

Qualità del suolo-sottosuolo

*Studio e definizione del valore di
concentrazione del fondo naturale – Revisione*

Comune di Bormio | Arsenico

ARPA Lombardia

Ottobre 2024

Nota alla revisione 2024:

Dopo la pubblicazione della prima versione di questo studio, nell'anno 2022, sono stati raccolti nuovi dati che hanno permesso di arricchire il dataset nell'areale definito inizialmente come "Area di Anomalia".

Alla luce di questi nuovi dati è stato possibile aggiornare le elaborazioni e definire sul territorio del Comune di Bormio due distinti areali caratterizzati da differenti valori di fondo naturale per il parametro Arsenico, denominati "Area 1" e "Area 2".

In questa revisione dello studio è stato integrato il set iniziale dei dati effettuando una nuova elaborazione nella sezione "DEFINIZIONE DEI VALORI DI FONDO NATURALE".

Sono state altresì aggiornate le norme tecniche di attuazione.

Sondrio, ottobre 2024

Documento originale redatto da:

Patti Giuseppe – ex Dipartimento di Lecco – Sondrio – UO BAE

Ferraro Damiano – Dipartimento di Lecco – Sondrio – UO BAE

Tagni Maurizio – Dipartimento di Lecco – Sondrio – UO BAE

Tarasi Maria – Dipartimento di Lecco – Sondrio – UO BAE

Con la collaborazione di:

Pozza Francesco – Dipartimento di Lecco – Sondrio – UO AF e VA

Revisione 2024:

Cola Ambra – Dipartimento di Lecco – Sondrio – UO BAE

Ferraro Damiano – Dipartimento di Lecco – Sondrio – UO BAE

Tagni Maurizio – Dipartimento di Lecco – Sondrio – UO BAE

Tarasi Maria – Dipartimento di Lecco – Sondrio – UO BAE

ARPA Lombardia Dipartimento di Lecco e Sondrio – Sede di Sondrio | U.O. Bonifiche e Attività Estrattive
Via Stelvio 35/A

23100 Sondrio (SO)

Tel. 03442.183211

PEC: dipartimentosondrio.arpa@pec.regione.lombardia.it

WEB: www.arpalombardia.it

Ottobre 2024

Sommario

PREMESSA.....	4
CONTESTO DI LAVORO.....	5
Inquadramento territoriale dell'area indagata.....	5
Origine dell'arsenico nei suoli	6
ATTIVITÀ PRELIMINARI.....	8
Esecuzione del piano di campionamento	8
Attività analitica e valutazione esiti	8
Cromo, Nichel, Zinco	10
Arsenico	11
DEFINIZIONE DEI VALORI DI FONDO NATURALE	12
Formazione del set di dati.....	12
Analisi statistica del dataset	15
Determinazione del valore di fondo dell'Area 1	19
Determinazione del valore di fondo dell'Area 2	19
CONCLUSIONI	21
NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	22
LINEE GUIDA.....	22
BIBLIOGRAFIA	22

PREMESSA

Il problema degli arricchimenti naturali di metalli/metalloidi nella matrice suolo/sottosuolo è oggi più che mai richiamato nella normativa di riferimento nazionale e regionale, che assegna alle Agenzie di Protezione Ambientale un ruolo determinante nell'espletamento delle procedure per la definizione dei valori di fondo (si vedano ad esempio l'articolo 11 del DPR 120/2017 e gli articoli 242 c. 13 ter e 242 ter, comma 4 bis del d.lgs. 152/06).

Nel territorio comunale di Bormio la presenza diffusa di Arsenico nei terreni si è andata manifestando in maniera sempre più consistente nel corso degli ultimi anni, fino a divenire un fattore critico per la gestione dei materiali da scavo generati nel corso della realizzazione di qualunque intervento edilizio, pubblico o privato.

Non a caso, le prime interlocuzioni di rilievo al fine di sviluppare le attività qui illustrate sono nate nel 2020 in seguito al rinvenimento di Arsenico in tenori superiori ai pertinenti limiti di legge nei terreni derivanti dal cantiere per la realizzazione della nuova RSA, che hanno portato nel 2021 alla definizione di un primo valore di fondo sulla porzione del territorio comunale insistente sul lobo destro del conoide del torrente Frodolfo.

L'avvento delle Olimpiadi Invernali Milano-Cortina 2026 con il "cluster Valtellina" e le nuove disponibilità legate alle azioni per l'implementazione del PNRR hanno poi dato nuovo impulso, quasi negli stessi anni, a quelle esigenze di trasformazione territoriale che da secoli interessano la "Magnifica Terra".

In tale contesto la necessità di determinare il valore di fondo dell'Arsenico nei suoli e nei terreni è diventata improcrastinabile.

È stata fondamentale la fattiva collaborazione dell'Amministrazione e degli Uffici Comunali nella fase di sottoscrizione del Protocollo d'Intesa predisposto dalla DAAL di ARPA Lombardia, nelle fasi operative di reperimento di mezzi e operatori, nonché nel farsi garante per gli accessi alle aree individuate nella proposta di indagine predisposta dal Dipartimento di Lecco e Sondrio.

Importante, inoltre, il contributo delle Associazioni di Categoria ANCE Lecco-Sondrio e Confartigianato Imprese Sondrio che hanno manifestato, sottoscrivendo a loro volta il protocollo, consapevolezza della rilevanza del progetto proposto, nonché volontà di dare sostegno agli operatori da esse stesse rappresentati, contribuendo *pro-quota* alla copertura dei costi necessari.

La definizione del valore di fondo naturale del parametro Arsenico, infatti, oltre ad arricchire le conoscenze scientifiche sul territorio indagato, costituisce un'importante semplificazione delle procedure di gestione dei materiali da scavo nei cantieri che ricadono nell'ambito di applicabilità del medesimo, nel rispetto delle Norme Tecniche di Attuazione che costituiscono parte integrante del presente documento.

Importante, infine, sottolineare come le attività si siano svolte secondo le modalità indicate dalla Linea Guida n. 8 del 2018 del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) e dalla norma ISO 19258/2005 "Soil Quality – Guidance on the determination of background values", sostanziali riferimenti per l'impostazione della metodologia di lavoro e della valutazione dei dati raccolti.

CONTESTO DI LAVORO

Inquadramento territoriale dell'area indagata

Il Comune di Bormio è contermina ai Comuni di Valdidentro, Valdisotto e Valfurva e confina a nord, per un breve tratto del suo limite amministrativo, con la Svizzera e la Provincia autonoma di Bolzano. Il suo territorio si estende dal corso del Fiume Adda fino al Passo dello Stelvio e ha una superficie complessiva di circa 41 km².

Dal punto di vista geologico, il territorio del Comune di Bormio ricade nel Dominio Austroalpino che è costituito, dal basso verso l'alto, dalle seguenti unità tettoniche:

- **Falda di Languard**, esterna al territorio di Bormio;
- **Falda di Campo**, costituita da rocce di basamento cristallino (filladi, paragneiss, ortogneiss, meta basiti, marmi e rocce granitoidi) con impronta metamorfica di età ercinica che interessa la porzione centrale del territorio comunale;
- **Falda dell'Ortles**, composta da potenti formazioni sedimentarie (dalla serie della dolomia principale fino ai calcari) che costituiscono una fascia continua che attraversa il territorio comunale da est a ovest;
- **Falda di Quattervals**, che appoggia direttamente sulla Falda dell'Ortles ed è costituita quasi esclusivamente da dolomia principale.

Dal punto di vista geomorfologico, il territorio comunale può essere suddiviso in un'area pedemontana, posta alla quota di circa 1.200 m s.l.m e densamente popolata, dove sono presenti la conoide del torrente Frodolfo e quella del torrente Campello, che passano verso ovest, senza nette soluzioni di continuità, ai depositi alluvionali del Fiume Adda, e in una porzione prettamente montana, corrispondente al territorio che si sviluppa verso nord fino al Passo dello Stelvio (si veda la "Relazione generale" della Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio del Comune di Bormio).

Non infrequenti sono le manifestazioni di attività morfologica, anche intense, in particolare quelle di colata detritico-torrentizia lungo le aste dei torrenti (Campello e Pravasivo), i cui bacini di alimentazione sono impostati, nella parte sommitale, entro le successioni carbonatiche, in rapida degradazione, sovrascorse sul basamento cristallino.

