114	2,32	<16,2	65,9	2,49	ND	0,81	ND	27,8	ND	6,22	1,56	0,117	3,27
Max	-	65,9	409	1059	15,4	119	1119	8,97	ND	9,00	ND	184	ND	61,4	16,2	1,11	39,6
range	-	56,7	395	945	13,1	111	1053	6,48	ND	8,20	424	156	ND	55,2	14,6	0,989	36,3

Tab. 4a.: Concentrazioni medie degli elementi, deviazione standard, valore minimo e massimo e range di concentrazione per ciascun elemento analizzato nel particolato campionato a Campo Icaro in ogni singola campagna di monitoraggio considerata. Tutti i valori sono espressi in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e, per gli elementi Mg, K, Zn e Fe, in ng/m^3 . N = numero di filtri in quarzo analizzati nelle quattro spedizioni considerate.

3.2 Elementi in traccia nel particolato atmosferico a MZS e Campo Icaro

Nei grafici seguenti sono illustrate le concentrazioni medie di alcuni elementi, determinate nel particolato atmosferico campionato nei campionatori installati a MZS e a Campo Icaro durante le singole spedizioni considerate. Le concentrazioni medie degli elementi che risultavano inferiori ai corrispondenti valori di PDL sono state sostituite con il valore di $\frac{1}{2}$ PDL, per poterle rappresentare graficamente.

Nel grafico di Figura 3 è mostrato il contenuto medio di Pb, espresso in pg/m^3 , misurato nel particolato atmosferico campionato nei diversi campionatori posizionati intorno alla stazione e nel campionario di Campo Icaro durante ciascuna spedizione. Dai risultati mostrati nel grafico si nota un aumento significativo dei valori medi di concentrazione di Pb nel corso delle diverse spedizioni. Questo incremento è stato osservato in tutti i campionatori di MZS e nel particolato prelevato a Campo Icaro, sito distante dalla stazione e dalle attività svolte in loco.

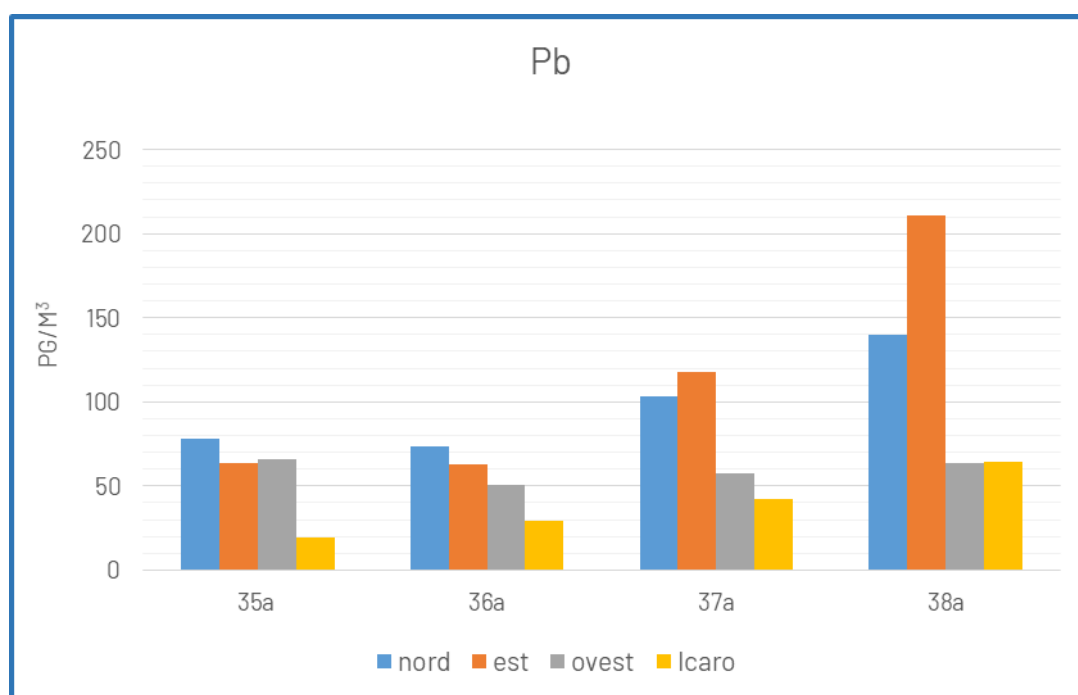


Fig. 3: Concentrazione media (pg/m^3) di Pb determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionario di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

Un andamento simile a quello riscontrato per Pb si osserva anche per Ni (Figura 4).

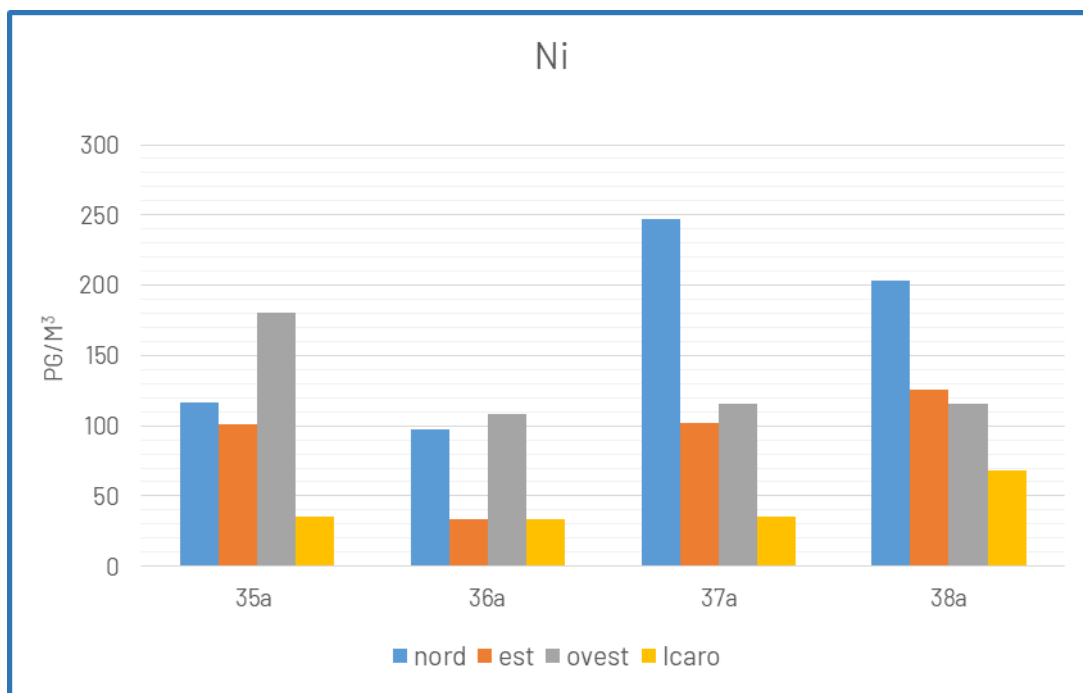


Fig. 4: Concentrazione media (pg/m³) di Ni determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionario di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

Per quanto riguarda questo elemento, nelle ultime due spedizioni, la 37^a e la 38^a, sono stati rilevati valori di concentrazione media più elevati nel particolato campionato dal campionario Nord. Inoltre, durante la 38^a spedizione, nel particolato di Campo Icaro sono stati analizzati contenuti medi di Ni più elevati rispetto a quelli misurati nelle spedizioni precedenti.

Nel grafico di Figura 5 sono riportate le concentrazioni medie di Cr misurate nel particolato campionato nel corso delle spedizioni considerate.

