



LINEA PROGETTUALE 3

Valutazione dell'esposizione umana
e implementazione sistema informativo integrato

AZIONE 1
Redazione linee guida

**Linee guida per la realizzazione
della valutazione dell'esposizione**
(versione n. 1)

Responsabili: Paola Angelini (Regione Emilia-Romagna), Paolo Lauriola (Arpa Emilia-Romagna)

www.moniter.it

Il progetto Moniter: organizzazione di un sistema di sorveglianza ambientale e valutazione epidemiologica nelle aree circostanti gli impianti di incenerimento in Emilia-Romagna, è promosso dagli assessorati Politiche per la salute e Ambiente, riqualificazione urbana della Regione, in collaborazione con Arpa

INDICE

INTRODUZIONE	4
<i>Valutazione esposizione della popolazione residente</i>	5
Definizione aree di studio	7
Definizione della popolazione in studio	8
Definizione dei criteri di arruolamento della popolazione: criterio geografico	8
Costruzione database civici residenziali	8
Definizione popolazione dello studio trasversale	9
Definizione popolazione dello studio di coorte storica	9
Caratterizzazione socio-economica	9
Valutazione dell'esposizione su base modellistica	10
Definizione degli indicatori per sorgente puntuale e per inquinamento totale	10
Valutazione dell'esposizione attuale	10
Valutazione esposizione dalla sorgente puntuale	11
Valutazione esposizione da tutte le fonti	11
Valutazione dell'esposizione nel passato	11
Valutazione esposizione dalla sorgente puntuale	12
Valutazione esposizione da tutte le fonti	12
Caratterizzazione della coorte su base geografica	13
<i>Uso del biomonitoraggio umano nella valutazione dell'esposizione</i>	14
Indicazioni per l'organizzazione di un progetto di biomonitoraggio umano nella popolazione residente in aree circostanti inceneritori	17
<i>Uso del biomonitoraggio ambientale nella valutazione dell'esposizione</i>	19
Indicazioni per l'organizzazione di un progetto di biomonitoraggio ambientale nelle aree circostanti inceneritori	20

PREMESSA

Il presente rapporto costituisce la versione n. 1 delle Linee Guida per la Realizzazione della Valutazione dell'esposizione sulle popolazioni residenti in aree caratterizzate dalla presenza di inceneritori nella Regione Emilia Romagna, ed è da intendersi come il primo prodotto dell'Azione 1 della Linea Progettuale 3 del Progetto MONITER.

Tale linea progettuale si colloca come elemento cerniera tra la sorveglianza ambientale condotta dalle linee progettuali 1 e 2 e la valutazione degli effetti sulla salute in capo alla LP4.

Per la valutazione dell'esposizione della popolazione in studio, verranno utilizzate informazioni derivanti dai risultati della LP2 (sostanzialmente le mappe di ricaduta degli inquinanti dal solo inceneritore, e da tutte le fonti), unitamente ad informazioni di tipo geografico e socio demografico.

I criteri e le metodologie proposte per la realizzazione della LP3, derivano oltre che da una attenta analisi della letteratura, da esperienze effettuate nell'ambito di altri progetti, in particolare dal Progetto europeo Interreg IIIC "ENHance health – Environmental Health Surveillance System in urban areas, near incinerators and industrial premises", il cui obiettivo principale è stato appunto, la definizione di linee guida per lo sviluppo di sistemi di sorveglianza ambientale-sanitaria, al fine di valutare lo stato di salute della popolazione esposta a fattori di rischio derivanti da insediamenti di impianti di incenerimento.

Le indicazioni metodologiche emerse da tale progetto europeo, hanno consentito di implementare la linea progettuale 3 e 4 del progetto MONITER e costituiscono il substrato del presente report.

In particolare in tale report è proposta una metodologia per la valutazione dell'esposizione che viene ultimamente applicata in epidemiologia ambientale soprattutto negli studi su piccole aree quale può essere considerato quello proposto nell'ambito del progetto MONITER. Gli studi su piccole aree fanno parte dell'epidemiologia spaziale che prevede l'analisi geografica di casi di malattia tenendo conto di fattori importanti quali quelli ambientali, demografici e socioeconomici.

Nell'approccio di piccola area, si assegna una stima dell'esposizione su base individuale a livello di residenza e attraverso l'integrazione geografica di dati ambientali e socio-demografici. In questo modo è possibile investigare la salute della popolazione residente in tutte le aree di studio individuate nell'intorno degli inceneritori presenti in Emilia Romagna, in funzione della loro esposizione stimata.

Nella stesura del presente documento, si è tenuto conto della struttura del piano operativo della LP3 al fine di dare delle indicazioni generali di metodo per gli operatori nel campo ambientale e sanitario che intendono affrontare la problematica della valutazione dell'esposizione nell'ambito di studi epidemiologici su piccole aree. Si propongono due capitoli riguardanti sia metodi diretti che indiretti di stima dell'esposizione tenendo conto degli strumenti di misura e informativi attualmente disponibili.

La LP3 prevede anche una azione sull'integrazione delle varie fonti di dati (ambientali, sanitari, socio demografici, biologici...), al fine di implementare un sistema informativo per il monitoraggio ambientale e sanitario prospettico delle popolazioni indagate. Tale attività verrà affrontata in una fase successiva del progetto e in via sperimentale, per cui sarà oggetto della versione finale delle linee guida.

I capitoli del report riguardano quindi:

1. Valutazione dell'esposizione della popolazione residente tramite approccio geografico
2. Uso del biomonitoraggio umano nella valutazione dell'esposizione
3. Uso del biomonitoraggio ambientale nella valutazione dell'esposizione

INTRODUZIONE

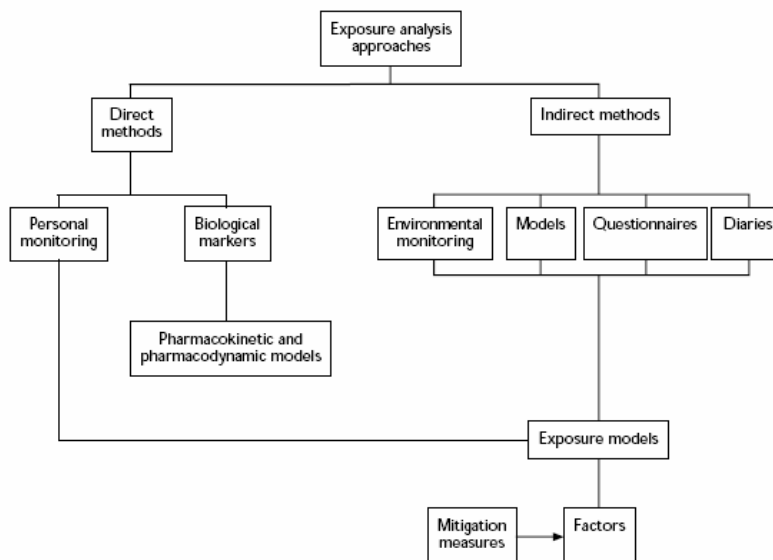
L'esposizione ad un agente ambientale è definita come il contatto fra un agente potenzialmente dannoso presente in una matrice ambientale (come l'aria, l'acqua o gli alimenti) e una superficie del corpo umano (come la cute o la parete del tratto digestivo o respiratorio) (1,2).

La corretta valutazione dell'esposizione umana agli inquinanti presenti nell'ambiente, rappresentano uno dei principali elementi critici dell'epidemiologia e del risk assessment, con implicazioni rilevanti nella pianificazione degli interventi di prevenzione e risanamento.

La valutazione dell'esposizione è il processo di stima o misura della quantità, frequenza e durata dell'esposizione ad un agente, assieme al numero e caratteristiche della popolazione esposta. Idealmente descrive la sorgente, le vie di esposizione, il percorso metabolico e le incertezze nella valutazione (WHO/IPCS, 2004).

