



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Analisi dei trend dei principali inquinanti atmosferici in Italia 2003-2012

RAPPORTI





ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Analisi dei trend dei principali inquinanti atmosferici in Italia 2003-2012

Informazioni legali

L'istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Rapporti 203/2014
ISBN 978-88-448-0666-8

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

ISPRA

Grafica di copertina: Franco Iozzoli

Foto di copertina: Paolo Orlandi

Coordinamento editoriale:

Daria Mazzella

ISPRA – Settore Editoria

Roma 4 luglio 2014

Autori

Giorgio Cattani (ISPRA)
Antonella Bernetti (ISPRA)
Anna Maria Caricchia (ISPRA)
Riccardo De Lauretis (ISPRA)
Serena De Marco (Stagista ISPRA)
Alessandro Di Menno di Bucchianico (ISPRA)
Alessandra Gaeta (ISPRA)
Giuseppe Gandolfo (ISPRA)
Ernesto Taurino (ISPRA)

INDICE

INTRODUZIONE	5
1. METODI	7
1.1 Il test di Kendall corretto per la stagionalità	7
1.2 Fonte dei dati e criteri di selezione delle serie storiche.....	10
2. RISULTATI E DISCUSSIONE	12
2.1 Materiale particolato.....	12
2.1.1 PM_{10} – Il quadro emissivo.....	12
2.1.2 PM_{10} – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria.....	13
2.1.3 $PM_{2,5}$ – Il quadro emissivo.....	17
2.1.4 $PM_{2,5}$ – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria.....	17
2.2 Ossidi di azoto.....	19
2.2.1 NO_x – Il quadro emissivo.....	19
2.2.2 NO_2 ed NO_x – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria.....	20
2.3 Monossido di carbonio.....	28
2.3.1 CO – Il quadro emissivo.....	28
2.3.2 CO – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria.....	28
2.4 Benzene.....	32
2.4.1 C_6H_6 – Il quadro emissivo.....	32
2.4.2 C_6H_6 – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria.....	32
2.5 Ozono.....	34
2.5.1 Il quadro emissivo dei precursori dell’ozono.....	34
2.5.2 O_3 – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria.....	35
3. CONCLUSIONI	38
BIBLIOGRAFIA	39
ALLEGATO A	41

INTRODUZIONE

L'inquinamento atmosferico determinato dalle attività antropiche è un fattore riconosciuto di rischio per la salute umana e per gli ecosistemi. Nei paesi occidentali la storia della lotta all'inquinamento atmosferico conta ormai oltre sessant'anni di studi e ricerche, finalizzati sia a comprendere i meccanismi degli effetti dannosi degli inquinanti inalati, sia ad individuare strategie e tecniche di mitigazione. L'aumento della consapevolezza circa i rischi sulla salute dell'esposizione ad inquinanti aerodispersi è stata accompagnata da un progressivo disaccoppiamento della crescita economica dall'inquinamento atmosferico [1].

Viceversa, negli ultimi vent'anni alcuni paesi dell'area asiatica e dell'est del mediterraneo, hanno registrato una rapida crescita economica che ha avuto un forte impatto sulla qualità dell'aria. Il monitoraggio ambientale mette in evidenza il fatto che il trasferimento delle "best available technologies" sviluppate dai paesi industrializzati per ridurre l'impatto delle attività umane non ha accompagnato adeguatamente tale crescita. Il risultato è che i livelli medi di esposizione di questi paesi sono rapidamente cresciuti, e sono oggi oltre tre volte superiori a quelli dei paesi europei ed americani cosiddetti ad "High Income".

Mentre nell'ultimo decennio in molti dei paesi "emergenti" la qualità dell'aria peggiora a causa dell'aumento delle emissioni, è possibile apprezzare una significativa riduzione delle emissioni dei principali inquinanti, negli Stati Uniti e in Europa.

In Italia ad esempio, le emissioni di biossido di zolfo (SO_2) e di benzene (C_6H_6) sono diminuite di circa il 90% nel periodo 1990 – 2012; quelle di monossido di carbonio (CO) del 70%. La riduzione degli ossidi di azoto (intesi come somma di monossido di azoto NO e di biossido di azoto NO_2) e quella dei composti organici volatili non metanici (COVNM) è stata superiore al 50%; quella del materiale particolato (PM_{10}) è superiore al 30% mentre quella dell'ammoniaca (NH_3) è meno rilevante e si attesta a circa il 14%. La riduzione delle emissioni si riflette in modo diretto sulle concentrazioni osservate in aria per gli inquinanti primari (quelli che sono emessi direttamente dalle sorgenti e persistono in tale forma in atmosfera, come SO_2 , CO, C_6H_6). Le osservazioni condotte in Europa negli ultimi dieci anni mostrano una costante e coerente diminuzione delle concentrazioni di SO_2 , CO, C_6H_6 , più marcata nei siti di misura collocati in prossimità delle principali arterie di traffico veicolare (siti di traffico urbano); i livelli di questi inquinanti sono ormai nella grande maggioranza dei casi ben al di sotto dei limiti vigenti in Europa.

Gli inquinanti in tutto o in parte di natura "secondaria", PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, NO_2 e ozono (O_3), per i quali sono rilevanti i processi di formazione che avvengono in atmosfera a partire da sostanze gassose dette "precursori" (NO, COVNM, NH_3 , SO_2) destano tuttora preoccupazione in relazione al fatto che sovente si registrano sul territorio nazionale livelli superiori ai valori limite di legge e alle linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità [2,3].

Con la Direttiva 1996/62/EC è iniziato in Europa un percorso comune nella complessa attività di valutazione e gestione della qualità dell'aria [4]. Attraverso l'emanazione di successive direttive, è stato definito il quadro degli adempimenti richiesti agli stati membri [5,6,7,8]. Attualmente in Italia è in vigore il D.Lgs. 155/2010 che recepisce in unico testo le direttive 2008/50/CE e 2004/107/CE [9,10]. Questo percorso ha determinato lo sviluppo di reti di monitoraggio sul territorio di ciascun stato membro dove sono monitorati con criteri e metodi condivisi i principali inquinanti aerodispersi, per i quali sono noti effetti negativi sulla salute umana a breve e lungo termine ed effetti negativi per gli ecosistemi. Sono stati fissati valori limite e obiettivi di riduzione e la previsione di piani di azione e di risanamento da attuare nelle zone dove tali limiti non sono rispettati.

La disponibilità d'informazioni sulla qualità dell'aria in Italia è andata aumentando nel tempo, tuttavia la risposta alla domanda: "la concentrazione degli inquinanti sta diminuendo?", se non è basata sull'analisi di serie storiche estese a un arco temporale sufficientemente lungo, su un set di punti di misura costante nel tempo, non può che essere di natura qualitativa [11].

Nel corso degli ultimi dieci anni sono stati raccolti attraverso il meccanismo dello scambio di informazioni basato sul protocollo europeo EoI (*Exchange of Information*) i dati provenienti dalle reti di monitoraggio [12,13]. Oggi sono dunque disponibili, almeno per una parte significativa della rete di monitoraggio nazionale, serie storiche di dati di sufficiente lunghezza per poter valutare gli andamenti nel tempo delle concentrazioni misurate, che riflettono sia la modalità con cui si è evoluta l'esposizione della popolazione, sia l'eventuale efficacia delle misure di riduzione attuate.

Le concentrazioni degli inquinanti atmosferici evolvono nel tempo seguendo dei profili tipici sia su base giornaliera che su base stagionale. Differenze sostanziali nei profili giornalieri sono evidenziabili in uno stesso luogo in funzione del periodo dell'anno. È evidente anche una marcata variabilità intra e inter giornaliera.

Un importante ruolo nei profili temporali degli inquinanti aerodispersi è determinato dai fattori che governano le proprietà dispersive dello strato limite planetario (*planetary boundary layer*, PBL) ovvero della parte di troposfera influenzata direttamente dalla presenza della superficie terrestre. A causa dell'apporto dell'energia solare si sviluppano forzanti radiative, e a causa dell'attrito tra aria e suolo si sviluppano forzanti meccaniche, che determinano lo sviluppo di moti turbolenti, dalla cui intensità e variabilità dipendono le proprietà dispersive del PBL, e le sue modificazioni su un tempo di scala orario o inferiore. La variabilità delle sorgenti emissive su scala intragiornaliera e intergiornaliera è assai più riproducibile della variabilità dei fattori che influenzano i moti turbolenti del PBL. In questo senso è possibile affermare che le concentrazioni al suolo evolvono con la variazione dei moti turbolenti che coinvolgono il PBL e dai quali dipendono le proprietà dispersive dello stesso. Le dinamiche alla base dell'intensità e della variabilità delle forzanti radiative e meccaniche sono profondamente diverse su base stagionale e in funzione della fascia climatica cui appartiene il punto di osservazione. Nell'analisi delle serie storiche è molto importante tener conto di questa dipendenza dei livelli osservati dalla variabilità delle proprietà dispersive del PBL. I fenomeni in gioco hanno una variabilità interannuale che può influenzare in modo significativo i parametri di sintesi delle variabili osservate (tipicamente medie annuali o medie stagionali) sebbene sia possibile individuare una componente ciclica tipica sia su base stagionale, sia relativa alla fascia climatica del luogo.

Una serie storica di concentrazioni di un inquinante aerodisperso può essere dunque immaginata come costituita da tre componenti: una tendenza di fondo o trend più o meno marcata non necessariamente statisticamente significativa né monotona, una componente stagionale, e una componente residuale o irregolare.

Per poter trarre conclusioni oggettive sullo stato della qualità dell'aria e sull'efficacia degli interventi intrapresi al fine di migliorarla, gli studi condotti negli ultimi anni si sono avvalsi dell'utilizzo di specifici metodi e strumenti, i quali considerano la notevole variabilità spaziale e temporale con cui si sviluppano i fenomeni di inquinamento atmosferico, e affrontano il problema della stima dei trend con un approccio di tipo statistico-probabilistico; tale tipo di approccio, offre il vantaggio non solo di descrivere, interpretare e prevedere il comportamento puntuale del fenomeno in relazione al suo evolvere nel tempo, ma permette anche di associare all'analisi effettuata il relativo margine di incertezza.

La necessità e la sfida è quella di superare un approccio di tipo qualitativo all'analisi dei trend, dal quale risulta impossibile interpretare in modo univoco e obiettivo le tendenze in atto.

L'obiettivo del lavoro è quello di verificare l'esistenza o meno di una tendenza, e la sua significatività statistica, all'aumento o alla diminuzione nel tempo delle concentrazioni di alcuni inquinanti aerodispersi desumibile dalle serie storiche di dati misurati presso le centraline di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico italiane.

1. METODI

Esistono differenti metodi per la stima e la ricerca dell'evoluzione di fondo o trend statistico di un qualsiasi parametro variabile nel tempo; negli ultimi 30 anni alcuni di questi sono stati applicati in casi in cui la variabile di interesse era una variabile ambientale. In particolare, nel caso in cui la variabile di interesse è la concentrazione di un inquinante aerodisperso, possiamo ricordare lo *Spearman partial rank correlation test* [14], il metodo del filtro di Kolmogorov-Zurbenko [15,16], i modelli di regressione lineare semplice, i modelli di regressione basati sui minimi quadrati generalizzati e quelli accoppiati a un modello autoregressivo a media mobile (ARMA), il test di Mann-Kendall, e il test di Kendall corretto per la stagionalità.

1.1 Il test di Kendall corretto per la stagionalità

Il test di Kendall corretto per la stagionalità è un test ad ipotesi statistiche di tipo non parametrico. La prima versione del test proposta da Mann nel 1945 [17] estendeva l'analisi della significatività del coefficiente di correlazione τ di Kendall [18] - test sviluppato per valutare l'associazione tra due variabili qualsiasi indipendentemente dalla distribuzione dei dati - al caso in cui una delle variabili fosse il tempo.