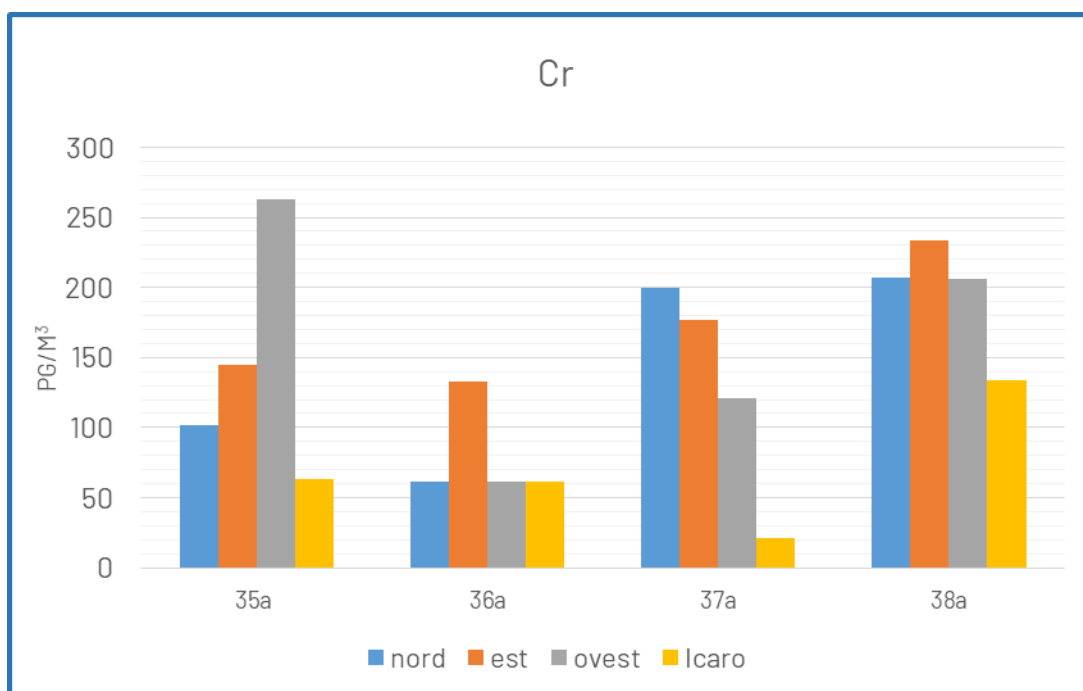


Fig. 5: Concentrazione media (pg/m³) di Cr determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionario di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

Nelle ultime due spedizioni sono stati determinati valori più elevati del contenuto medio di Cr nel PM10 raccolto sui filtri dei tre campionatori a MZS. Inoltre, il particolato atmosferico campionato dal campionatore di Campo Icaro nell'ultima spedizione mostra una concentrazione media di Cr molto più elevata rispetto quella rilevata nelle spedizioni precedenti.

In Figura 6 è illustrato il grafico di Cu. Si osserva un aumento significativo della concentrazione media nel particolato atmosferico campionato dal campionatore Est durante la 38^a spedizione. Tuttavia, esaminando i singoli valori di concentrazione degli elementi misurati sui filtri di quarzo di quella spedizione (Tabelle 13, 14 e 15 in appendice), si osserva che il particolato raccolto sul filtro di quarzo n. 1 del campionatore Est (Tabella 14, in appendice), presenta, per la maggior parte degli elementi, valori di concentrazione più elevati rispetto a quelli misurati, per gli stessi elementi, sugli altri filtri di quarzo prelevati dallo stesso campionatore nel corso della 38^a spedizione. È possibile che ad inizio campagna ci sia stata qualche attività, svolta in prossimità del campionatore Est, che abbia causato questi valori molto elevati per la maggior parte degli elementi, tra cui Cu.

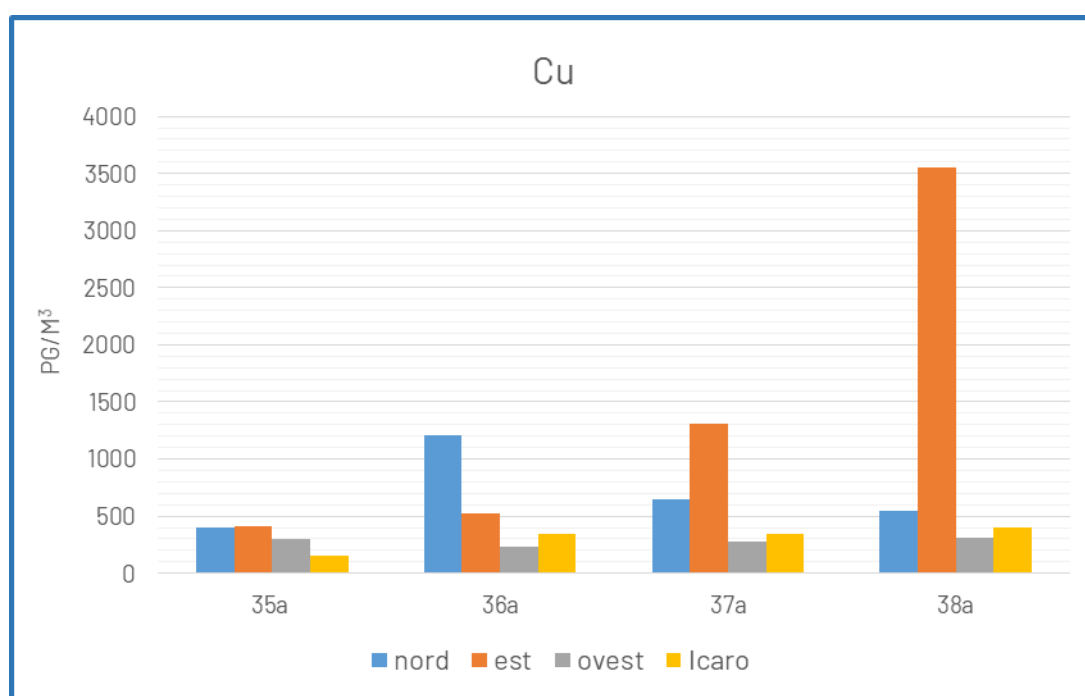


Fig. 6: Concentrazione media (pg/m³) di Cu determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionatore di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

Nei grafici seguenti è mostrata la concentrazione media di As (Figura 7), determinata nel particolato raccolto dai tre campionatori a MZS e da quello di Campo Icaro nelle quattro campagne analizzate. Si osserva che la concentrazione media di As nel particolato campionato dal campionatore Est aumenta progressivamente dalla prima spedizione considerata, la 35^a, fino all'ultima, la 38^a. Al contrario, il contenuto medio di As misurato sui filtri degli altri campionatori e a Campo Icaro rimane mediamente invariato nel corso delle diverse campagne di monitoraggio.

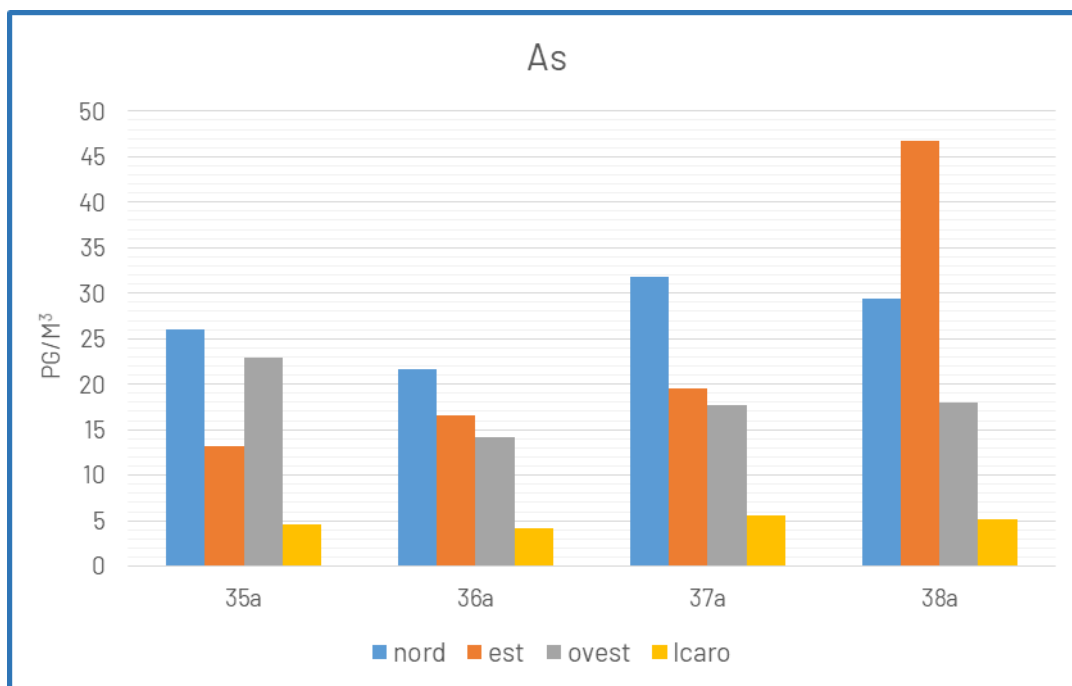


Fig. 7: Concentrazione media (pg/m³) di As determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionario di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

Anche il contenuto medio di Cd (Figura 8) aumenta in misura significativa al susseguirsi delle spedizioni, e ciò avviene per il particolato campionato da tutti i campionatori, compreso quello di Campo Icaro.

