



Combustioni all'aperto  
Programma di monitoraggio di microinquinanti in  
aria - Via di Salone Roma



2017

---

---

## Combustioni all'aperto - Programma di monitoraggio di microinquinanti in aria a Via di Salone Roma

16 ottobre 2017

### A cura di:

- **ARPA Lazio, Direzione Tecnica – Atmosfera e Impianti – Via Boncompagni 101, 00189 Roma**  
Antonio Amoroso, Rossana Cintoli, Alessandro D. Di Giosa, Maurizio Guidotti, Stefano Listrani, Malgorzata Owczarek
- **INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Via di Vigna Murata, 605 - 00143 Roma**  
Chiara Caricchi, Patrizia Macrì, Aldo Winkler

Foto di copertina: Foto [http://www.municipioroma.it/wp-content/uploads/2015/04/sgombero\\_salone201.jpg](http://www.municipioroma.it/wp-content/uploads/2015/04/sgombero_salone201.jpg)

---

---



# INDICE

<b>LEGENDA</b> .....	<b>4</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b> .....	<b>5</b>
<b>2 PROCESSI DI COMBUSTIONE</b> .....	<b>6</b>
<b>3 LIMITI DI LEGGE</b> .....	<b>8</b>
<b>4 MONITORAGGIO</b> .....	<b>11</b>
<b>5 RISULTATI</b> .....	<b>19</b>
<b>6 CONCLUSIONI</b> .....	<b>22</b>
<b>7 BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>24</b>
<b>8 APPENDICE 1: MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA TRAMITE LICHENI COME BIOACCUMULATORI</b> .....	<b>25</b>
<b>8 APPENDICE 2: BIOMONITORAGGIO MAGNETICO DEI LICHENI / INGV</b> .....	<b>27</b>

## Indice figure

FIGURA 1: FOTO DI UN INCENDIO DI VIA DI SALONE (DA ROMATODAY).....	5
FIGURA 2: MAPPA E RISULTATI VOC MEDIATI DELL'AREA SOTTO INDAGINE AMBIENTALE A VIA DI SALONE ROMA. ....	12
FIGURA 3: DISTANZA DEPOSIMETRO DA CAMPO ROM.....	14
FIGURA 4: XANTHORIA PARIETINA (COPYRIGHT JENNY SEAWRIGHT) .....	16
FIGURA 5: PUNTI DI CAMPIONAMENTO LIMITROFI A VIA DI SALONE.....	17
FIGURA 6: VALORI DI DIOSSINE E FURANI DA BIOMONITORAGGIO PRESSO IL CAMPO ROM DI VIA DI SALONE. ....	19
FIGURA 7: VALORI DI PBDEs DA BIOMONITORAGGIO PRESSO IL CAMPO ROM DI VIA DI SALONE.....	20
FIGURA 8: CONCENTRAZIONI DI Pb DA BIOMONITORAGGIO PRESSO IL CAMPO ROM DI VIA DI SALONE. ....	21

## Indice figure

TABELLA 1: CONCENTRAZIONE MEDIA PCDD/F RILEVATA IN UE IN MATERIALE PARTICELLARE SOSPESO E NELLA DEPOSIZIONE ATMOSFERICA. ...	11
TABELLA 2: RISULTATI DEI VOC ( $\mu\text{G}/\text{M}^3$ ) PER SETTIMANA DI MISURA .....	13
TABELLA 3: RISULTATI DELLE ALDEIDI ( $\mu\text{G}/\text{M}^3$ ) PER SETTIMANA DI MISURA.....	13
TABELLA 4: RISULTATI DIOSSINE DA DEPOSIMETRO VICINO AL CAMPO ROM DI VIA DI SALONE. ....	14
TABELLA 5: RISULTATI ANALITICI SUI BIOMONITORAGGI SULLA XANTHORIA PARIETINA.....	17
TABELLA 6: MEDIA DEI RISULTATI VICINO CAMPO ROM, E CONFRONTO CON DATI CAMPAGNA ARPA LAZIO 2015 .....	22



## LEGENDA

DAD	Diode Array Detector
GC	Gas Chromatography
HPLC	High Pressure Liquid Chromatography
HRGC	High resolution Gas Chromatography
HRMS	High resolution Mass Spectrometry
INGV	Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia
MS	Mass Spectrometry Detector
PBDEs	Polibromo-difenil eteri
PCBs	Policlorobifenili
PCDD	Policloro-dibenzo – diossine
PCDF	Policloro-dibenzo – furani
POPs	Persistent Organic Pollutants
TEF	Fattore di Tossicità equivalente
TEQ	Tossicità equivalente
TCDD	2,3,7,8 –tetracloro di benzo-p-diossina
U.d.M.	Unità di Misura
VOC	Composti organici Volatili

\* \* \*

Viene riportata la tabella di conversione dei sottomultipli di grammo utilizzati nel documento.

Tabella di conversione dei grammi	
mg	$10^{-3}$ g
$\mu$ g	$10^{-6}$ g
ng	$10^{-9}$ g
pg	$10^{-12}$ g
fg	$10^{-15}$ g

## 1 INTRODUZIONE

ARPA Lazio ed altre Autorità hanno ricevuto numerose segnalazioni relative a combustioni che frequentemente si sviluppano presso i campi rom. Tali attività sono certamente di natura illecita e generano nella popolazione preoccupazione, a causa della generazione di sostanze nocive durante la combustione incontrollata di materie plastiche, rifiuti contenenti composti clorurati, materiale organico. Generalmente, queste combustioni vengono attivate per liberare i metalli contenuti nei rifiuti.



*Figura 1: Foto di un incendio di via di Salone (da RomaToday).*

Nel mese di Luglio, a seguito di una audizione in Commissione Ambiente della Regione, sul tema e a seguito di richiesta dell'assessorato ambientale, ARPA Lazio, ha avviato una campagna di monitoraggio pilota nei dintorni del Campo Rom di via di Salone Roma. Al programma sperimentale

di misura ha collaborato il laboratorio di paleomagnetismo e magnetismo ambientale dell'INGV (vedi documento allegato).

In generale, questi roghi hanno una dimensione ridotta rispetto ad altre tipologie di combustioni (ad esempio: incendi di aree boschive, capannoni industriali, serbatoi di idrocarburi, discariche) e, di conseguenza, il rilascio di sostanze inquinanti in aria ambiente è noto dal punto di vista qualitativo, ma difficile da monitorare quantitativamente. La campagna è finalizzata ad una prima analisi del fenomeno, e alla messa a punto della migliore strategia di monitoraggio in termini di efficienza ed efficacia, anche al fine di definire un protocollo operativo.

## 2 PROCESSI DI COMBUSTIONE

I processi di combustione generano una molteplicità di sostanze organiche dovute alla arsione incompleta, alle particolari condizioni di temperatura, umidità e alle tipologie di composti presenti nel comburente. La combustione favorisce la formazione di materiale organico volatile e semivolatile, nonché metalli che a seconda delle condizioni atmosferiche possono disperdersi nell'atmosfera e successivamente ricadere nelle zone più o meno limitrofe all'evento combustivo.

Per alcuni di questi composti la tossicità è riconosciuta dalla comunità scientifica e considerata dalla normativa vigente sulla qualità dell'aria ambiente (D.lgs. n.155/2010).

Diversi studi dimostrano che la concentrazione dei composti chimici liberati in atmosfera rappresentano un pericolo sia dal punto di vista ambientale che sanitario.

I composti organici generati in carenza di ossigeno possono essere gassosi o aeriformi; la loro composizione chimica evidenzia un numero limitato di atomi di carbonio (più è basso più sono volatili, detti VOC) e con catena:

1. Lineare
2. Aromatica

- 2.1. Monociclica
  - 2.1.1. non sostituita (Benzene)
  - 2.1.1. sostituita (toluene, xileni, nitrobenzeni)
- 2.2. Policiclica
  - 2.2.1. non sostituita (IPA)
  - 2.2.2. sostituita (es. Nitro-IPA)

Quando sono presenti materiali plastici (PVC), associati a metalli che fungono da catalizzatore (in primis il rame) e in particolari condizioni di temperatura, si generano le diossine. Le diossine possono essere generate anche da processi di combustione industriale e dalla combustione di legno e carbone. Con il termine generico di “diossine” si indica un gruppo di 210 composti chimici aromatici policlorurati, divisi in due famiglie: diossine PCDD e furani PCDF di cui la 2,3,7,8 – tetracloro di benzo -p-diossina (TCDD) è quella più conosciuta poichè più pericolosa (è usata come valore di riferimento per il calcolo della Tossicità Equivalente delle altre diossine) (Bertazzi, et al., 2001; Lohmann & Jones, 1998).

Le diossine sono composti poco solubili in acqua ma molto solubili nei tessuti adiposi e per questo motivo si accumulano negli individui e possono provocare alterazioni al corso normale del metabolismo animale. Proprio per la loro tendenza ad accumularsi nei tessuti viventi, anche un'esposizione prolungata a livelli minimi può causare danni (Steenland & Deddens, 2003). Inoltre, salendo nella catena trofica, la concentrazione di tali sostanze può aumentare (biomagnificazione), giungendo a esporre a rischio maggiore il vertice di detta catena (Czuczwa & Hites, 1984). Altri composti che destano preoccupazione durante un incendio sono i policlorobifenili (PCB) con una serie di 209 composti aromatici costituiti da molecole di bifenile variamente clorate. Questi composti sono molto stabili, resistenti ad acidi, alcali e alla fotodegradazione, non sono ossidabili,



non attaccano i metalli, sono poco solubili in acqua, ma lo sono nei grassi e solventi organici; evaporano a temperature superiori a 300°C e si decompongono solo oltre 800-1000°C. I PCB venivano prodotti industrialmente fino al 1995. A differenza delle diossine, quindi, i PCB sono sostanze chimiche largamente prodotte in passato tramite processi industriali per le loro proprietà chimico-fisiche.

Solo 12 dei 209 congeneri di PCB presentano caratteristiche chimico-fisiche e tossicologiche paragonabili alle diossine e ai furani: questi vengono definiti PCB diossina simili (PCB-DL). Altri undici PCB non diossina simili, interessanti a livello sanitario e ambientale, completano il quadro dei PCB ricercati prevalentemente nelle matrici ambientali.

I PBDE (Poli bromo difenil eteri) sono stati utilizzati in una vasta gamma di prodotti, compresi i materiali da costruzione, elettronica, mobili, veicoli a motore, aeroplani, materie plastiche, schiume poliuretatiche e prodotti tessili. Essi sono strutturalmente simili ai i PCB e altri composti poli-alogenati, costituiti da due anelli aromatici alogenati. Generalmente, visto che tali composti sono ubiquitari e possono essere liberati in atmosfera solo se i materiali vengono bruciati, si possono considerare come traccianti della combustione di materiale contenente tali sostanze (Sidhu, et al., 2005).