Il test ha come obiettivo la valutazione dell'esistenza di un trend ovvero di un andamento monotono crescente o decrescente dato un campione sufficientemente ampio di dati.

Le ipotesi su cui si basa il test sono le seguenti:

- ipotesi nulla H_0 ovvero ipotesi di assenza di trend;
- ipotesi alternativa H_1 ovvero ipotesi di esistenza di trend.

Trattandosi di un test non parametrico non viene fatta alcuna assunzione a priori sulle caratteristiche della popolazione e dunque non è richiesto che i dati sperimentali seguano una particolare distribuzione di probabilità come ad esempio quella normale (distribuzione frequentemente utilizzata nell'approssimazione delle distribuzioni empiriche).

La logica seguita dal test consiste nel calcolare le $\frac{n(n-1)}{2}$ differenze fra la media annuale dell' i -esimo anno successivo e la media annuale del j -esimo anno precedente in modo da associare a ciascuna di esse un segno più nel caso in cui si sia verificato, da un anno all'altro, un incremento delle concentrazioni, un segno meno in caso di decremento, uno zero in caso di stazionarietà o assenza di trend, come di seguito rappresentato:

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_i - x_j > 0 \\ 0 & \text{se } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{se } x_i - x_j < 0 \end{cases}$$

Calcolando il numero di differenze positive e quello delle differenze negative ottenuti dal confronto e determinando quale sia prevalente tra i due, si ricava il primo parametro statistico chiamato S (Kendall's S):

$$S = P - M$$

dove per P si intende il numero totale delle coppie associate ai segni positivi mentre per M il numero totale delle coppie associate ai segni negativi. Tale parametro dà una prima indicazione sull'esistenza di una possibile tendenza alla crescita o alla decrescita a seconda, rispettivamente, che il numero delle coppie con segno positivo sia maggiore di quello delle coppie con segno negativo o viceversa.

Allo stesso modo tanto più il parametro S si avvicina a zero tanto più dovrà essere accettata come vera l'ipotesi nulla H_0 di assenza di trend.

Dividendo il parametro S per il numero totale di tutti i possibili accoppiamenti eseguibili sugli n anni a disposizione, $\frac{n(n-1)}{2}$, si ottiene un secondo parametro statistico chiamato τ o coefficiente di correlazione di Kendall:

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2}$$

La formula con la quale è stato definito tale coefficiente evidenzia chiaramente il suo significato: una misura diretta di quanto il parametro S incida sul totale.

Da ciò si possono trarre le seguenti conclusioni: tanto più S si avvicinerà al numero totale dei casi possibili, tanto più τ si avvicinerà a +1 nel caso in cui prevalga un'accentuata tendenza all'aumento delle concentrazioni, o a -1 nel caso in cui prevalga un'altrettanto accentuata tendenza alla riduzione delle concentrazioni; i casi citati si verificheranno, inoltre, a seconda che il segno algebrico assunto da S risulti, rispettivamente, positivo o negativo.

Per tali ragioni, si può affermare che, quest'ultimo coefficiente costituisce un importante indicatore riguardo alla "forza" o "solidità" di un dato andamento monotono crescente o decrescente.

Se il campione di dati è sufficientemente elevato il parametro S viene trasformato nel parametro Z come descritto di seguito:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_s} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_s} & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

dove per $\sigma_s = \sqrt{(n/18)(n-1)(2n+5)}$ è indicata la varianza.

Noto il valore di Z , si potrà affermare la presenza di un trend statisticamente significativo se, fissato un livello di significatività α , risulti che $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ dove $Z_{1-\alpha/2}$ è un valore ottenuto mediante tabelle.

Se si verifica la condizione precedente si potrà affermare che il test è significativo ad α % ovvero che rifiutando l'ipotesi H_0 questa decisione può essere errata con probabilità pari ad α %; in caso contrario dovrà essere accettata per vera l'ipotesi nulla H_0 concludendo, quindi, di trovarsi nel caso di assenza di trend statisticamente significativo.

Questa versione originaria non contemplava l'esistenza di una variabilità di tipo periodico dei dati come accade ad esempio nel caso delle variabili meteorologiche e di quelle da esse dipendenti come le concentrazioni degli inquinanti aerodispersi. Il test di Mann-Kendall così descritto venne rielaborato da Hirsch et al. nel 1982 per tener conto degli effetti dovuti alla stagionalità; quest'ultimo test è, difatti, noto come *Seasonal Kendall Test* (SK) o test di Kendall corretto per la stagionalità [19].

La necessità di proporre una nuova versione del test nacque dall'idea che gli effetti dovuti alle diverse condizioni atmosferiche caratterizzanti ciascun mese o stagione in senso lato, se coinvolte nei calcoli, avrebbero potuto incidere in maniera non indifferente nella stima del trend; il limite, nel considerare un anno come unico intervallo temporale, consiste, infatti, nel non riuscire a cogliere gli eventuali singoli contributi sparsi fra i diversi mesi. Infittendo, invece, l'analisi a intervalli di tempo più ristretti come le stagioni o addirittura i mesi, e sommando, infine, i diversi contributi ottenuti, la stima finale del trend conterrà l'informazione aggiuntiva, nel caso di esistenza di trend, che questo è consistente in stagioni diverse ovvero che prevalgono nelle diverse stagioni situazioni di esistenza di trend statisticamente significativo omogenee nella stessa direzione crescente o decrescente.

La logica di base e i parametri statistici rimangono uguali nella loro definizione originaria; l'unica differenza consiste nella notevole mole di calcoli eseguiti prima di arrivare al risultato definitivo.

Scegliendo come intervallo di tempo il k -esimo mese il processo parte dal ricavare i singoli parametri statistici confrontando i dati relativi al mese di gennaio di tutti gli n anni a disposizione, per poi reiterare il procedimento al mese successivo fino ad arrivare all'ultimo mese e computare, infine, i dati ottenuti in un calcolo complessivo.

Di seguito vengono riportate le formule dei vari parametri statistici sulla base delle estensioni introdotte da quest'ultimo test.

Per il calcolo del parametro S si procede calcolando il parametro S_k relativo al k -esimo mese:

$$S_k = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sign}(x_{ik} - x_{jk})$$

Successivamente si ricava il parametro S totale facendo la somma dei singoli S_k :

$$S = \sum_{k=1}^p S_k$$

dove p è il numero totale di mesi.

Allo stesso modo si procede per il calcolo di Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_S} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_S} & \text{se } S < 0 \end{cases}$$

dove con σ_S è indicata la varianza totale calcolata a partire dalle k -esime varianze e dalla covarianza σ_{kh} :

$$\sigma_S = \sum_{k=1}^p \sigma_k + \sum_{\substack{kh \\ k \neq h}} \sigma_{kh}$$

$$\sigma_k = \sqrt{(n_k/18)(n_k-1)(2n_k+5) - \sum (t_k/18)(t_k-1)(2t_k+5)}$$

Il simbolo t_k sta ad indicare un eventuale vincolo presente all'interno del k -esimo periodo considerato. In questo test, in particolare, il calcolo del parametro Z , subentra, se eseguendo il prodotto fra il numero totale p di stagioni considerate e il numero totale n di anni a disposizione, si ottiene un valore maggiore di 25.

Ricavato Z la condizione di verifica del test rimane identica a quella descritta per il test di Mann-Kendall: $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$.

Al fine di stimare l'entità del trend Hirsch et al. hanno sviluppato un parametro noto come SK *slope estimator* che è un'estensione del *Sen estimator* sviluppato precedentemente [20,21]. Tale parametro può essere determinato calcolando:

$$m_{ijk} = (x_{ik} - x_{jk}) / (i - j)$$

per tutte le coppie di (x_{jk}, x_{ik})

Dove $k = 1, 2, 3, \dots, p$;

$1 \leq i < j \leq n_k$

Il parametro SK *slope estimator* è determinato calcolando la mediana dei valori m_{ijk} ottenuti, ed avrà lo stesso segno di S .

È stato dimostrato che tra i vari test parametrici e non parametrici disponibili per l'analisi dei trend il SK è tra quelli che ottiene le performance migliori, rispetto ad altri test, valutati utilizzando serie storiche fittizie.

Esso è in grado di predire l'esistenza di un trend statisticamente significativo mantenendo la percentuale di errore al di sotto del valore prefissato, e al contempo, di individuare deboli tendenze statisticamente significative laddove effettivamente presenti nella serie fittizia. Trattandosi di un test non parametrico, prescinde dall'ipotesi di normalità dei dati. A questo si aggiunge la robustezza del metodo nel caso di presenza di dati anomali (*outliers*) e di dati mancanti e la relativa semplicità di implementazione [22]. Inoltre individuare e rimuovere la componente stagionale (destagionalizzazione) può migliorare la stima delle tendenze di fondo, riducendo l'incertezza associata alla stima [23].

Il test SK è stato recentemente applicato nell'analisi dei trend delle concentrazioni di composti semi-volatili negli USA [24], del materiale particolato in quattro megalopoli indiane [25], di inquinanti primari e secondari in Finlandia in Olanda e in Europa [23,26,27]. In Italia è stato usato il SK in uno studio del trend di materiale particolato fine e ultrafine a Roma nel periodo 1999 – 2010 [28].

L'analisi dei trend non può in ogni caso prescindere dalla disponibilità di serie storiche sufficientemente lunghe in modo da limitare l'effetto di anni caratterizzati da condizioni meteorologiche atipiche che possono mascherare la tendenza di fondo.

È stato dimostrato che l'incertezza nella determinazione dell'esistenza di un trend statisticamente significativo in una serie di dati di qualità dell'aria aumenta esponenzialmente con il diminuire della lunghezza della serie. Per poter apprezzare tendenze di riduzione o aumento molto piccole (dell'ordine di $0,3 \mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$) è necessario disporre di serie di dati lunghe circa 15 anni. Con serie più brevi la tendenza diventa apprezzabile se risulta più significativa ($1 \mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$) ma la serie deve essere lunga almeno sette anni. La normalizzazione dei dati per gli effetti della meteorologia permette di ridurre l'incertezza associata alla stima e quindi di apprezzare l'esistenza di un trend dello stesso ordine di grandezza a partire da serie di dati relativamente meno estese (11 anni nel primo caso, 5 anni nel secondo) [26].

Nell'ambito di questo studio è stato usato il SK test.

Il test di Kendall corretto per la stagionalità consente di individuare l'esistenza di una tendenza di fondo e di esprimere in termini quantitativi tale tendenza e la sua significatività statistica. Il test restituisce una stima della riduzione/aumento della concentrazione su base annua cui è associata la relativa incertezza a un dato livello di confidenza ($p < 0,05$).

Tutte le elaborazioni sono state effettuate usando il software open-source R - package Openair [29,30].

1.2 Fonte dei dati e criteri di selezione delle serie storiche

Le serie storiche sulle quali valutare il trend sono state estratte dai dati di monitoraggio della qualità dell'aria che ISPRA raccoglie, a livello nazionale, nell'ambito dello scambio europeo di informazioni (Decisione 97/101/CE). In base a questo protocollo, il complesso delle informazioni raccolte dalle Regioni e Province autonome per il tramite dei gestori delle reti di monitoraggio, comprensivo non solo delle misurazioni effettuate ma anche dei metadati (informazioni su reti, stazioni e punti di campionamento), sono trasmesse all'ISPRA che le riorganizza e le elabora per mezzo di una banca dati chiamata BRACE (Banca dati Relazionale Atmosfera Clima Emissioni).

I dati contenuti in BRACE sono suddivisi in due gruppi:

- dati grezzi;
- dati aggregati.

Al primo gruppo appartengono i dati così come vengono inviati dai vari enti; al secondo i dati riorganizzati da ISPRA e utilizzati, sulla base di specifici criteri, per le successive elaborazioni.