In epidemiologia ambientale, la valutazione del rischio di malattia in relazione alla quantità di un inquinante o di un suo metabolita, viene spesso effettuata utilizzando la misura dei livelli ambientali dell'agente stesso nella matrice prossima alla via di ingresso nell'organismo, in quanto risulta molto difficile misurare la dose all'organo bersaglio.

La determinazione dei livelli ambientali di un agente (ad es. tramite le misure delle centraline della rete di monitoraggio urbano) non è di per sé una misura dell'esposizione della popolazione a tale agente, ma un suo indicatore surrogato (*proxy*), la cui validità dipende da vari fattori tra cui la residenza (localizzazione e tipologia di abitazione rispetto alle sorgenti di emissione), la mobilità della popolazione, le modalità di trasporto impiegate, il tempo trascorso in ambienti *indoor/outdoor*, lo stile di vita, abitudini al fumo, esposizioni lavorative e fattori generali quali età e stato di salute.



Reprinted with permission from Human Exposure Assessment for Airborne Pollutants. ©1991 by the National Academy of Sciences. Courtesy of the National Academy Press, Washington, D.C.

Fig.x Approcci diretti e indiretti per la valutazione dell'esposizione

In tal senso si stanno sviluppando approcci sempre più sofisticati nella valutazione dell'esposizione, basati su tecniche modellistiche di tipo deterministico e stocastico che tengono conto di variabili come la temperatura, la direzione dei venti e la variabilità spaziale degli inquinanti in atmosfera. Studi recenti di epidemiologia ambientale, utilizzano questi modelli per la stima dell'esposizione della popolazione e dove possibile integrano con la ricerca di indicatori personali su matrici biologiche (biomarkers di esposizione).

VALUTAZIONE ESPOSIZIONE DELLA POPOLAZIONE RESIDENTE

L'utilizzo di informazioni geografiche per la valutazione dell'esposizione e, più in generale, nella conduzione di studi epidemiologici, sta diventando sempre più frequente, sia in fase di disegno dello studio che di analisi dei dati. La crescente disponibilità di informazioni digitali e lo sviluppo dei sistemi informativi geografici (GIS) permette di analizzare e gestire dati localizzati spazialmente.

L'uso di dati e modelli ambientali come indicatore indiretto per la valutazione dell'esposizione rappresenta sicuramente un miglioramento della stima rispetto a considerazioni meramente geografiche come la distanza da una fonte. Il contesto geografico risulta essere il più idoneo per integrare informazioni di tipo ambientale con dati socio-demografici per l'attribuzione di valori di esposizione alla popolazione oggetto di indagine epidemiologica.

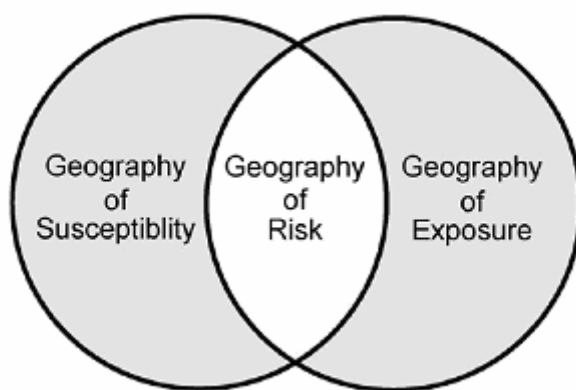


Figura 1: Diagramma di Venn della geografia del rischio

In quest'ottica si possono identificare, secondo il diagramma di Venn sopra riportato¹, due tipologie di ambiti geografici da considerare nella valutazione dell'esposizione della popolazione, la cui intersezione compone la definizione del rischio per la salute della popolazione, da indagare tramite diverse tipologie di indagine epidemiologica o più in generale di *risk assessment*.

La geografia della suscettibilità attiene ai fattori che confondono o modificano le relazioni inquinamento-salute. La geografia dell'esposizione riguarda la zona geografica in cui un soggetto o un gruppo vive: può essere microambiente, intra-urbano, inter-urbano.

I fattori che influiscono sulla scelta del metodo di indagine sono l'approccio individuale o di popolazione, il contesto geografico di riferimento (larga scala, ambito urbano, piccola area, ...), la valutazione temporale degli effetti sanitari (a breve o a lungo termine). Anche il modello ambientale adatto da utilizzare in questo processo è diretta conseguenza di queste considerazioni.

Un buon disegno di valutazione dell'esposizione che integri competenze e strumenti di monitoraggio e modellistica ambientale, GIS, metodi statistici, permette un miglior controllo dei fattori confondenti dovuti alle aggregazioni geografiche e alle valutazioni sulle varie forme di inquinamento ambientale.

L'epidemiologia utilizza un approccio comparativo, suddividendo la popolazione in studio in sottogruppi e confrontando una misura di malattia (tasso, rapporto standardizzato o altro) fra questi. Il gruppo a minor esposizione viene preso come gruppo di controllo, e si valuta se e quanto gli altri siano a maggior rischio rispetto al primo. La composizione di questi gruppi è tanto più affidabile quanto più è minimizzata la variabilità dell'indicatore di esposizione entro i gruppi e massimizzata quella fra i gruppi. Quando l'esposizione è determinata da rilevazioni o stime modellistiche di concentrazioni di inquinanti in aria, si vuole stimare al meglio i diversi gradienti di esposizione, ovvero definire aree a diversa pressione ambientale. In questo caso vanno privilegiati gli approcci che interpretano al meglio la variabilità spaziale

¹ Jerrett M, Finkelstein M. "Geographies of Risk in Studies Linking Chronic Air Pollution Exposure to Health Outcomes" *J. Toxicol. Environ. Health A* 68:13, 1207-1242

degli inquinanti, piuttosto che la stima numerica puntuale, la cui importanza aumenta all'interno di un processo di risk assessment quantitativo. Per quest'ultimo aspetto può essere utile il contributo di tecniche di misura diretta, quali il biomonitoraggio, presenti come attività sperimentali all'interno della Linea Progettuale e discusse più avanti anche in questo documento.

L'affidabilità delle mappe generate da modelli di dispersione deve essere valutata alla luce delle considerazioni fatte sopra. In letteratura esistono recenti esperienze di valutazione dell'attendibilità di questo dato in ambito epidemiologico.

Uno studio condotto a Monaco di Baviera² ha confrontato i livelli misurati di PM_{2.5} e NO₂ con quelli stimati da un modello di dispersione gaussiano e da un modello di tipo statistico. Al di là della diversa scala spaziale considerata (intera città) rispetto ad un'indagine di piccola area, le analisi hanno mostrato forti correlazioni fra i 2 modelli e fra i modelli e i valori misurati, evidenziando una generale sovrastima del modello gaussiano rispetto ai valori misurati.

Un lavoro francese³ ha validato un modello di dispersione gaussiano di diossine da un inceneritore tramite una campagna di misurazioni al suolo in 75 punti di campionamento. Tale modello era stato usato in un lavoro precedente dagli stessi autori per definire l'esposizione ad inquinamento da inceneritore di una popolazione in uno studio caso-controllo. I risultati confermano la validità del modello nel definire diversi gradienti di esposizione, rimarcando delle incongruenze fra livelli misurati e stimati dal modello solo in presenza di situazioni topografiche complesse (presenza di colline).

All'interno delle attività dell'Azione 3 della Linea Progettuale 3 è previsto uno studio di fattibilità sull'utilizzo di bioindicatori ambientali in una delle aree di indagine, i cui risultati potrebbero fornire un utile strumento di verifica dei gradienti di esposizione forniti dalle mappe ambientali dei modelli di ricaduta, analogamente a quanto effettuato nello studio francese.