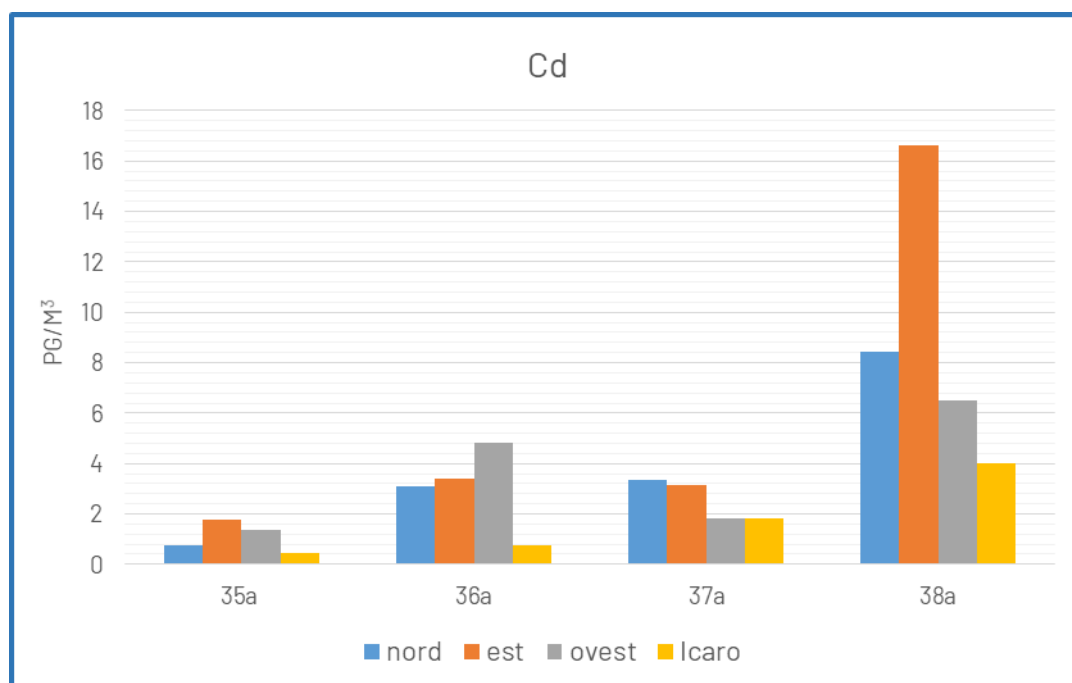


Fig. 8: Concentrazione media (pg/m³) di Cd determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionario di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

Le concentrazioni medie particolarmente elevate di As e Cd rilevate nel particolato atmosferico campionato dal campionario Est durante la 38^a spedizione sono principalmente attribuibili ad alcuni

campioni specifici, caratterizzati da valori di concentrazione molto elevati per questi due elementi. In particolare, il filtro n. 6 mostra un livello elevato di As, mentre il filtro n. 4 evidenzia un valore elevato di Cd (Tabella 14 in Appendice).

D'altra parte, ci sono alcuni elementi per i quali i valori medi di concentrazione nel particolato prelevato nel corso delle quattro campagne analizzate non mostrano variazioni significative da una spedizione all'altra. In particolare, il contenuto medio di Co (Figura 9), V (Figura 10), Fe (Figura 11) e Mn (Figura 12), misurato nel particolato raccolto dai tre campionatori e sui filtri del campionatore di Campo Icaro, rimane pressoché invariato nel tempo. Questo comportamento suggerisce che la presenza di questi elementi nel particolato ha probabilmente un'origine naturale (terrigena), legata alla conformazione geologica del sito e alla tipologia delle rocce presenti. In altre parole, la loro presenza è dovuta al materiale derivante dal suolo e dalle rocce che si depositano sui filtri, riflettendo così le caratteristiche geologiche dell'area.

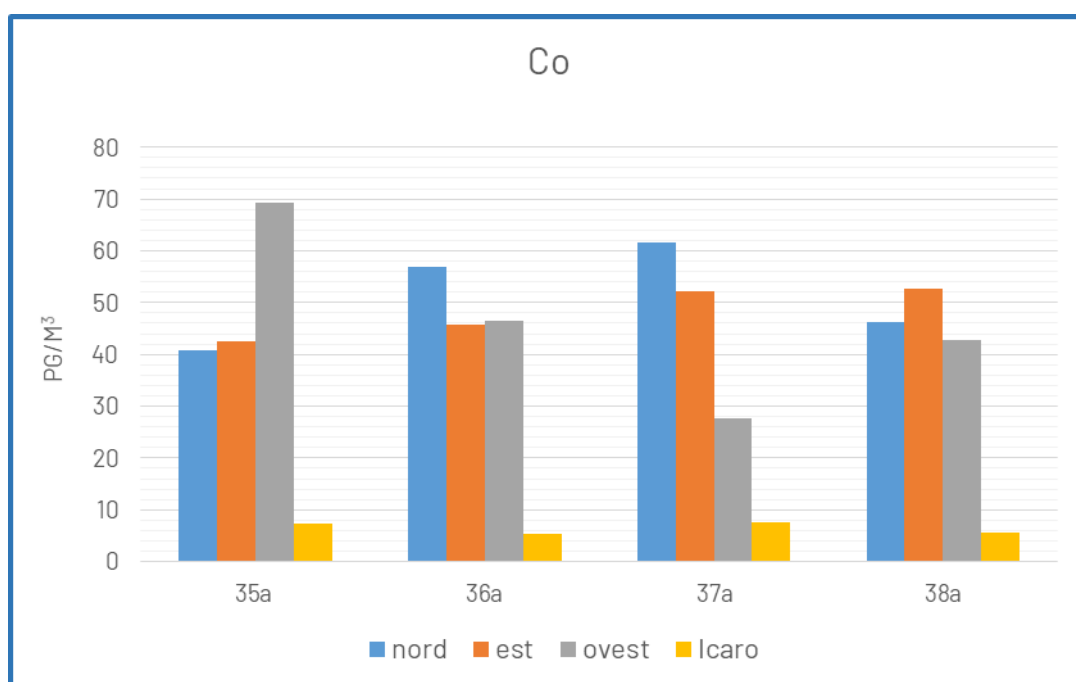


Fig. 9: Concentrazione media (pg/m³) di Co determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionatore di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

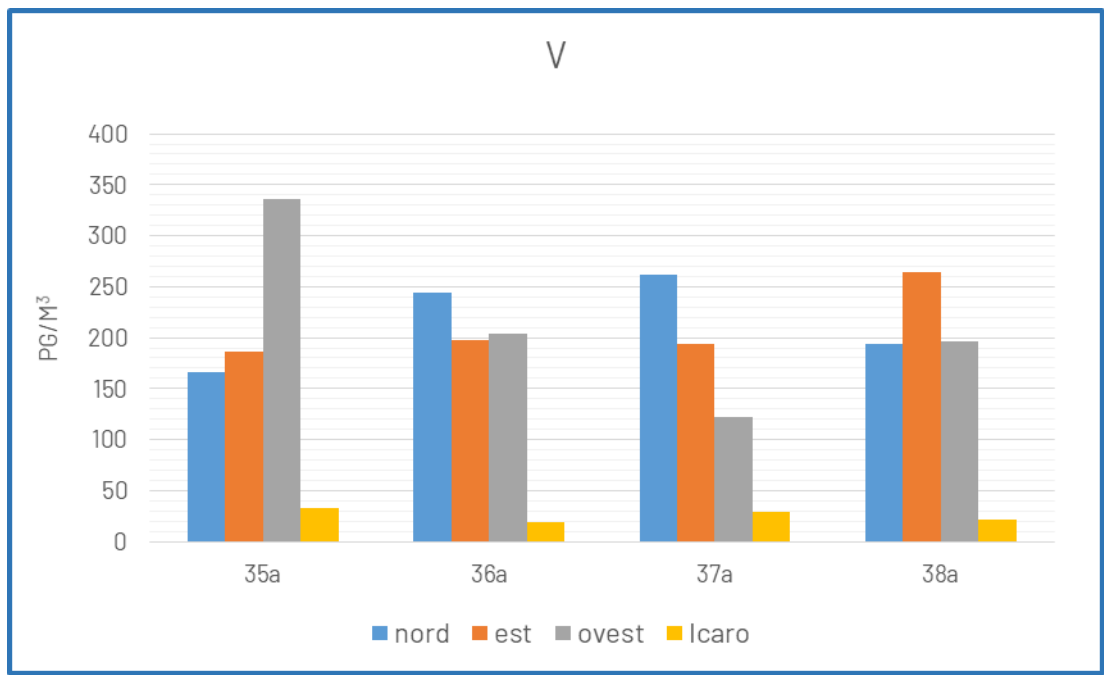


Fig. 10: Concentrazione media (pg/m³) di V determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionario di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