I composti descritti sono denominati microinquinanti, perché sono generalmente presenti nell'ambiente (aria, acqua, terreni, rifiuti e alimenti) in concentrazioni molto basse, pur tuttavia in grado di alterare l'equilibrio dell'ecosistema e di produrre effetti tossici; peraltro, hanno la caratteristica di essere molto stabili e, quindi ,persistenti nell'ecosistema (POPs) (Comunità Europea, 2006).

### 3 LIMITI DI LEGGE

Il quadro normativo di riferimento relativo alla matrice aria è costituito dal Decreto legislativo 13 agosto 2010 n.155 "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e

per un'aria più pulita in Europa" e dal Piano di risanamento della qualità dell'aria del Lazio, approvato con Delibera del Consiglio Regionale n.66 del 10 dicembre 2009.

Il Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n.155<sup>1</sup> definisce i limiti di legge per diversi inquinanti quali NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub> e alcune sostanze presenti nel particolato quali IPA e metalli. Tra questi nel caso degli incendi possono essere di particolare interesse, vista anche la loro persistenza in aria e la ricaduta al suolo, il PM<sub>10</sub> (media giornaliera - 50 µg/m<sup>3</sup>), la concentrazione del benzo[a]pirene a livello di media annua (1 ng/m<sup>3</sup>) oltre ad alcuni metalli presenti nel particolato atmosferico, anch'essi come media annua. In generale, i metalli pesanti sono presenti in atmosfera sotto forma di particolato aerotrasportato; le dimensioni delle particelle a cui sono associati e la loro composizione chimica dipende fortemente dalla tipologia della sorgente di emissione; per questo motivo vengono generalmente misurati nelle polveri sospese. Infatti, il valore obiettivo è riferito al tenore dell'inquinante presente nella frazione PM<sub>10</sub> del materiale particolato. I valori obiettivo sono: As 6 ng/m<sup>3</sup>, Cd 5 ng/m<sup>3</sup>, Ni 20 ng/m<sup>3</sup>, Pb 0.5 µg/m<sup>3</sup>). Per quanto riguarda i VOC il solo limite di legge applicabile è quello previsto dal D.Lgs. 155/2010<sup>1</sup> per il benzene (media annua 5 µg/m<sup>3</sup>).

---

Nota <sup>1</sup>

**Valori Limite per la protezione della salute umana (D. Lgs. 155/2010)**

Per comodità e completezza, qui di seguito sono riportati i valori limiti per la protezione della salute umana imposti dal D. Lgs. 155/2010 (e naturalmente anche dalla Direttiva 2008/50/CE). Da ricordare che tali valori limite sono riferiti sempre ad un arco temporale pari ad 1 anno civile.

**PM<sub>10</sub>:** Valore limite di 50 µg/m<sup>3</sup> per le concentrazioni medie giornaliere da non superare per più di 35 volte nell'anno civile; Valore limite 40 µg/m<sup>3</sup> per la concentrazione media annuale.

**PM<sub>2.5</sub>:** Valore limite 25 µg/m<sup>3</sup> per la concentrazione media annuale da raggiungere entro il 2015. A partire dal 2009 è applicato un margine di tolleranza decrescente secondo un percentuale annua costante e tale da annullarsi il 2015. Nell'anno 2014 il valore limite incrementato del margine di tolleranza è pari a 26 µg/m<sup>3</sup>.

**NO<sub>2</sub>:** Valore limite di 200 µg/m<sup>3</sup> per le concentrazioni medie orarie da non superare più di 18 volte nell'anno civile; valore limite 40 µg/m<sup>3</sup> per la concentrazione media annuale.

**O<sub>3</sub>:** Valore limite di 180 µg/m<sup>3</sup> e 240 µg/m<sup>3</sup> per la concentrazione media oraria che rappresentano rispettivamente soglia di informazione e di allarme; Valore limite di 120 µg/m<sup>3</sup> come massimo giornaliero della media mobile su 8 ore da non superare più di 25 volte nell'anno civile.

**SO<sub>2</sub>:** Valore limite 350 µg/m<sup>3</sup> delle concentrazioni medie orarie; Valore limite 125 µg/m<sup>3</sup> per la concentrazione media giornaliera da non superare più di 3 volte nell'anno civile.

**CO:** Valore limite di 10 mg/m<sup>3</sup> come massimo giornaliero della concentrazione media mobile su 8 ore.

**Benzene:** Valore limite di 5 µg/m<sup>3</sup> per la concentrazione media annuale.

Sia le aldeidi che gli altri composti organici volatili non sono normati ma possono dare utili informazioni sui risultati ottenuti.

Per quanto riguarda le diossine, le concentrazioni (esprese come tossicità in termini di equivalente)<sup>2</sup> in ambiente urbano di PCDD e PCDF sono stimate a circa 100 fg/m<sup>3</sup> (dati OMS) anche se con elevata variabilità di zona. Concentrazioni in aria di 300 fg/m<sup>3</sup> o superiori sono indicative della presenza di fonti di emissione locale che devono essere identificate e controllate (Air quality guidelines for Europe, 2000 WHO). La concentrazione nell'aria, pur costituendo un contributo minore, è molto importante per la contaminazione del catena alimentare.

Oggi giorno si può stimare un'assunzione media (U.S.A.) di circa 1 pg/Kg peso corporeo per un contenuto medio di circa 0.2 µg. Si consideri che il tempo medio di permanenza di diossine e furani nel corpo umano è di sette anni.

Si segnalano tre utili riferimenti:

- 1) Le Linee guida per la qualità dell'aria dell'OMS (WHO, 2000).
- 2) Un documento APAT su Diossine e Furani e PCB [2006], che descrive le normative e le linee guida in campo ambientale per i suddetti composti (APAT, 2006).
- 3) Il rapporto Istisan 06/43, che contiene valori riferiti al Lazio in aria; nello specifico, per l'area urbana di Roma viene riportato un intervallo di 11-38 fg I-TEQ/m<sup>3</sup>, mentre il sito remoto presso il Parco dei Monti Simbruini ha 2-6 fg I-TEQ/m<sup>3</sup> di diossine equivalenti (Viviano et al. , 43/2006; Viviano et al. 2006 Menichini et al. 2007; Turrio-Baldassarri, et al., 2001).

Nella Tabella 1 sono riportati alcuni valori di concentrazione di diossine e furani rilevati su campioni prelevati su materiale particellare sospeso e nella deposizione atmosferica in Europa. Il German

---

<sup>2</sup> Generalmente le diossine non vengono rilevate nelle diverse matrici come singoli composti, ma come miscele complesse dei diversi composti; si ribadisce, inoltre, che non tutti i composti sono tossici o lo sono alla stessa maniera. Per riuscire a esprimere la tossicità dei singoli composti, è stato introdotto il concetto di fattore di tossicità equivalente (TEF\*). I fattori di tossicità equivalente si basano sulla considerazione che i PCDD e i PCDF sono composti strutturalmente simili che presentano il medesimo meccanismo strutturale di azione (attivazione del recettore Ah\*) e producono effetti tossici simili: proprio il legame tra le diossine e il recettore Ah e il passo chiave per il successivo innescarsi degli effetti tossici. I TEF vengono calcolati confrontando l'affinità di legame dei vari composti organoclorurati con il recettore Ah, rispetto a quella della 2,3,7,8-TCDD, considerando l'affinità di questa molecola come il valore unitario di riferimento.

Expert Group (LAI) ha individuato alcuni valori guida per le deposizioni atmosferiche di PCDD/F e PCB<sub>DL</sub> in 4 pg TEQ/m<sup>2</sup>d (TEF per il calcolo del TEQ da indicazioni del WHO) siti urbani e un valore specifico per gli impianti industriali di 9 pg TEQ/m<sup>2</sup>d.

Tabella 1: Concentrazione media PCDD/F rilevata in UE in materiale particolato sospeso e nella deposizione atmosferica.

Paese	Materiale particolato sospeso (fg TEQ/m <sup>3</sup> )*		Deposizione atmosferica totale (pg TEQ/m <sup>2</sup> d)	
	Siti urbani	Siti rurali	Siti urbani	Siti rurali
Austria	-	-	-	-
Belgio	68-129	70-125	0.9-12	0.7-3.1
Germania	-	-	0.5-464	-
Italia	47-277	-	-	-
Lussemburgo	54-77	30-64	-	-
Olanda	-	9-63	-	-
Svizzera	0.2-54	-	-	-
Regno Unito	17-103	6-12	0.4-312	Nv-517

#### 4 MONITORAGGIO

Il monitoraggio è stato svolto attraverso l'utilizzo combinato di diverse tecnologie di campionamento: campionatori passivi per i composti organici volatili e le aldeidi, un deposimetro per la determinazione delle deposizioni totali (secche più umide) e biosensori.

##### 1) Campionatori passivi per: VOC e Aldeidi

I campionatori Radiello per VOC e per aldeidi sono costituiti da una cartuccia con un tubo in rete di acciaio inossidabile (5 mm) con maglia di 3x8 µm, riempito con materiale in grado di "catturare" le sostanze inquinanti (350 mg di carbone grafitato per i VOC e con di Florisil® rivestito di 2,4-dinitrofenilidrazina - 2,4-DNPH - per le aldeidi). I composti organici volatili sono captati per adsorbimento, sono recuperati per desorbimento termico e sono analizzati in gascromatografia capillare con rivelatore MS per i VOC e in HPLC con rivelatore DAD le Aldeidi. I campionatori passivi sono stati posizionati in differenti punti (seguendo i punti cardinali) intorno al campo rom per poter "catturare" gli inquinanti in funzione della direzione del vento. I campionamenti sono stati effettuati

per 1 mese con la sostituzione dei campionatori ogni settimana. In Figura 2 sono individuati i siti di campionamento, di cui si riportano i risultati analitici in tabella 2 e tabella 3.