Significative, infine, le manifestazioni sorgentizie a carattere anche idrotermale dalle quali si alimenta il complesso dei "Bagni di Bormio".

Origine dell'Arsenico nei suoli

La presenza di Arsenico nei suoli, in concentrazioni anche superiori ai limiti imposti dalla normativa italiana (20 mg/kg s.s. per i siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale e 50 mg/kg s.s. per i siti ad uso commerciale e industriale), può essere dovuta sia a fenomeni di origine naturale che ad attività antropiche.

In natura l'Arsenico si trova principalmente in corrispondenza di sistemi vulcanici, depositi minerali idrotermali di alta e media temperatura (giacimenti di pirite), in ambienti fortemente riducenti (es. sedimenti marini profondi, torbiere) e nelle grandi pianure alluvionali.

L'Arsenico (As) è un elemento chimico calcofilo molto diffuso nella crosta terrestre nella quale è presente, oltre che come forma elementare, in più di 200 specie minerali (arseniuri, solfuri, ossidi, arseniati e arseniti) di cui la più comune è l'Arsenopirite (FeAsS), cui seguono Realgar (As_4S_4) e Orpimento (As_2S_3). La Pirite arricchita in Arsenico ($\text{Fe}(\text{S},\text{As})_2$) può avere un contenuto di tale elemento superiore al 10% in peso, divenendone un'importante fonte nell'ambiente a seguito di processi metamorfici, attività mineraria ed erosione. La Pirite può formarsi anche in ambienti sedimentari in condizioni riducenti (ad esempio, in corrispondenza di depositi di materiale organico in decomposizione) e a basse temperature, inglobando parte dell'Arsenico solubile. Per quanto riguarda gli ossidi e gli idrossidi l'Arsenico può essere presente in elevate concentrazioni in parte all'interno della struttura dei minerali, in parte adsorbito ad essi. L'Arsenico può essere adsorbito anche dall'argilla e dalla calcite, ma la percentuale in peso di tale Arsenico è inferiore a quella adsorbita dagli ossidi di ferro (Smedley & Kinniburgh, 2002).

In Alta Valtellina sono note diverse località nelle quali è possibile rinvenire minerali dell'Arsenico in cristalli di varie dimensioni: la miniera di Stabiello sulle pendici della Cima di Redasco, dove l'Arsenopirite è segnalata in cristalli centimetrici, nel gruppo del Gran Zebrù e del Cevedale, dove questo minerale è segnalato in piccoli cristalli millimetrici, in Valdidentro sulla Cima Piazzi, sul Monte Sobretta, dove sono stati osservati realgar e orpimento in cristalli millimetrici inclusi nel quarzo, e in Valfurva e al Monte Plator in croste massive (Benetti, 2001).

Nei terreni il contenuto di Arsenico è molto variabile, ma le concentrazioni più elevate si osservano nei depositi non consolidati a tessitura più fine, limosi e argillosi, nei quali si possono riscontrare tenori fino a 490 mg/kg di Arsenico, a causa del più alto contenuto di solfuri, ossidi, sostanza organica e argilla, a cui è affine. I sedimenti ricchi di ossidi di ferro e manganese sono a loro volta accompagnati da significativi tenori di Arsenico, con concentrazioni che possono variare da 1 a 2.900 mg/Kg (NAS, 1977).

Il contenuto di Arsenico nei suoli è proporzionale a quello nei minerali costituenti il materiale parentale da cui il suolo ha avuto origine ed è quindi più elevato in presenza di minerali ferrosi e solfuri. Generalmente la concentrazione media di Arsenico nei suoli è dell'ordine di 5-10 mg/Kg, ma tale valore è più alto nella torba e nei suoli di palude e soprattutto nei suoli solfato-acidi che si arricchiscono in Arsenico per ossidazione della pirite in terreni ricchi di solfuri come scisti piritici, vene minerali e paludi di mangrovie prosciugate.

Per quanto riguarda invece l'Arsenico antropogenico, le attività industriali che contribuiscono o hanno contribuito in passato alla contaminazione del suolo da Arsenico sono:

- l'estrazione mineraria, la fusione dei metalli non ferrosi, gli impianti di arrostitimento e sinterizzazione di minerali metallici compresi i minerali solforati;

- la produzione industriale di vetro e ceramica, ma anche gli impianti destinati alla fusione di sostanze minerali e alla produzione di clinker e calce viva;
- la combustione di combustibili fossili (carbone o petrolio);
- la produzione di composti chimici organici di base (tra cui si ricorda ad esempio la produzione di coloranti e pigmenti), di fertilizzanti (che vengono utilizzati sia in pieno campo – dove l'uso prolungato di prodotti nei quali l'Arsenico è presente come impurezza, es. concimi fosfatici, può portare ad un accumulo di Arsenico nel suolo - che in serra per la difesa di specie floricole ad alto reddito), di prodotti fitosanitari e biocidi (l'Arsenico è utilizzato come pesticida soprattutto sulle piante di cotone e in passato veniva utilizzato per preservare il legno) e di esplosivi;
- gli impianti per il trattamento dei rifiuti (i contenuti più elevati di Arsenico si riscontrano nei rifiuti derivanti dall'industria metallurgica dei metalli non ferrosi, principalmente zinco e piombo).
- le industrie di cosmetici, le industrie tessili, i colorifici.

ATTIVITÀ PRELIMINARI

Esecuzione del piano di campionamento

Le attività di campionamento del terreno si sono svolte nei giorni 6 e 7 settembre 2022 sulla scorta del piano di campionamento predisposto dal Dipartimento ARPA di Sondrio, come previsto dal protocollo di intesa, e condiviso col Comune di Bormio.

Rispetto alle previsioni del piano originale il comune di Bormio ha proposto in campo alcune modifiche alla posizione dei punti di indagine, al fine di interessare aree di cui si avesse la piena disponibilità o comunque il benessere all'accesso, ma senza però inficiare la rappresentatività del dato e quindi il risultato finale.

Le attività di campionamento sono state condotte in contraddittorio con il personale della società Laboratorio Geotecnico Valtellinese s.r.l., incaricata dal Comune.

Nel complesso sono quindi stati indagati 20 punti, da ciascuno dei quali è stato prelevato un campione rappresentativo per ogni metro della trincea escavata, spinta alla profondità di due metri. In caso di variazioni litologiche entro tale profondità, il campione è stato formato entro ciascuno dei livelli individuati, a prescindere dalla posizione rispetto al piano campagna. Il materiale che ha concorso alla formazione del campione è stato setacciato in campo a 2 cm, scartando la frazione granulometricamente superiore.

Attività analitica e valutazione esiti

La Parte, per il tramite dei consulenti incaricati, ha avviato ad analisi tutti i propri campioni presso il laboratorio Technolab3 di Erba (CO). I relativi esiti analitici sono stati acquisiti agli Atti dell'Agenzia con prot. n. 165637 del 21/10/2022.

Per la validazione del dato di Parte, l'Agenzia ha eseguito le proprie determinazioni su n. 8 dei n. 40 campioni presso la sede laboratoristica ARPA di Monza, che le ha fatte pervenire al prot. n. 163347 del 18/10/2022.

In entrambi i casi, le analisi sono state condotte sulla frazione inferiore a 2 mm del campione formato in campo, riportando quindi l'esito relativo al singolo parametro all'intero campione, comprensivo della frazione tra 2 mm e 2 cm, individuata come scheletro.