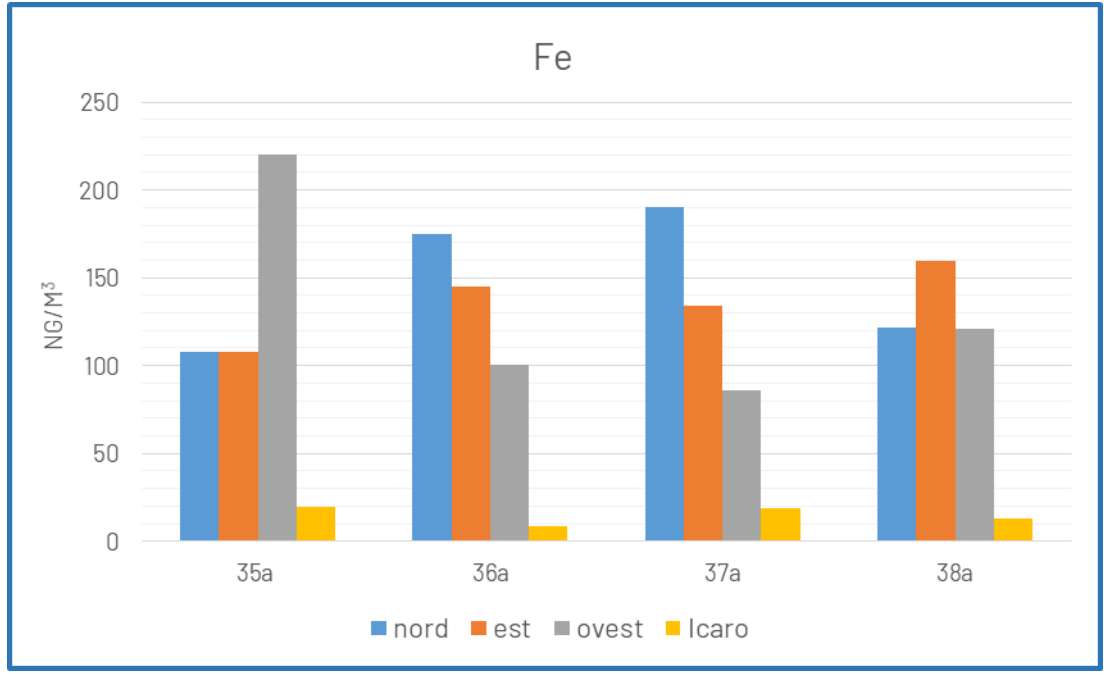


Fig. 11: Concentrazione media (ng/m³) di Fe determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionario di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

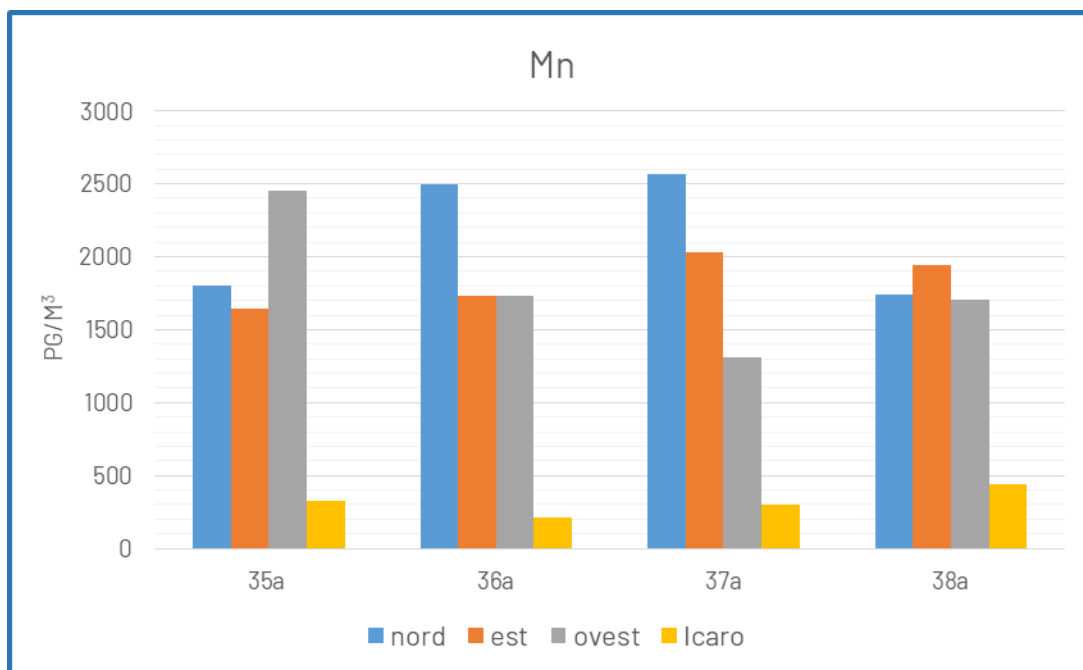


Fig. 12: Concentrazione media (pg/m³) di Mn determinata nel particolato atmosferico campionato dai tre campionatori a MZS e dal campionatore di Campo Icaro in ciascuna spedizione considerata.

Analizzando i risultati di questo studio, si nota che durante la 36^a spedizione, caratterizzata da restrizioni dovute alla pandemia da Covid-19 e quindi da un numero ridotto di persone ospitate presso la stazione MZS, le concentrazioni medie degli elementi nel materiale particolato campionato risultano generalmente più basse. In particolare, gli elementi come Pb, Ni, Cu, As, i cui livelli nel particolato atmosferico sono principalmente di origine antropica (Toscano et al. 2005), mostrano valori inferiori rispetto alle altre campagne considerate. Ciò suggerisce appunto una diminuzione delle emissioni derivanti dalle attività umane in quel periodo.

D'altra parte, non si osservano differenze significative nelle concentrazioni medie di elementi come Co, V, Fe, Mn tra la spedizione in pandemia e le altre campagne analizzate. Questi elementi sono presumibilmente di origine prevalentemente naturale, e i loro valori di concentrazione nel particolato durante la 36^a spedizione sono comparabili a quelli rilevati nelle altre campagne oggetto di questo studio.

Inoltre, si può osservare che, in generale, in tutte le spedizioni considerate, il particolato raccolto sui filtri del campionatore Est presenta valori di concentrazione più elevati degli elementi metallici rispetto a quello campionato dagli altri campionatori presso MZS; questa differenza è probabilmente attribuibile alla direzione del vento catabatico, che soffia da ovest verso est. Di conseguenza, il campionatore Est risulta più esposto al vento prevalente rispetto soprattutto al campionatore Ovest.

4. Conclusioni

I valori di concentrazione degli elementi analizzati nel particolato atmosferico campionato nel corso delle campagne antartiche descritte in questo report (35^a, 36^a, 37^a e 38^a spedizione) sono risultati sempre ben al di sotto dei valori limite e dei valori obiettivo previsti per alcuni metalli dalle normative sulla qualità dell'aria, a sottolineare che l'impatto della Stazione Mario Zucchelli (MZS) sull'ambiente antartico circostante è molto limitato. Come atteso, data la distanza di Campo Icaro da MZS e dalle attività che vi si svolgono, anche i risultati relativi al contenuto degli elementi metallici nel particolato campionato in questo sito sono generalmente inferiori rispetto a quelli misurati nel particolato campionato presso la base MZS. Tuttavia, in entrambi i siti monitorati, si osserva nel corso degli anni una tendenza a un aumento progressivo dei valori di concentrazione di elementi come Pb, Ni, Cd, Cr, Cu, As, la cui presenza nel particolato atmosferico è correlata alle attività umane.

I metalli presenti nel particolato possono avere origini diverse: alcuni derivano da processi geogenici, cioè dall'erosione naturale delle rocce, mentre altri sono di origine antropica, cioè risultano dalla risospensione dovuta all'utilizzo di macchinari e veicoli, alla manutenzione e alla costruzione di infrastrutture. Molti metalli nel particolato, quindi, provengono sia da materiali naturali sia da quelli risospesi a causa delle attività umane, spesso in momenti specifici, come durante l'accensione dell'inceneritore, l'atterraggio degli aerei, o la movimentazione dei mezzi da lavoro.

Anche il sito di Campo Icaro, pur remoto, sembra risentire delle attività di MZS e di quelle svolte nelle sue vicinanze, come ad esempio l'apertura di una strada percorsa regolarmente da mezzi pesanti diretti alla vicina aeropista di recente costruzione. Nei prossimi anni a MZS sono previsti diversi lavori di ristrutturazione, tra cui la sostituzione dei generatori di energia, che rappresentano una delle principali fonti di emissione di particolato in atmosfera. Questi generatori, ormai in uso da parecchi anni, saranno sostituiti con modelli di nuova generazione, più efficienti e sostenibili dal punto di vista ambientale. Sarà quindi molto interessante valutare e confrontare il contenuto dei metalli nel particolato atmosferico che verrà campionato presso MZS dopo questi interventi di ammodernamento.