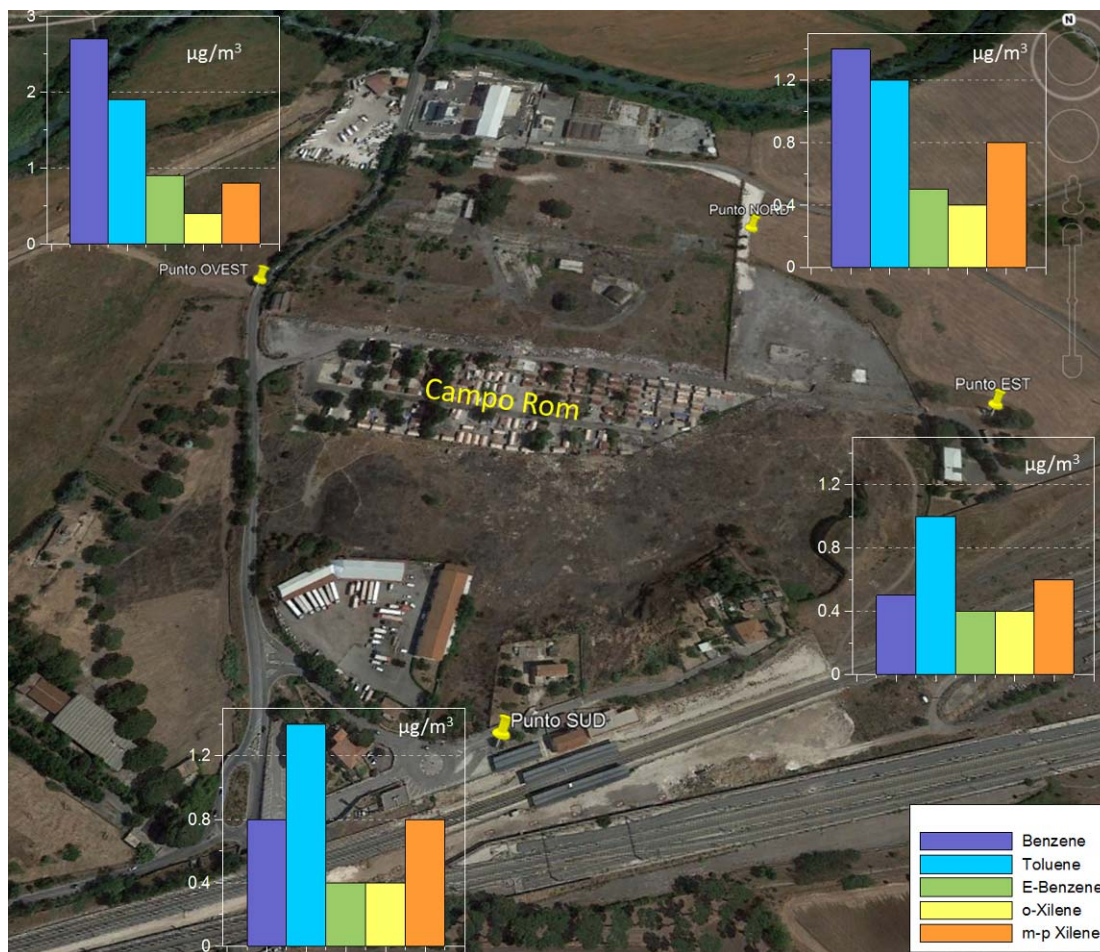


Figura 2: Mappa e risultati VOC mediati dell'area sotto indagine ambientale a via di Salone Roma.

Il benzene, unico inquinante normato, in nessun caso supera il valore di  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  definito dal D.Lgs. 155/2010.

I valori asteriscati (\*) presenti nelle tabelle sono risultati inferiori al detection limits (la più bassa concentrazione di analita in un campione che può essere rivelata nelle condizioni sperimentali del metodo).

Tabella 2: Risultati dei VOC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) per settimana di misura

<b>Benzene</b>	U.d.M	6-13/07	13-20/07	20-27/07	27/07-03/08	03-10/8	Media
Punto Est	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,3	-	0,3	0,6	0,9	0,5
Punto Nord	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,0	-	0,5	1,6	2,6	1,4
Punto Ovest	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	3,4	1,3	1,8	4,2	2,7
Punto Sud	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	0,8	0,8	0,8
<b>Toluene</b>		6-13/07	13-20/07	20-27/07	27/07-03/08	03-10/8	Media
Punto Est	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,3	-	0,6	1,0	1,2	1,0
Punto Nord	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,4	-	0,6	1,3	1,6	1,2
Punto Ovest	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	2,3	1,1	1,5	2,6	1,9
Punto Sud	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	1,3	1,4	1,4
<b>Et-benzene</b>		6-13/07	13-20/07	20-27/07	27/07-03/08	03-10/8	Media
Punto Est	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,4	-	0,4*	0,4*	0,4*	0,4
Punto Nord	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,4	-	0,4*	0,4	0,8	0,5
Punto Ovest	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	1,4	0,4	0,5	1,4	0,9
Punto Sud	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	0,4	0,4	0,4
<b>O-Xilene</b>		6-13/07	13-20/07	20-27/07	27/07-03/08	03-10/8	Media
Punto Est	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,4	-	0,4*	0,4*	0,4*	0,4
Punto Nord	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,5	-	0,4	0,4*	0,4*	0,4
Punto Ovest	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	0,4	0,4*	0,4*	0,4	0,4
Punto Sud	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	0,4	0,4*	0,4
<b>M,p-Xilene</b>		6-13/07	13-20/07	20-27/07	27/07-03/08	03-10/8	Media
Punto Est	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,0	-	0,4*	0,5	0,5	0,6
Punto Nord	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,3	-	0,4*	0,6	0,7	0,8
Punto Ovest	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	0,8	0,5	0,7	1,0	0,8
Punto Sud	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	0,8	0,7	0,8

Tabella 3: Risultati delle aldeidi ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) per settimana di misura

<b>Formaldeide</b>	U.d.M	6-13/07	13-20/07	20-27/07	27/07-03/08	03-10/8	Media
Punto Est	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,6	1,3	1,7	2,0	2,3	2,0
Punto Nord	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,2	1,7	1,4	1,7	2,4	1,9
Punto Ovest	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	1,7	1,8	1,9	2,3	1,9
Punto Sud	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	1,9	2,7	2,3
<b>Acetaldeide</b>		6-13/07	13-20/07	20-27/07	27/07-03/08	03-10/8	Media
Punto Est	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,5	0,7	1,2	3,6	2,2	2,0
Punto Nord	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,4	1,5	1,1	1,6	1,4	1,6
Punto Ovest	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	2,3	1,0	1,2	1,4	1,5
Punto Sud	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	-	1,3	1,3	1,3

Per le aldeidi, i valori riportati da precedenti studi svolti a Roma nel periodo giugno e luglio (Possanzini e al. 1994) mostrano come range di concentrazione 17-23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  per la formaldeide e 18-9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  per l'acetaldeide; in nessun caso tali valori vengono superati (tabella 3).

## 2) Deposimento.

Il deposimetro è costituito da un contenitore cilindrico in vetro pyrex ed è utilizzato per la determinazione delle deposizioni totali (secche + umide) del particolato sul suolo. I risultati rappresentano la quantità di inquinante depositata su 1 mq al giorno. Il deposimetro è stato installato vicino al Campo Rom (Figura 2) per un periodo di 47 giorni, dal 13 luglio fino al 29 agosto 2017.



Figura 3: Distanza deposimetro da Campo Rom.

I risultati sono riportati nella tabella 4.

Tabella 4: Risultati diossine da deposimetro vicino al campo rom di via di Salone.

	U.d.M.	Campo Rom via Salone	Valori guida Germania	Valori guida Francia (fondo urbano-industriale)
Tossicità equivalente Diossine	pg/m <sup>2</sup> /d	2.2	-	<5.4
Tossicità equivalente Diossine + PCBs diossina simili	pg/m <sup>2</sup> /d	<b>6.6</b>	4	-
Benzo(a)pirene	ng/m <sup>2</sup> /d	0.8	-	-

La tossicità delle diossine e PCB<sub>LD</sub> ha un valore di 6.6 pg/m<sup>2</sup>/d, superiore ai valori delle linee guida utilizzati in Germania per la deposizione atmosferica.

### 3) Analisi particolato atmosferico

Nei giorni dal 6 al 8 luglio 2017, a causa delle particolari condizioni createsi in una zona limitrofa al Campo Rom di via di Salone si sono sviluppati due incendi (a Tivoli Terme, e a Villaggio Prenestino) e per questo motivo nell'ambito delle attività istituzionali di monitoraggio, sono stati prelevati e analizzati i filtri di PM<sub>10</sub> della stazione fissa di Roma – Tenuta del Cavaliere. La centralina dista in linea d'aria circa 1,5 Km dall'area di indagine). Il risultato ottenuto (240 fg I-TEQ/m<sup>3</sup>) risulta superiore al valore definito stimato come caratteristico dell'ambiente urbano dall'OMS di 100 fg I-TEQ/m<sup>3</sup>; presumibilmente, questo valore deriva dall'effetto congiunto dei due incendi avvenuti nella zona limitrofa al campo.

### 4) Biosensori

I roghi di materiale vario avvengono periodicamente nei campi rom e possono quindi causare un accumulo di inquinanti nell'ambiente limitrofo. Per questo motivo è stato deciso di utilizzare i biosensori (licheni) in grado di fornire indicazioni relative a possibili fenomeni accaduti nel tempo. Sono stati prelevati dei licheni (*Xanthoria parietina*, Figura 4) presenti sul posto e analizzati presso il Laboratorio dell'ARPA di Rieti, specializzato in analisi di microinquinanti organici.





Figura 4: *Xanthoria parietina* (copyright Jenny Seawright)

La *Xanthoria parietina* è un lichene (organismi simbiotici derivanti dall'associazione di due individui: un organismo autotrofo, un cianobatterio o un'alga, per lo più una clorofita, e un fungo, in genere un ascomicete o un basidiomicete) ed è una specie foliosa che solitamente cresce dalle zone rurali alle zone antropizzate, su svariati substrati: cortecce di varie essenze arboree, roccia, muri in cemento, tegole, mattoni, vetroresina, coperture.

Il lichene è solitamente impiegato come bioaccumulatore, essendo idoneo, per le proprie caratteristiche biologiche e fisiologiche, ad assorbire, accumulare e mantenere nel tempo le sostanze inquinanti presenti nell'aria. I punti di campionamento sono rappresentati in figura 5 e i risultati sono riportati in tabella 5.



Figura 5: Punti di campionamento limitrofi a via di Salone.

Sono stati individuati tre punti di campionamento vicino al campo rom denominati S<sub>0</sub> (Terreno strada interna), S<sub>1</sub> (Inizio Via C. Cipolletti), S<sub>2</sub> (Vicino fiume Aniene) e ulteriori tre punti: uno S<sub>3</sub> (Via A. Noale) distante dall'area di via di Salone e utile alla fase di valutazione dei risultati, un altro nella Città di Roma ma all'interno di un'area verde (Villa Pamphili), ed uno molto distante (Valle Oracula) a circa 2 Km da Rieti in una zona priva di significanti fonti di inquinamento.