È stato selezionato un set di stazioni di monitoraggio per le quali fossero disponibili i livelli giornalieri di materiale particolato (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$), e orari di biossido di azoto (NO_2) ossidi di azoto (NO_x) monossido di carbonio (CO) benzene (C_6H_6) e ozono (O_3), nel periodo dal 2003 al 2012. Sono state incluse le serie che rispettavano criteri minimi prefissati di copertura temporale (disponibilità per ogni anno, di almeno il 75% di dati validi).

Tenuto conto di questo è stato individuato per ciascun inquinante un set di stazioni caratterizzato da serie lunghe 10 anni (2003 – 2012), ad eccezione del $\text{PM}_{2,5}$ per il quale non sono disponibili informazioni di lungo periodo. È stato possibile analizzare i trend in sole 18 stazioni di monitoraggio e limitatamente al periodo 2007 - 2012.

L'applicazione del test di Kendall corretto per la stagionalità prevede che ciascun anno compreso nell'intervallo temporale da analizzare, sia suddiviso in sottoperiodi (stagioni). La massima suddivisione possibile prevede 12 sottoperiodi coincidenti con i singoli mesi dell'anno. Sono quindi state calcolate le medie mensili per i diversi inquinanti. Una media mensile è stata considerata valida per un periodo minimo di copertura del 50%.

L'analisi dei dati di ozono è stata condotta sulla base dei valori di un indicatore di esposizione (*Sum of Mean Over Zero, SOMOO*) con riferimento al periodo stagionale tipico dell'inquinante (aprile – settembre), considerato il più rilevante ai fini dell'esposizione della popolazione [31].

Il *SOMOO* è stato calcolato a partire dalle medie orarie delle concentrazioni di ozono misurate presso 46 postazioni fisse, caratterizzate per ciascun anno da una copertura temporale pari almeno al 75%.

Per calcolarlo occorre disporre per ciascun giorno delle medie mobili di otto ore. Queste si ottengono calcolando, per ciascuna ora del giorno, il valore della media relativa alle otto ore precedenti: ogni media su 8 ore così calcolata è riferita al giorno nel quale la stessa si conclude. Per ciascun giorno si seleziona, tra le 24 disponibili, la media su otto ore massima.

Quindi si calcola il *SOMOO* come sommatoria delle medie mobili massime, diviso il numero di giorni validi. In altre parole il *SOMOO* è la media delle medie mobili massime di otto ore delle concentrazioni di ozono.

$$SOMOO = \frac{\sum_i M_i}{N}$$

essendo M_i la media mobile su otto ore massima giornaliera:

$$M_i = \text{Max}(Me_i)$$

ed:

$$Me_i = \text{Media}(h, h-1, \dots, h-6, h-7)$$

con:

$$h = 0, 1, 2, 3, \dots, 23.$$

con N = numero di giorni per i quali è disponibile una media mobile massima di otto ore.

Per l'ozono sono state infine calcolate le medie mensili del *SOMOO*. I mesi considerati per questo inquinante sono, a differenza degli altri inquinanti, sei piuttosto che dodici nell'ottica di inquadrare eventuali tendenze nel periodo di massimo impatto che si verifica nei mesi che vanno da aprile a settembre, quando aumenta la frequenza e l'intensità dei fenomeni di smog fotochimico con elevate concentrazioni di ozono a livello del suolo.

2. RISULTATI E DISCUSSIONE

In questo capitolo vengono riportati e discussi i risultati dell'analisi dei trend delle concentrazioni di materiale particolato (PM₁₀ e PM_{2,5}), ossidi di azoto (NO₂ e NO_x), monossido di carbonio (CO), benzene (C₆H₆) e ozono (O₃). L'analisi per ciascun inquinante è basata su un set di stazioni di monitoraggio per le quali sono disponibili dati con continuità nel decennio 2003 – 2012, ad eccezione del PM_{2,5} per il quale non sono disponibili informazioni di lungo periodo, ed è stato possibile analizzare i trend in sole 18 stazioni di monitoraggio e limitatamente al periodo 2007 - 2012.

La numerosità del set di stazioni è diversa per ciascun inquinante e, pur permettendo valutazioni di carattere generale riferite al territorio nazionale, non permette di fare valutazioni per alcune zone del paese. In particolare, mancano del tutto informazioni sufficienti per l'analisi di lungo periodo in buona parte del sud.

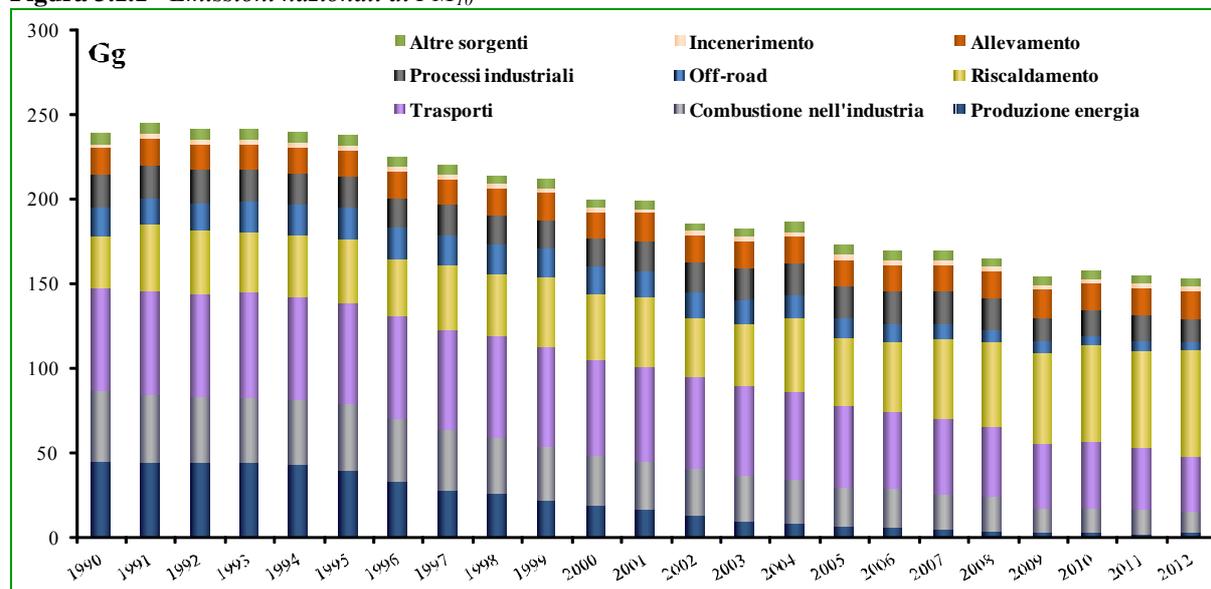
Ciascun paragrafo è arricchito con un quadro generale dell'andamento a livello nazionale delle emissioni di ciascun inquinante in atmosfera relativo alla serie storica dal 1990 al 2012. Nel caso dell'ozono è riportato l'andamento dei composti organici volatili non metanici, in quanto importanti precursori, insieme agli ossidi di azoto, descritti nel relativo paragrafo. I dati sono tratti dall'ultimo aggiornamento dell'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera [32,33], che rappresenta il riferimento fondamentale nell'ambito della Convenzione di Ginevra sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero (UNECE/CLRTAP), nell'ambito della Convenzione-quadro sui cambiamenti climatici (UNFCCC) e del Protocollo di Kyoto e nell'ambito delle Direttive europee sulla limitazione delle emissioni.

2.1 Materiale particolato

2.1.1. PM₁₀ – Il quadro emissivo

Le emissioni di PM₁₀ sono caratterizzate nel periodo 1990 – 2012 da un andamento decrescente, passando da 239 Gg a 153 Gg con un decremento del 36% (-16% dal 2003). La maggior parte delle emissioni è dovuta alla combustione non industriale (riscaldamento, 41% del totale nel 2012) ed ai trasporti su strada (17% nel 2012). Le altre sorgenti mobili, pesando per il 9% delle emissioni nazionali, mostrano una riduzione di circa il 58%. Importante sottolineare l'andamento crescente delle emissioni da riscaldamento per le quali si registra un incremento del 113% rispetto all'anno base. La riduzione più evidente (-94%) si riscontra nelle emissioni derivanti dalla combustione per la produzione di energia e nelle industrie di trasformazione, il cui contributo pari al 19% nel 1990 risulta inferiore al 2% nel 2012.

Figura 3.1.1 - Emissioni nazionali di PM₁₀



Le emissioni nazionali di PM₁₀ provenienti dal trasporto su strada diminuiscono del 53% dal 1990 al 2012 (-44% dal 2003); nel 2012 derivano per l'83% dai veicoli alimentati a gasolio e per il 15% dai veicoli a benzina, mostrando dal 1990 una diminuzione leggermente più marcata nell'ambito urbano. Il contributo delle automobili alimentate a gasolio si riduce del 51% (-24% dal 2003), le emissioni dei veicoli commerciali leggeri a gasolio sono diminuite del 45% dal 1990 e del 54% dal 2003, mentre le emissioni provenienti dai mezzi commerciali pesanti e dagli autobus diminuiscono del 63% dal 1990 e del 49% dal 2003.

All'abbattimento delle emissioni negli anni concorre l'adozione dei filtri anti particolato.

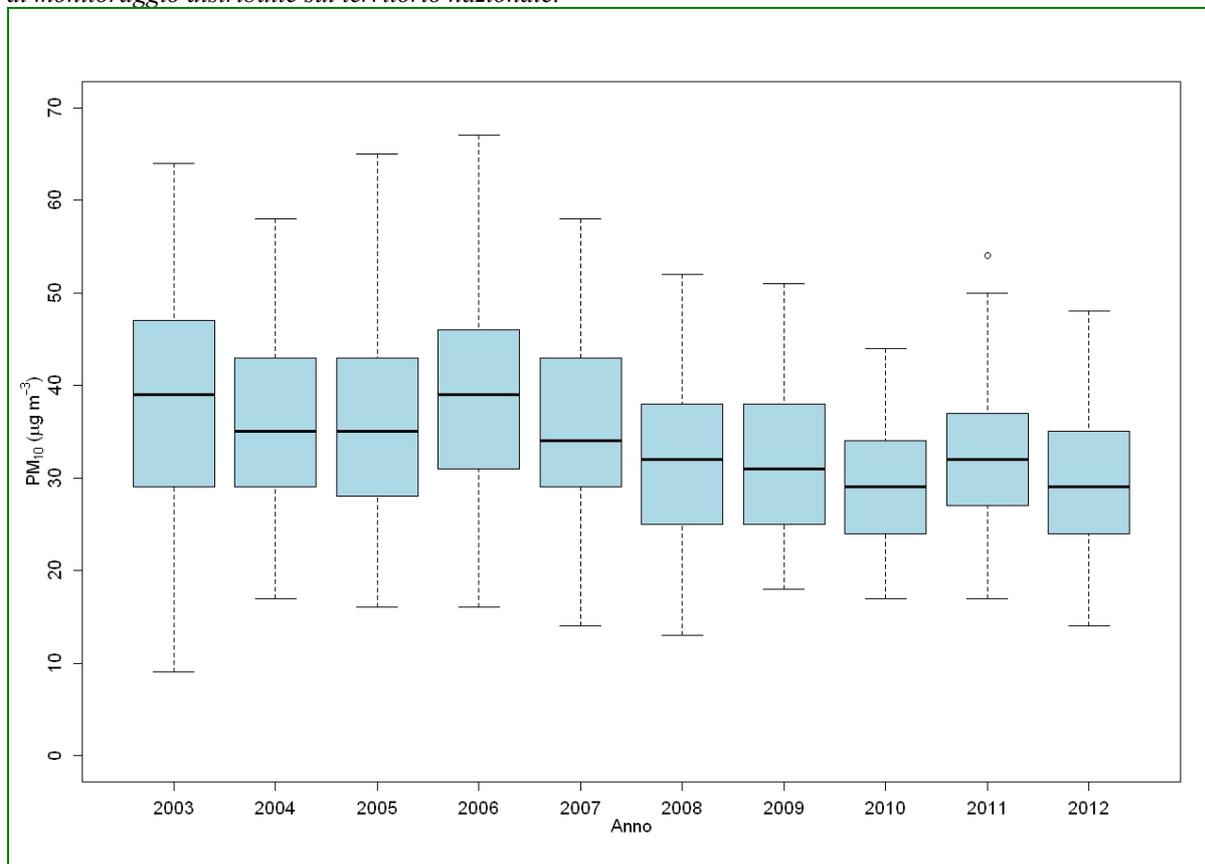
La frazione *exhaust* complessiva risulta pari al 66% del PM₁₀ totale ed evidenzia una decrescita pari a 63% dal 1990 e a 53% dal 2003; come riportato nell'EMEP/EEA *Emission Inventory Guidebook 2013* la speciazione in carbonio elementare ed organico distintamente per categoria veicolare che viene applicata risulta comunque affetta da elevata incertezza.