Il set analitico previsto dal protocollo era costituito dai seguenti parametri:

- pH
- Arsenico
- Cromo
- Nichel
- Zinco

Nella Tabella 1 seguente viene riportato il raffronto tra le rispettive determinazioni (i rapporti di prova emessi dai Laboratori sono allegati alla presente):

PARAMETRI	CSC limiti col. A B D.lgs 152/06	P1 (0-1)			P2 (1-2)			P3 (0-1)			P7 (1-2)		
		RDP	Esiti		RDP	Esiti		RDP	Esiti		RDP	Esiti	
METALLI		50827	Arpa	Parte	50828	Arpa	Parte	50829	Arpa	Parte	50830	Arpa	Parte
Arsenico mg/kg s.s.	20 50		24	15		45	26		20	13		17	15
Cromo totale mg/kg s.s.	150 800		15	8.4		10	8.2		< 10	< 5		10	6.7
Nichel mg/kg s.s.	120 500		14	8.0		11	7.9		< 10	< 5		11	6.3
Zinco mg/kg s.s.	150 500		79	38		49	28		21	16		33	17
Altri parametri													
pH	---		7.7	7.0		8.3	8.2		8.6	8.2		8.5	7.2
Scheletro g/kg	---		425	630		419	600		549	720		601	710

PARAMETRI	CSC limiti col. A B D.lgs 152/06	P10 (0-1)			P12 (1-2)			P13 (0-1)			P20 (1-2)		
		RDP	Esiti		RDP	Esiti		RDP	Esiti		RDP	Esiti	
METALLI		50831	Arpa	Parte	50832	Arpa	Parte	50833	Arpa	Parte	50834	Arpa	Parte
Arsenico mg/kg s.s.	20 50		62	73		80	150		30	30		16	13
Cromo totale mg/kg s.s.	150 800		36	35		18	14		23	12		< 10	< 5
Nichel mg/kg s.s.	120 500		36	30		21	13		23	15		< 10	< 5
Zinco mg/kg s.s.	150 500		106	78		63	36		60	33		16	10
Altri parametri													
pH	---		7.2	7.3		8.0	7.7		5.6	6.8		8.3	7.8
Scheletro g/kg	---		89	22		336	490		247	380		619	720

Tabella 1: confronto esiti analitici Parte/ARPA

Il raffronto evidenzia alcune marcate differenze, in particolare in alcuni campioni, tra il set di dati prodotto dal Laboratorio individuato dalla Parte e quello del Laboratorio ARPA.

Al fine di valutare la significatività di tali differenze e quindi procedere all'eventuale validazione del dato, sono stati condotti i test statistici di seguito illustrati.

Preliminarmente, è da evidenziare che il set di dati di Parte presenta per ciascun parametro analizzato un potenziale outlier, come visibile nei Box Plot riportati in Tabella 2. Tali valori, sicuramente di origine naturale, vengono valutati a valle della validazione del dato di seguito svolta. Inoltre, per la valutazione delle differenze, si è scelto di attribuire ai non-detect un valore pari alla metà del LOQ espresso dai rispettivi laboratori.

Punto	Campione	pH	Scheletro	As_Lab	As_ARPA	As_Diff	Cr.tot_Lab	Cr.tot_ARPA	Cr_Diff	Ni_Lab	Ni_ARPA	Ni_Diff	Zn_Lab	Zn_ARPA	Zn_Diff
P1	P1 0-1	7	630	15	24	-9	8,4	15	-6,6	8	14	-6	38	79	-41
P2	P2 1-2	8,2	600	26	45	-19	8,2	10	-1,8	7,9	11	-3,1	28	49	-21
P3	P3 0-1	8,2	720	13	20	-7	<5	<10	-2,5	<5	<10	-2,5	16	21	-5
P7	P7 1-2	7,2	710	15	17	-2	6,7	10	-3,3	6,3	11	-4,7	17	33	-16
P10	P10 0-1	7,3	22	73	62	11	35	36	-1	30	36	-6	78	106	-28
P12	P12 1-2	7,7	490	150	80	70	14	18	-4	13	21	-8	36	63	-27
P13	P13 0-1	6,8	380	30	30	0	12	23	-11	15	23	-8	33	60	-27
P20	P20 1-2	7,8	720	13	16	-3	<5	<10	-2,5	<5	<10	-2,5	10	16	-6
			Normale?	NO	SI	n.a.	SI	SI	n.a.	SI	SI	n.a.	SI	SI	n.a.
			Outlier pot.												
Condizioni:															
						Media									
						Dev. St.									
						Errore std									
						t score									

Tabella 2: sintesi analisi statistica

Cromo, Nichel, Zinco

Per tali parametri i set di dati di entrambi i laboratori mostrano una distribuzione normale. È pertanto possibile condurre un test t a campioni appaiati, che consente di valutare se le differenze medie tra i due set siano “sufficientemente vicine” da poterli considerare ugualmente validi.

Una volta calcolate tutte le differenze per ciascuna coppia, è possibile calcolare l'errore standard come rapporto tra la deviazione standard e la radice quadrata della numerosità campionaria N, e quindi calcolare il t score come rapporto tra la differenza media e l'errore standard stesso.

Si stabilisce di non ritenere significative le differenze con un errore del 5% (alpha = 0.05), confrontando il valore del t score ottenuto con il valore della distribuzione t corrispondente al livello di significatività scelto e ai gradi di libertà (definiti dalla numerosità campionaria N diminuita di 1, freedom = 7).

La distribuzione di t da prendere in considerazione è quella “a due code”, in quanto non vi è motivo per ritenere che, per ciascun parametro, il segno delle differenze tra gli esiti di ciascuna coppia di campioni possa essere positiva piuttosto che negativa. Il valore di t (tabellato) per le condizioni imposte è pari a ± 2.365 , ovvero è possibile accogliere l'ipotesi nulla (la media delle differenze della popolazione è considerata pari a zero) se il valore del t score ottenuto per ciascun test risulta compreso tra -2.365 e +2.365 (si veda Figura 1).

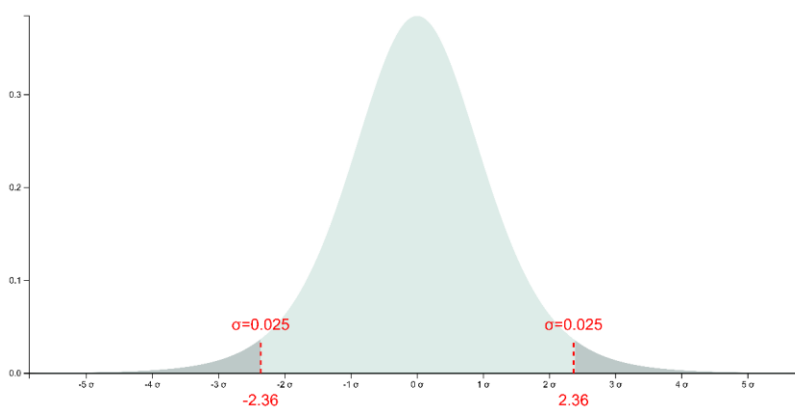


Figura 1: definizione della regione di validità dell'ipotesi nulla (in verde chiaro)

Il valore di t score per il gruppo di parametri in parola è sempre negativo ed inferiore a -2.365, collocandosi pertanto nella regione sinistra di non accettabilità dell'ipotesi nulla. Ciò sta ad indicare che le differenze rilevate tra i due set di dati appaiono statisticamente significative.

Per lo scopo del presente lavoro, tuttavia, si evidenzia che i tenori di tali elementi nei terreni indagati si collocano, anche considerando il set di dati relativo a tutti i campioni analizzati, ampiamente al di sotto dei limiti di riferimento e pertanto non verranno condotti in questa sede ulteriori approfondimenti.

Arsenico

Per tale parametro la non normalità della distribuzione dei dati di Parte rende di fatto non applicabile un t test a campioni appaiati. In questo caso, appare più opportuno condurre un test non parametrico dei ranghi con segno di Wilcoxon, che assolve funzioni analoghe. Il procedimento è il seguente:

1. Si calcolano le differenze tra le coppie di valori.
2. Si dispongono le differenze in valore assoluto crescente.
3. Si assegnano i ranghi ai valori ordinati tenendo conto che:
 - a. in caso di differenze nulle la coppia non verrà computata nella statistica di test e non concorrono alla numerosità campionaria;
 - b. a valori uguali si assegna un rango pari alla media dei ranghi che i valori avrebbero avuto se fossero stati diversi;
4. Si assegnano ai ranghi così determinati i segni delle differenze.
5. Si sommano separatamente i ranghi con segno positivo (W+) da quelli negativi (W-).
6. Si confronta il minore tra W+ e W- (in valore assoluto) con il valore W tabulato per il valore alpha imposto (0.05) e per la numerosità campionaria, accettando l'ipotesi nulla (le differenze sono dovute al caso) se il minore tra W- o W+ è inferiore al valore critico.