Tabella 5: Risultati analitici sui biomonitoraggi sulla *Xanthoria parietina*

	U.d.M.	S <sub>0</sub> Terreno	S <sub>1</sub> Cipolletti	S <sub>2</sub> Aniene	S <sub>3</sub> Noale	Valle oric.	Villa Pamphili	Legenda:	
<b>Diossine Teq</b>	ng/kg	7,23	2,7	3,7	2,8	1,2	0,81	<b>Alterazione</b>	<b>Colore</b>
<b>PBDEs</b>	ng/kg	2253	430	1039	1191	315	1235	<b>Naturalità molto alta</b>	Blu
<b>PCB TOT</b>	ng/kg	3717	3064	4213	3593	2140	2646	<b>Naturalità alta</b>	Verde scuro
<b>PCB DL</b>	ng/kg	627	592	977	422	283	524	<b>Naturalità Media</b>	Verde Chiaro
<b>PCB % DL</b>	ng/kg	17	19	23	12	21	20	<b>Naturalità/Alterazione basse</b>	Giallo
<b>Hg</b>	mg/kg	4,30	0,06	0,26	0,15	<0,2	0,008	<b>Alterazione media</b>	Arancione
<b>As</b>	mg/kg	26	18,67	2,96	3,97	0,56	0,51	<b>Alterazione alta</b>	Rosso
<b>Cr</b>	mg/kg	9,61	16,03	5,73	19,64	11,0	4,4	<b>Alterazione molta alta</b>	Cremisi
<b>Cu</b>	mg/kg	29	32,46	22,05	65,11	23,79	8,16		
<b>Ni</b>	mg/kg	15	10	4	8,03	3,88	2,84		
<b>Cd</b>	mg/kg	0,13	0,23	0,09	0,12	0,06	0,20		
<b>Pb</b>	mg/kg	22	49,39	8,97	23,20	9,8	5,88		
<b>Mn</b>	mg/kg	50	287	61	158	62	14,6		
<b>Fe</b>	mg/kg	3241	9772	2916	5908	3709	2287		
<b>Zn</b>	mg/kg	41	106	43	106	49	31,3		

La scala cromatica utilizzata per evidenziare il grado di alterazione dei licheni è quella proposta da uno studio di Nimis e Bargagli in relazione alla concentrazione di metalli (i colori variano dal blu per lichene naturale sino a cremisi per lichene molto alterato; Nimis & Bargagli, 1999). La metodologia di analisi dei licheni è illustrata in appendice. Si denotano alterazioni, sia sui siti vicino al Campo Rom ( $S_0, S_1, S_2$ ) che sul sito limitrofo ( $S_3$ ).

L'impiego di licheni ha permesso la realizzazione di uno studio multidisciplinare in cui i dati analitici sono stati integrati e confrontati con quelli di mineralogia magnetica, elaborati presso il laboratorio di paleomagnetismo e magnetismo ambientale dell'INGV, la cui discussione è rimandata alla relazione allegata a questo documento.

## 5 RISULTATI

Si riportano, di seguito in forma grafica i risultati dei microinquinanti misurati nei diversi punti di campionamento:

- **Diossine e Furani**

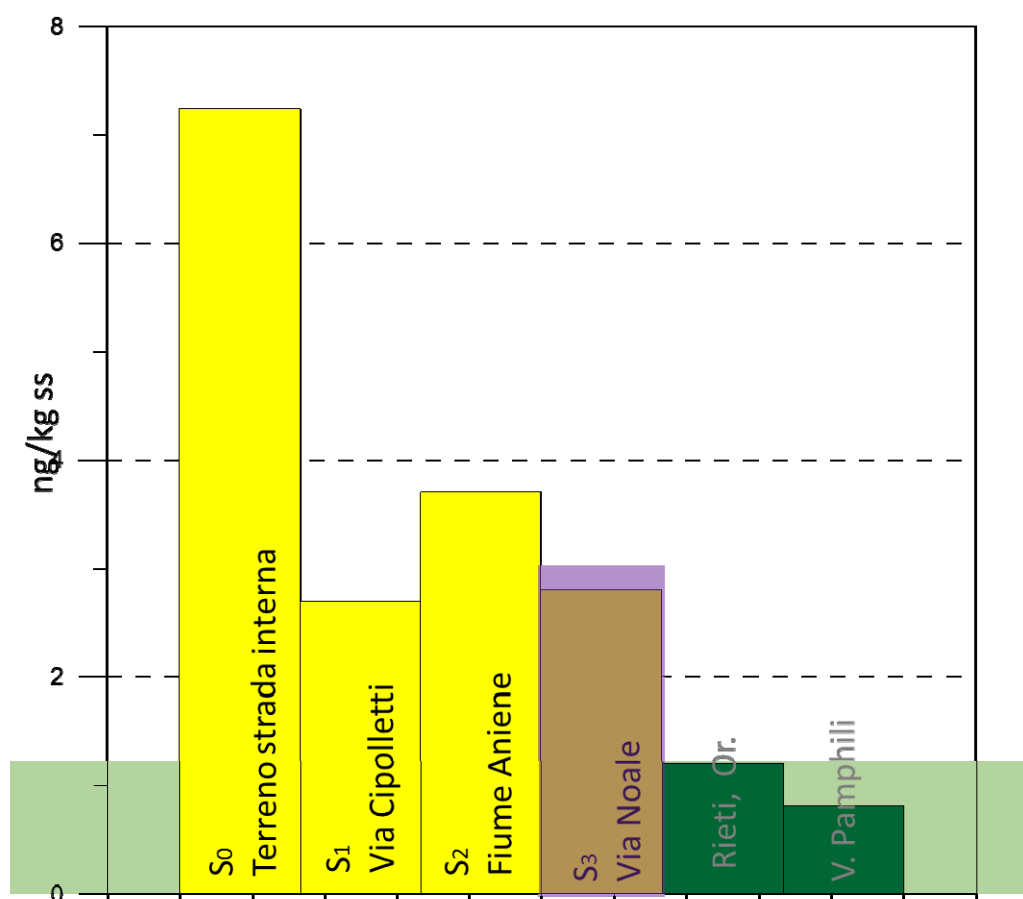


Figura 6: Valori di Diossine e Furani da biomonitoraggio presso il campo rom di Via di Salone.

I risultati sulle diossine e i furani, relativamente a via di Salone, sono riportati nell'istogramma in figura 6; come è possibile osservare il valore in corrispondenza del sito di campionamento più vicino al campo rom S<sub>0</sub> (Terreno a strada interna) è più alto rispetto ai valori misurati a Roma Villa Pamphili e a Rieti (Valle Oracula: zona isolata a circa 2 km da Rieti). Tale valore è superiore anche rispetto a quello relativo al sito S<sub>3</sub> (Via A. Noale), situato nei pressi del G.R.A.. I valori relativi ai siti

S<sub>1</sub> (Inizio Via C. Cipolletti) e S<sub>2</sub> (Vicino fiume Aniene), anch'essi vicini al campo, sono simili a quello relativo al punto maggiormente esterno al campo S<sub>3</sub> (Via A. Noale). Tutti i siti hanno comunque esibito valori superiori a quelli di *Roma Villa Pamphili*.

- PBDEs

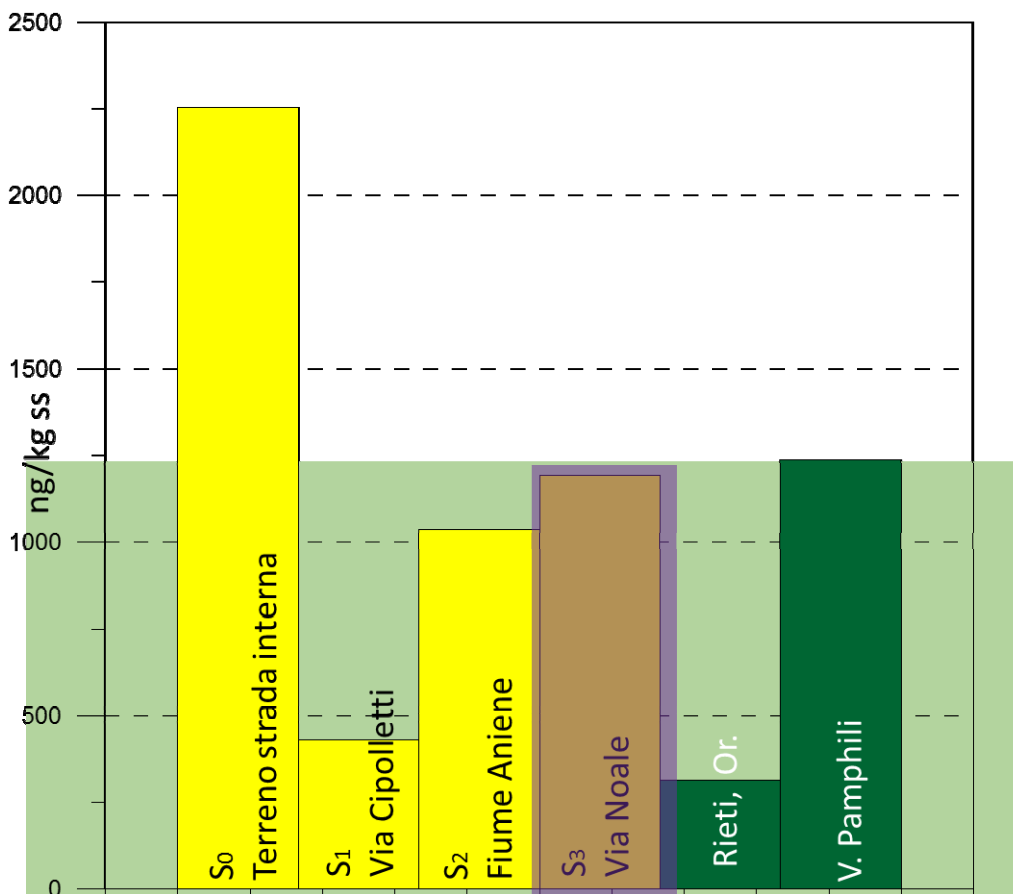


Figura 7: Valori di PBDEs da biomonitoraggio presso il campo rom di Via di Salone.

Un trend simile si osserva per quanto riguarda i PBDEs (figura 7); tali composti, sono usati come ritardanti di fiamma e possono essere usati come traccianti di combustione di materiale plastico e plastico-elettronico. Il valore relativo al sito S<sub>0</sub> (Terreno strada interna) è superiore a quanto individuato come livello di *background* su Roma (Villa Pamphili) e Rieti (Valle Oracola), pur rilevando valori inferiori o simili sugli altri siti campionati.