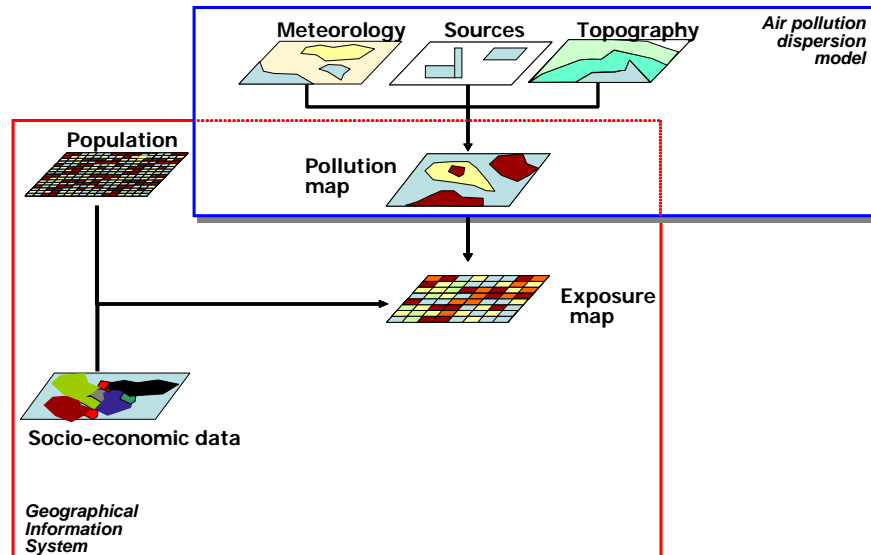
Sempre all'interno della stessa Azione è previsto un altro studio di fattibilità, su indagini di biomonitoraggio umano, i cui risultati potrebbero essere utili per la verifica dell'attendibilità di indici di esposizione individuale.

All'interno del presente documento si propone una metodologia di valutazione dell'esposizione su base geografica residenziale, che utilizza i modelli di dispersione degli inquinanti come base per la valutazione della popolazione esposta.

Il procedimento logico di linkage tra le informazioni socio-demografiche, le residenze e le mappe ambientali è illustrato nella figura sottostante, dove si chiarisce il ruolo centrale dell'impostazione geografica del sistema.

² Cyrus J, Hochadel M, Gehring U, Hoek G, Diegmann V, Brunekreef B, Heinrich J. GIS-based estimation of exposure to particulate matter and NO₂ in an urban area: stochastic versus dispersion modeling. *Environ Health Perspect.* 2005 Aug;113(8):987-92.

³ Floret N, Viel JF, Lucot E, Dudermel PM, Cahn JY, Badot PM, Mauny F. Dispersion modelling as a dioxin exposure indicator in the vicinity of a municipal solid waste incinerator: a validation study. *Environ Sci Technol* 2006;40(7):2149-55.



Adattato da Intarese - WP 3.6 Collaborative Group

Figura 2: Diagramma di flusso della valutazione geografica dell'esposizione

La mappa di inquinamento viene collegata ad informazioni individuali e di deprivazione sociale attraverso la collocazione della residenza di ciascun soggetto coinvolto nell'indagine. Tutte queste informazioni concorrono alla stima dell'esposizione di ciascun individuo su base geografica.

I prossimi paragrafi analizzano più in dettaglio le singole fasi di questo processo di stima, dando indicazioni generali e specificando le scelte adottate all'interno del progetto Moniter.

Un aspetto di sicura importanza, non metodologico ma fondamentale, riguarda il coinvolgimento operativo di tutte le Istituzioni detentrici delle diverse banche dati che verranno via via indicate come fondamentali nella costruzione del database conclusivo per la valutazione dell'esposizione della popolazione indagata. Un buon coinvolgimento di tali Istituzioni è alla base della buona riuscita del processo, e può essere spunto per impostare cambiamenti nei sistemi di rilevazione per migliorare la collocazione geografica.

Definizione aree di studio

La definizione dell'area di studio va fatta considerando alcuni fattori chiave: la morfologia dell'impianto, la meteorologia locale e la distribuzione della popolazione.

Le prime due servono per definire, attraverso dati di letteratura e eventualmente anche prove sperimentali, una ipotetica area di influenza dell'impianto in termini di ricaduta degli inquinanti emessi. La distribuzione della popolazione è utile per stimare a priori una numerosità di popolazione interessata e impostare stime legate alla potenza statistica (relativa in particolare ad indagini da effettuare su patologie rare). Vanno comunque considerate anche gli altri fattori di pressione ambientale che agiscono come confondenti rispetto all'esposizione all'inceneritore, la cui influenza cresce all'aumentare della distanza dei soggetti dall'impianto.

Area di studio di Moniter

L'area di studio è stata definita come un cerchio di raggio di 4Km, sulla base di considerazioni derivanti da analisi della letteratura e da precedenti esperienze effettuate a livello locale.

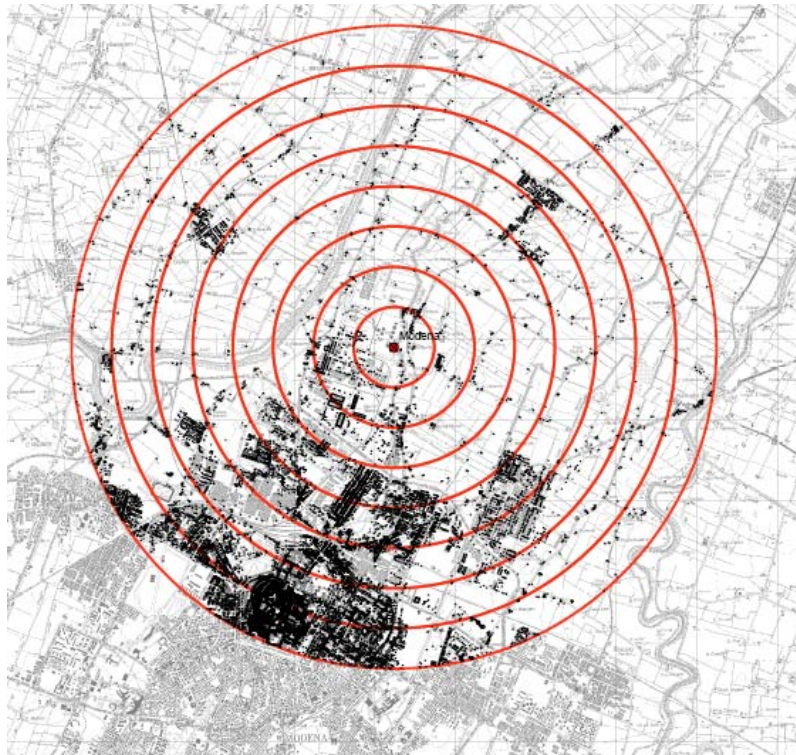


Figura 3: Esempio di definizione dell'area di studio all'interno del progetto Monitor

Definizione della popolazione in studio

Definizione dei criteri di arruolamento della popolazione: criterio geografico

Nella costruzione di una coorte di esposti il criterio di inclusione è alla base di tutto il disegno. L'approccio è di tipo geografico, il criterio di scelta va fatto sulla collocazione geografica che si intende dare ad ogni soggetto. Per un'indagine di grandi dimensioni come quella impostata nel presente studio non ci si può permettere di ricercare informazioni personali relative alle attività e spostamenti di ogni singolo soggetto, per cui si deve riferire ciascun arruolato ad un punto. La residenza, pur con tutte le sue limitazioni e approssimazioni, rimane la scelta che limita maggiormente le possibilità di misclassificazione in queste condizioni.

Criterio di inclusione adottato per Monitor:

- Coorte dei nati: tutti i nati residenti nell'area di studio nel periodo 2003-2006, facendo riferimento cioè alla residenza del bambino al momento della nascita, anche se differente da quella della madre. Sono esclusi i bambini in affido, riconoscibili in quanto residenti presso la sede municipale del Comune di residenza.
- Coorte storica dei residenti: tutti i soggetti che risiedono o che hanno risieduto (per un periodo minimo di 6 mesi) nell'area di studio di ciascun inceneritore, per il periodo considerato (1991-2006).