Alla luce di quanto finora osservato ed esposto in questo rapporto, si sottolinea l'importanza e la necessità di proseguire in futuro con le attività di monitoraggio ambientale, che rappresentano uno strumento fondamentale per il controllo e tutela dell'area antartica che ospita la stazione MZS.

Riferimenti bibliografici

Truzzi, C., Annibaldi, A., Illuminati, S., Mantini, C., Scarponi, G., Chemical fractionation by extraction of Cd, Pb, and Cu in Antarctic atmospheric particulate for the characterization of aerosol composition, sources, and summer evolution at Terra Nova Bay. *Victoria Land Air Qual. Atmos. Health* (2017), 10, 783-798

Udisti, R., Becagli, S., Castella, E., Travers, R., Vermigli, S., Piccardi, G., Sea-spray and marine biogenic seasonal contribution to snow composition at Terra Nova Bay. *Antarctica. Annals of Glaciology* (1999), 29, 77-83 - doi: 10.3189/172756499781820923

Pongratz, R., Heumann, K.G., Production of methylated mercury, lead and cadmium by marine bacteria as a significant natural source for atmospheric heavy metals in Polar Regions. *Chemosphere* (1999), 39, 89-102

Toscano, G., Gambaro, A., Moret, L., Capodaglio, G., Turetta, C., Cescon, P., Trace metals in aerosol at Terra Nova Bay. *Antartica. J. Environm. Monit.* (2005), 7, 1275-1280

Appendice

Spedizione 35^a - Campionatore BASE NORD

Periodo	n. campione	m ³	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	ng/m ³			
																Mg	K	Zn	Fe
12-18/11/2019	2	9899	6,83	499	339	3991	106	232	470	35,9	<PDL	2,11	415	96,6	11,1	93,1	82,1	8,88	322
21-27/11/2019	3	10027	<PDL	124	<PDL	2606	32,3	143	207	12,3	<PDL	<PDL	<PDL	44,4	3,25	58,4	29,9	14,1	95
27-03/12/2019	4	6739	<PDL	56,2	<PDL	1799	18,7	46,2	262	17,0	<PDL	<PDL	<PDL	162	0,90	18,8	<PDL	41,6	43
03-09/12/2019	5	10027	<PDL	275	<PDL	2400	65,3	137	376	16,4	29,7	2,11	2924	63,6	4,80	65,7	45,4	12,1	161
18-24/12/2019	7	10027	<PDL	23,4	<PDL	302	9,70	81,0	191	7,01	819	<PDL	<PDL	44,6	<PDL	26,5	<PDL	6,52	16
2430/12/2019	8	10015	<PDL	16,0	<PDL	208	15,4	<PDL	127	54,0	2438	<PDL	<PDL	25,4	<PDL	23,7	<PDL	11,2	12
30-05/01/2020	9	10021	<PDL	62,2	<PDL	1859	18,3	79,1	685	28,7	1504	<PDL	<PDL	105	1,06	33,2	17,5	22,2	61
05-11/01/2020	10	10007	<PDL	205	<PDL	1729	59,6	210	1178	63,2	2028	<PDL	<PDL	128	3,72	62,8	37,8	12,4	138
17-23/01/2020	12	9993	<PDL	184	<PDL	1181	36,7	<PDL	244	9,51	1035	<PDL	<PDL	37,1	3,26	47,3	30,1	5,26	105
23-29/01/2020	13	6493	<PDL	215	170	1960	47,3	173	225	16,3	1356	<PDL	<PDL	73,6	3,89	80,6	42,9	14,2	128
PDL			4,50	1,90	127	33,0	2,20	70,0	23,0	1,00	22,0	0,86	266	8,10	0,87	17,5	12,0	0,22	0,70

Tab. 1. Concentrazione elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato in base (Campionatore Nord) durante la 35^a spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

Spedizione 35a - Campionatore BASE EST

Periodo	n. campione	m ³	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	ng/m ³			
																Mg	K	Zn	Fe
12-18/11/2019	2	9917	4,51	324	222	3522	68,3	206	392	16,2	<PDL	1,38	545	190,7	6,70	63,5	55,6	34,7	206
21-27/11/2019	3	10026	<PDL	166	<PDL	1662	43,3	122	267	17,3	24,4	6,14	<PDL	41,9	4,35	66,0	40,5	17,7	109
27-03/12/2019	4	6724	<PDL	47,2	<PDL	510	12,8	<PDL	71,0	6,38	<PDL	<PDL	<PDL	21,9	<PDL	19,4	<PDL	6,11	33
03-09/12/2019	5	10026	10,8	874	618	6832	195	349	1603	36,4	36,8	<PDL	4376	181,7	18,9	172	144	13,8	539
18-24/12/2019	7	10027	<PDL	18,1	<PDL	231	7,75	<PDL	126	10,7	534	2,60	<PDL	30,5	<PDL	26,3	<PDL	3,68	14,0
24-30/12/2019	8	10013	<PDL	5,55	<PDL	60,0	<PDL	<PDL	205	7,30	36,2	<PDL	<PDL	13,0	<PDL	20,5	<PDL	0,460	3,00
30-05/01/2020	9	10024	<PDL	32,5	<PDL	256	6,93	<PDL	179	11,1	126	3,68	<PDL	20,3	<PDL	29,5	<PDL	0,923	21,0
05-11/01/2020	10	10003	<PDL	36,6	<PDL	286	9,23	<PDL	721	6,58	290	1,02	<PDL	40,7	<PDL	29,0	<PDL	1,72	23,0
17-23/01/2020	12	9994	<PDL	87,6	<PDL	603	17,9	<PDL	173	4,93	236	<PDL	286	23,4	0,97	29,8	14,7	1,33	52,0
23-29/01/2020	13	10027	<PDL	268	165	2436	63,7	120	433	15,1	397	1,38	265	68,8	6,72	90,7	68,3	6,06	79,0
PDL			4,50	1,90	127	33,0	2,20	70,0	23,0	1,00	22,0	0,86	266	8,10	0,87	17,5	12,0	0,22	0,70

Tab. 2. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato in base (Campionatore Est) durante la 35a spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

Spedizione 35^a - Campionatore BASE OVEST

Periodo	n. campione	m ³	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
12-18/11/2019	2	9909	<PDL	280	200	2365	59,7	158	267	12,0	<PDL	<PDL	691	43,3	5,41	49,2	40,7	0,876	179
21-27/11/2019	3	10033	<PDL	115	<PDL	1639	26,8	127	152	11,5	<PDL	<PDL	352	39,6	2,34	54,1	26,0	4,85	80,0
27-03/12/2019	4	6730	<PDL	116	<PDL	1529	24,7	<PDL	144	9,36	<PDL	<PDL	<PDL	42,0	1,85	28,3	17,0	5,14	81,0
03-09/12/2019	5	1003	27,3	2384	1843	14776	485	966	1799	85,6	<PDL	<PDL	2047	344	48,9	509	398	6,71	1596
18-24/12/2019	7	10031	<PDL	22,3	<PDL	247	6,10	<PDL	49,0	4,00	<PDL	2,23	<PDL	16,3	<PDL	19,7	<PDL	0,451	15,0
24-30/12/2019	8	10019	<PDL	15,0	<PDL	529	4,37	247	111	12,0	<PDL	2,38	<PDL	27,8	<PDL	<PDL	<PDL	1,50	11,0
30-05/01/2020	9	10022	<PDL	23,4	<PDL	174	5,38	<PDL	65,0	44,5	<PDL	1,79	<PDL	23,7	<PDL	20,2	<PDL	1,10	14,0
05-11/01/2020	10	10006	<PDL	84,5	<PDL	1045	17,0	<PDL	112	9,68	<PDL	4,03	<PDL	56,8	1,06	28,8	14,2	10,9	49,0
17-23/01/2020	12	9997	<PDL	185	<PDL	1084	36,2	<PDL	173	20,2	29,3	1,02	<PDL	33,8	2,99	41,4	28,8	0,535	105
23-29/01/2020	13	10030	<PDL	139	140	1178	28,3	127	176	20,5	54,6	<PDL	997	29,9	2,43	45,0	26,4	2,90	70,0
PDL			4,50	1,90	127	33,0	2,20	70,0	23,0	1,00	22,0	0,86	266	8,10	0,87	17,5	12,0	0,22	0,70