▪ Biomonitoraggio - Pb

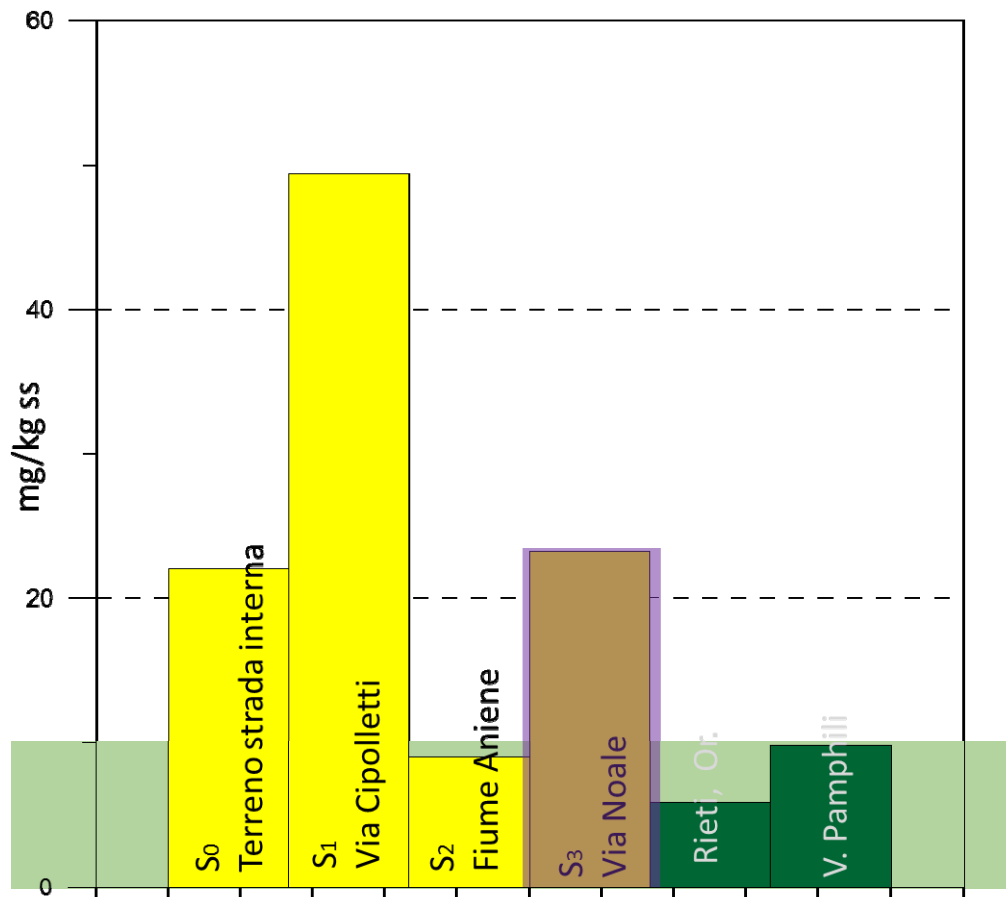


Figura 8: Concentrazioni di Pb da biomonitoraggio presso il campo rom di Via di Salone.

Analizzando i dati di concentrazione del piombo nei licheni (figura 8), si nota un *trend* differente, in cui spicca il valore rilevato presso il sito S<sub>1</sub> (Inizio Via C. Cipolletti), per quanto anche S<sub>0</sub> (Terreno strada interna) e S<sub>2</sub> (Vicino fiume Aniene) evidenzino concentrazioni superiori rispetto al *background* di Villa Pamphili e a Rieti (Valle Oracola), confrontabile, invece, con quanto rilevato presso il sito S<sub>3</sub> (Via A. Noale).

In tabella 6, sono riportati i valori di tutti gli inquinanti monitorati mediante i licheni adiacenti al Campo Rom di via di Salone. Il valore medio calcolato utilizzando i valori S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> ed escludendo il

dato S<sub>3</sub>, in quanto distante dal campo. I valori sono stati confrontati con i dati (minimi e massimi) provenienti dalla campagna effettuata da ARPA Lazio nel 2015 in 17 punti (16 nella regione Lazio ed 1 a Terni in Umbria). Vengono riportati in grassetto i valori che superano il valore massimo misurato nella campagna 2015.

Tabella 6: Media dei risultati vicino campo rom, e confronto con dati campagna ARPA Lazio 2015

	U.d.M.	Salone Media	Campagna 2015 Valore minimo	Campagna 2015 Valore massimo
PCDD/F <sub>Teq</sub>	ng/kg	4,54	0,40	7,10
PBDE <sub>s</sub>	ng/kg	<b>1240,7</b>	162	779
PCB <sub>TOT</sub>	ng/kg	3664,7	868	7685
PCB <sub>DL</sub>	ng/kg	732	72	1608
PCB %DL	ng/kg	19,7	8,29	20,9
Hg	mg/kg	1,54		
As	mg/kg	15,9	0,05	3,42
Cr	mg/kg	10,5	2,54	51,9
Cu	mg/kg	27,84		
Ni	mg/kg	9,67	1,03	43,6
Cd	mg/kg	0,15	0,03	0,72
Pb	mg/kg	<b>26,8</b>	0,62	17,8
Mn	mg/kg	133		
Fe	mg/kg	5310		
Zn	mg/kg	63,3		

## 6 CONCLUSIONI

Pur con i limiti dovuti alla complessità dell'area oggetto del monitoraggio, alla presenza di sorgenti multiple di inquinamento, alla tipologia di indagini condotte, alla durata temporale delle misure, i risultati della campagna di misura non possono che riportare una conferma del fatto che tali aree sono interessate nel corso degli anni da eventi di combustione che hanno coinvolto materiale sia di origine naturale (legna, sterpaglie, ..) che antropica (combustibili fossili, plastiche, materiali contenenti ritardanti di fiamma e metalli, ..) che hanno dato origine a fenomeni di accumulo. D'altra parte le distribuzioni individuate non consentono di evidenziare un trend, ne consentono di individuare aree più critiche rispetto ad altre; in considerazione del fatto che i valori rilevati nelle

aree urbane sono paragonabili tra loro e anche se superiori a quelli presenti nelle aree di background, non lo sono in maniera così significativa.

Il campo rom è localizzato in un area fortemente antropizzata dove, oltre alle combustioni all'aperto, sono presenti infrastrutture stradali, attività industriali e artigianali, cantieri edili, impianti di riscaldamento a servizio degli edifici. Non risulta quindi possibile determinare il peso delle diverse sorgenti antropiche nella produzione di microinquinanti.

Un contributo alla comprensione del fenomeno potrebbe essere fornito da un censimento delle fonti di emissione presenti sul territorio a supporto del riconoscimento dell'incidenza delle diverse sorgenti naturali e antropiche.

Indagini ambientali sull'inquinamento atmosferico potrebbero trovare una efficacia, seppur minima la dove i fenomeni potessero essere maggiormente circoscritti e la risoluzione spaziale e temporale potesse essere significativamente più alta.

Tenuto conto della natura illecita delle combustioni all'aperto, dello sviluppo di microinquinanti durante la combustione, si ritiene che l'analisi ambientale delle aree interessate da questi fenomeni debba essere necessariamente guidata e integrata da studi di carattere sanitario finalizzati a stimare l'esposizione dei cittadini e l'eventuale correlazione con la salute.

Al fine di avere ulteriori elementi innovativi e di confronto si è provveduto a esporre nell'area di via di Salone licheni prelevati in aree ad alta naturalità.

Al termine di un lungo periodo di esposizione (3 mesi) si provvederà all'analisi e valutazione dell'esposizione.



## 7 BIBLIOGRAFIA

- APAT. (2006). *Diossine Furani e PCB*.
- Bertazzi, P., Consonni, D., Bachetti, S., Rubagotti, M., Baccarelli, A., Zocchetti, C., & Pescatori, A. C. (2001). Health Effects of Dioxin Exposure: A 20-Year Mortality Study. *American Journal of Epidemiology*, 153(<https://doi.org/10.1093/aje/153.11.1031>), 1031-1044.
- Comunita Europea. (2006). *2006/507/CE: Decisione del Consiglio, del 14 ottobre 2004, relativa alla conclusione, a nome della Comunità europea, della convenzione di Stoccolma sugli inquinanti organici persistenti*. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.
- Czuczwa, J. M., & Hites, R. A. (1984). Environmental fate of combustion-generated polychlorinated dioxins and furans. *Environ. Sci. Technol.*, 18 (6)(DOI: 10.1021/es00124a010), 444-450.
- Lohmann, R., & Jones, K. C. (1998). Dioxins and furans in air and deposition: A review of levels, behaviour and processes. *The science of the total Environment*, 219 53-81.
- Menichini, E., Iacovella, N., Monfredini, F., & Turrio-Baldassarri, L. (2007). Atmospheric pollution by PAHs, PCDD/Fs and PCBs simultaneously collected at a regional background site in central Italy and at an urban site in Rome. *Chemosphere*(69), 422-434.
- Nimis, L., & Bargagli, R. (1999). Linee-Guida per l'utilizzo di licheni epifiti come bioaccumulatori di metalli intraccia.
- Sidhu, S., Gullett, B., Striebich, R., Klosterman, J., Contreras, J., & De Vito, M. (2005). Endocrine disrupting chemical emissions from combustion sources: diesel particulate emissions and domestic waste open burn emissions. *Atmospheric Environment*, 801-811.
- Steenland, K., & Deddens, J. (2003). Dioxin: Exposure Response Analyses and Risk Assessment. *Industrial health*, 41, 175-180.
- Turrio-Baldassarri, L., Abate, V., Di Domenico, A., Iacovella, N., La Rocca, C., & Menichini, E. (2001). PCDD, PCDF, PCB and PAH in outdoor air in Rome: Comparison with a remote area. *Organohalogen Compound*(51), 18-21.
- Viviano, G., Mazzoli, P., & Settimo, G. (2006). Microinquinanti organici e inorganici. *Rapporti Istisan*, 06/43(ISSN 1123-3117).
- Viviano, G., P. Mazzoli, & G. Settimo. (06/43). Microinquinanti organici e inorganici nel comune di Mantova: studio dei livelli ambientali. *Istituto Superiore di Sanità*.
- World Health Organization (2000). Air quality guidelines for Europe.

## 8 APPENDICE 1: MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA TRAMITE LICHENI COME BIOACCUMULATORI

Nell'ambito della presente ricerca è stato avviato il monitoraggio della qualità dell'aria tramite l'utilizzo dei licheni come bioaccumulatori. Tale studio, che ha avuto inizio nel luglio del 2017, è stato suddiviso nelle seguenti fasi operative:

- ✓ scelta della specie lichenica;
- ✓ individuazione degli alberi idonei per il campionamento del materiale lichenico;
- ✓ raccolta di campioni di licheni;
- ✓ preparazione dei campioni in laboratorio;
- ✓ determinazione analitica dei contaminanti (metalli pesanti, IPA, diossine e furani, PCB, PBDEs).