Costruzione database civici residenziali

Per la costruzione della coorte residenziale, il primo passo consiste nella selezione dei civici residenziali che ricadono nelle aree di studio.



Tutti i civici residenziali che ricadono in una delle aree vanno selezionati e georeferiti. Per ogni sito verrà quindi costruito un database contenente l'elenco dei civici residenziali selezionati, corredati di coordinate geografiche, comune di appartenenza, inceneritore di riferimento ed eventualmente distanza dall'impianto.

Il tracciato record di questo database, opportunamente riclassificato per comune di residenza, rappresenta la base di selezione della popolazione di qualsiasi coorte da parte delle diverse Anagrafi comunali coinvolte (il cui territorio entra in una delle aree).

Le informazioni che devono essere fornite dalle diverse anagrafi comunali dipendono dalla coorte che si intende ricostruire. In linea generale è opportuno distinguere una parte anagrafica di identificazione del soggetto, specialmente per quanto riguarda sesso ed età, e una parte di informazione residenziale, che comprenda indirizzo esatto, periodo di residenza, sezione di censimento relativa.

Definizione popolazione dello studio trasversale

Le informazioni da raccogliere riguardano i nati nel periodo temporale definito nelle aree di indagine, unitamente alle informazioni sulla madre. Il criterio di selezione dei casi si basa sulla residenza della madre in una delle aree al momento del parto. La lista dei neonati dovrà essere completata con le seguenti informazioni: cognome e nome del bambino, CF bambino, indirizzo alla nascita, data di nascita, cognome e nome della madre, CF madre, luogo e data di nascita della madre.

Definizione popolazione dello studio di coorte storica

La coorte storica include tutti i residenti nelle aree di studio che abbiano abitato per un periodo minimo (es. 6 mesi) in un civico residenziale tra quelli inclusi nell'area. Va definita una soglia temporale inferiore, che solitamente si fa coincidere con un anno di censimento (es. 1991), per il quale dovrebbe esistere un buon riallineamento delle anagrafi comunali. Da lì in poi, vanno raccolti i dati informatizzati per la ricostruzione della storia residenziale in funzione della disponibilità di ciascuna anagrafe. Nel caso (altamente probabile) di un salto temporale dalla soglia temporale inferiore al primo anno disponibile di dati continui sulla storia residenziale, va definito un criterio di "collegamento" per il periodo non coperto da rilevazione.

Nel caso del Monitor, i criteri seguiti saranno:

- in caso di residenza identica al 1991 e al primo anno disponibile (es. 1995), si assumerà che l'individuo abbia risieduto in quell'abitazione per tutto il periodo (es. 1991-1995).
- in caso di residenza differente al 1991 e al primo anno disponibile (es. 1995), si dividerà il periodo non coperto in due parti, assegnando la residenza al 1991 al primo periodo e la residenza al 1995 al secondo.

La richiesta di ricostruzione delle storie residenziali alle anagrafi comunali dovrà quindi portare ad avere un database in cui ogni singolo record rappresenta la singola residenza di una persona in un punto interno al dominio. La numerosità finale del database coinciderà perciò non con il numero di persone arruolate, ma con il numero di spostamenti effettuati dalle persone arruolate nella coorte all'interno dell'area di studio nel periodo considerato.

Più nel dettaglio ogni record dovrà contenere le informazioni sul soggetto, la residenza in formato agganciabile con i dati georeferiti delle banche dati regionali, l'indicazione delle sezioni di censimento '91 e '01 utili alla costruzione dell'indicatore socio-economico, il periodo di residenza in quell'abitazione (data inizio e fine residenza)

Caratterizzazione socio-economica

L'indicatore socio-economico che sarà utilizzato nel corso delle analisi come fattore di correzione sarà attribuito ad ogni individuo a seconda della sezione di censimento di appartenenza.

Si utilizzerà un indicatore tempo-specifico partendo dai dati dei censimenti del 1991 e del 2001. Saranno individuate diverse variabili *proxy* di indicatori di vantaggio/svantaggio sociale come il livello di istruzione, la professione, le condizioni abitative e la composizione familiare. Si costruirà, combinando questi diversi fattori, un indicatore sintetico di posizione socio economica per la popolazione in studio residente in prossimità degli inceneritori e un indicatore sulle popolazioni di riferimento, provinciali e regionale, che consentirà la correzione per fattore socio economico anche nei confronti esterni all'area in studio.

Valutazione dell'esposizione su base modellistica

Definizione degli indicatori per sorgente puntuale e per inquinamento totale

Vi sono parecchie motivazioni che devono essere considerate nella definizione dei traccianti ambientali da utilizzare per l'inquinamento da sorgente puntuale (es. inceneritori) e da tutte le sorgenti che insistono nell'area di indagine.

La consapevolezza dell'assenza di un tracciante specifico per gli inceneritori, l'evoluzione tecnologica di questi impianti che nel tempo ha abbattuto l'emissione di sostanze che potevano essere buoni traccianti nel passato (es. diossine e acido cloridrico), la difficoltà di monitorare e modellizzare la ricaduta di alcuni inquinanti (es. metalli pesanti).

In base a tutto ciò, il tracciante da scegliere deve essere possibilmente unico per tutto il periodo considerato e il più possibile affidabile, da un punto di vista di monitoraggio alle emissioni, di disponibilità di dati da fornire in input ad un modello di ricaduta.

Criterio adottato in Monitor

Si è concordato, assieme alla LP2, di utilizzare per la simulazione modellistica per il solo inceneritore, la ricaduta al suolo del PM10 *long term* annuale

La scelta di questo tracciante è sostanzialmente dovuta alle seguenti motivazioni, che riprendono le considerazioni esposte sopra:

- La simulazione modellistica di PM10, NOx e metalli produce mappe morfologicamente sovrapponibili, differenti solo nei valori quantitativi, ma non nei gradienti;
- L'accuratezza del data-set per il PM10 (ricavabile dai dati in continuo dello SME) è sicuramente maggiore di quello dei metalli, per i quali gli unici dati disponibili deriverebbero da controlli, in genere a cadenza semestrale;
- Per gli inceneritori in configurazione passata (vedi punto successivo) è presumibile trovare un numero maggiore di dati misurati per il PM10 che non per i metalli

Per la simulazione modellistica dell'inquinamento dovuto a tutti i fattori di pressione che insistono nell'area di studio, sempre dopo un confronto con gli esperti di modellistica della LP2, si utilizzerà l'NOx (*long term* annuale).

Valutazione dell'esposizione attuale

Nel valutare l'impatto sulla salute di impianti esistenti da parecchi anni attraverso studi epidemiologici, non si può non tenere conto del diverso impatto dovuto ai significativi cambiamenti strutturali degli impianti dal momento della costruzione alla attuale forma, cosiddetta di nuova generazione.

Per poter coprire l'intero dominio di indagine epidemiologica, per esigenze tecniche del modello utilizzato, il dominio minimo consiste di un rettangolo orientato secondo i punti cardinali di dimensione tale da includere un quadrato di lato non inferiore al diametro dell'area in esame e centrato sul camino dell'inceneritore. L'estensione del rettangolo è definita secondo i seguenti criteri:

- ~ inclusione delle aree industriali, autostrade e strade di grande viabilità;
- ~ inclusione delle aree urbane (in particolare siti sensibili quali ospedali, scuole, residenze per anziani, parchi giochi, etc);
- ~ esclusione di ampie aree disabitate (mare);
- ~ esclusione di aree a orografia complessa, compatibilmente con le potenzialità del modello di dispersione utilizzato;

maggiore estensione nelle direzioni prevalenti notturne del vento (dove il pennacchio assume forma più piatta; fenomeni di *fanning*).