Nella determinazione della quota *not-exhaust*, focalizzata sul particolato primario, viene contemplata l'usura di pneumatici e freni [34].

2.1.2. PM₁₀ – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria

L'analisi è stata condotta su un campione di 57 stazioni di monitoraggio sul territorio nazionale, distribuite in 10 regioni. Il campione possiede una consistenza numerica sufficiente, ma le stazioni sono prevalentemente ubicate nelle regioni del nord, dove sono rappresentate le principali aree urbane; nel centro la disponibilità di dati è limitata alle città di Roma, Firenze, Pisa e Pescara, mentre al sud l'unica grande città rappresentata è Palermo, oltre ad alcune aree industriali del sud della Sardegna. Sono comunque rappresentate le principali aree climatiche del paese, su un periodo sufficientemente lungo da poter apprezzare eventuali tendenze di fondo di riduzione o aumento della concentrazione, con adeguata confidenza della stima.

Figura 2.1.2 - PM₁₀, 2003 – 2012. Media annua - Statistiche descrittive calcolate su una selezione di 57 stazioni di monitoraggio distribuite sul territorio nazionale.



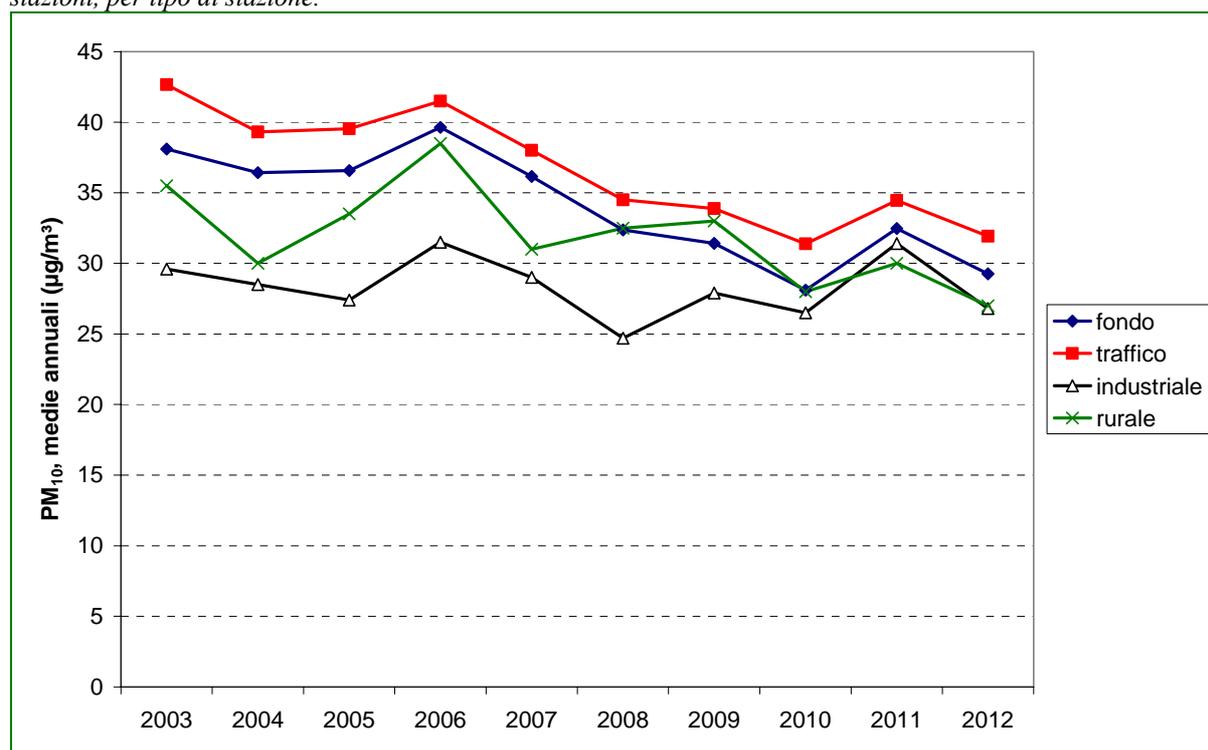
Nella figura 2.1.2 è riportata la distribuzione delle concentrazioni medie annuali determinate nel periodo studiato. Si può osservare qualitativamente la riduzione complessiva dei livelli medi annuali, e una tendenza alla riduzione della variabilità spaziale, che è indicata dalla distanza interquartile, e dalla distanza tra l'estremo superiore e inferiore della distribuzione che tendono a ridursi negli anni.

Le oscillazioni interannuali sono piuttosto ampie, come prevedibile a conferma del fatto che le valutazioni fatte confrontando anni adiacenti anziché analizzare serie storiche di lungo periodo, non consentono in alcun modo di apprezzare eventuali tendenze di fondo.

Proseguendo una valutazione preliminare di tipo qualitativo, è interessante osservare l'andamento generale, distinto per tipo di stazione (figura 2.1.3). In questo caso non sembrano emergere tendenze diverse per tipo di stazione, l'andamento generale delle stazioni di fondo urbano e suburbano segue in modo fedele il profilo dell'andamento delle stazioni di traffico urbano e suburbano. Sembra meno evidente la riduzione per le stazioni di tipo industriale, ma occorre considerare l'insufficiente numerosità del campione e la possibilità che rifletta una situazione particolare legata alle specifiche attività delle aree rappresentate (6 siti su 10 appartengono all'area del sud della Sardegna).

Da questa prima disamina appare evidente quanto l'approccio qualitativo sia poco indicativo delle tendenze in atto, pur permettendo di evidenziare macroscopicamente alcune tendenze generali. Queste osservazioni comunque rafforzano la necessità di eseguire con sistematicità un'analisi statistica dei trend, e l'opportunità di implementare un metodo di destagionalizzazione, per minimizzare l'effetto delle oscillazioni interannuali dovute alle differenze riscontrabili nei vari anni rispetto al ciclo stagionale medio.

Figura 2.1.3 - PM_{10} , 2003 – 2012. Andamento della media delle medie annuali calcolata su un campione di 57 stazioni, per tipo di stazione.



Legenda: fondo: stazioni di fondo urbano e suburbano (19 stazioni); traffico: stazioni di traffico urbano e suburbano (26); industriale: stazioni industriali urbane, suburbane o rurali (10); rurale: stazioni di fondo rurale (2)

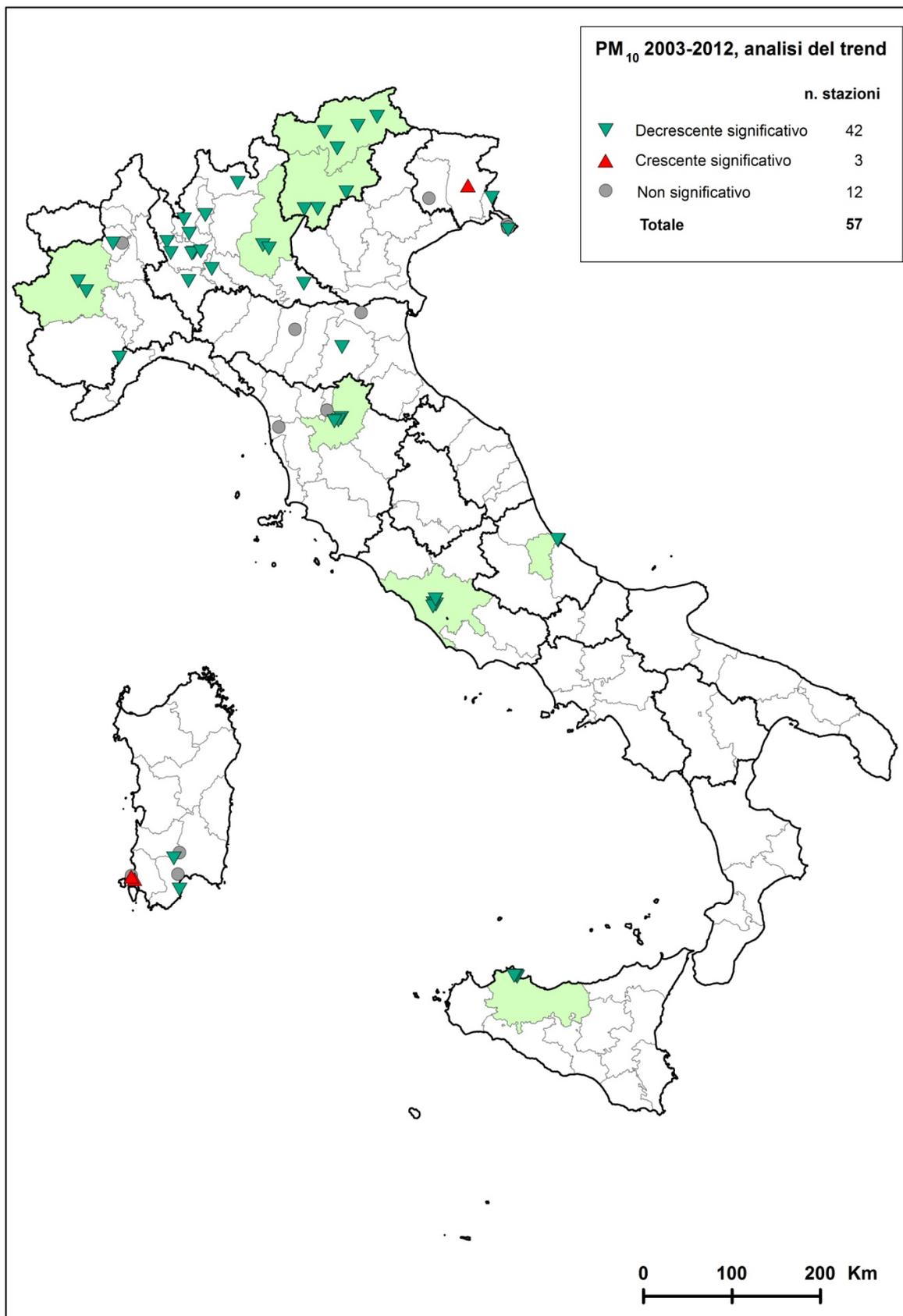
Nella tabella 2.1.1 sono riportati i risultati dell'analisi dei trend eseguita con il metodo di Mann-Kendall corretto per la stagionalità, descritto nella sezione metodi. È stato individuato un trend decrescente statisticamente significativo nel 73,7% dei casi (42 stazioni di monitoraggio su 57; variazione annuale media stimata: $-1,3 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$ [$-2,4 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1} \div -0,4 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$]). Un trend crescente statisticamente significativo è stato individuato nel 5,3% dei casi (3 stazioni di monitoraggio su 57; variazione annuale media stimata: $+0,5 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$ [$+0,3 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1} \div +0,9 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$]). Nel restante 21% dei casi (12 stazioni di monitoraggio su 57) non è stato possibile escludere l'ipotesi nulla (assenza di trend) per il dato livello di confidenza (95%).