Tab. 3. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato in base (Campionatore Ovest) durante la 35^a spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

Spedizione 35^a – Campionatore CAMPO ICARO

Periodo	n. campione	m ³	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
12-18/11/2019	2	1120	<PDL	21,1	<PDL	251	6,10	<PDL	64,8	4,63	<PDL	<PDL	<PDL	20,5	1,30	40,7	14,4	0,388	13,0
21-27/11/2019	3	1002	<PDL	26,2	<PDL	279	6,80	<PDL	67,4	4,58	<PDL	<PDL	<PDL	16,1	<PDL	38,9	14,2	<PDL	17,0
27-03/12/2019	4	1100	<PDL	25,6	<PDL	272	5,9	<PDL	58,2	3,99	<PDL	<PDL	<PDL	24,4	<PDL	<PDL	<PDL	<PDL	17,0
03-09/12/2019	5	1128	<PDL	72,3	<PDL	696	16,0	<PDL	232	5,75	<PDL	<PDL	<PDL	27,3	1,60	29,2	17,1	<PDL	46,0
18-24/12/2019	7	1128	<PDL	7,25	<PDL	91,0	2,20	<PDL	238	4,95	<PDL	<PDL	<PDL	19,5	<PDL	<PDL	<PDL	<PDL	7,00
24-30/12/2019	8	1121	<PDL	6,04	<PDL	73,0	<PDL	<PDL	25,9	3,47	<PDL	<PDL	<PDL	8,74	<PDL	<PDL	<PDL	<PDL	6,00
30-05/01/2020	9	1131	<PDL	7,41	<PDL	66,0	<PDL	<PDL	<PDL	2,82	<PDL	<PDL	<PDL	<PDL	<PDL	19,5	<PDL	<PDL	2,00
05-11/01/2020	10	1107	<PDL	19,8	<PDL	178	3,80	<PDL	333	4,14	<PDL	<PDL	<PDL	25,0	<PDL	<PDL	<PDL	<PDL	8,00
17-23/01/2020	12	1120	<PDL	83,2	<PDL	812	18,0	<PDL	116	5,52	<PDL	<PDL	<PDL	18,6	1,80	23,4	17,4	<PDL	44,1
23-29/01/2020	13	1131	<PDL	59,8	<PDL	582	13,0	<PDL	399	6,00	<PDL	<PDL	<PDL	28,7	1,40	28,2	14,9	0,367	37,0
PDL			4,50	1,90	127	33,0	2,20	70,0	23,0	1,00	22,0	0,86	266	8,10	0,87	17,5	12,0	0,22	0,70

Tab. 4. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a Campo Icaro durante la 35^a spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

Spedizione 36^a - Campionatore BASE NORD

Periodo	n. camp.	m ³	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	ng/m ³			
																Mg	K	Zn	Fe
14-20/11/2020	1	1091	6,83	298	198	2442	64,8	121	582	16,7	917	<PDL	1186	67,5	5,74	67,5	51,6	6,56	322
20-26/11/2020	2	1096	<PDL	105	<PDL	872	24,9	<PDL	694	23,5	1841	1,65	<PDL	52,0	<PDL	38,8	15,2	10,1	95
27/11-3/12/2020	3	1083	<PDL	183	<PDL	1502	41,8	<PDL	5909	14,1	2514	6,79	534	53,0	3,04	63,5	40,7	17,0	43
3-9/12/2020	4	1096	10,1	831	518	6983	179	338	1067	38,3	1141	4,72	2401	143	21,1	180	167	10,4	161
9-15/12/2020	5	1058	<PDL	184	<PDL	5017	46,6	119	533	17,4	9829	5,83	380	59,1	3,49	83,7	30,3	45,7	16
15-21/12/2020	6	1096	<PDL	231	<PDL	1910	56,9	87,9	409	17,3	1595	<PDL	383	55,1	4,45	61,9	40,2	8,15	12
21-26/12/2020	7	903	<PDL	67,0	<PDL	615	25,9	<PDL	763	7,21	4273	<PDL	<PDL	55,7	<PDL	60,1	15,6	21,2	61
2-8/01/2021	8	1069	<PDL	175	<PDL	1972	41,8	<PDL	453	48,5	1339	5,02	433	81,8	3,63	56,6	32,9	11,6	138
8-14/01/2021	9	1067	<PDL	121	<PDL	1162	31,7	77,6	420	11,1	2312	1,69	<PDL	92,2	1,79	47,4	18,3	11,6	105
PDL			4,33	1,79	123	31,7	2,15	67,4	22,3	3,03	21,2	1,48	257	7,80	1,60	16,9	11,5	0,209	0,70

Tab. 5. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a MZS (Campionatore Nord) durante la 36^a spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

Spedizione 36^a - Campionatore BASE EST

Periodo	n. camp.	m ³	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
14-20/11/2020	1	1092	<PDL	169	<PDL	1599	45,0	<PDL	226	14,7	2615	2,02	416	46,6	3,74	49,4	31,2	14,6	109
20-26/11/2020	2	1096	<PDL	71,0	<PDL	629	17,3	<PDL	1016	6,85	1066	<PDL	<PDL	57,8	<PDL	26,9	<PDL	6,00	54,8
27/11-3/12/2020	3	1089	<PDL	51,3	<PDL	446	11,3	<PDL	724	8,35	233	<PDL	<PDL	42,9	<PDL	29,3	<PDL	1,74	37,8
3-9/12/2020	4	1096	9,19	688	431	5677	152	252	848	34,7	2438	15,6	1882	148	16,7	157	127	14,4	512
9-15/12/2020	5	1058	<PDL	35,1	<PDL	329	6,53	<PDL	<PDL	<PDL	333	<PDL	<PDL	7,86	<PDL	<PDL	<PDL	1,65	26,7
15-21/12/2020	6	1097	7,56	574	332	4851	133	203	1425	30,0	2659	6,34	1415	153	13,8	150	111	14,3	428
21-26/12/2020	7	899	<PDL	33,9	<PDL	604	8,13	<PDL	209	5,48	370	<PDL	<PDL	22,0	<PDL	47,7	<PDL	1,53	25,9
2-8/01/2021	8	1070	<PDL	99,2	<PDL	1066	27,6	<PDL	151	37,0	4006	3,17	<PDL	60,9	<PDL	48,3	15,5	22,6	74,7
8-14/01/2021	9	1068	<PDL	53,9	<PDL	405	11,3	<PDL	148	11,3	420	<PDL	<PDL	24,7	<PDL	30,6	<PDL	2,15	37,3
PDL			4,33	1,79	123	31,7	2,15	67,4	22,3	3,03	21,2	1,48	257	7,80	1,60	16,9	11,5	0,209	0,70

Tab. 6. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a MZS (Campionatore Est) durante la 36^a spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

Spedizione 36^a - Campionatore BASE OVEST

Periodo	n. camp.	m ³	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
14-20/11/2020	1	1092	<PDL	137	<PDL	1070	30,3	<PDL	202	11,4	34,7	<PDL	398	48,2	2,65	38,2	28,5	1,00	2,62
20-26/11/2020	2	1097	<PDL	272	209	2384	56,9	112	327	17,0	79,9	6,52	668	60,3	5,17	60,9	46,5	2,50	146
27/11-3/12/2020	3	1089	<PDL	135	<PDL	1019	37,6	<PDL	108	15,4	42,4	6,75	359	38,2	8,85	41,7	28,9	0,900	36,5
3-9/12/2020	4	1096	6,66	378	286	2958	80,7	207	335	19,1	56,0	<PDL	835	65,8	9,33	85,1	69,5	1,66	157
9-15/12/2020	5	1059	<PDL	191	<PDL	2040	47,9	386	300	14,9	82,3	<PDL	494	60,4	3,86	60,7	43,1	2,01	60,0
15-21/12/2020	6	1097	<PDL	176	<PDL	1737	45,7	<PDL	196	8,83	15,2	18,3	547	51,5	5,17	66,7	46,4	2,25	117
21-26/12/2020	7	905	<PDL	203	<PDL	1699	45,5	96,6	204	12,5	85,6	<PDL	<PDL	39,8	4,08	61,5	32,9	1,00	142
2-8/01/2021	8	1075	<PDL	202	<PDL	1732	44,6	<PDL	212	17,1	94,6	7,21	271	58,2	3,98	54,9	33,0	3,03	138
8-14/01/2021	9	1069	<PDL	140	<PDL	945	29,1	<PDL	190	11,7	40,3	1,51	<PDL	31,5	1,78	39,4	20,4	0,736	84,2
PDL			4,33	1,79	123	31,7	2,15	67,4	22,3	3,03	21,2	1,48	257	7,80	1,60	16,9	11,5	0,209	0,70