Valutazione esposizione dalla sorgente puntuale

La finalità delle mappe prodotte, o meglio la tipologia di studio epidemiologico all'interno del quale vengono utilizzate, determina le caratteristiche della simulazione modellistica.

Mentre, infatti, per lo studio di coorte storica, è sufficiente una mappa che caratterizza l'inquinamento annuale "tipo" del periodo (considerato omogeneo in relazione alle caratteristiche dell'impianto), lo studio sugli effetti sanitari sui nati, indagando gli effetti riproduttivi, lega tali patologie all'esposizione prenatale (i 9 mesi della gravidanza). Per questo motivo pare utile effettuare delle simulazioni modellistiche, sempre di tipo *long term*, che permettano, però, di tenere in considerazione eventuali periodi di fermo dell'impianto, che non di rado sono dell'ordine dei mesi. Per cui è stato concordato di effettuare una simulazione per ogni anno considerato, al fine di modulare il funzionamento mensile dell'impianto. Il periodo temporale di simulazione deve comprendere anche l'anno precedente all'inizio del reclutamento della coorte dei nati, sempre per poter correttamente valutare l'esposizione prenatale.

Criteri adottati in Monitor:

Periodo medio annuale di funzionamento dell'inceneritore: 365 giorni all'anno, in concordanza con le simulazioni effettuate per il monitoraggio della LP2, considerando uno scenario medio peggiorativo.

Il valore da inserire come input al modello ADMS deriva dalla raccolta dei dati SME (monitoraggio in continuo) dell'inceneritore. Occorre effettuare una analisi di questi dati orientata a due obiettivi principali:

1. determinare quantitativamente le emissioni per la costruzione del catasto;
2. ricercare una eventuale regolarità delle emissioni.

La serie temporale dei dati da valutare deve coprire almeno un anno di rilevazioni e deve essere rappresentativa dello stato di regime dell'impianto.

Valutazione esposizione da tutte le fonti

Diversamente da quanto predisposto per la valutazione dei punti di monitoraggio (cfr LG per la realizzazione della sorveglianza ambientale), in questo caso la valutazione delle "altre" fonti emissive⁴ non è legata a vincoli di distanza dall'impianto, ma deve essere legata alla distribuzione della popolazione nel dominio di calcolo. Tutte le fonti saranno dunque descritte con la maggior accuratezza possibile, e soprattutto quelle geograficamente più prossime alla distribuzione dei residenti (fornite dalla Linea Progettuale 3 alle diverse unità operative coinvolte nella modellistica ambientale).

Il parametro di valutazione di importanza di emissione è legato dunque alla massa annuale emessa da ogni singola sorgente (impianto industriale, strada, ecc.). Sono comunque valide le considerazioni relative alla qualità del dato espresse nelle LG per la realizzazione della sorveglianza ambientale.

Valutazione dell'esposizione nel passato

Per valutare, con studi epidemiologici, l'impatto sulla salute di impianti su un arco temporale considerevole (15-20 anni o anche più) comporta una serie di considerazioni nell'attribuzione dell'esposizione in tutto il periodo. Stimare l'impatto di impianti di vecchia generazione non può significare predire lo stesso impatto per gli impianti di nuova generazione (o per lo stesso impianto dopo gli ammodernamenti). La tecnologia cambia, le emissioni sono quantitativamente e qualitativamente diverse, cambia pure il target dell'esposizione, ovvero la popolazione residente, le sue caratteristiche demografiche e il suo stato di salute.

⁴ Nelle LG orientate al monitoraggio ambientale queste fonti sono definite "confondenti" in quanto concorrono a "confondere" la valutazione di ricaduta dell'impianto in oggetto in un dato punto recettore. In questo contesto sono definite "altre sorgenti emissive" in quanto concorrono all'assorbimento di inquinanti da parte della popolazione residente nel dominio.

Non di meno cambiano qualitativamente e quantitativamente anche le altre esposizioni dovute ai diversi fattori di pressione che insistono nell'area di studio (traffico, altre fonti industriali, riscaldamento).

Da queste considerazioni emerge la necessità di valutare lo scenario emissivo nel passato. Mentre questo può risultare fattibile per il singolo impianto di incenerimento (pur con delle limitazioni rispetto all'attuale, specialmente nel numero di dati sperimentali a disposizione), pare chiaramente arduo, se non impossibile, ridefinire lo scenario emissivo per gli altri determinanti ambientali.

Vengono quindi descritti due diversi approcci per stimare l'impatto nel passato dovuto all'inceneritore e agli altri fattori di pressione.

Valutazione esposizione dalla sorgente puntuale

Questa fase dell'azione è finalizzata a limitare l'errore di valutazione dell'esposizione in periodi passati. Le mappe fornite dalla LP2 sulle attuali ricadute degli inceneritori sono riferite alle odierne situazioni impiantistiche. Ogni impianto ha avuto, nel corso degli anni che si considerano per la ricostruzione della storia residenziale per lo studio di coorte, una serie di adeguamenti strutturali, solitamente in risposta a modifiche legislative nelle autorizzazioni alle emissioni.

Una valutazione delle normative dal 1990 ad oggi fa emergere due sicuri step, che hanno sostanzialmente cambiato i livelli autorizzati alle emissioni di sostanze di sicuro interesse sanitario, quali le diossine: il 1990 con l'entrata in vigore del DM 12/7/90 e il 1997 con il DM 19/11/97, n.503 su RSU e RS.

Questi decreti richiedevano agli enti gestori un adeguamento degli impianti entro un periodo stabilito. Si ritiene quindi fondamentale effettuare una modellizzazione della situazione di ogni impianto prima dell'adeguamento al DM 503.

Accanto a queste considerazioni, deve essere analizzata la storia degli adeguamenti di ogni singolo impianto, per verificare tutti gli eventuali significativi cambiamenti nel quadro emissivo.

Queste informazioni saranno alla base delle decisioni sulle ulteriori suddivisioni temporali sulle quali effettuare eventualmente le simulazioni modellistiche per ogni impianto.

Accanto a questa ricostruzione, sarà compito delle linee progettuali ambientali la verifica delle disponibilità di dati reali (misurati) per gli anni passati, da utilizzare per calcolare un valore medio del periodo temporale considerato, da inserire come parametro di input ai modelli.

Questa ricognizione contribuisce, per quanto detto sopra nel paragrafo sulla scelta degli indicatori, alla definizione del tracciante per gli inceneritori sul passato, che da indagini esplorative iniziali, vede il PM10 come candidato più probabile.

Una questione aperta, ma di notevole rilevanza ai fini epidemiologici, riguarda la situazione "pre 1990", dove non esisteva una normativa ma solo indicazioni europee, in quanto un'alta esposizione a determinate sostanze può avere indotto patologie riscontrabili nel periodo di studio. L'attribuzione dell'esposizione "pre 1990" basata sul modello successivo all'adeguamento al DM 12/7/90 comporta una forte assunzione a priori sull'impatto degli impianti prima del 1990. Si valuterà assieme alla LP2 la possibilità di indagare meglio e modellizzare il periodo precedente al 1990, anche in base ai risultati della ricognizione di campagne di misure passata. Questo aspetto va comunque di pari passo con la disponibilità di dati sulla residenza in quegli anni della popolazione, dato senza il quale ogni sforzo modellistico risulterebbe vano o poco informativo.

Valutazione esposizione da tutte le fonti

Un discorso di ricostruzione modellistica dell'impatto ambientale nel passato di tutte le fonti presenti nell'area risulta pressoché impossibile nella pratica. Si utilizzerà quindi come misura *proxy* di questa esposizione la vicinanza nel tempo a fattori di pressione importanti.

Questa caratterizzazione dell'esposizione a livello geografico può essere fatta attribuendo a ciascun civico residenziale una serie di informazioni relative alla vicinanza a fattori di pressione ambientale significativi.