Tabella 2.1.1 – PM_{10} . Sintesi dei risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Casi di trend statisticamente significativo ($p < 0,05$), variazione della concentrazione annua media stimata (Δ_v) e intervallo di confidenza della stima (riportato tra parentesi quadro accanto al valore stimato di Δ_v).

	Trend decrescente ($p < 0,05$)		Trend crescente ($p < 0,05$)		Trend non significativo ($p > 0,05$)
	n	Δ_v ($\mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n	Δ_v ($\mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n
2003 – 2012 (57 stazioni)	42	-1,3 [-2,4 ÷ -0,4]	3	0,5 [0,3 ÷ 0,9]	12

Nella figura 2.1.4 sono riportati su mappa i risultati dell'analisi dei trend per ciascuna stazione di monitoraggio considerata. È interessante analizzare i dati su ambiti territoriali ridotti laddove sono disponibili stazioni multiple (in questo caso è stata scelta l'area provinciale, per aumentare la probabilità di avere almeno due punti di misura, in un contesto sufficientemente omogeneo dal punto di vista delle sorgenti e delle condizioni climatiche): nella maggior parte dei casi le stazioni ubicate nel territorio di una stessa provincia mostrano un trend coerente tra loro (evidenziato nella mappa da un colore uniforme dell'area definita dal confine provinciale), supportando l'ipotesi che il trend non sia dovuto a situazioni locali, ma possa essere indicativo di una tendenza generale, nel territorio in esame: nelle provincie di Bolzano, Trento, Torino, Milano, Brescia, Firenze, Roma, Pescara, è stato evidenziato un trend decrescente statisticamente significativo. Risultati meno chiari (perché non estesi a tutte le stazioni) si registrano a Cagliari (2 stazioni con trend decrescente e due con trend non statisticamente significativo), Trieste (3 stazioni su 4 mostrano assenza di trend) e Carbonia-Iglesias. In quest'ultimo caso è notevole la presenza di trend crescente statisticamente significativo, associato a due stazioni di tipo industriale su tre.

Figura 2.1.4 - PM_{10} , 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Distribuzione sul territorio delle stazioni analizzate. Sono colorate le aree provinciali in cui il trend è coerente tra tutte le stazioni disponibili sul territorio, nel caso ce ne siano almeno due: verde chiaro in caso di trend decrescente; rosa in caso di trend crescente; grigio in caso di trend non significativo.

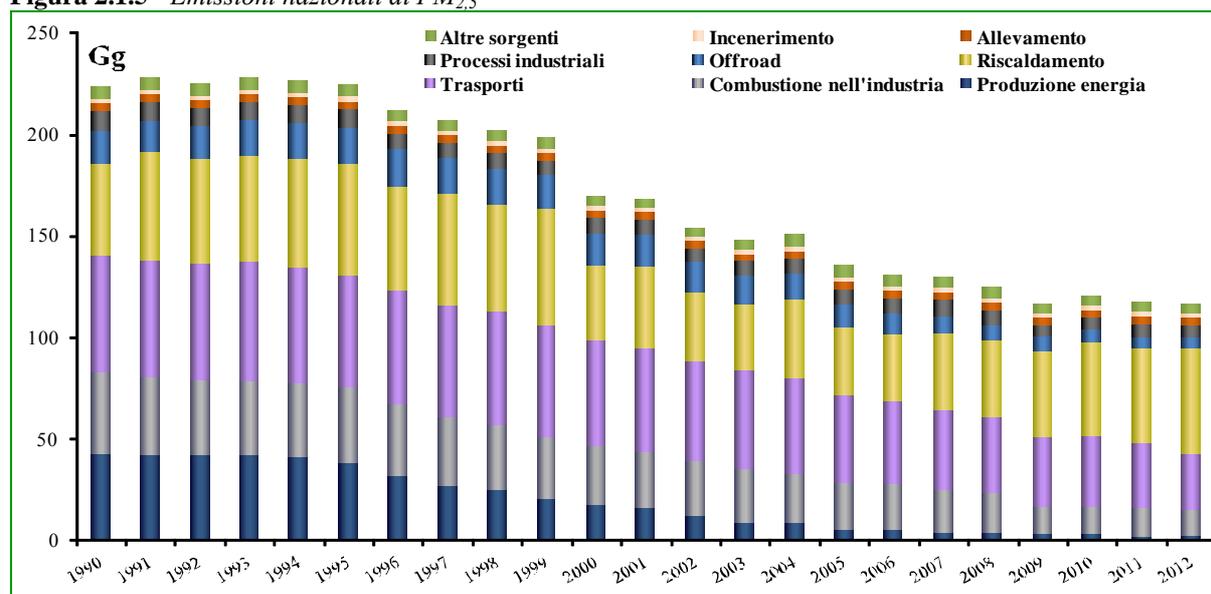


2.1.3. PM_{2,5} – Il quadro emissivo

Il trend delle emissioni di PM_{2,5} è decrescente dal 1990 al 2012 con una variazione da 206 Gg a 126 Gg pari a -39% (-16% dal 2003). Da segnalare che nell'ambito della revisione del "Multieffect protocol" della Convenzione UNECE/CLRTAP è stato assegnato un obiettivo di riduzione pari al 17% del valore del 2005 da raggiungere entro il 2020.

In particolare, le emissioni dai trasporti su strada, che sono pari al 17% del totale, decrescono del 57% mentre le emissioni dalle altre sorgenti mobili, pari al 10% del totale nel 2012, decrescono del 58%. Come nel caso del PM₁₀ il riscaldamento costituisce la maggiore fonte di emissione crescendo dal 1990 al 2012 del 122%.

Figura 2.1.5 - Emissioni nazionali di PM_{2,5}



Le emissioni nazionali di PM_{2,5} provenienti dal trasporto su strada diminuiscono del 47% rispetto al 2003. Le emissioni sono fondamentalmente legate ai veicoli diesel (86% del totale nel 2012), mentre ai veicoli a benzina spetta il 13% delle emissioni ed il rimanente 1% al resto dei veicoli diversamente alimentati. La riduzione delle emissioni rilevata è leggermente più marcata in ambito urbano, sia per i veicoli alimentati a gasolio che per i veicoli alimentati a benzina.

La frazione *exhaust* risulta essere pari a circa il 78% delle emissioni totali di PM_{2,5} ed evidenzia una decrescita negli anni comunque più marcata in ambito urbano.

Nella stima della frazione *not-exhaust*, focalizzata sul particolato primario, viene considerata l'usura di pneumatici e freni [34].

In conformità con quanto riportato nell'EMEP/EEA *Emission Inventory Guidebook* 2013, si assume trascurabile la quantità di materiale particolato di diametro > 2,5 µm emesso allo scarico, ossia si assume che la quota *exhaust* per PM_{2,5} e PM₁₀ sia la stessa. La speciazione del PM *exhaust* in carbonio elementare ed organico, applicata nel dettaglio delle diverse tecnologie veicolari, a causa della variabilità dei dati desunti dagli studi di riferimento e dell'incertezza intrinseca ai dati di misurazione, si ritiene comunque altamente incerta [34].

2.1.4. PM_{2,5} – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria

Non sono disponibili informazioni di lungo periodo per quanto riguarda il PM_{2,5}. La Direttiva 1999/30/CE e il decreto di recepimento Italiano [35], già prevedevano che sul territorio fossero implementate stazioni di monitoraggio in grado di determinare la concentrazione di massa del PM_{2,5}, al fine di estendere le conoscenze circa i livelli e l'esposizione umana a questa frazione del

particolato. Tuttavia solo negli ultimi anni è iniziato il monitoraggio in modo sistematico di questa frazione del particolato, secondo quanto previsto dal D.Lgs 155/2010.

È stato dunque possibile analizzare i trend in sole 18 stazioni di monitoraggio e limitatamente al periodo 2007 - 2012. Tale intervallo temporale di soli sei anni, è ai limiti dell'applicabilità del metodo, con riferimento all'incertezza della stima. Inoltre il numero limitato di siti disponibili non consente di fornire un'adeguata rappresentazione delle tendenze su base nazionale; la maggior parte delle stazioni di monitoraggio sono collocate nell'area urbana di alcune importanti città italiane: Torino, Aosta, Brescia, Bolzano, Prato, Livorno, Ancona e Roma.

Nella tabella 2.1.2 sono riportati i risultati dell'analisi dei trend eseguita con il metodo di Mann-Kendall corretto per la stagionalità, descritto nella sezione metodi. È stato individuato un trend decrescente statisticamente significativo in 10 casi su 18. Un trend crescente statisticamente significativo è stato individuato in 2 casi mentre in 6 casi non è stato possibile escludere l'ipotesi nulla (assenza di trend) per il dato livello di confidenza (95%).

Tabella 2.1.2 – $PM_{2,5}$. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Casi di trend statisticamente significativo ($p < 0,05$), variazione della concentrazione annua media stimata (Δ_y) e intervallo di confidenza della stima (riportato tra parentesi quadro accanto al valore stimato di Δ_y).

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione (% y^{-1})	Trend
Torino	Torino - Lingotto	FU	-1 [-1.8 ÷ -0.4]	-2.7 [-4.5 ÷ -1.2]	DECRESCENTE
Aosta	Aosta (Piazza Plouves)	FU	-0.8 [-1.2 ÷ -0.5]	-4.6 [-6.2 ÷ -2.9]	DECRESCENTE
Saronno	Saronno - Santuario	FU	-0.5 [-1.1 ÷ 0]	-1.6 [-3.3 ÷ 0.1]	STAZIONARIO
Calusco D'adda	Calusco	FS	-1.1 [-2 ÷ -0.4]	-3.6 [-5.8 ÷ -1.4]	DECRESCENTE
Casirate D'adda	Casirate D'adda	FR	1 [0.2 ÷ 1.7]	3.2 [0.5 ÷ 6]	CRESCENTE
Brescia	Brescia Villaggio Sereno	FU	-0.8 [-1.2 ÷ -0.4]	-2.4 [-3.4 ÷ -1.1]	DECRESCENTE
Ponti Sul Mincio	Ponti S/Mincio 2	IR	0.5 [-0.1 ÷ 1]	2.1 [-0.4 ÷ 4.5]	STAZIONARIO
Merate	Merate	TU	0.6 [0 ÷ 1.2]	2.2 [-0.2 ÷ 4.4]	STAZIONARIO
Lodi	Lodi	TU	-1.3 [-2.1 ÷ -0.6]	-4.1 [-6.4 ÷ -2.2]	DECRESCENTE
Bolzano	Bz4 Via C. Augusta	TU	-1 [-1.6 ÷ -0.4]	-5 [-7.8 ÷ -2.1]	DECRESCENTE
Bolzano	Bz5 Piazza Adriano	TU	-0.7 [-1.1 ÷ -0.3]	-3.8 [-5.8 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Merano	Me1 Merano	TU	-0.9 [-1.5 ÷ -0.5]	-4.7 [-6.5 ÷ -2.8]	DECRESCENTE
Velturmo	Ab1 Del Brennero A22	TS	-0.1 [-0.6 ÷ 0.3]	-0.9 [-3.3 ÷ 1.7]	STAZIONARIO
Livorno	Li-Carducci	TU	-0.2 [-0.6 ÷ 0.1]	-1.5 [-3.6 ÷ 1]	STAZIONARIO
Prato	Po-Roma	FU	0.6 [0.1 ÷ 1.1]	3.1 [0.5 ÷ 6.2]	CRESCENTE
Ancona	Ancona - Porto	IS	-2.4 [-2.9 ÷ -1.8]	-7.1 [-8.1 ÷ -5.8]	DECRESCENTE
Ancona	Ancona Cittadella	FU	-0.9 [-1.3 ÷ -0.5]	-3.9 [-5.7 ÷ -2.2]	DECRESCENTE
Roma	Villa Ada	FU	-0.2 [-0.6 ÷ 0.1]	-1.2 [-2.7 ÷ 0.3]	STAZIONARIO