Per i campioni considerati la valutazione è sintetizzata nella seguente Tabella 3:

Campione	As_Lab	As_ARPA	As_Diff	As_Diff	Segno	Rango	Rango con segno
P1 0-1	15	24	-9	9	-1	4	-4
P2 1-2	26	45	-19	19	-1	6	-6
P3 0-1	13	20	-7	7	-1	3	-3
P7 1-2	15	17	-2	2	-1	1	-1
P10 0-1	73	62	11	11	1	5	5
P12 1-2	150	80	70	70	1	7	7
P13 0-1	30	30	0	0	n.a.	n.a.	n.a.
P20 1-2	13	16	-3	3	-1	2	-2
W+	12						
W-	16						
Wcrit(7;0.05)	2						

W+ > W crit ----> Accetto l'ipotesi nulla

Tabella 3: test di Wilcoxon per i campioni appaiati relativi al parametro As

Essendo il minimo valore W calcolato maggiore del valore W critico tabulato, è possibile affermare che per il parametro As è possibile non scartare l'ipotesi nulla, ovvero ritenere che le differenze tra i due set di dati non siano statisticamente rilevanti. Ai fini pratici, pertanto, gli esiti forniti dai due laboratori possono essere ritenuti equivalenti nella rappresentazione del tenore in As nei terreni indagati. L'intero set di dati relativo ai 40 campioni prelevati ed analizzati presso il Laboratorio di Parte può pertanto essere validato per quanto riguarda il parametro Arsenico.

DEFINIZIONE DEI VALORI DI FONDO NATURALE

Formazione del set di dati

Come evidenziato in premessa, il territorio comunale di Bormio era già stato oggetto nel corso del 2020 di un'indagine ambientale, che ha portato nel 2021 alla definizione di un valore di fondo del parametro Arsenico per la porzione insistente sul lobo destro del conoide del torrente Frodolfo. Nell'ambito di attività di controllo unilaterale o in contraddittorio, l'Agenzia ha peraltro acquisito, ulteriori dati relativi al parametro Arsenico, i quali, pur se relativi ad ambiti territoriali più limitati, vengono fatti concorrere alla formazione del dataset complessivo.

L'aggiornamento all'anno 2024 del presente lavoro nasce dalla disponibilità di nuovi dati acquisiti nell'ambito di attività svolte in contraddittorio nella zona definita in seguito *Area 2*; anche questi ultimi faranno dunque parte del dataset al fine di definire il valore di fondo naturale caratteristico dell'Area di Anomalia non definito nell'anno 2022 per mancanza, in quell'areale di un numero di dati statisticamente significativo.

La posizione dei punti di prelievo dei campioni è rappresentata nella allegata Tavola 1:

Ambito	Punto	Campione	As	Conoide	Alluvioni	Morenico	Area	
Campagna 2022	P1	P1 0-1	15	✓			1	
		P1 1-2	21	✓			1	
	P2	P2 0-1	32	✓			1	
		P2 1-2	26	✓			1	
	P3	P3 0-1	13	✓			1	
		P3 1-2	12	✓			1	
	P4	P4 0-1	31		✓		1	
		P4 1-2	47		✓		1	
	P5	P5 0-1	20		✓		1	
		P5 1-2	20		✓		1	
	P6	P6 0-1	21	✓			1	
		P6 1-2	23	✓			1	
	P7	P7 0-1	18	✓			1	
		P7 1-2	15	✓			1	
	P8	P8 0-1	32		✓		1	
		P8 1-2	32		✓		1	
	P9	P9 0-1	27	✓			1	
		P9 1-2	32	✓			1	
	P10	P10 0-1	73	✓			1	
		P10 1-2	57	✓			1	
	P11	P11 0-1	160				✓	2
		P11 1-2	170				✓	2
	P12	P12 0-1	120				✓	2
		P12 1-2	150				✓	2
	P13	P13 0-1	30				✓	1
		P13 1-2	44				✓	1
	P14	P14 0-1	320				✓	2

Ambito	Punto	Campione	As	Conoide	Alluvioni	Morenico	Area
		P14 1-2	220			✓	2
	P15	P15 0-1	39			✓	1
		P15 1-2	29			✓	1
	P16	P16 0-1	97			✓	2
		P16 1-2	100			✓	2
	P17	P17 0-1	17		✓		1
		P17 1-2	16		✓		1
	P18	P18 0-1	79		✓		1
		P18 1-2	69		✓		1
	P19	P19 0-1	35	✓			1
		P19 1-2	100	✓			1
	P20	P20 0-1	14		✓		1
		P20 1-2	13		✓		1
Cantiere "Stelvio Alpine Centre" (2024)	SAC1	SAC1 0-1	15.5			✓	1
		SAC1 1-2	25.6			✓	1
	SAC2	SAC2 0-1	84.6			✓	2
		SAC2 1-2	125			✓	2
	SAC3	SAC3 0-1	28.3			✓	1
		SAC3 1-2	25.8			✓	1
	SAC4	SAC4 0-1	20.1			✓	1
		SAC4 1-2	18.8			✓	1
Cantiere "Comparto SKI ARENA" (2023)	C1	C1 0-1	94			✓	2
		C1 1-3	130			✓	2
	C2	C2 0-1	110			✓	2
		C2 1-3	83			✓	2
	C4	C4 0-1	100			✓	2
		C4 1-3	79			✓	2
	C5	C5 0-1	110			✓	2
		C5 1-3	110			✓	2
	C6	C6 0-1	160			✓	2
		C6 1-3	150			✓	2
	C7	C7 0-1	120			✓	2
		C7 1-3	140			✓	2
	C8	C8 0-1	150			✓	2
		C8 1-3	140			✓	2
	S9	S9 0-1	120			✓	2
		S9 1-8	100			✓	2
Cantiere "via Leghe Grigie" (2022)	P1	P1 0-1	27	✓			1
		P1 1-2	33	✓			1
	P2	P2 0-1	34	✓			1
		P2 1-2	36	✓			1
	P3	P3 0-1	30	✓			1
		P3 1-2	34	✓			1

Ambito	Punto	Campione	As	Conoide	Alluvioni	Morenico	Area
Lobo destro conoide Frodolfo (2021)	P2	201	47	✓			1
		212	28	✓			1
	P3	301	34	✓			1
		312	27	✓			1
	P4	401	56	✓			1
		412	63	✓			1
	P5	501	39	✓			1
		512	24	✓			1
	P6	601	14		✓		1
		612	55		✓		1
	P7	701	37	✓			1
		712	43	✓			1
	P8	801	61	✓			1
		812	53	✓			1
	P9	901	40	✓			1
		912	35	✓			1
	P10	1001	74	✓			1
		1012	89	✓			1
	P11	1101	34	✓			1
		1112	24	✓			1
Cantiere RSA "Villa del Sorriso" (2020)		C2	35	✓			1
		C3	65	✓			1
Cantiere "Via Stelvio 1" (2020)	A1	A101	24	✓			1
		A112	29	✓			1
	B1	B101	39	✓			1
		B112	12	✓			1
		B123	29	✓			1
	C1	C101	45	✓			1
		C112	30	✓			1
	D1	D101	27	✓			1
D112		16	✓			1	
"Golf Club" (2020)	C1	C1.1	15		✓		1
	C2	C2.1	29		✓		1
	C3	C3.1	53		✓		1
	C4	C4.1	27		✓		1
	C5	C5.1	47		✓		1
	C6	C6.1	67		✓		1
	C7	C7.1	48		✓		1
	C8	C8.1	16		✓		1
Cantiere "Via Stelvio 2" (2020)	C1	C1	30	✓			1

Tabella 4: set di dati relativi al parametro As e distribuzione dei campioni per tipologia di deposito

Analisi statistica del dataset

La definizione del valore di fondo naturale del parametro Arsenico deve essere preceduta da un esame del set di dati riportato nella precedente Tabella 4, al fine di individuare e valutare la presenza di eventuali outlier e verificare l'effettiva aderenza del set ad una distribuzione normale (o ad essa riconducibile).