Tab. 7. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a MZS (Campionatore Ovest) durante la 36^a spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

Spedizione 36^a - Campionatore CAMPO ICARO

Periodo	n. camp	m ³	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
14-21/11/2020	1	1245	<PDL	10,8	<PDL	117	2,37	166	270	3,17	<PDL	<PDL	<PDL	18,8	<PDL	<PDL	<PDL	0,398	6,87
21-27/11/2020	2	1073	<PDL	21,6	<PDL	198	4,04	233	556	4,23	23,9	<PDL	<PDL	45,2	<PDL	<PDL	<PDL	0,989	12,4
3-9/12/2020	4	1066	<PDL	49,7	<PDL	548	13,0	<PDL	570	7,78	<PDL	<PDL	<PDL	42,7	<PDL	<PDL	<PDL	0,816	13,1
9-15/12/2020	5	991	<PDL	13,1	<PDL	135	4,18	<PDL	515	5,38	46,6	<PDL	<PDL	43,4	<PDL	<PDL	<PDL	1,19	1,53
15-21/12/2020	6	1067	<PDL	21,7	<PDL	214	5,18	<PDL	139	<PDL	22,3	<PDL	<PDL	15,0	<PDL	<PDL	<PDL	<PDL	14,2
21-25/12/2020	7	710	<PDL	9,69	<PDL	145	4,71	<PDL	137	<PDL	27,7	<PDL	<PDL	14,2	<PDL	<PDL	<PDL	0,282	6,70
8-14/01/2021	9	1014	<PDL	9,91	138	99,0	4,67	<PDL	203	5,84	32,9	<PDL	<PDL	26,6	<PDL	<PDL	<PDL	0,316	6,77
PDL			4,33	1,79	123	31,7	2,15	67,4	22,3	3,03	21,2	1,48	257	7,80	1,60	16,9	11,5	0,209	0,70

Tab. 8. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a Campo Icaro durante la 36^a spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e, Fe, in ng/m³.

37ª Spedizione –Campionatore BASE NORD

Periodo	n. camp.	m ³	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe											
															<i>pg/m³</i>														
															<i>ng/m³</i>														
9-15/11/2021	1	1096	157	100	1332	40,6	55,3	334	13,5	1654	3,88	3298	66,1	4,61	46,8	34,0	7,42	114											
20-26/11/2021	3	1093	624	392	5397	135	246	922	37,7	676	3,43	4093	193	19,5	150	129	14,6	450											
30/11-6/12/2021	4	1096	861	542	7230	187	409	918	48,1	3391	6,39	13392	146	27,2	231	184	18,7	608											
16-22/12/2021	5	1096	367	249	2937	82,2	135	618	16,9	418	1,60	1794	64,6	8,26	97,7	75,5	7,62	247											
22-29/12/2021	6	1096	24,2	59,8	1061	22,6	44,4	478	44,7	586	7,99	<PDL	246	<PDL	37,3	14,6	40,9	60,0											
29/12/21-4/1/22	7	1096	17,6	<PDL	1464	7,12	439	276	11,9	170	1,60	<PDL	40,6	<PDL	22,4	9,31	2,66	30,9											
4-10/1/2022	8	1096	59,4	102	683	21,7	32,3	1463	57,3	261	2,51	<PDL	78,7	1,19	49,4	23,0	4,37	51,8											
11-17/1/2022	9	1095	66,2	117	589	14,4	150	371	12,3	605	1,37	1193	33,5	1,64	202	67,3	3,42	44,0											
18-24/1/2022	10	1095	184	214	2397	43,2	715	468	43,4	1834	1,60	1199	61,4	5,29	105	56,8	11,4	109											
PDL			1,31	41,0	43,7	2,38	11,0	19,3	1,18	15,7	0,48	610	17,8	0,57	1,32	2,43	0,140	0,231											

Tab. 9. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a MZS (Campionatore Nord) durante la 37ª spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn, e Fe, in ng/m³.

37ª Spedizione –Campionatore BASE EST

Periodo	n. camp.	m ³	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	ng/m ³			
															Mg	K	Zn	Fe
9-15/11/2021	1	1096	69,8	101	612	21,7	66,5	229	13,2	1028	2,74	<PDL	48,3	1,41	30,4	17,8	3,64	50,0
20-26/11/2021	3	1093	66,1	<PDL	743	18,3	<PDL	90,9	2,97	97,9	0,69	<PDL	23,6	1,42	21,8	21,8	3,69	28,1
30/11-6/12/2021	4	1096	1019	953	9616	261	523	8612	50,9	1666	11,4	3104	634	30,4	297	250	25,0	781
16-22/12/2021	5	1096	339	258	3528	96,1	152	716	14,4	114	2,97	1099	99,0	10,8	135	112	7,67	215
22-29/12/2021	6	1096	15,6	<PDL	177	6,89	<PDL	373	14,8	184	1,14	<PDL	24,6	<PDL	51,7	18,5	4,01	7,66
29/12/21-4/1/22	7	1096	33,6	53,6	1393	11,7	40,3	487	17,1	738	1,60	<PDL	56,8	0,96	58,9	24,6	8,66	13,1
4-10/1/2022	8	1096	50,9	<PDL	437	15,1	<PDL	595	14,1	674	2,05	<PDL	93,1	1,41	69,2	29,1	6,57	15,9
11-17/1/2022	9	1096	48,2	<PDL	481	12,8	<PDL	294	11,4	526	1,83	<PDL	26,7	0,96	140	49,5	3,04	34,0
18-24/1/2022	10	1096	103	149	1293	26,7	112	372	37,4	2968	4,11	<PDL	53,2	2,10	99,1	44,4	16,6	62,0
PDL			1,31	41,0	43,7	2,38	11,0	19,3	1,18	15,7	0,48	610	17,8	0,57	1,32	2,43	0,140	0,231

Tab. 10. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a MZS (Campionatore Est) durante la 37ª spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

37ª Spedizione –Campionatore BASE OVEST

Periodo	n. camp.	m ³	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	ng/m ³			
															Mg	K	Zn	Fe
9-15/11/2021	1	1097	129	128	1089	30,8	76,7	141	13,7	156	2,51	<PDL	58,8	3,01	35,5	28,8	2,46	86,6
20-26/11/2021	3	1093	138	154	1276	32,1	105	263	12,8	102	2,29	<PDL	211	3,25	50,0	35,1	33,1	97,6
30/11-6/12/2021	4	1096	193	172	1745	42,3	135	358	24,6	118	1,14	<PDL	42,7	4,61	75,0	49,6	1,41	152
16-22/12/2021	5	1092	288	200	2279	60,7	124	335	8,92	29,5	0,92	<PDL	51,5	6,22	67,7	60,6	1,93	187
22-29/12/2021	6	1096	40,4	77,6	560	12,6	135	299	24,9	64,3	4,56	<PDL	54,7	1,19	53,5	24,3	23,8	17,2
29/12/21-4/1/22	7	1096	29,5	84,4	2689	15,6	329	601	40,8	278	0,68	<PDL	29,2	<PDL	24,1	12,6	0,958	78,5
4-10/1/2022	8	1096	57,5	41,7	469	12,6	13,8	152	7,07	19,8	1,14	<PDL	27,1	0,73	40,2	19,3	0,496	37,9
11-17/1/2022	9	1096	148	97,6	1108	27,2	49,8	238	17,3	49,7	2,05	<PDL	21,9	16,5	95,3	42,1	1,13	76,8
18-24/1/2022	10	1096	71,2	136	581	14,6	75,8	95,0	9,12	41,7	0,91	1338	19,8	1,41	68,0	30,3	1,89	42,8
PDL			1,31	41,0	43,7	2,38	11,0	19,3	1,18	15,7	0,48	610	17,8	0,57	1,32	2,43	0,140	0,231

Tab. 11. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a MZS (Campionatore Ovest) durante la 37ª spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