2.2 Ossidi di azoto

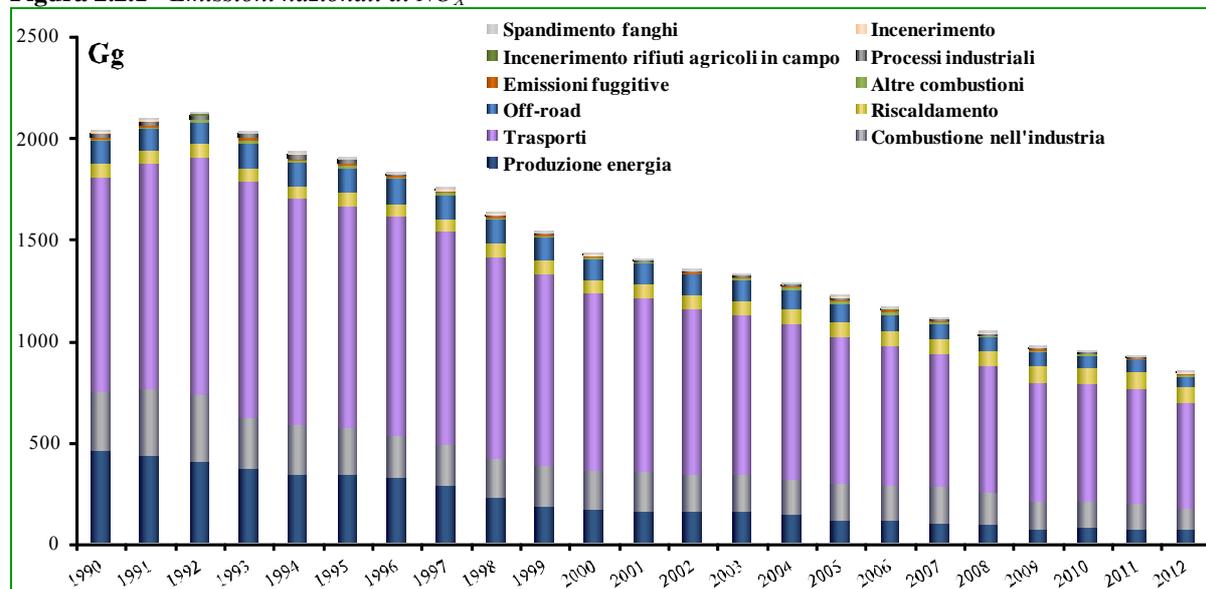
2.2.1. NO_x – Il quadro emissivo

Le emissioni di NO_x mostrano un trend decrescente nel periodo 1990 – 2012, da 2,025Gg a 844Gg con un decremento pari al 58% dal 1990 e al 36% rispetto al 2003. Le emissioni totali mostrano un marcato decremento tra il 1995 e il 2000, specialmente nei settori dei trasporti su strada e della combustione per la produzione di energia.

Dopo il raggiungimento del valore obiettivo fissato per il 2010 dalla direttiva NEC [36], nel 2013 nell'ambito della convenzione UNECE/CLRTAP, in particolare il "Multi-effects protocol" è stato stabilito un nuovo obiettivo pari al 60% delle emissioni del 2005 da raggiungersi per il 2020.

Le emissioni dovute al trasporto su strada (principale fonte di NO_x con una quota pari a circa il 50% del totale nel 2012) mostrano una riduzione del 56% tra il 1990 e il 2012 mentre le altre tipologie di trasporto, che nel 2012 contribuiscono per il 20%, sono diminuite del 36% rispetto al 1990. Altre riduzioni importanti derivano dalla combustione per la produzione di energia e nell'industria (circa 84% e 67% rispettivamente) avendo un peso sul totale di circa il 9% e il 10%. Al contrario, i settori del riscaldamento e della gestione dei rifiuti mostrano degli incrementi nelle emissioni di NO_x pari al 29% e al 17% rispetto all'anno base ma il primo pesa per il 10% del totale mentre il secondo conta solo per lo 0,5%. L'andamento generalmente decrescente è dovuto principalmente alla forte penetrazione del gas naturale sul territorio nazionale in sostituzione di combustibili come carbone e olio, all'introduzione dei catalizzatori nei veicoli, all'adozione di misure volte al miglioramento dei processi di combustione nella produzione energetica e di tecniche di abbattimento dei fumi.

Figura 2.2.1 - Emissioni nazionali di NO_x



Dall'analisi della serie storica delle emissioni nazionali di ossidi di azoto derivanti dal trasporto stradale emerge una significativa riduzione del contributo complessivo di questa fonte, pari al 56% dal 1990 al 2012 (più marcata in ambito urbano ed extraurbano che autostradale) e al 38% dal 2003 al 2012; le emissioni dai veicoli diesel, che danno nell'insieme il contributo maggiore al totale, 91% nel 2012, decrescono, dal 2003, del 20%, e ciò è il risultato di diversi fattori: a fronte di una diminuzione dal 2003 delle emissioni dovute ai veicoli commerciali leggeri (determinata essenzialmente dall'andamento in ambito urbano; le emissioni da veicoli commerciali leggeri tendono nel complesso, dal 1990, ad aumentare), ai veicoli commerciali pesanti e ai bus (marcata sia in ambito urbano che extraurbano ed autostradale), si osserva un aumento delle emissioni da automobili, marcato in tutti gli ambiti: urbano, extraurbano ed autostradale.

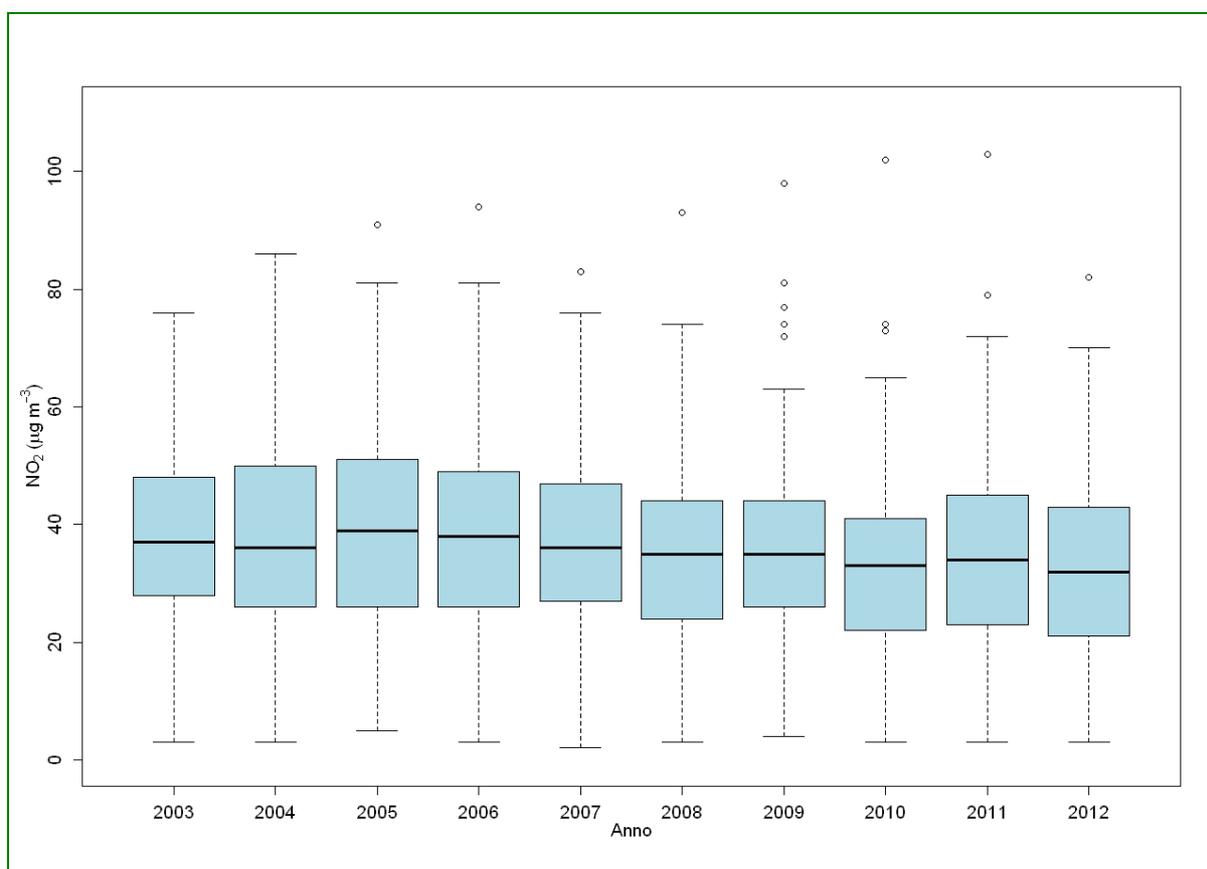
Le emissioni di NO₂ derivanti dal trasporto stradale aumentano dal 2003 del 37% (+41% dal 1990) essendo il risultato di opposte tendenze che caratterizzano i veicoli diesel (99% sul totale delle emissioni nel 2012): una forte crescita delle emissioni da automobili diesel (in tutti gli ambiti ma dal 2003 più marcata in ambito urbano) e veicoli commerciali leggeri diesel (più marcata in ambito extraurbano ed autostradale; le emissioni di NO₂ da automobili diesel e veicoli commerciali leggeri diesel rappresentano insieme il 76% del totale nel 2012) e una decrescita delle emissioni dai veicoli pesanti e bus diesel (marcata in tutti gli ambiti).

Le emissioni di NO originate dal trasporto su strada decrescono del 47% dal 2003 (-63% dal 1990); in questo caso le emissioni dai veicoli diesel (89% sul totale nel 2012) presentano dal 2003 una decrescita per tutte le categorie (le emissioni da automobili diesel, pur aumentando del 99% dal 1990 al 2012, dal 2003 presentano una leggera decrescita, pari al 2%, determinata dall'andamento in ambito extraurbano); la diminuzione complessiva è più marcata in ambito urbano ed extraurbano, rispetto all'autostradale.

2.2.2. NO₂ e NO_x – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria

Nella figura 2.2.2 è riportata la distribuzione delle concentrazioni medie annuali di NO₂ determinate dal 2003 al 2012 in 109 stazioni di monitoraggio sul territorio nazionale, distribuite in 13 regioni. Si può osservare, in modo analogo a quanto osservato per il PM₁₀, una modesta riduzione complessiva dei livelli medi annuali, appena apprezzabile dai valori della mediana e del 3° quartile della distribuzione.

Figura 2.2.2 – NO₂, 2003 – 2012. Media annua - Statistiche descrittive calcolate su una selezione di 109 stazioni di monitoraggio distribuite sul territorio nazionale.