Individuazione dei potenziali outlier

Il box plot riferito al dataset disponibile all'anno 2022 mostrava la presenza di potenziali outlier per tenori di Arsenico superiori a 89 mg/kg s.s., come riportato nella seguente Figura 2 :

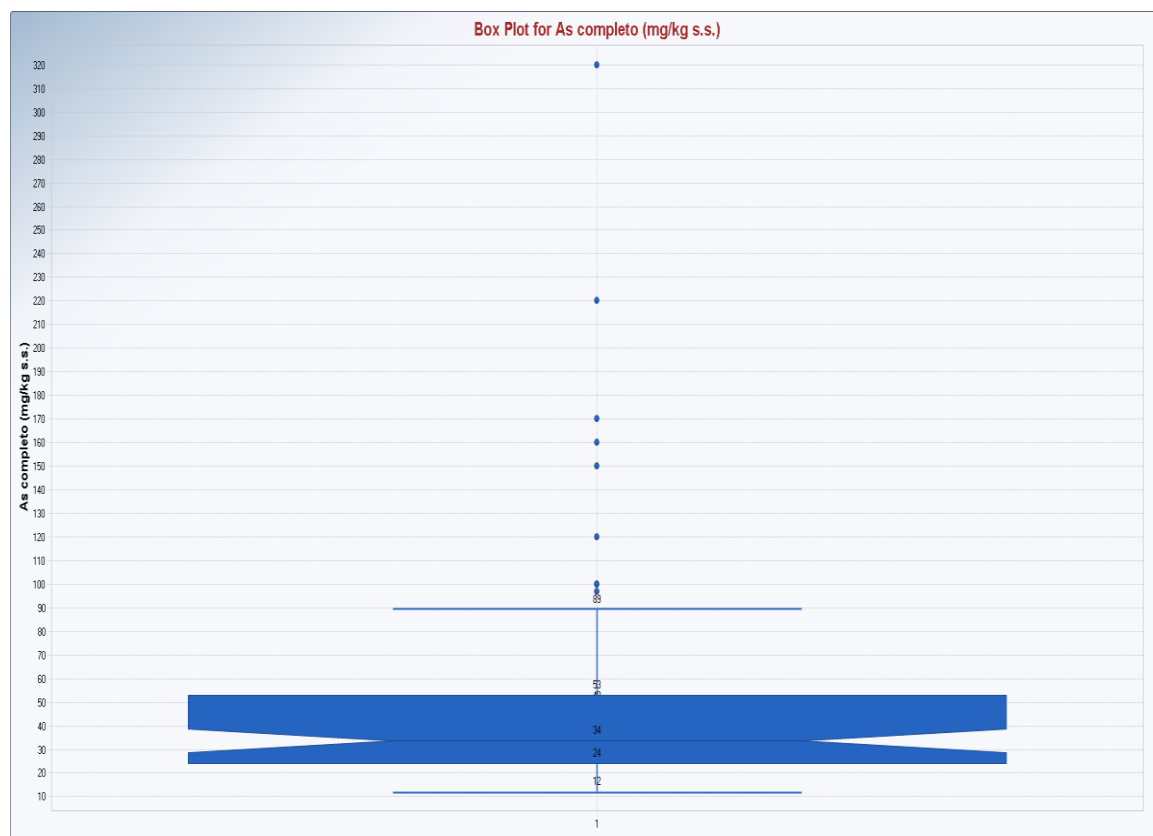


Figura 2: box plot del dataset completo al 2022 dei valori di Arsenico rinvenuti sul territorio comunale

Tali valori, individuati come outlier della distribuzione, potevano essere ricondotti ad uno stesso areale geografico posto nella parte sud del territorio comunale, alla base del versante del monte Vallecetta, come riportato nella seguente Figura 3:

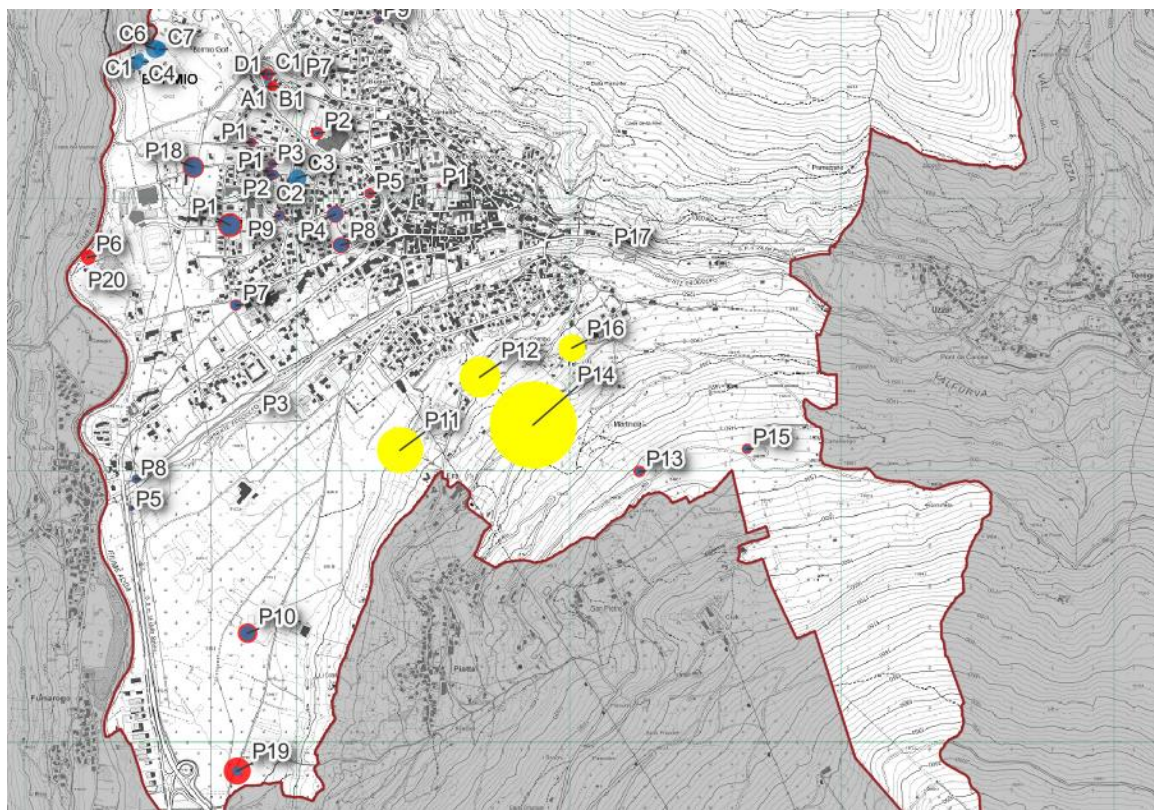


Figura 3: distribuzione planimetrica dei valori di Arsenico riscontrati nei campioni prelevati nel territorio comunale (anno 2022). In giallo i potenziali outlier

Il box plot del dataset completo aggiornato all'anno 2024 individua come potenziali outlier tenori di As superiori a 190 mg/kg come mostrato in Figura 4.

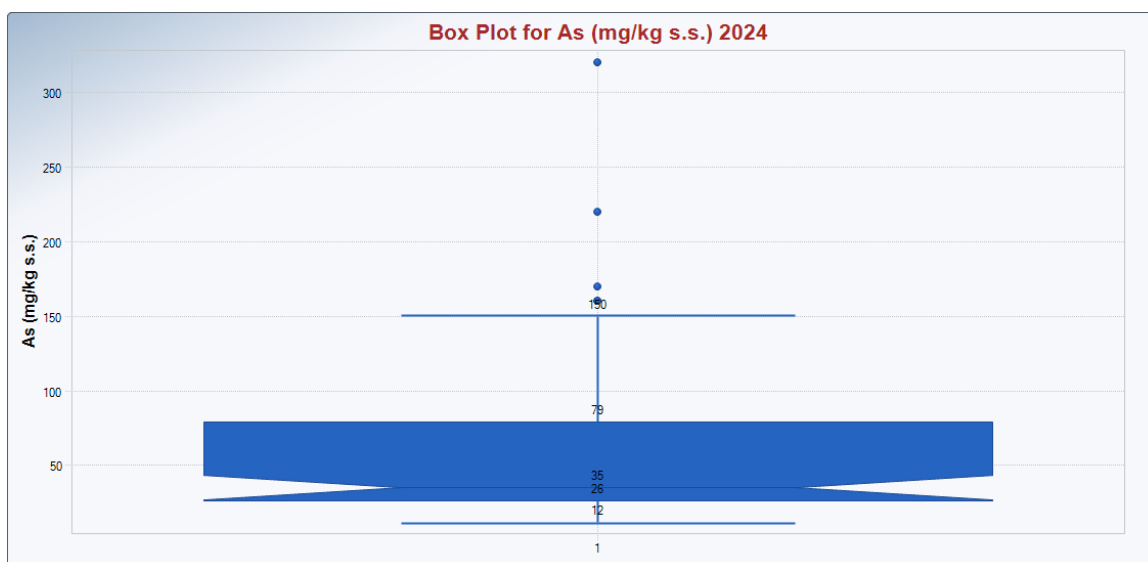


Figura 4: box plot del dataset completo al 2024 dei valori di Arsenico rinvenuti sul territorio comunale

La presenza di un numero inferiore di outlier nel dataset 2024 rispetto a quello 2022 è da ricercarsi nel fatto che, essendo i nuovi dati provenienti dall'area dove sono stati riscontrati i valori di Arsenico più elevati, la coda destra della nuova distribuzione risulta essere maggiormente rappresentata rispetto a quanto accadeva in precedenza; pertanto molti dei valori individuati come outlier nel 2022 sono stati riassorbiti nella distribuzione.