I siti idonei per lo studio sono stati selezionati durante l'indagine preliminare. Tale scelta è stata fatta in base ad una serie di fattori, tra cui l'accessibilità e la presenza degli alberi idonei per la raccolta del materiale lichenico da sottoporre alle analisi. Complessivamente, sono state scelte 3 stazioni nelle immediate vicinanze del campo rom e tre stazioni, utili per la rilevazione dei livelli di *background*, di cui una limitrofa al campo, che non dovrebbe essere influenzata da esso, una a Roma, nel parco di Villa Pamphili, e un'altra a Rieti in una zona isolata a 2 Km da Rieti (Valle Oracula).

L'indagine preliminare ha messo in evidenza una scarsa presenza di popolazioni licheniche nell'area interessata. Tra le specie rilevate che sono risultate idonee allo scopo della ricerca, è stato scelto il lichene epifita *Xanthoria parietina* (L.) Th.Fr. (Fig.1 allegato), di cui la forma di crescita fogliosa favorisce il prelievo e l'allestimento di campioni idonei alle analisi.



Figura 1. *Xanthoria parietina* (L.) Th.Fr.

### *Caratteri morfologici*

- tallo folioso a lobi larghi, da giallo verdastro a arancione, orbicolare;
- lobi ampi 2-6 mm, lineari, appiattiti, appressati al substrato;
- rizine chiare, semplici, sparse ai margini;
- apotecii frequenti, lecanorini, sessili, con diametro fino a 3 mm, disco arancione, margine sottile e liscio;
- fotobionte clorococcoide.

### *Caratteri chimici*

- Tallo K+ rosso, C-, KC-, P-.

### *Caratteri ecologici*

- Lichene meso-xerofitico che si instaura preferibilmente su alberi isolati, assente solo in zone fortemente inquinate.

- Predilige substrati da subacidi a basici, tollera forte radiazione solare diretta e predilige livelli di eutrofizzazione anche fortemente pronunciati.
- In provincia di Rieti è molto frequente ed è uno dei rari licheni in grado di penetrare ambienti fortemente antropizzati.

Il campionamento dei licheni è stato eseguito secondo le “Le linee guida per l’utilizzo di licheni epifiti come bioaccumulatori di elementi in traccia”, ANPA 1998.

Sono stati prelevati su tronchi di alberi i campioni del lichene autoctono preso in considerazione.

Il campionamento è stato effettuato su superfici che hanno soddisfano le seguenti condizioni:

- alberi con tronco la cui inclinazione non superi i 10°;
- alberi con assenza di segni evidenti di disturbo (verniciature, chiodi o puntine piantati sul tronco, etc.);
- superfici non fortemente concave, e non interessate a periodico scolo d’acqua piovana,
- superfici non decorticate;
- superfici libere da briofite.

Per ogni stazione di monitoraggio è stata compilata la scheda raccolta dati che oltre al numero, localizzazione, descrizione della stazione, e data del campionamento, ha incluso, per ciascun tallo campionato:

- specie di albero e specie di lichene;
- circonferenza del tronco misurata nel punto di raccolta del tallo;
- altezza dal suolo ed esposizione del tallo;
- diametro approssimativo del tallo;
- eventuale presenza di danneggiamenti (scolorimento del tallo, danni meccanici, necrosi del tallo).

Il materiale pervenuto in laboratorio è stato adeguatamente preparato per le successive analisi. Tale fase è consistita in:

- ✓ eliminazione delle parti morte e del materiale estraneo (foglie, terriccio, talli di altri licheni);
- ✓ essiccamento;
- ✓ triturazione e omogeneizzazione.



Biomonitoraggio magnetico dei licheni campionati a  
Via di Salone (RM) e località Via Cesurni, ex Polverificio  
Stacchini (Comune di Tivoli)



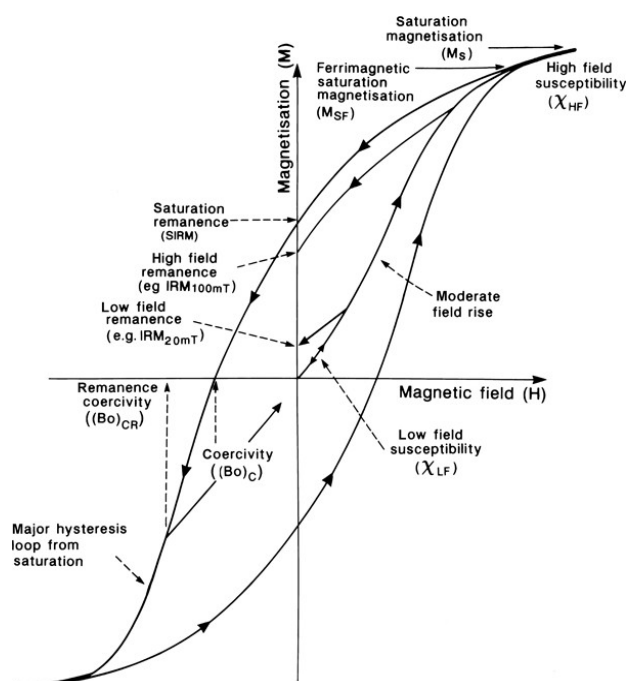
## Introduzione

Il laboratorio di paleomagnetismo e magnetismo ambientale dell'INGV è coinvolto, da oltre 15 anni, in ricerche su inquinamento atmosferico e polveri sottili mediante misurazioni magnetiche. Già in passato, INGV, Regione Lazio e ARPA Lazio hanno collaborato in uno studio per la definizione di metodi magnetici idonei a riconoscere e stimare la frazione antropica del PM10 deposto sui filtri delle centraline di monitoraggio di qualità dell'aria nel Lazio (Sagnotti et al., 2006).

La frazione magnetica del particolato sottile può derivare da processi di combustione, nel caso di emissioni industriali, domestiche o veicolari, e da abrasioni, come per i freni veicolari e per le rotaie, ed è costituita da sferule o granuli di dimensioni variabili, riconducibili a ossidi di ferro (principalmente magnetite, spesso associata a metalli pesanti), analizzabili tramite le rapide, sensibili e poco costose tecniche di magnetismo delle rocce.

Per introdurre i parametri magnetici analizzati, si ricorda che in natura tutti i mezzi si classificano secondo tre comportamenti conseguenti all'esposizione a un campo magnetico. I mezzi diamagnetici si magnetizzano molto debolmente e temporaneamente in verso opposto a quello del campo magnetico applicato; sono diamagnetici, tra gli altri, l'acqua e i composti organici. I mezzi paramagnetici si magnetizzano debolmente, temporaneamente e concordemente al campo agente; tra gli elementi paramagnetici si citano l'alluminio, il sodio e il magnesio. I mezzi ferromagnetici, infine, sono quelli che possono magnetizzarsi permanentemente e, talora, molto intensamente sotto l'azione di un campo magnetico.

La caratteristica curva che descrive la magnetizzazione di un corpo ferromagnetico sotto l'azione di un campo magnetico variabile si chiama ciclo d'isteresi (Fig. 1); dalla sua forma e da alcuni suoi punti particolari si evincono informazioni sulla composizione, la concentrazione e la granulometria della frazione magnetica di un materiale.



**Fig. 1.** Ciclo d'isteresi e parametri magnetici; si notino la magnetizzazione di saturazione ( $M_s$  - magnetizzazione misurata durante l'applicazione del campo di saturazione), la saturazione della magnetizzazione rimanente ( $M_{rs}$  - magnetizzazione misurata dopo aver rimosso il

campo di saturazione), la coercitività magnetica ( $H_c$  - campo negativo necessario per portare a zero la magnetizzazione dopo aver applicato il massimo campo positivo) e la coercitività della magnetizzazione rimanente ( $H_{cr}$  - campo negativo necessario per azzerare la magnetizzazione rimanente dopo aver applicato il massimo campo positivo), nonché la suscettività magnetica in campo debole ( $\chi$  - rapporto tra magnetizzazione e campo magnetico debole applicato; da Maher et al., 1999).

Il biomonitoraggio con metodi magnetici consiste nel considerare foglie e licheni come recettori e collettori di particolato atmosferico fine, anche magnetico, interpretando pertanto le loro proprietà magnetiche come indicatori di inquinamento atmosferico, considerando che, essendo principalmente composti da acqua e materia organica, in un contesto non inquinato hanno comportamento diamagnetico o, comunque, debolmente magnetico. Foglie e licheni offrono l'indiscusso vantaggio di essere ampiamente diffusi (o, questi ultimi, eventualmente esposti nei siti mediante trapianti), offrendo la possibilità di ottenere informazioni con buona numerosità e densità di campionamento, senza le restrizioni imposte dall'uso di centraline.

Inoltre, analizzando direttamente le caratteristiche magnetiche delle polveri dai filtri delle centraline di rilevamento del PM, o quelle emesse da sorgenti inquinanti, quali le automobili, è possibile distinguere frazioni differenti originate da sorgenti naturali e antropiche (Sagnotti et al., 2009), fornendo un contributo significativo al monitoraggio dell'inquinamento atmosferico.

Recentemente, espandendo l'esperienza conseguita sul campionamento di foglie in ambito urbano per studi indirizzati sull'inquinamento atmosferico da traffico, sono stati effettuati studi di biomonitoraggio magnetico mediante licheni autoctoni o trapiantati in prossimità di cementifici e aree industriali (Paoli et al., 2016; Kodnik et al., 2017), con lo scopo di applicare le metodologie magnetiche in ulteriori contesti urbani o industriali.

I trapianti lichenici sono particolarmente indicati qualora si manifesti la necessità di determinare le proprietà magnetiche seguendo uno schema regolare di campionamento, anche in zone non vegetative, per un periodo noto di esposizione e partendo da condizioni iniziali note.

## **Metodologia di misura**

Le misurazioni e le analisi magnetiche sono state eseguite presso il laboratorio di paleomagnetismo e di magnetismo ambientale dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia di Roma.

I licheni sono stati collocati in capsule farmaceutiche # 4 per le misure di isteresi e in cubetti di plastica di 8 cm<sup>3</sup> per le analisi di suscettività magnetica.

Le capsule sono idonee a vibrare nel Magnetometro a Vibrazione (VSM) della Princeton Measurement Corporation, utilizzando l'apposita sonda in fibra di carbonio; il volume di ogni capsula è di circa 0,15 ml; piccoli frammenti di licheni, dimensionati e sagomati irregolarmente, sono stati pressati accuratamente all'interno delle capsule per ridurre gli interstizi e massimizzarne il contenuto.