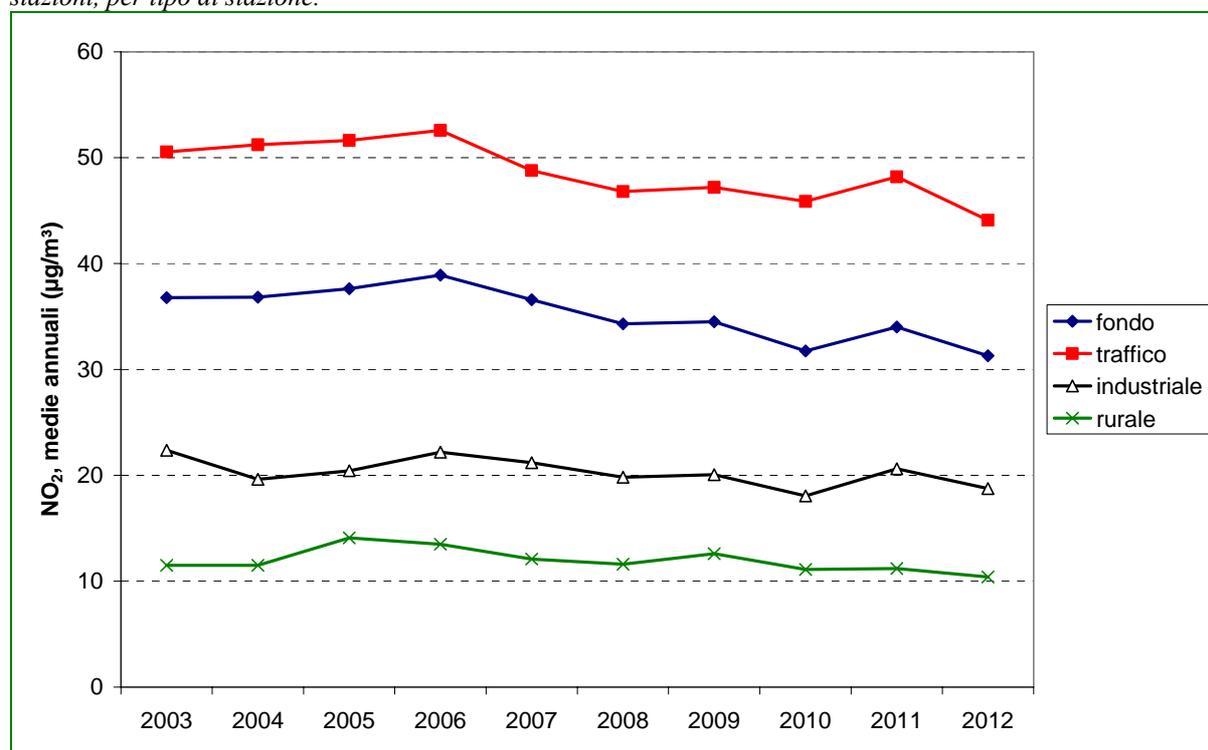


La figura 2.2.3 illustra l'andamento generale per tipo di stazione. La tendenza, espressa come media delle medie annuali del set di stazioni, suddivise per tipo, appare speculare e decrescente, per le

stazioni di traffico (urbano e suburbano) e per quelle di fondo urbano e suburbano. Non si evince dall'osservazione qualitativa una qualche tendenza per le stazioni di tipo industriale e di fondo rurale. L'analisi statistica i cui risultati sono riportati sinteticamente nella tabella 2.2.1 ha permesso di evidenziare un trend decrescente statisticamente significativo nel 66,1% dei casi (72 stazioni di monitoraggio su 109; variazione annuale media stimata: $-1,0 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$ [$-2,8 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1} \div -0,1 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$]). Un trend crescente statisticamente significativo è stato individuato nel 6,4% dei casi (7 stazioni di monitoraggio su 109; variazione annuale media stimata: $+0,9 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$ [$+0,1 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1} \div +3,1 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$]). Nel restante 27,5% dei casi (30 stazioni di monitoraggio su 109) non è stato possibile escludere l'ipotesi nulla (assenza di trend) per il dato livello di confidenza (95%).

I casi in cui i risultati sono completamente coerenti in una stessa area (identificati con l'area colorata entro i confini provinciali nella figura 2.2.4) sono limitati: Aosta, Torino, Biella, Verona, Venezia, Cremona, Lecco, Latina, ciascuna con almeno 2 stazioni di monitoraggio con tendenza decrescente.

Figura 2.2.3 – NO_2 , 2003 – 2012. Andamento della media delle medie annuali calcolata su un campione di 109 stazioni, per tipo di stazione.



Legenda: fondo: stazioni di fondo urbano e suburbano (41 stazioni); traffico: stazioni di traffico urbano e suburbano (41); industriale: stazioni industriali urbane, suburbane o rurali (17); rurale: stazioni di fondo rurale (10)

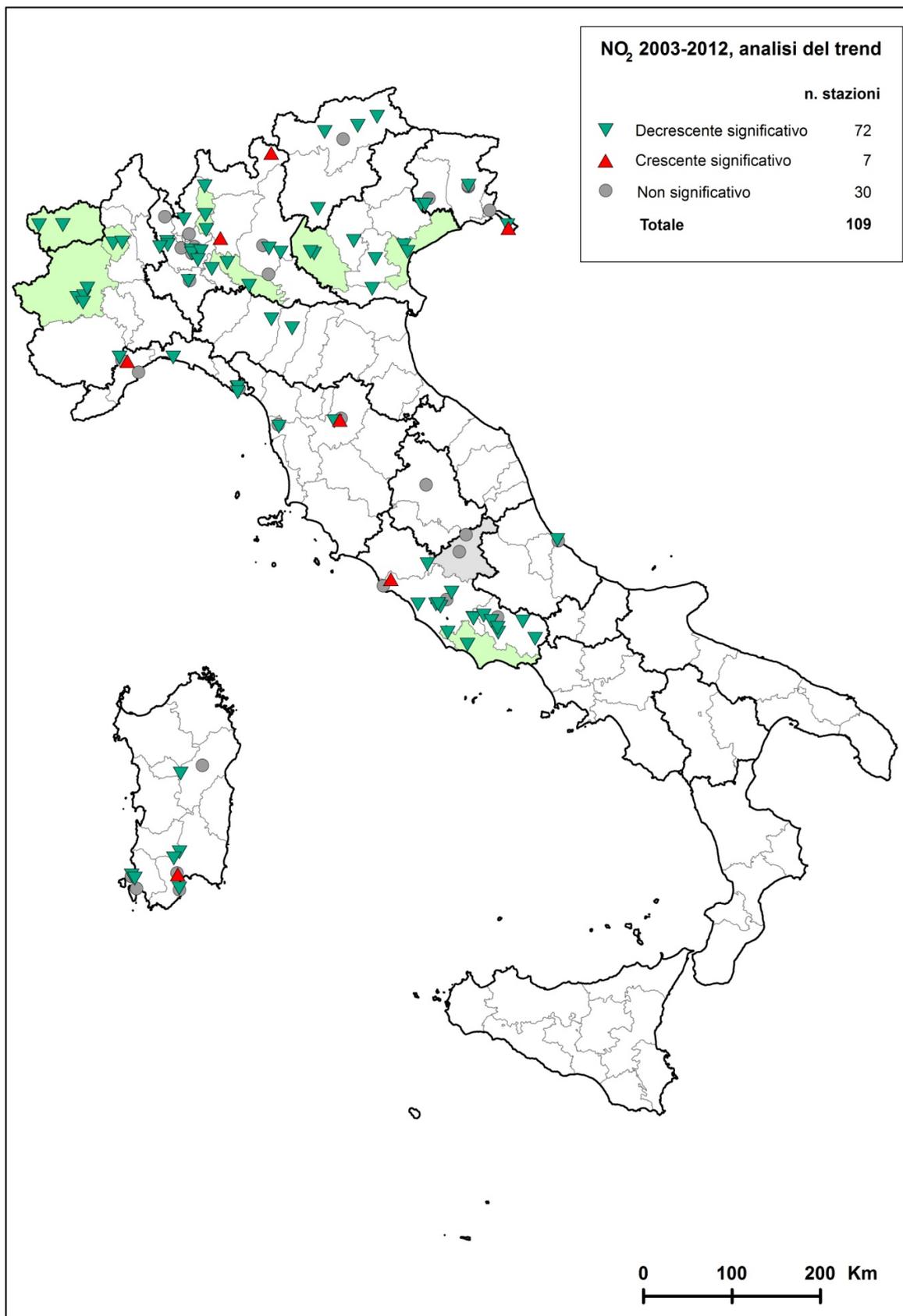
Tabella 2.2.1 – NO_2 . Sintesi dei risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Casi di trend statisticamente significativo ($p < 0,05$), variazione della concentrazione annua media stimata (Δ_y) e intervallo di confidenza della stima.

	Trend decrescente ($p < 0,05$)		Trend crescente ($p < 0,05$)		Trend non significativo ($p > 0,05$)
	n	Δ_y ($\mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n	Δ_y ($\mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n
2003 – 2012 (109 stazioni)	72	-1,0 [-2,8 ÷ -0,1]	7	0,9 [0,1 ÷ 3,1]	30

A Roma e Milano, per le quali sono disponibili molti siti di misura, pur prevalendo i casi di tendenza decrescente statisticamente significativa, si segnalano dei casi in cui tale tendenza non è evidenziabile, e in un caso a Roma, si registra una tendenza di segno opposto. In generale i casi di trend crescente non sono comunque concentrati in una zona specifica. È interessante osservare che dei sette casi, tre

sono stati rilevati in stazioni di fondo, 3 in stazioni di tipo industriale e solo uno in una stazione di traffico. La numerosità dei dati comunque non consente di estrapolare da queste osservazioni considerazioni di tipo generale.

Figura 2.2.4 – NO_2 , 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Distribuzione sul territorio delle stazioni analizzate. Sono colorate le aree provinciali in cui il trend è coerente tra tutte le stazioni disponibili sul territorio, nel caso ce ne siano almeno due: verde chiaro in caso di trend decrescente; rosa in caso di trend crescente; grigio in caso di trend non significativo.

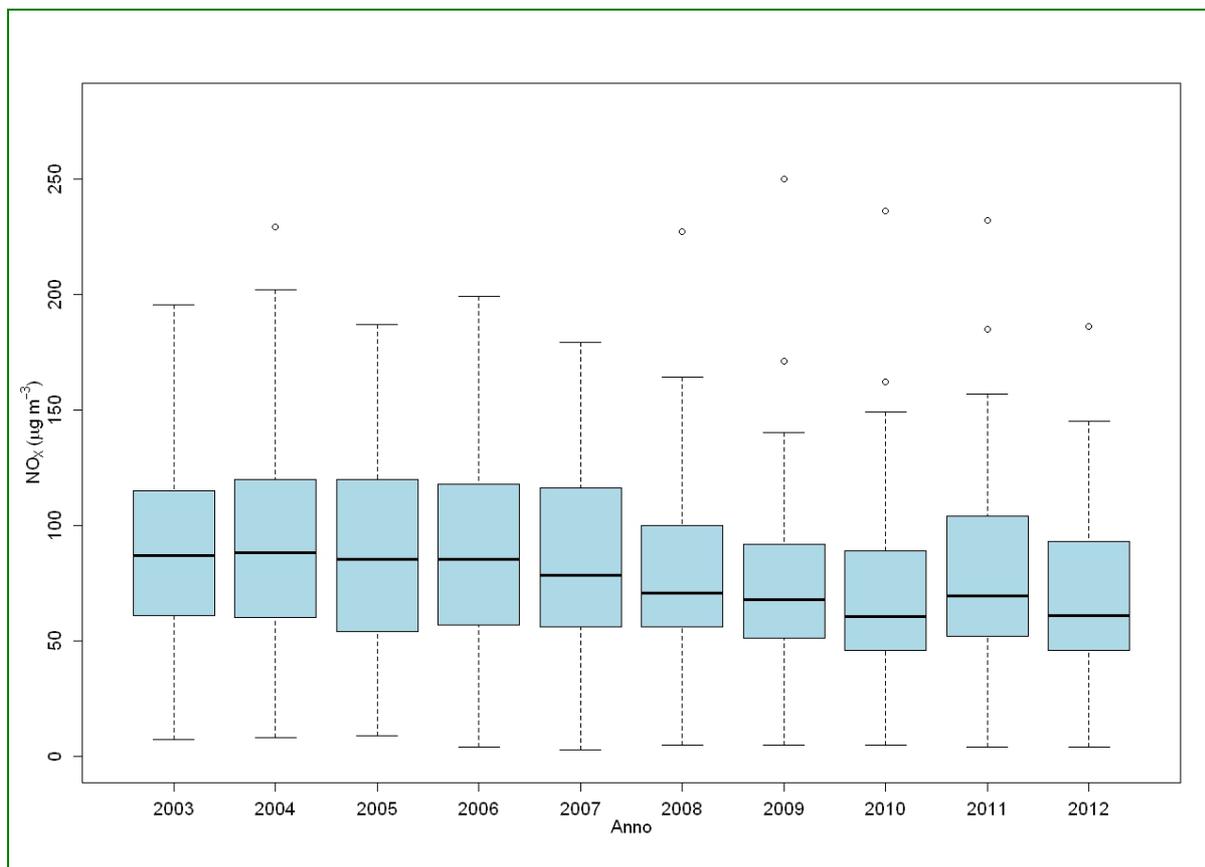


La determinazione della concentrazione degli ossidi di azoto (NO_x) intesa come somma dei due ossidi NO_2 e NO nelle stazioni di monitoraggio della rete nazionale è prevista dalla normativa nazionale ed europea per valutare i possibili effetti avversi per la vegetazione. Il monitoraggio degli NO_x dovrebbe accompagnare anche quello dell'ozono, essendo gli NO_x annoverati tra i precursori dell'ozono troposferico. È dunque importante valutare le tendenze delle concentrazioni degli ossidi di azoto.