Deve essere definito un elenco (georeferito) delle sorgenti significative di inquinamento per ogni area, per l'intero periodo di indagine. Per ogni tipologia di sorgente (puntuale, areale, industriale, residenziale, strada ad alto traffico, ...) deve essere definita una distanza massima significativa di influenza per ogni tipo di sorgente, definendo quindi dei *buffer* spaziali per ogni sorgente considerata. In questo modo sarà possibile,

attraverso analisi geografiche, creare delle variabili *dummy* (o delle variabili numeriche con la distanza esatta) per ciascun civico residenziale che caratterizzino ciascuna abitazione in termini di vicinanza significativa alle diverse fonti. La determinazione delle sorgenti di inquinamento da considerare terrà conto delle valutazioni che la LP2 inserirà nelle linee guida in merito alla selezione degli impianti da inserire come input puntuale nel modello di simulazione. Nel caso però di una valutazione a fini epidemiologici, però, la vicinanza all'inceneritore non sarà un criterio di selezione in quanto il riferimento dell'impatto degli impianti è sull'intera area di indagine (ovvero sulla popolazione residente in quell'area). Verranno classificate le fonti industriali in base alla tipologia e dimensione dell'impianto, alle caratteristiche fisiche e agli inquinanti emessi. Per l'impatto dovuto al traffico saranno individuati buffer differenti per le autostrade e per le strade ad alto volume di traffico. Verrà considerata anche la residenza in un'area urbana, per tenere conto sia del traffico che del riscaldamento.

Caratterizzazione della coorte su base geografica

Per gli inquinanti sopra citati verranno create mappe ad hoc sulla situazione espositiva attuale e passata.

Ad ogni singolo record creato nella fase di ricostruzione della storia residenziale verrà attribuito il valore di concentrazione stimata per quel periodo in quel punto.

Nel caso in un record vi sia un periodo temporale di residenza che si riferisce a due diverse situazioni modellistiche, e quindi due valori di esposizione differenti, l'esposizione per quel periodo verrà calcolata come media dei due valori pesata per il tempo di esposizione.

Ad ogni record verrà collegata anche la caratterizzazione socioeconomica, basata sul valore dell'indice creato in corrispondenza della sezione di censimento della residenza.

Al fine di fornire un'indicazione sintetica dell'esposizione individuale nell'intero periodo, si prevede anche l'aggregazione di tali informazioni per singolo individuo. In questo contesto verrà indagata la possibilità di costruire degli indicatori di esposizione sintetici, che tengano conto dei diversi valori di esposizione attribuiti all'individuo nel periodo considerato, dei suoi valori di deprivazione, delle caratteristiche dell'individuo (sesso, età, ...), nonché di altre eventuali informazioni riferibili al soggetto.

USO DEL BIOMONITORAGGIO UMANO NELLA VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE

Come già descritto nei paragrafi precedenti, esistono numerosi e diversi metodi per definire le relazioni esistenti tra la presenza di un contaminante nell'ambiente e gli effetti dannosi che esso può determinare sulla salute umana. In questo processo di valutazione del rischio, vengono generalmente utilizzati approcci empirici o modelli che stimano la concentrazione degli inquinanti nei vari comparti ambientali per arrivare ad attribuire un valore di esposizione umana stimato e da esso quantificare la dose.

In epidemiologia ambientale, in questo ultimo decennio, si è assistito ad un progressivo incremento nello sviluppo e applicazione del biomonitoraggio umano come strumento per la valutazione dell'esposizione individuale e dell'associazione tra inquinanti e danno precoce, indagando eventualmente anche la suscettibilità, specie in aree contaminate o intorno a sorgenti puntuali di inquinamento.

In molti casi, la ricerca di indicatori biologici in tessuti o fluidi corporei si è dimostrata un prezioso completamento, se non un superamento, del processo di stima dell'esposizione basata su misure ambientali e costituisce un approccio fondamentale nella caratterizzazione e nella gestione del rischio per la salute.

Il biomonitoraggio umano, misura direttamente la quantità di una sostanza chimica nel corpo di un individuo, tenendo conto di processi spesso scarsamente compresi, quali il bioaccumulo, escrezione, metabolismo e assorbimento, attraverso differenti vie metaboliche di esposizione, piuttosto che ogni sorgente di esposizione individuale.

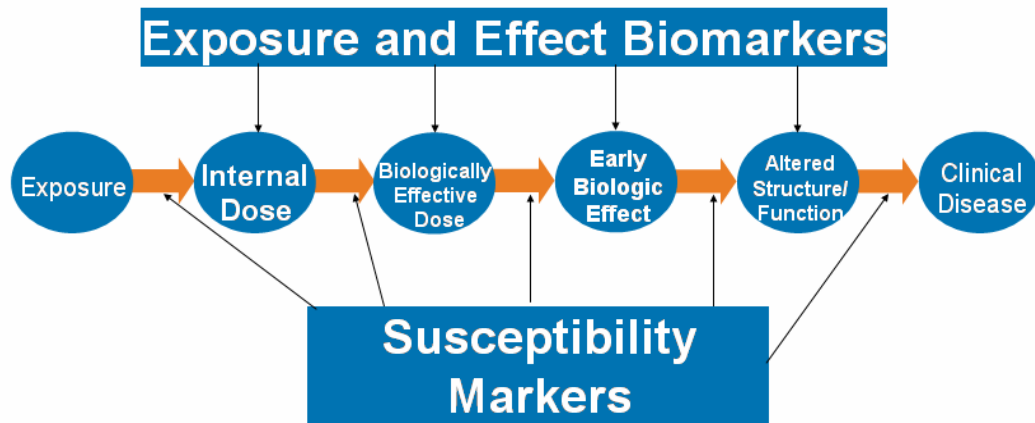
Perciò tali dati risultano molto più pertinenti per la valutazione del rischio rispetto all'estrapolazione da concentrazione di inquinanti nel suolo, aria, e acqua.

Quando si raccolgono e analizzano dati di biomonitoraggio umano, "l'inquinamento diventa personale", cioè rispecchia maggiormente la reale esposizione complessiva dell'individuo a quel determinato inquinante.

Gli indicatori biologici o biomarkers sono generalmente delle caratteristiche biochimiche, genetiche, immunologiche o fisiologiche, osservate in sistemi biologici. Tradizionalmente vengono classificati in:

- *biomarkers di esposizione*: concentrazione di uno xenobiotico, di un suo metabolita o del prodotto della loro interazione con un componente endogeno.
- *biomarkers di effetto*: alterazioni biochimiche morfologiche o funzionali rilevabili nell'organismo umano
- *biomarkers di suscettibilità*. indice di predisposizione (ereditaria od acquisita) di un individuo a subire gli effetti di uno xenobiotico.

Sebbene questa classificazione suggerisca l'esistenza di sottogruppi chiaramente definiti, i biomarkers formano un continuum tra l'esposizione esterna e le modificazioni fisiologiche o patologiche interne (vedi figura..).



Adapted from National Research Council, *Biologic Markers in Reproductive Toxicology*. Washington: National Academy Press, 1989

I biomarcatori d'esposizione, specie se misurati in campioni di popolazioni definite, permettono di identificare cambiamenti del profilo di esposizione della popolazione nel tempo più precocemente, rispetto a biomarcatori di effetto, anche fisiologico, anche pre-clinico, che misurano comunque un cambiamento o un danno già avvenuto o in corso.

Tali biomarcatori sono particolarmente utile per la valutazione dell'esposizione a metalli e a numerose sostanze organiche e in generale a sostanze che non vengono metabolizzate rapidamente. Il suo utilizzo per valutare gli effetti sulla salute in popolazioni residenti nelle vicinanze di impianti di trattamento di rifiuti è stato proposto quasi dieci anni fa.

Alcuni esempi di sostanze presenti nell'ambiente per le quali sono stati sviluppati biomarcatori d'esposizione sono riportati nella tabella sottostante⁵.