La forza coercitiva ( $B_c$ ), la magnetizzazione rimanente di saturazione ( $M_{rs}$ ), nonché la magnetizzazione di saturazione ( $M_s$ ) sono stati misurati utilizzando il VSM fino a un campo magnetico massimo pari a 1.0 T e determinati dopo aver sottratto il trend lineare paramagnetico.

I valori della magnetizzazione, specifici per la massa, sono stati calcolati dividendo i momenti magnetici per il peso netto dei campioni. I valori di coercitività della rimanenza ( $B_{cr}$ ) sono stati estrapolati dalle curve di rimagnetizzazione fino a -1 T, a seguito dell'applicazione di un campo pari a +1 T.

La suscettibilità magnetica ( $\chi$ ) è stata misurata sul Kappabridge AGICO MFK-1; anche i valori di  $\chi$  sono stati normalizzati per la massa dei campioni.

## Mineralogia magnetica dei licheni

Le misurazioni magnetiche hanno messo in risalto caratteristiche d'isteresi magnetica ben delineate, corrispondenti a parametri magnetici ben definiti ed indicativi di considerevoli concentrazioni di minerali magnetici.

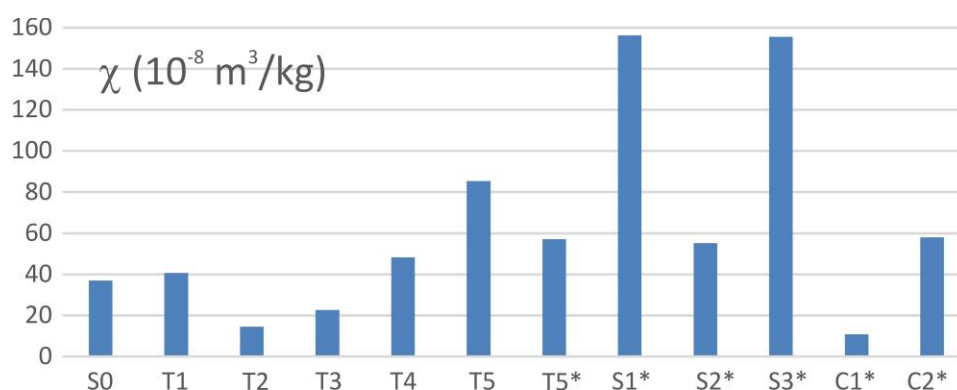
Tutti i cicli d'isteresi, fatta eccezione per il campione 2 della zona "Via di Salone", sono di forma simile, saturi, a modesta variabilità di coercitività magnetica ( $11 \text{ mT} < B_c < 14 \text{ mT}$ ;  $36 \text{ mT} < B_{cr} < 40 \text{ mT}$ ), ad indicare sostanziale uniformità della mineralogia magnetica, presumibilmente attribuibile a magnetite o, comunque, minerali ferrimagnetici.

I parametri magnetici dipendenti dalla concentrazione variano di circa un ordine di grandezza [ $1.52 \times 10^{-2} < M_s (\text{Am}^2/\text{kg}) < 1.41 \times 10^{-1}$ ;  $2.14 \times 10^{-3} < M_{rs} (\text{Am}^2/\text{kg}) < 2.16 \times 10^{-2}$ ;  $14.5 < \chi (10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}) < 156.2$ ], complessivamente indicando concentrazioni variabili di minerali magnetici simili, come suggerito dal comportamento magnetico omogeneo (tab. 1). Si riportano inoltre i valori rilevati su due campioni di controllo, prelevati a Valle Oracola, in zona isolata a circa 2 km da Rieti, e a Villa Pamphili, a Roma; i valori di  $\chi$ ,  $M_s$  e  $M_{rs}$  relativi al campione di Valle Oracola sono risultati inferiori rispetto a tutti i campioni "S" e "T"; invece, per quel che riguarda il campione di Villa Pamphili, i valori sono risultati in linea con quelli medio-bassi rilevati sui campioni in esame, presumibilmente a causa di effetti antropici e naturali urbani.

I parametri magnetici sono stati riportati in tabella 1 e fig. 2.

Campione	$\chi$ ( $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ )	$M_s$ ( $\text{mAm}^2/\text{kg}$ )	$M_{rs}$ ( $\text{mAm}^2/\text{kg}$ )	$B_c$ (mT)	$B_{cr}$ (mT)	$B_{cr}/B_c$	$M_{rs}/M_s$
S0 (Salone)	37.0	53.0	7.55	12.9	39.0	3.03	0.14
T1 (Tiburtina)	40.6	62.4	8.91	12.4	37.6	3.04	0.14
T2 (Tiburtina)	14.5	15.2	2.14	11.3	35.6	3.15	0.14
T3 (Tiburtina)	22.6	22.5	3.09	11.7	37.7	3.22	0.14
T4 (Tiburtina)	48.3	46.4	6.59	12.4	39.2	3.17	0.14
T5 (Tiburtina)	85.4	99.4	14.1	13.0	39.4	3.04	0.14
T5* (Tiburtina)	57.0	60.3	9.38	13.7	39.3	2.87	0.16
S1* (Salone)	156.2	141.0	21.6	13.4	38.0	2.84	0.15
S2* (Salone)	55.1	113.0	9.30	11.7	36.8	3.13	0.08
S3* (salone)	155.6	124.0	19.3	12.6	38.7	3.06	0.16
C1* (Valle Oracola)	10.8	9.4	1.24	10.4	34.1	3.28	0.13
C2* (Pamphili)	58.0	46.8	5.30	9.6	36.0	3.77	0.11

**Tabella 1.** Parametri magnetici e loro rapporti; l'asterisco sulla sigla indica il campione pulito

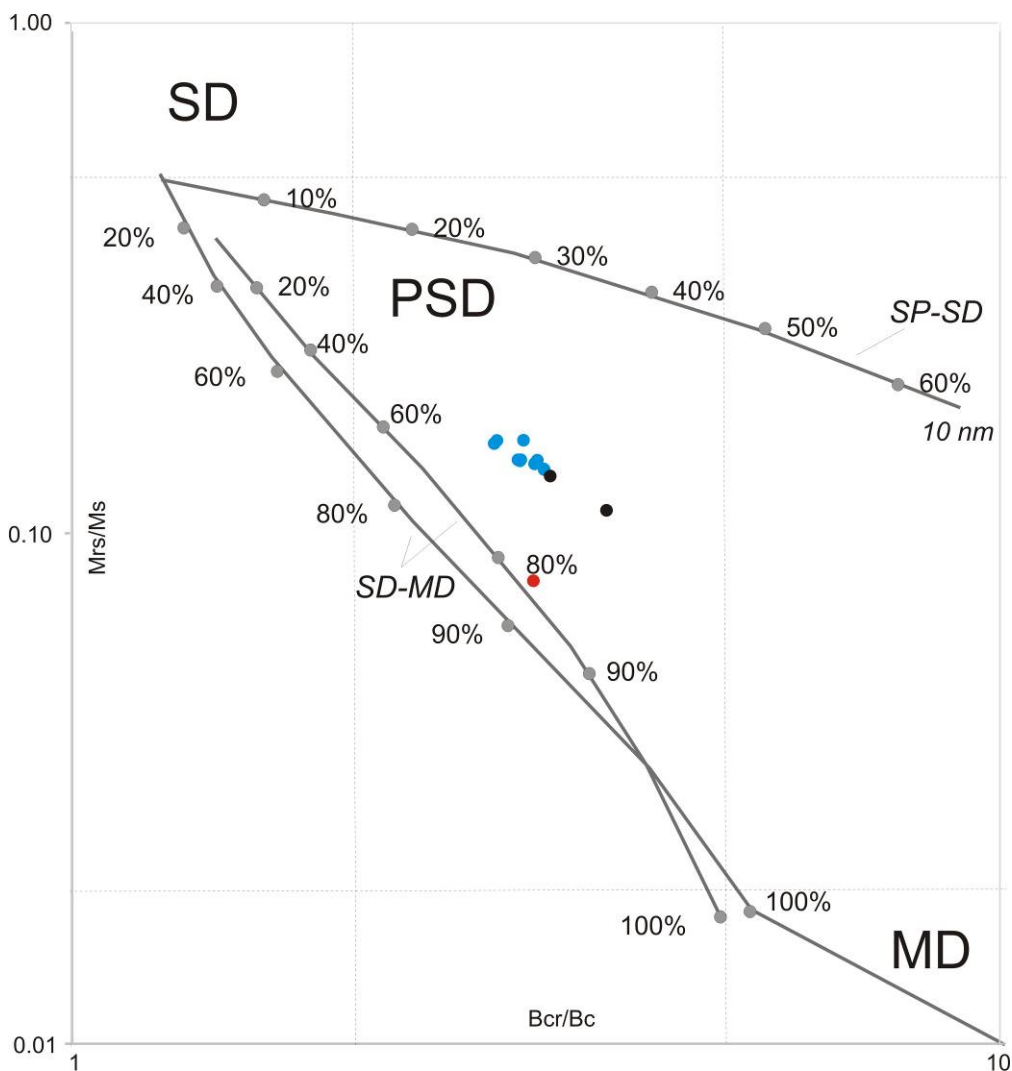




**Figura 2.** Istogramma della suscettività magnetica in relazione al sito di campionamento

Dal punto di vista della granulometria magnetica, i rapporti  $M_{rs}/M_s$  e  $B_{cr}/B_c$  indicano che i campioni si distribuiscono nella regione centrale del Day Plot (Dunlop, 2002), riconducibile a comportamento prevalente pseudo singolo dominio PSD, relativo alla magnetite, con dimensioni comprese tra 0.08 e 15  $\mu\text{m}$  (Fig. 3).

Il campione 2 della zona “Via di Salone”, già menzionato per la forma particolare del ciclo d’isteresi, è relativamente distante dal cluster formato dagli altri campioni, collocandosi in prossimità del trend teorico previsto per un mix composto dall’80% di magnetite multidominio MD (di dimensione superiore a 15  $\mu\text{m}$ ) e dal 20% di magnetite singolo dominio SD. Il campione di controllo “Oricoli” si colloca in prossimità del *cluster* di punti, il campione “Pamphili” è, invece, lievemente distante.