Tuttavia, il dataset complessivo 2024 risulta non avere una distribuzione discernibile al livello di significatività del 5%. Ciò potrebbe essere dovuto alla presenza di più distinte popolazioni nella distribuzione, come già individuato nell'anno 2022.

I valori di concentrazione maggiori infatti sono stati individuati preferenzialmente in un unico areale geografico, alla base del versante del monte Vallecetta, dove si rilevavano depositi di tipo morenico.

Tale areale è stato pertanto distinto e denominato *Area 2* rispetto alla restante porzione di territorio indagato, denominata *Area 1*.

Suddividendo il dataset in due sottoinsiemi sulla base del criterio geografico, ossia separando i dati relativi all' *Area 2* da quelli relativi all'*Area 1*, si ottengono due distribuzioni aventi rispettivamente come indici di correlazione $R=0.874$ e $R=0.944$.

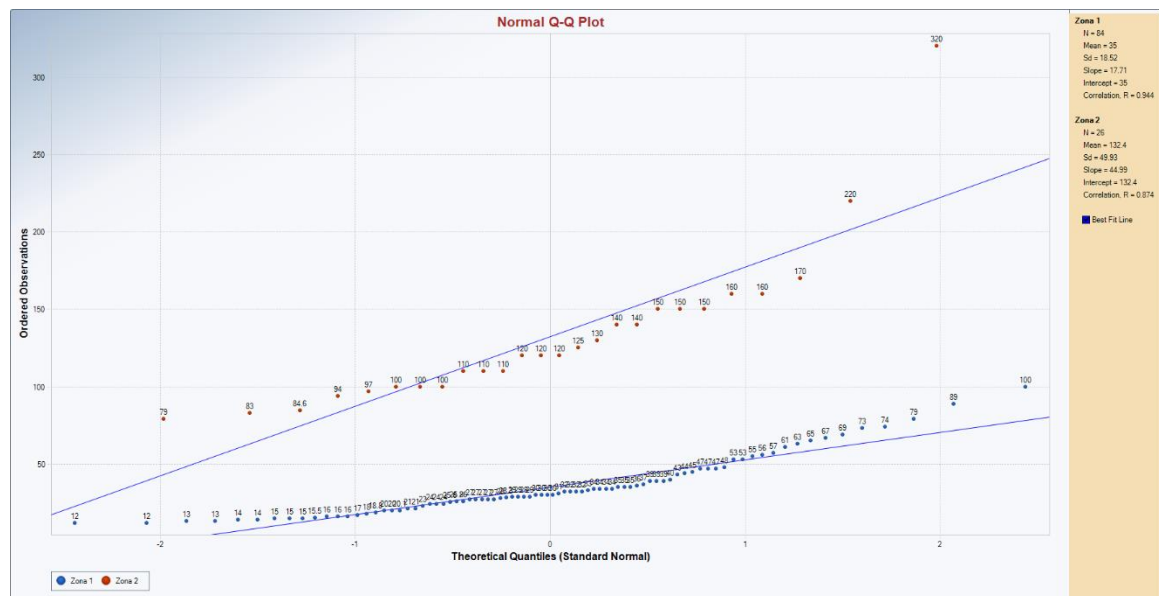


Figura 5: Identificazione delle due popolazioni suddivise in "Area 1" in blu e "Area 2" in rosso

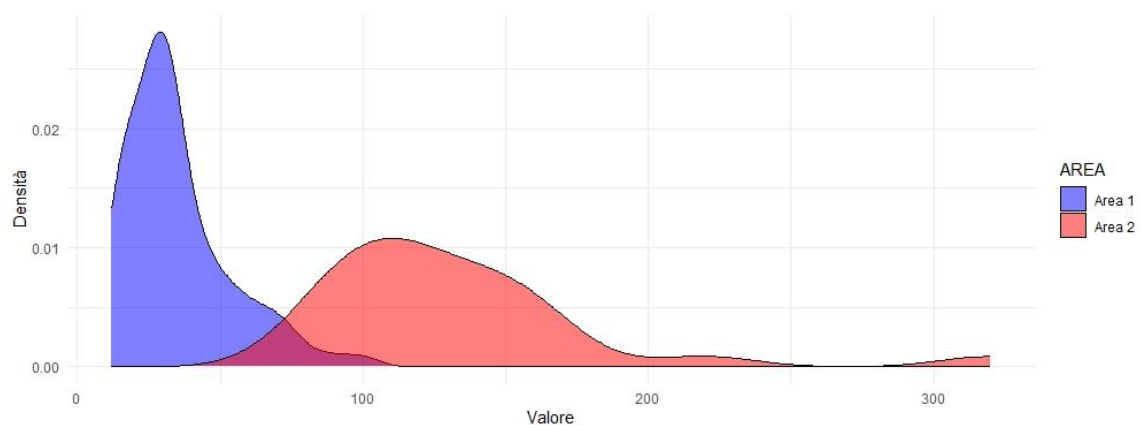


Figura 6: distribuzione delle due popolazioni suddivise in "Area 1" in blu e "Area 2" in rosso

Dalla Figura 6 si può notare che la coda destra della popolazione *Area 1* e la coda sinistra della popolazione *Area 2* sono parzialmente sovrapponibili; ciò viene interpretato come variabilità naturale all'interno dei due differenti domini. I valori più elevati di concentrazione di Arsenico che si rilevano nell'*Area 1* si ritiene che possano essere legati ad arricchimenti puntuali,

contrariamente a quanto si rileva nell'Area 2, dove i tenori di Arsenico sono sempre elevati e la concentrazione media si attesta attorno ai 120 mg/kg.

Si ritiene dunque di suddividere il dataset su base geografica definendo due distinti valori di fondo alle zone Area 1 ed Area 2 rappresentate in Figura 9 e Tavola 3.

Dal punto di vista dell'analisi statistica, il dataset derivante dalla delimitazione dell'Area 1 restituisce il seguente boxplot:

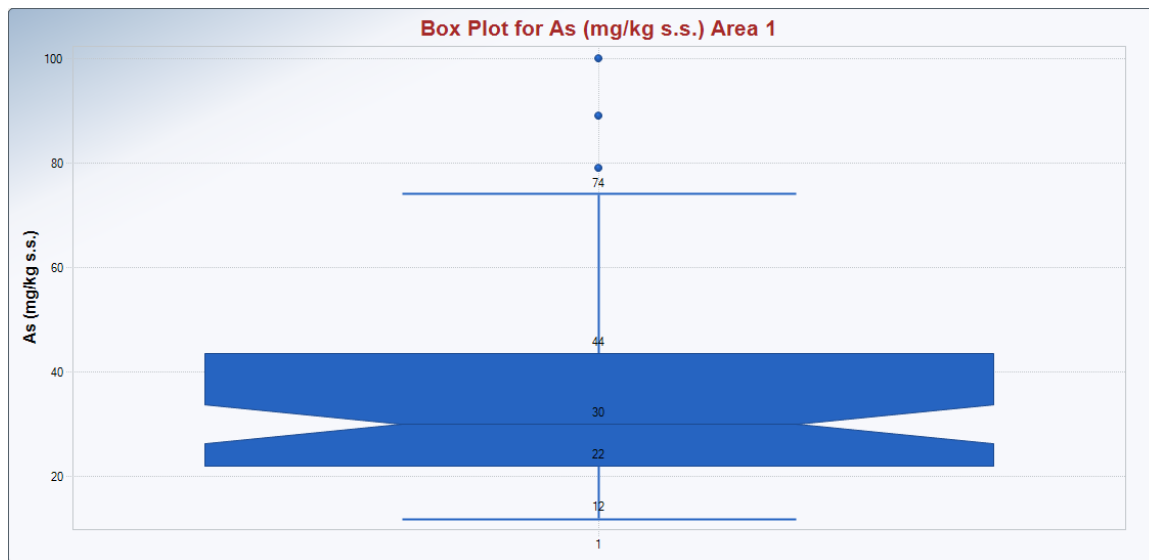


Figura 7: box plot del dataset dell'Area 1

Applicando la medesima metodologia anche per il dataset dell'Area 2 si ottiene il sottostante boxplot:

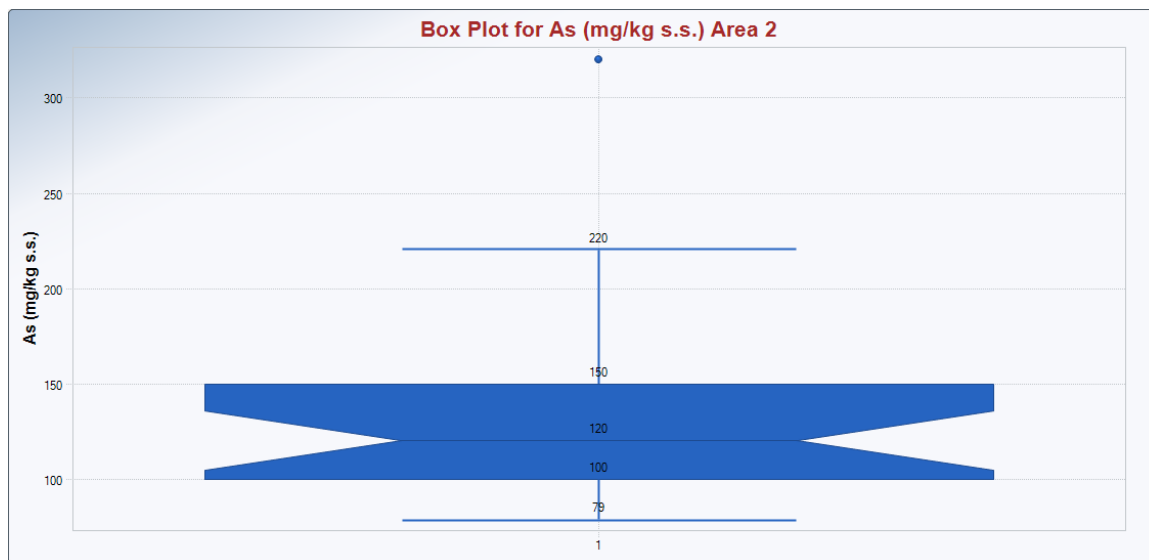


Figura 8: box plot del dataset dell'Area 2

Dai box plot dei due dataset si evidenziano dei valori di concentrazioni dell'Arsenico al di sopra dei rispettivi massimi (74 mg/kg s.s. e 220 mg/kg s.s.), identificabili in prima battuta come valori anomali o outlier.

Dalle caratteristiche del contesto in cui sono stati prelevati i campioni è risultato però evidente che tali valori non sono comunque riconducibili a contaminazioni di origine antropica ma vengono interpretati come puntuali arricchimenti di Arsenico e pertanto questi dati vengono inclusi nei set utilizzati per la determinazione del valore di fondo naturale.

Determinazione del valore di fondo dell'Area 1

Per la determinazione del valore di concentrazione rappresentativo del fondo naturale nell'Area 1 sono stati utilizzati i dati relativi a 84 campioni di terreno, comunque ritenuti indicativi delle condizioni naturali dell'area. Si evidenzia che i dati vengono elaborati senza distinguere la profondità di campionamento, sia perché non si osserva una correlazione tra questa e la concentrazione di Arsenico, sia perché per alcuni dati non è identificata la profondità di prelievo.

Come specificato dalle linee guida SNPA "determinare il "valore di fondo" di un dato parametro significa attribuire ad esso un valore (o, in termini più generali, associare ad esso un descrittore) che esprima la variabilità massima di quel parametro in relazione all'"oggetto" che si intende rappresentare, all'area di indagine e, eventualmente, ad una finestra temporale".

Di conseguenza, preliminarmente, sono stati condotti i test statistici atti ad individuare quale fosse la distribuzione più adatta a rappresentare l'andamento del dato raccolto.

Come sintetizzato in Tabella 5, il set di dati considerato non appare rappresentabile da una distribuzione Normale, ma da una distribuzione ad essa riconducibile ovvero quella Lognormale¹:

Normal GOF Test Results		Lognormal GOF Test Results	
Correlation Coefficient R	0.944	Correlation Coefficient R	0.993
Approximate Shapiro Wilk Test Statistic	0.886	Approximate Shapiro Wilk Test Statistic	0.967
Approximate Shapiro Wilk P Value	1.3902E-8	Approximate Shapiro Wilk P Value	0.132
Lilliefors Test Statistic	0.167	Lilliefors Test Statistic	0.0679
Lilliefors Critical (0.05) Value	0.0968	Lilliefors Critical (0.05) Value	0.0968
Data not Normal at (0.05) Significance Level		Data appear Lognormal at (0.05) Significance Level	

Tabella 5: individuazione della miglior distribuzione rappresentativa del set di dati Area 1

Il valore di fondo viene quindi individuato al 95° percentile della distribuzione Lognormale, in corrispondenza del quale risulta essere pari a circa **70 mg/kg s.s.**, come evidenziato nella seguente **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Background Statistics assuming Lognormal Distribution				
95% UTL with 95% Coverage	82.24		90% Percentile (z)	58.74
95% UPL (t)	71.5		95% Percentile (z)	70.49
95% USL	150		99% Percentile (z)	99.24

Tabella 6: Parametri statistici della distribuzione dei dati dell'Area 1 e individuazione del descrittore del fondo naturale

Determinazione del valore di fondo dell'Area 2

Per la determinazione del valore di concentrazione rappresentativo del fondo naturale nell'Area 2 sono stati utilizzati i dati relativi a 26 campioni di terreno, comunque ritenuti indicativi delle condizioni naturali dell'area. Si evidenzia che i dati vengono elaborati senza distinguere la

¹ Test condotto utilizzando la funzione "Goodness of fit" del software ProUCL 5.1

profondità di campionamento poiché non si osserva una correlazione tra questa e la concentrazione di Arsenico.

Come sintetizzato in Tabella 7, il set di dati considerato non appare rappresentabile da una distribuzione Normale, ma da una distribuzione ad essa riconducibile ovvero quella Lognormale:

Normal GOF Test Results		Lognormal GOF Test Results	
Correlation Coefficient R	0.874	Correlation Coefficient R	0.962
Shapiro Wilk Test Statistic	0.783	Shapiro Wilk Test Statistic	0.932
Shapiro Wilk Critical (0.05) Value	0.92	Shapiro Wilk Critical (0.05) Value	0.92
Approximate Shapiro Wilk P Value	4.5390E-5	Approximate Shapiro Wilk P Value	0.0937
Lilliefors Test Statistic	0.175	Lilliefors Test Statistic	0.104
Lilliefors Critical (0.05) Value	0.17	Lilliefors Critical (0.05) Value	0.17
Data not Normal at (0.05) Significance Level		Data appear Lognormal at (0.05) Significance Level	

Tabella 7: individuazione della miglior distribuzione rappresentativa del set di dati Area 2

Il valore di fondo viene quindi individuato al 95° percentile della distribuzione Lognormale, in corrispondenza del quale risulta essere pari a circa **210 mg/kg s.s.**, come evidenziato nella seguente Tabella 8:

Background Statistics assuming Lognormal Distribution			
95% UTL with 95% Coverage	255.3	90% Percentile (z)	187.4
95% UPL (t)	216.2	95% Percentile (z)	209.8
95% USL	289.7	99% Percentile (z)	259.4

Tabella 8: Parametri statistici della distribuzione dei dati dell'Area 2 e individuazione del descrittore del fondo naturale

I valori di fondo così determinati, da utilizzare in sostituzione alle CSC come previsto dalla normativa vigente, si ritengono validi per i rispettivi ambiti territoriali definiti Area 1 e Area 2 delimitati in Tavola 3, riportata in stralcio nella seguente Figura 9:

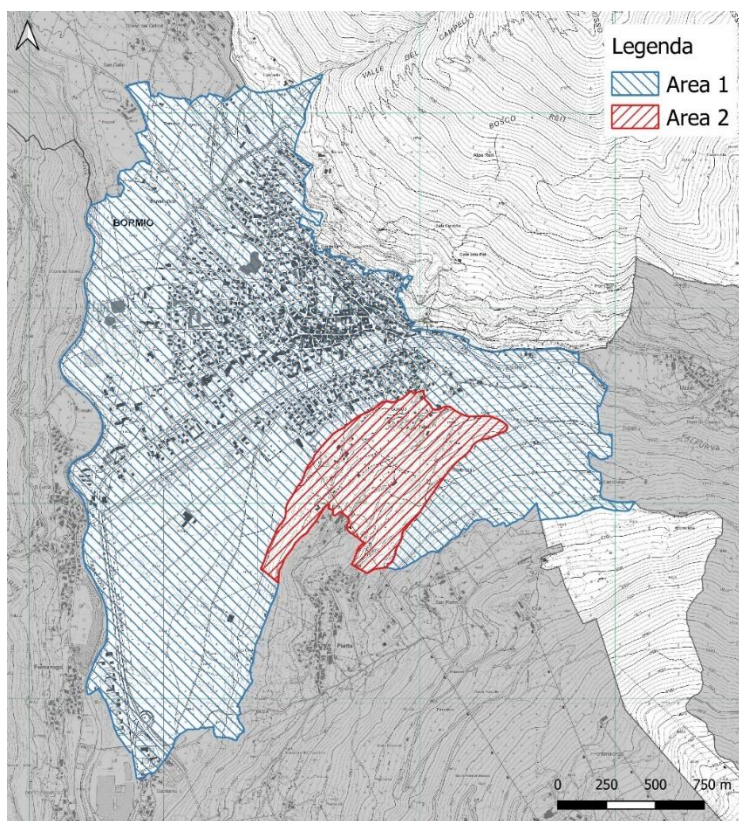


Figura 9: stralcio Tavola 3 con rappresentazione degli ambiti di validità dei valori di fondo naturale determinati

CONCLUSIONI

Le attività di indagine condotte nell'ambito del protocollo di intesa sottoscritto nel 2022 da ARPA Lombardia, dall'Amministrazione Comunale di Bormio, da ANCE Lecco e Sondrio e Confartigianato Imprese Sondrio, hanno consentito di raccogliere 40 campioni di terreno in 20 distinti punti di indagine distribuiti diffusamente sul territorio comunale.

Sommando i dati relativi alle concentrazioni di Arsenico riscontrati in tali campioni con gli ulteriori dati ottenuti in precedenti o concomitanti indagini sullo stesso territorio, comunque validati dall'Agenzia, è stato formato un cospicuo set di 86 valori rappresentativi della distribuzione territoriale delle concentrazioni del parametro ricercato nei terreni dell'area.

A seguito di ulteriori campagne di indagine effettuate nell'area definita nell'elaborato datato 2022 "Area di Anomalia" è stato possibile ampliare ulteriormente il dataset pervenendo alla definizione del valore di fondo naturale di Arsenico anche in questo areale definito in seguito *Area 2*.

Sono pertanto stati definiti, per il territorio del Comune di Bormio, due distinti valori di fondo naturale dell'Arsenico, rappresentativi di due differenti domini rappresentati da due aree denominate *Area 1* ed *Area 2*, dove i due VFN determinati sono rispettivamente pari a **70 mg/kg s.s.** e **210 mg/kg s.s.**

Il valore di fondo naturale così determinato sostituisce la Concentrazione Soglia di Contaminazione del parametro Arsenico espressa alla Tabella 1, All. 5 al Titolo V, Parte Quarta, d.lgs. 3 aprile 2006, n. 152, colonne A e B, negli ambiti territoriali rappresentati nella Tavola 3.

La disciplina degli eventuali siti di produzione, deposito intermedio e di destinazione di materiali da scavo in tali ambiti è infine dettagliata nelle NTA allegate.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 “Norme in materia ambientale”.
- Decreto del Presidente della Repubblica 13 giugno 2017, n. 120 “Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo, ai sensi dell’articolo 8 del decreto-legge 12 settembre 2014, n. 133, convertito, con modificazioni, dalla legge 11 novembre 2014, n. 164”.
- legge 29 luglio 2021, n. 108 “Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 31 maggio 2021, n. 77, recante governance del Piano nazionale di ripresa e resilienza e prime misure di rafforzamento delle strutture amministrative e di accelerazione e snellimento delle procedure”.

LINEE GUIDA

- Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure (ARPAL), 2014. “Linee guida per lo studio dei valori di fondo naturale di alcuni metalli e semimetalli nei suoli della Liguria”.
- ISO 19258/2005 “Soil Quality – Guidance on the determination of background values”.
- Provincia di Milano, Università degli Studi di Milano – Dipartimento di Scienze della Terra “A. Desio”, 2003. “Linee guida per la determinazione dei valori del fondo naturale nell’ambito della bonifica dei siti contaminati”.
- Regione del Veneto, 2010. Protocollo operativo per l’esecuzione di indagini mirate alla determinazione delle concentrazioni di metalli e metalloidi nei suoli attribuibili al fondo naturale o ad inquinamento diffuso. Allegato A alla Dgr n. 464 del 02.03.2010.
- Sistema Nazionale per la Protezione dell’Ambiente (SNPA), 2018. “Linee guida per la determinazione dei valori di fondo per i suoli e le acque sotterranee”. Linee guida n. 8.
- Sistema Nazionale per la Protezione dell’Ambiente (SNPA), 2019. “Linee guida sull’applicazione della disciplina per l’utilizzo delle terre e rocce da scavo.”. Linee guida n. 22.

BIBLIOGRAFIA

- ARPA Emilia-Romagna. 2005. “Presenza e diffusione dell’arsenico nel sottosuolo e nelle risorse idriche italiane”. I quaderni di Arpa.
- ARPA Veneto, Dipartimento Provinciale di Treviso – Servizio Osservatorio Suolo e Rifiuti. Dicembre 2007. “L’interpretazione delle analisi del terreno”. ISBN 88-7504-115-6.
- L. Benetti. 2001. “Arsenico nativo, arsenopirite ed altri minerali di arsenico in provincia di Sondrio”. IVM Magazine, Bollettino dell’Istituto di Mineralogia “F. Grazioli” 2/2001, pp. 12-13.
- G. Bonsignore, A. Borgo, R. Gelati, A. Montrasio, R. Potenza, R. Pozzi, U. Ragni, G. Schiavinato. 1969. “Carta Geologica d’Italia alla scala 1:100.000, foglio 8, Bormio” e relative “Note illustrative”. Servizio Geologico d’Italia. Consultabile al seguente link:
http://sgi.isprambiente.it/geologia100k/mostra_foglio.aspx?numero_foglio=8
- Comune di Bormio. 2013. “Componente geologica, idrogeologica e sismica. Relazione generale”. Piano di Governo del Territorio (PGT).

- P. Conti. (1997). “La Falda austroalpina dell’Ortles e l’evoluzione tettonica delle Dolomiti dell’Engadina (Svizzera-Italia)”. Mem. Descr. Carta Geol. d’Italia, LIII, Roma.
- Istituto Nazionale per l’Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro (INAIL). 2010. “Arsenico: contaminazione ed esposizione ambientale”. Quaderno informativo ISPESL.
- M. Marcolli. 2020. “Studio della distribuzione dell’arsenico nei suoli dell’alta Valtellina finalizzato alla definizione di una metodologia per la determinazione dei valori di fondo naturale”. Tesi di laurea, Università degli Studi di Milano – Bicocca, Dipartimento di Scienze dell’Ambiente e della Terra.
- National Academy of Sciences. 1977. “Medical and biologic effects of environmental pollutants: Arsenic”. Washington D.C., pp 332.
- F. Previtali. 2001. “Elementi di geopedologia. Genesi e geografia dei suoli.”
- Provincia di Milano. 2003. “Linee guida per la selezione di analiti da determinare nella caratterizzazione dei siti contaminati.”
- Regione Lombardia. Carta litologica - Base informativa della cartografia Geoambientale. Mappa digitale. Ultima revisione del dato: 01/01/1987. Geoportale: <https://www.geoportale.regione.lombardia.it/>
- Regione Lombardia. Carta geomorfologica - Base informativa della cartografia Geoambientale. Mappa digitale. Ultima revisione del dato: 01/01/1987. Geoportale: <https://www.geoportale.regione.lombardia.it/>
- P.L. Smedley, D.G. Kinniburgh. 2002. “A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters”. Applied Geochemistry 17 (2002), pp. 517–568.