Esempi di sostanze inquinanti per le quali sono stati sviluppati biomarcatori di esposizione

Sostanze	Biomarcatori
Piombo	Piombo nel sangue
Cadmio	Cadmio nelle urine
Cromo	Legami incrociati proteina-DNA
Mercurio	Mercurio nelle urine
Policlorobifenili (PCB)	PCB serico
Composti organici volatili (COV)	COV nel sangue
Pesticidi organoclorurati	Pesticidi nel latte materno
Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)	Addotti al DNA
DDT	DDE e altri metanoli nel tessuto adiposo

Il biomonitoraggio umano assume un ruolo crescente per la definizione di valori di riferimento e soglie di attenzione e di allarme precoce per la popolazione, e per la valutazione di efficacia di *policy* ambientali per la

⁵ Bianchi F. Biomonitoraggio in epidemiologia ambientale. Rapporti ISTISAN 06/19



tutela della salute. L'integrazione di dati di biomonitoraggio umano, ambientale e sorveglianza della salute è considerato obiettivo prioritario da perseguire dall'UE: è stato infatti di recente costituito un gruppo di esperti per il supporto delle attività di biomonitoraggio (ESBIO) ed è stato attivato un progetto pilota per armonizzare le attività, sviluppare protocolli standardizzati, mettere a punto strumenti appropriati per il trasferimento dei risultati del biomonitoraggio in strategie di intervento su ambiente e salute, sviluppare metodologie e strumenti per la comunicazione con i decisori e il pubblico⁶.

⁶ European Human Biomonitoring. www.ehumanbiomonitoring.org

Indicazioni per l'organizzazione di un progetto di biomonitoraggio umano nella popolazione residente in aree circostanti inceneritori

L'utilizzo di biomarcatori (in particolare biomarkers di esposizione) in un complesso sistema di sorveglianza, come quello predisposto da questo progetto, consente di definire in modo diretto l'esposizione della popolazione residente in prossimità di impianti di incenerimento. Infatti il solo dosaggio ambientale non tiene conto di quanta parte degli inquinanti presenti nell'ambiente superi le difese dell'organismo e venga assorbita. L'applicazione di modelli che operino su base individuale e/o avvalendosi di misure dirette, quali ad es. il biomonitoraggio umano ad integrazione del dosaggio ambientale delle sostanze di interesse, comportano il miglioramento della valutazione dell'esposizione.

Il disegno di uno studio di popolazione in presenza di realtà espositive complesse come la presente richiede una varietà di scelte che devono essere attentamente valutate sia per le problematiche scientifiche che per il possibile impatto sull'opinione pubblica. Esistono molti problemi legati agli aspetti tecnici dei saggi utilizzati che devono essere attentamente valutati prima dell'avvio di ogni ricerca sul campo. Per esempio aspetti come la scelta di un marcatore più specifico o più sensibile, il fluido biologico in cui misurarlo, il saggio da utilizzare, il laboratorio più indicato, etc. sono parametri di grande rilevanza che potrebbero inficiare i risultati dell'intero studio, e devono pertanto essere valutati e definiti a priori. Per questi motivi è estremamente indicato, specialmente in situazioni a grande impatto ambientale, condurre prima dello studio una valutazione della fattibilità dell'indagine, che consenta di ottenere informazioni su parametri quali la scelta della popolazione, i biomarcatori più appropriati, le condizioni di raccolta dei campioni, la compatibilità etica, i laboratori da incaricare, la congruenza dei costi, la veridicità degli effetti attesi nelle popolazioni esposte.

Di seguito vengono fornite alcune indicazioni generali che dovrebbero essere considerate per la stesura di un progetto di fattibilità, in particolare per la identificazione di possibili biomarkers umani da proporre successivamente per la sperimentazione:

- **Contenuto informativo:** preliminarmente allo scopo di permettere una efficiente identificazione del migliore set di biomarcatori da applicare nello studio di biomonitoraggio risulta indispensabile effettuare una approfondita ricerca bibliografica prevalentemente riferita ai marcatori di esposizione utilizzati in popolazione esposte a fumi di inceneritori o ad agenti chimici simili. Dopo aver identificato un ampio set di potenziali biomarcatori verranno applicati alcuni filtri selettivi. In particolare è consigliabile mirare l'attenzione soprattutto su marcatori di esposizione, di effetto biologico precoce in relazione anche all'obiettivo di validare le informazioni raccolte mediante i modelli numerici di diffusione ed esposizione ad inquinamento da inceneritori. In tal senso tra gli indicatori di effetto biologico precoce è opportuno sondare la possibilità di impiegare addotti al DNA e da danno ossidativo, oltre alla frequenza di micronuclei nei linfociti periferici del sangue.
- Nella scelta e nell'uso di biomarcatori di esposizione occorre fare riferimento a quattro criteri generali:
 - possibilità di identificare gruppi più esposti (e/o che accumulano l'agente in questione o i suoi metaboliti) in misura maggiore del resto della popolazione;
 - potenzialità di definire una relazione tra concentrazione ambientale e esposizione individuale. Un decremento di concentrazione può non corrispondere ad un proporzionale declino di esposizione individuale. Questa, oltre che dalla entità delle emissioni e dalle proprietà intrinseche del contaminante (come la sua persistenza nell'ambiente) è anche condizionata da cambiamenti di comportamento e/o attitudine degli individui e della popolazione;
 - possibilità di quantificare la relazione tra esposizione e dose;

- possibilità di valutare la distribuzione spaziale dell'esposizione e quindi della popolazione da studiare. Occorre tuttavia considerare alcune criticità dell'uso di biomarcatori, in particolare la relazione tra l'agente che misura il biomarcatore e l'effetto sulla salute deve essere dimostrata e validata sul campo. In secondo luogo, la concentrazione di biomarcatori di esposizione (e la retrostante esposizione) è spesso fortemente condizionata da determinanti non sanitari di salute, quali le condizioni socio-economiche, etniche e altre esposizioni ambientali che debbono essere conosciute.
- Aspetti tecnico-logistici ed economici: per valutare questi aspetti è consigliabile condurre una indagine di mercato per valutare i costi di ogni marcatore utilizzabile ed i requisiti logistici (es. tempo di conservazione a temperatura ambientale, necessità di refrigerazione e tempi brevi, etc.). Deve inoltre essere verificata la componente logistica locale (es. distanza fra i siti ed i laboratori interessati, disponibilità di personale, compatibilità fra marcatori proposti e apparecchiature disponibili, etc.).
- Accettabilità da parte della popolazione (ricerca dei marcatori a minore invasività): l'uso di biomarcatori deve essere sempre valutato a valle di considerazioni di tipo etico. Vanno considerate le implicazioni etiche legate all'uso di marcatori che potrebbero aver una interpretazione in termini di rischio individuale. Va inoltre valutata la recettività in termini di percezione del rischio della popolazione definito e andrebbe definito un programma dettagliato di informazione delle popolazioni coinvolte.