**Fig. 3.** Diagramma dei rapporti di isteresi dei campioni in esame. Sono indicate le zone del grafico relative a magnetite singolo-dominio (SD), pseudo-singolo dominio (PSD) e multidominio (MD) e i *trend* per le granulometrie magnetiche composite (modificato da Dunlop, 2002); in rosso il campione con ciclo d’isteresi difforme (S2), in nero i campioni di controllo

I parametri magnetici dipendenti dalla concentrazione ( $\chi$ , Ms, Mrs) sono risultati significativamente linearmente correlati tra loro ( $p\text{-value} < 0.001$ ); tale correlazione migliora ulteriormente non considerando il campione S2, di cui è stato discusso il ciclo d'isteresi di forma peculiare. Si può pertanto evincere che  $\chi$ , Ms, Mrs sono indicativi della stessa frazione magnetica e che la suscettività magnetica è pienamente rappresentativa dalla frazione mineralogica ferromagnetica.

### Correlazione tra parametri magnetici e concentrazioni dei metalli

Per i campioni “S” e “T” sono state determinate le regressioni lineari tra valori di suscettività magnetica e le concentrazioni dei metalli. La suscettività magnetica è il parametro magnetico più rapido da misurare, risultando pertanto il più immediato indicatore della concentrazione di minerali magnetici.

Gli elementi Cr, Cu, Pb, Mn, Fe e Zn sono risultati significativamente correlati linearmente ai valori di suscettività magnetica, con  $p\text{-value} \leq 0.01$ , indicando che la probabilità che la suscettività magnetica non sia correlata linearmente alla concentrazione dei suddetti metalli è inferiore al 99% (Tabella 2); tali correlazioni migliorano ulteriormente non considerando il campione S2.

Elemento	Pendenza	Errore	Intercetta	Errore	r	r <sup>2</sup>	p
Hg	-8.3514E+5	1.57E+6	1.862	1.290	-0.19747	0.038994	0.61
As	4.73E+6	6.16E+6	3.729	5.073	0.27878	0.077718	0.47
Cr	1.02E+7	1.24E+6	1.769	1.017	0.95191	0.906133	<b>0.00</b>
Cu	2.44E+7	7.04E+6	11.077	5.792	0.79483	0.631755	<b>0.01</b>
Ni	2.01E+6	2.95E+6	5.171	2.431	0.24869	0.061847	0.52
Cd	1.50E+4	5.47E+4	0.155	0.045	0.10294	0.010597	0.79
Pb	2.26E+7	6.06E+6	0.484	4.986	0.8158	0.665530	<b>0.01</b>
Mn	1.35E+8	2.58E+7	7.287	21.204	0.89327	0.797931	<b>0.00</b>
Fe	4.04E+9	7.87E+8	1554.800	647.410	0.88917	0.790623	<b>0.00</b>
Zn	4.10E+7	1.21E+7	37.819	9.930	0.78901	0.622537	<b>0.01</b>

**Tabella 2.** Parametri statistici descrittivi delle regressioni lineari tra la suscettività magnetica e le concentrazioni dei metalli. In grassetto i  $p\text{-value}$  significativamente contrari all'ipotesi nulla (livello di confidenza 95%).

### Discussione dei dati

Precedenti studio effettuati presso il laboratorio di paleomagnetismo dell'INGV, hanno messo in risalto valori decisamente inferiori di suscettività magnetica, con  $(0.35 < \chi < 7.41) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  nel caso di trapianti di lichene *Pseudevernia furfuracea*, esposti per due mesi in un'area industriale in provincia di Pordenone (Kodnik et al., 2017) e  $(4.12 < \chi < 8.07) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  per i trapianti di lichene *Evernia prunastri* esposti per sei mesi nei pressi di un cementificio slovacco (Paoli et al., 2016).

In Paoli et al., 2016 sono stati esaminati anche licheni *Xanthoria parietina* nativi, i cui valori di suscettività magnetica sono risultati  $(7 < \chi < 92) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , escludendo i campioni con  $\chi > 200 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , evidentemente difforni in quanto campionati in prossimità di una cava di basalto.

I valori misurati nel presente studio risultano notevoli anche se rapportati a quanto già misurato a seguito di campagne di biomonitoraggio su foglie di leccio e platano in un quadrante sud est a Roma (Moreno et al., 2003; Szoenyi et al., 2006; Szoenyi et al., 2008), e pur considerando le differenti caratteristiche di deposizione e accumulo di PM su foglie.

Per una valutazione e un raffronto generale con quanto già pubblicato su scala mondiale, si rimanda a Hofman et al., 2017: in generale, sono stati riportati, per muschi e licheni, valori di suscettività

magnetica distribuiti tra  $-1.5$  e  $+1161 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , quest'ultimo valore relativo a zone metallurgiche nei pressi di Tandil, Argentina su licheni *Parmotrema pilosum* (Marié et al., 2017). I valori osservati, pertanto, risultano indicativi, anche raffrontandoli alla letteratura internazionale, di concentrazioni rilevanti di minerali magnetici, a loro volta ben correlati alle concentrazioni dei metalli.

Essendo campioni nativi, di cui non è nota la tempistica espositiva, non è facile un raffronto con i campioni di controllo prelevati a Valle Oracola e Villa Pamphili. Indicativamente, per tutti i campioni, i parametri magnetici dipendenti dalla concentrazione sono maggiori rispetto a quelli del campione di Valle Oracola; la medesima condizione non si verifica nel confronto con quello di Villa Pamphili, inserito, anch'esso, in un contesto urbano.

Da un punto di vista granulometrico, il comportamento PSD dei campioni è compatibile con la natura antropogenica delle sorgenti, in conformità con quanto, per esempio, osservato nei siti argentini di Tandil (Marié et al., 2017), in cui le aree a scarso impatto ambientale sono risultate caratterizzate dalla presenza di particolati magnetici di dimensione inferiori a  $0.1 \mu\text{m}$ .

## Conclusioni

Lo studio pilota, realizzato per verificare la fattibilità e stimolare un'analisi a maggiore risoluzione spazio temporale dell'inquinamento atmosferico in prossimità di siti coinvolti da incendi e sottoposti a varie sorgenti antropogeniche inquinanti, ha messo in risalto notevoli aspetti d'interesse legati agli esiti delle misurazioni magnetiche.

Il set di campioni, per quanto numericamente modesto e distribuito in un'area vasta e eterogenea, è risultato sostanzialmente uniforme dal punto di vista magnetico, stimolando, in funzione di ulteriori indagini, ricerche sulle sorgenti naturali e/o antropiche riferibili ai parametri magnetici rilevati.

Ulteriori indagini, da effettuarsi infittendo la rete di rilevazione e ripetendo l'osservazione in diversi periodi dell'anno, dovranno vertere sul riconoscimento delle sorgenti naturali e antropiche della frazione magnetica del PM rilevato nei licheni. In tal senso viene suggerito l'utilizzo di trapianti per realizzare una griglia di osservazione di cui sia nota anche la tempistica espositiva.

Schematicamente, i principali risultati emersi sono stati:

- 1) La mineralogia magnetica dei licheni è pressoché uniforme, corrispondente a minerali di comportamento riconducibile a magnetite di dimensione granulometrica compresa tra circa  $0.1 \mu\text{m}$  e  $15 \mu\text{m}$
- 2) L'omogeneità dei risultati e la modalità di campionamento favoriscono l'ipotesi che i parametri in oggetto siano legati principalmente a sorgenti antropogeniche di PM, pur riservandosi ulteriori studi di dettaglio per poter escludere la partecipazione di componenti naturali legate ai suoli
- 3) I valori dei parametri magnetici sono indicativi di concentrazioni rilevanti di minerali magnetici, peraltro ben correlati alle concentrazioni di metalli, tra i quali spiccano il cromo, per la qualità della correlazione e, per interesse relativo a questo studio, il rame.

## Bibliografia

- Dunlop, D. (2002). Theory and application of the Day plot (MRS/Ms versus Hcr/Hc): 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research*. 107. . 10.1029/2001JB000486.
- Hofman, J., Maher, B., Muxworthy, A., Wuyts, K., Castanheiro, A., Samson, R. (2017). Biomagnetic Monitoring of Atmospheric Pollution: A Review of Magnetic Signatures from Biological Sensors. *Environmental Science & Technology*. 51. . 10.1021/acs.est.7b00832.
- Kodnik, D., Winkler, A., Carniel, F., Tretiach, M. (2017). Biomagnetic monitoring and element content of lichen transplants in a mixed land use area of NE Italy. *Science of The Total Environment*. 595. 858-867. 10.1016/j.scitotenv.2017.03.261.
- Maher, B.A., Thompson, R. and Hounslow, M.W. (1999) Introduction to Quaternary Climates, Environments and Magnetism. *In: Quaternary Climates, Environments and Magnetism (Eds B.A.Maher and R.Thompson), pp. 1–48. Cambridge University Press, Cambridge, UK.*
- Marié, D. & Chaparro, M., Irurzun, A., Lavornia, J., Marinelli, C., Cepeda, R., Böhnel, H., Castañeda M. A., Sinito, A.M.. (2016). Magnetic mapping of air pollution in Tandil city (Argentina) using the lichen *Parmotrema pilosum* as biomonitor. *Atmospheric Pollution Research*. 7. . 10.1016/j.apr.2015.12.005.
- Moreno, E., Sagnotti, L., Dinarès-Turell, J., Winkler, A., Cascella, A. (2003). Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves. *Atmospheric Environment*. 37. 2967-2977. 10.1016/S1352-2310(03)00244-9.
- Paoli, L., Winkler, A., Guttova, A., Sagnotti, L., Grassi, A., Lackovičová, A., Senko, D., Loppi, S. (2016). Magnetic properties and element concentrations in lichens exposed to airborne pollutants released during cement production. *Environmental Science and Pollution Research*. 24. . 10.1007/s11356-016-6203-6.
- Sagnotti, L., Macri, P., Egli, R., Mondino, M. (2006). Magnetic properties of atmospheric particulate matter from automatic air sampler stations in Latium (Italy): Toward a definition of magnetic fingerprints for natural and anthropogenic PM 10 sources. *Journal of Geophysical Research*. 111. . 10.1029/2006JB004508.
- Sagnotti, L., Taddeucci, J., Winkler, A., Cavallo, A. (2009). Compositional, morphological, and hysteresis characterization of magnetic airborne particulate matter in Rome, Italy. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 10. . 10.1029/2009GC002563.
- Szönyi, M., Sagnotti, L., Hirt, A. (2007). On leaf magnetic homogeneity in particulate matter biomonitoring studies. *Geophysical Research Letters*. 34. . 10.1029/2006GL029076.
- Szönyi, M., Sagnotti, L., Hirt, A. (2008). A refined biomonitoring study of airborne particulate matter pollution in Rome, with magnetic measurements on *Quercus Ilex* tree leaves. *Geophysical Journal International*. 173. 127-141. 10.1111/j.1365-246X.2008.03715.x.