37ª Spedizione – Campionatore CAMPO ICARO

Periodo	n. camp.	m ³	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe				
															<i>pg/m³</i>				<i>ng/m³</i>			
10-16/11/2021	1	1066	51,4	<PDL	682	14,1	106	82,9	6,56	40,8	1,17	<PDL	18,5	0,98	22,3	12,2	0,575	37,5				
26/11-6/12/2021	4	1066	92,4	46,9	953	22,8	31,3	431	9,61	43,8	1,64	<PDL	48,1	3,33	65,1	33,9	0,662	60,0				
16-22/12/2021	5	1067	23,2	<PDL	209	5,67	66,7	240	<PDL	<PDL	<PDL	1070	25,8	<PDL	27,0	10,6	0,245	13,8				
22-28/12/2021	6	1060	11,4	<PDL	97,7	4,53	<PDL	682	5,66	<PDL	3,77	<PDL	34,7	<PDL	31,9	10,5	0,604	7,55				
28/12/21-4/1/22	7	1260	10,8	44,2	101	2,82	35,0	70,7	3,77	17,3	0,60	<PDL	<PDL	<PDL	25,4	10,1	0,172	6,81				
4-11/1/2022	8	1208	23,2	<PDL	201	4,60	<PDL	697	9,52	<PDL	3,73	1008	49,5	<PDL	46,0	15,6	0,527	12,9				
11-17/1/2022	9	1058	11,2	<PDL	87,2	2,65	<PDL	347	4,96	<PDL	1,42	<PDL	95,2	<PDL	83,8	26,2	0,843	6,59				
18-25/1/2022	10	1260	8,18	<PDL	51,2	4,21	24,9	196	3,37	<PDL	1,98	<PDL	54,2	<PDL	65,1	20,9	0,238	5,32				
PDL			1,31	41,0	43,7	2,38	11,0	19,3	1,18	15,7	0,48	610	17,8	0,57	1,32	2,43	0,140	0,231				

Tab. 12. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a Campo Icaro durante la 37ª spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

38ª Spedizione –Campionatore BASE NORD

Periodo	n. camp.	m ³	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	ng/m ³			
															Mg	K	Zn	Fe
5-11/11/2022	1	1096	645	432	4693	130	293	578	26,5	277	12,1	1890	105	15,4	112	102	2,76	396
20-29/11/2022	2	1739	283	301	2580	64,6	516	422	37,7	546	11,1	1046	223	8,23	89,7	57,3	7,35	175
2-8/12/2022	3	1096	25,7	258	471	32,4	180	225	16,2	649	5,76	419	115	<PDL	35,0	9,47	4,38	16,0
10-16/12/2022	4	1096	151	203	1828	38,9	138	427	31,9	1974	19,5	789	287	3,94	53,6	36,9	14,8	99,7
20-28/12/2022	5	1404	99,3	78,3	986	27,8	123	499	16,8	1571	6,68	324	45,5	2,65	40,7	25,8	7,42	66,7
3-9/1/2023	6	1095	35,6	111	313	9,88	46,8	1320	29,9	794	<PDL	174	105	<PDL	54,3	19,0	3,61	21,8
10-16/1/2023	7	1095	161	140	1370	35,8	121	400	35,8	459	<PDL	571	137	4,30	64,2	39,6	2,08	106
16-22/1/2023	8	1095	151	130	1684	29,6	208	478	40,4	367	10,7	574	99,5	4,30	63,0	35,7	6,55	92,7
PDL			1,62	27,6	21,1	1,62	16,2	24,4	1,46	18,9	1,62	114	4,87	1,62	2,10	3,12	0,122	0,341

Tab. 13. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a MZS (Campionatore Nord) durante la 38ª spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

38ª Spedizione – Campionatore BASE EST

Periodo	n. camp.	m ³	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	ng/m ³			
															Mg	K	Zn	Fe
5-11/11/2022	1	1096	1362	1128	9472	266	507	22276	41,0	7570	166	4224	1172	32,6	255	234	42,1	817
20-29/11/2022	2	1686	431	356	3243	84,5	191	1544	22,8	661	77,7	1389	197	11,6	121	81,5	5,42	265
2-8/12/2022	3	1096	28,5	101	240	5,48	65,9	754	225	8,03	25,4	354	52,5	<PDL	45,9	12,5	1,00	16,6
10-16/12/2022	4	1096	120	151	1219	29,9	74,6	175	56,9	212	<PDL	679	36,0	3,04	48,3	31,2	3,28	71,8
20-28/12/2022	5	1400	75,7	59,7	603	15,4	50,1	321	8,54	278	<PDL	250	28,7	2,10	39,2	19,6	1,37	49,0
3-9/1/2023	6	1096	17,0	<PDL	132	4,42	58,3	376	9,68	6,4	3,92	1,82	41,6	<PDL	51,8	13,1	0,22	8,77
10-16/1/2023	7	1096	57,8	43,9	445	11,5	33,1	176	6,69	38,3	<PDL	204	27,6	1,61	55,4	19,9	0,46	36,0
16-22/1/2023	8	1096	24,5	11,2	223	5,22	26,9	2785	3,86	228	6,80	51,5	129	<PDL	33,7	9,78	2,91	14,9
PDL			1,62	27,6	21,1	1,62	16,2	24,4	1,46	18,9	1,62	114	4,87	1,62	2,10	3,12	0,122	0,341

Tab. 14. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a MZS (Campionatore Est) durante la 38ª spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

38ª Spedizione – MZS: Campionatore BASE OVEST

Periodo	n. camp.	m ³	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	ng/m ³			
															Mg	K	Zn	Fe
5-11/11/2022	1	1095	337	329	2649	69,8	213	321	19,0	124	<PDL	1212	67,1	8,45	67,3	56,8	1,53	219
20-29/11/2022	2	1688	173	613	2436	37,4	160	328	25,1	43,9	<PDL	855	61,9	5,10	67,9	44,3	2,89	110
2-8/12/2022	3	1095	49,6	67,1	909	57,4	72,5	327	12,5	19,8	1,83	431	81,0	<PDL	28,8	9,44	3,10	35,6
10-16/12/2022	4	1096	308	236	2870	59,5	161	401	32,4	13,4	3,08	1184	80,3	6,87	65,8	51,5	15,2	198
20-28/12/2022	5	1408	166	150	1160	30,4	77,6	175	13,1	53,9	<PDL	492	39,4	3,67	42,3	30,7	0,800	102
3-9/1/2023	6	1096	174	124	1369	27,6	82,3	315	17,3	22,9	1,83	532	87,6	3,73	68,5	39,1	4,74	100
10-16/1/2023	7	1095	169	52,9	1024	29,4	92,4	202	12,1	3,02	35,7	524	44,0	3,34	53,0	33,4	0,433	96,8
16-22/1/2023	8	1096	189	76,9	1204	31,4	73,0	409	12,3	16,7	7,02	561	47,6	4,32	50,8	35,4	1,14	108
PDL			1,62	27,6	21,1	1,62	16,2	24,4	1,46	18,9	1,62	114	4,87	1,62	2,10	3,12	0,122	0,341

Tab. 15. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a MZS (Campionatore Ovest) durante la 38ª spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

38ª Spedizione – Campionatore CAMPO ICARO

Periodo	n. camp.	m ³	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	As	Mo	Cd	Ba	Pb	U	Mg	K	Zn	Fe
5-11/11/2022	1	1071	21,3	148	195	4,14	76,3	245	3,14	<PDL	2,19	334	27,8	<PDL	6,22	<PDL	0,224	11,7
20-29/11/2022	2	1478	65,9	67,3	632	15,4	114	288	7,48	<PDL	7,70	341	184	2,59	38,5	15,3	1,11	39,6
2-8/12/2022	3	1108	15,8	81,3	126	2,41	67,5	65,9	3,73	<PDL	<PDL	481	32,1	<PDL	51,1	12,8	0,342	3,27
10-16/12/2022	4	1045	17,5	<PDL	160	3,49	32,6	136	2,49	<PDL	<PDL	<PDL	43,1	<PDL	14,3	<PDL	0,117	10,4
20-28/12/2022	5	1401	9,94	<PDL	114	2,32	<PDL	309	2,68	<PDL	8,81	<PDL	34,0	<PDL	15,5	<PDL	0,119	7,17
3-9/1/2023	6	1045	9,25	409	1059	5,93	119	298	8,97	<PDL	1,88	<PDL	47,8	<PDL	61,4	16,2	0,275	4,72
10-16/1/2023	7	1413	18,0	40,9	202	4,94	40,0	744	4,74	<PDL	<PDL	<PDL	67,6	<PDL	38,2	12,2	0,363	10,4
16-26/1/2023	8	1825	19,0	297	1000	6,94	90,1	1119	7,85	<PDL	9,00	<PDL	78,8	<PDL	24,0	7,27	0,623	15,4
PDL			1,62	27,6	21,1	1,62	16,2	24,4	1,46	18,9	1,62	114	4,87	1,62	2,10	3,12	0,140	0,341

Tab. 16. Concentrazioni elementi in traccia nel particolato atmosferico campionato a Campo Icaro durante la 38ª spedizione. Dati espressi in pg/m³ e per: Mg, K, Zn e Fe, in ng/m³.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - Centro Ricerche Frascati
novembre 2025