A completamento dello studio di fattibilità è necessario definire parametri di base quali quelli statistici:

- Definizione della numerosità delle misure al fine di assicurare un'adeguata potenza allo studio

USO DEL BIOMONITORAGGIO AMBIENTALE NELLA VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE

Il monitoraggio ambientale attraverso l'utilizzo di bioindicatori è una prassi ormai consolidata per la sorveglianza della qualità degli ecosistemi naturali, a maggior ragione nelle aree in cui la pressione di input contaminanti, seppure ciascuno a norma di legge, è resa particolarmente complessa da una parte dalla pluralità delle fonti e dall'altra dalla pluralità degli usi che di questi ecosistemi fa la popolazione umana. La bioindicazione costituisce un metodo integrato di evidenziazione delle risposte locali alla contaminazione, che non necessita della conoscenza delle diverse vie e tipi di esposizione, quanto mai variabili soprattutto in ambiente terrestre dove condizioni climatiche, tipologia e quali-quantità delle fonti di emissioni, giocano un ruolo di primaria importanza nel determinare il livello puntuale di esposizione. Inoltre le recenti ricerche in tema di relazioni fra contaminazione ed effetti biologici a diverse scale di complessità dell'organismo (genetica, molecolare, tissutale, funzionale) o addirittura a livello di complessità ecologica superiore (popolazione, comunità, ecosistema), hanno evidenziato quanto gli eventuali rischi per l'esposizione umana possano essere individuati a livello precoce tramite lo studio di risposte biologiche su specie selvatiche direttamente in ambiente o in laboratorio, attraverso esperimenti di esposizione controllata di specie selvatiche allevate allo scopo. La valutazione del rischio di esposizione per la popolazione umana soggiacente agli output dei sistemi di incenerimento di rifiuti solidi urbani in esercizio sul territorio, risponde a un obiettivo, ormai ineludibile, di sorveglianza dell'effetto nel tempo di emissioni continuative in ambiente atmosferico, di sostanze che, a fronte di drastiche diminuzioni per alcune nell'ultimo decennio dovute all'impiego di nuove tecnologie, soffrono sempre di più, con il cambiamento dei consumi, dell'imprevedibilità legata alla natura in parte incognita dei rifiuti domestici e dello stato di strutturazione e gestione dei vari impianti. Infatti ancora oggi spesso possiamo solo ipotizzare in linea teorica l'eventuale emissione di diverse classi di molecole derivanti dalla combustione di nuovi materiali che vengono immessi sul mercato, ma mancano i dispositivi di rilevamento chimico adeguati al livello bassissimo in cui queste potrebbero essere eventualmente presenti nei comparti ambientali.

D'altro canto, poiché nelle aree urbane e periurbane sono normalmente presenti, oltre a quelli specifici legati al ciclo dei rifiuti, numerosi fattori di pressione ambientale e criticità per i diversi aspetti della vita della popolazione umana che comunque sono rappresentabili tutti, anche se in diversa misura, da processi di combustione, l'attribuzione di rischio di esposizione legato alla singola causa risulta di particolare difficoltà.

E' per questi motivi che la previsione di un approccio ecotossicologico tramite studio di bioindicatori, che rappresenta un link fra contaminazione e indicazioni di effetti a livello di comparto biologico, può costituire un punto di forza per attivare un sistema integrato di valutazione dell'esposizione. Il bioindicatore per un dato contesto ambientale viene scelto sulla base delle modalità di esposizione che dipendono dalle abitudini di vita e dalla sua fisiologia e possono essere dirette (p.es. per inalazione o contatto) o indirette (tramite l'assunzione di cibo/acqua contaminati). L'entità biologica scelta come bioindicatore (specie) risponde con variazioni biologiche a diverso livello di complessità distinguibili in risposte all'esposizione (biomarkers di esposizione, come il bioaccumulo di contaminanti persistenti come ad esempio i metalli pesanti) e risposte di effetto legate allo stress/danno risultante dall'esposizione stessa (biomarkers di effetto, come attivazione di proteine stress). Lo studio dei biomarkers può quindi costituire: a) una fonte di validazione per le misure ambientali già integrata con l'informazione relativa alla biodisponibilità, cioè alla frazione di contaminante che in quel contesto interagisce con l'entità biologica, b) una fonte di informazione sui meccanismi coinvolti e sui tempi della risposta, basilare per comprendere se la pressione dei contaminanti si presenta di tipo cronico o acuto e a quale ambito spaziale si riferisce; c) una fonte di interpretazione della capacità del comparto biologico naturale di convivere con l'impatto attraverso meccanismi di difesa e di adattamento, base sulla quale l'impatto stesso può essere classificato nell'ambito delle previsioni di rischio ecologico.

L'utilizzo di biomarcatori ambientali (in particolare biomarkers di esposizione) in un complesso sistema di sorveglianza, come quello predisposto da questo progetto, può fornire quindi un contributo

fondamentale al miglioramento della valutazione dell'esposizione: infatti permettono di definire l'effettivo ambito spaziale e temporale di esposizione e l'effettiva entità della sua pressione, (che sono dati dalla risultanza di esposizione, tempo e attitudini fisiologiche al mantenimento del benessere dell'organismo, in contesti di stress ambientale).

Allo stadio delle conoscenze attuali, in tema di impatti delle operazioni di incenerimento di rifiuti solidi sulla salute degli ecosistemi e in prospettiva della popolazione umana, e vista la grande complessità dei problemi legati al rilevamento e alla quantificazione di tali impatti e del costo in fitness del comparto biologico degli ecosistemi interessati, legati anche alle interazioni ambientali sul destino delle emissioni degli impianti di incenerimento, diventa estremamente indicato condurre uno studio di fattibilità per la costruzione di un modello di approccio integrato di monitoraggio che coniughi l'aspetto del rilevamento della contaminazione con quello del rilevamento dei suoi effetti biologici.

In questo modello, l'approccio ecotossicologico attuato tramite biomonitoraggio finalizzato (ecotossicologia è la disciplina che studia gli effetti di stressanti chimici, fisici e biologici sui complessi viventi non-umani), si pone perciò come il legante ideale fra la chimica ambientale e la previsione di rischio ecologico. Da questo poi, opportune riflessioni possono adire a speculazioni per la predizione di rischio per la salute umana.

Indicazioni per l'organizzazione di un progetto di biomonitoraggio ambientale nelle aree circostanti inceneritori

Analogamente al biomonitoraggio umano, la progettazione di un sistema di biomonitoraggio ambientale deve essere preceduta da uno studio di fattibilità. Un progetto di biomonitoraggio ambientale su basi ecotossicologiche, nell'ottica della sorveglianza e della valutazione di impatto di un impianto di incenerimento dei rifiuti solidi sul territorio, dovrà affrontare i seguenti aspetti generali:

- l'identificazione, basate sulle conoscenze personali e documentali, dei gruppi tassonomici e delle entità ecologiche a maggior rilevanza ambientale, nello specifico specie animali o comunità, da classificare e scegliere in base alla via di esposizione probabile alla contaminazione proveniente dall'inceneritore, in base alla complessità biologica che rappresentano e al fine di potere eventualmente comporre una batteria di bioindicatori a sensibilità differente;
- l'identificazione di classi di biomarkers che possano mettere in luce diversi aspetti della risposta all'esposizione alle diverse classi di contaminanti, quali potranno essere riconosciute sulla base della caratterizzazione delle emissioni e del loro destino ambientale;
- la scelta dei biomarkers pilota per ciascuna classe, che in sé racchiudano la maggiore capacità di rispondenza al livello e alla qualità della contaminazione, tenendo presente che l'identificazione di risposte a livello precoce è funzionale all'identificazione di segnali di variazione ambientale, mentre i segnali a livello ecologico più avanzato contengono informazioni a maggior livello predittivo di rischio;
- la scelta delle metodologie maggiormente affidabili e ripetibili, considerando anche le differenti complessità biologiche rappresentate dai diversi bioindicatori;
- la proposta modulare di test su popolazioni allevate in laboratorio in aggiunta o in alternativa all'approccio su entità biologiche prelevate direttamente in campo;
- il campo del disegno sperimentale che risponda alle esigenze dell'approccio di valutazione statistica dei dati;
- la valutazione in termini di aspetti tecnico-logistici ed eventualmente economici, della proposta più esaustiva di protocollo, per l'individuazione di eventuali steps di implementazioni a tempi differenziati;
- la proposta di punti chiave sperimentali per l'implementazione di un progetto-pilota di biomonitoraggio in un sito di riferimento che, applicando i protocolli individuati, arrivi a costituire un primo risultato sperimentale per la banca delle informazioni integrate ambiente-comparto biologico (mappe, correlazioni statistiche ecc.), utile per prendere decisioni informate in tema di autorizzazioni, sorveglianza, mitigazione degli impatti.