Un altro aspetto che rende interessante la valutazione del trend delle concentrazioni di NO_x è rappresentata dalla verifica degli effetti complessivi dell'evoluzione del parco veicolare nelle aree urbane. Diversi studi nei primi anni del 2000 hanno evidenziato che la frazione di NO_2 primario emesso dai veicoli risulta più alta di quanto stimato precedentemente. Inoltre successivi studi convergono nell'osservare una tendenza all'aumento della frazione di NO_2 primario e la ragione di questo aumento viene attribuita alla progressiva tendenza alla riduzione del parco veicolare a benzina, a favore di veicoli alimentati a gasolio, tendenza peraltro confermata dall'analisi delle emissioni nazionali di ossidi di azoto derivanti dal trasporto stradale, riportata nel precedente paragrafo.

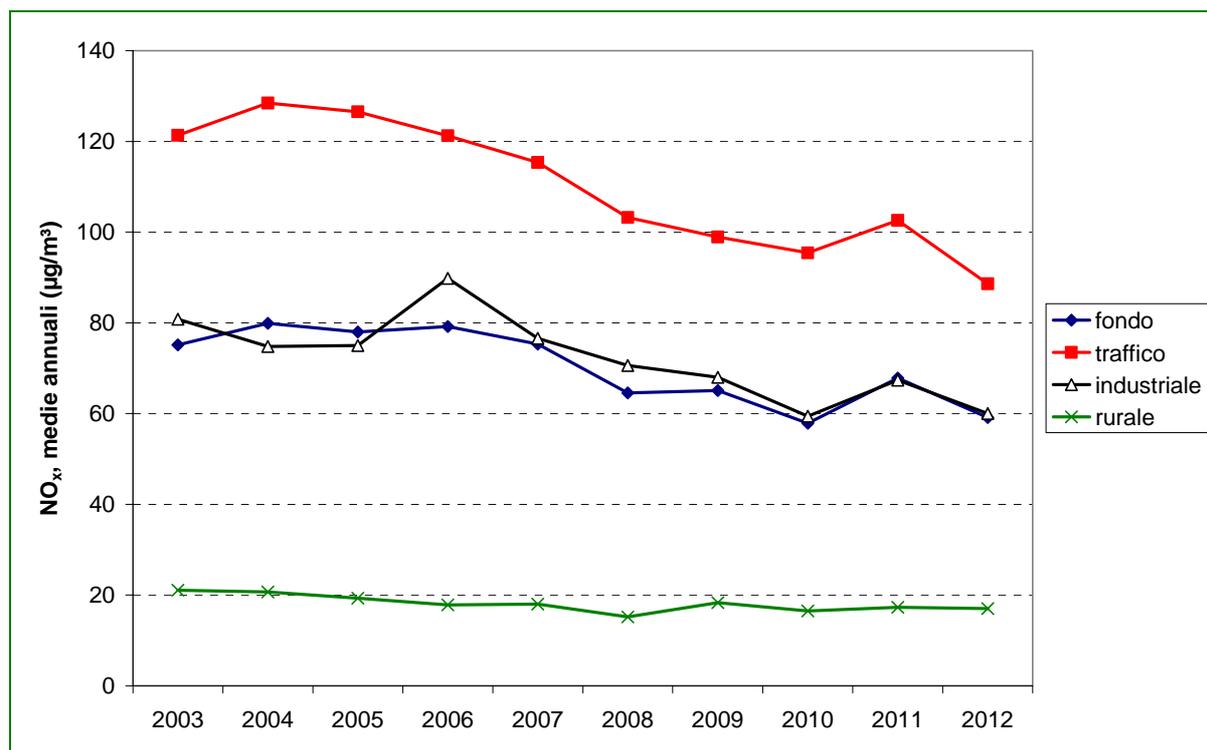
Nella figura 2.2.5 è riportata la distribuzione delle concentrazioni medie annuali di NO_x determinate dal 2003 al 2012 in 62 stazioni di monitoraggio sul territorio nazionale, distribuite in 8 regioni del centro nord. In questo caso si può apprezzare visivamente la tendenza alla riduzione complessiva delle concentrazioni di NO_x , apprezzabile dai valori della mediana e del 3° quartile della distribuzione.

Figura 2.2.5 – NO_x , 2003 – 2012. Media annua - Statistiche descrittive calcolate su una selezione di 62 stazioni di monitoraggio distribuite sul territorio nazionale.



La figura 2.2.6 illustra l'andamento generale per tipo di stazione. La tendenza alla riduzione, espressa come media delle medie annuali del set di stazioni, suddivise per tipo, appare chiaramente decrescente, sia per le stazioni di traffico (urbano e suburbano) che per quelle di fondo (urbano e suburbano). Dall'osservazione qualitativa emerge anche una tendenza alla riduzione dei livelli per le stazioni di tipo industriale. Meno chiaro è lo scenario relativo alle stazioni di fondo rurale.

Figura 2.2.6 – NO_x , 2003 – 2012. Andamento della media delle medie annuali calcolata su un campione di 62 stazioni, per tipo di stazione.



Legenda: fondo: stazioni di fondo urbano e suburbano (25); traffico: stazioni di traffico urbano e suburbano (26); industriale: stazioni industriali urbane, suburbane o rurali (5); rurale: stazioni di fondo rurale (6).

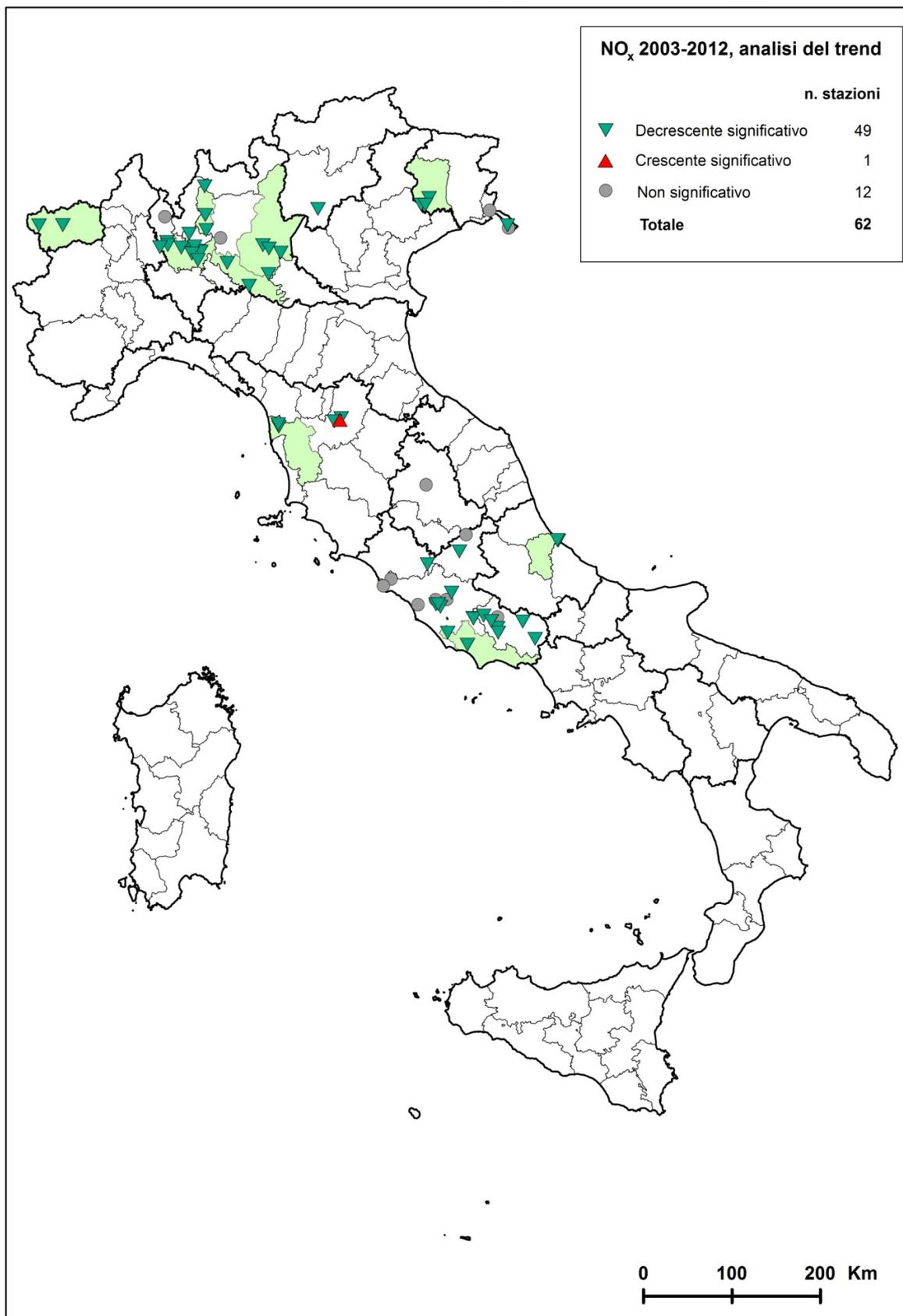
Nella tabella 2.2.2 sono riportati i risultati dell'analisi dei trend delle concentrazioni di NO_x rilevati nel periodo 2003 – 2012. È stato individuato un trend decrescente statisticamente significativo nel 74% dei casi (49 stazioni di monitoraggio su 62); la variazione annuale media stimata è stata pari a $-3,2 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$ [$-8,0 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1} \div -1,3 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$]. Un trend crescente statisticamente significativo è stato individuato in un solo caso a Firenze (variazione annuale media stimata: $+3,6 \mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$). Nel restante 16,1% dei casi (12 stazioni di monitoraggio su 62) non è stato possibile escludere l'ipotesi nulla (assenza di trend) per il dato livello di confidenza (95%).

Tabella 2.2.2 – NO_x . Sintesi dei risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Casi di trend statisticamente significativo ($p < 0,05$), variazione della concentrazione annua media stimata (Δ_y) e intervallo di confidenza della stima.

	Trend decrescente ($p < 0,05$)		Trend crescente ($p < 0,05$)		Trend non significativo ($p > 0,05$)
	n	Δ_y ($\mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n	Δ_y ($\mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n
2003 – 2012 (62 stazioni)	49	-3,2 [-8,0 ÷ -1,3]	1	3,6	12

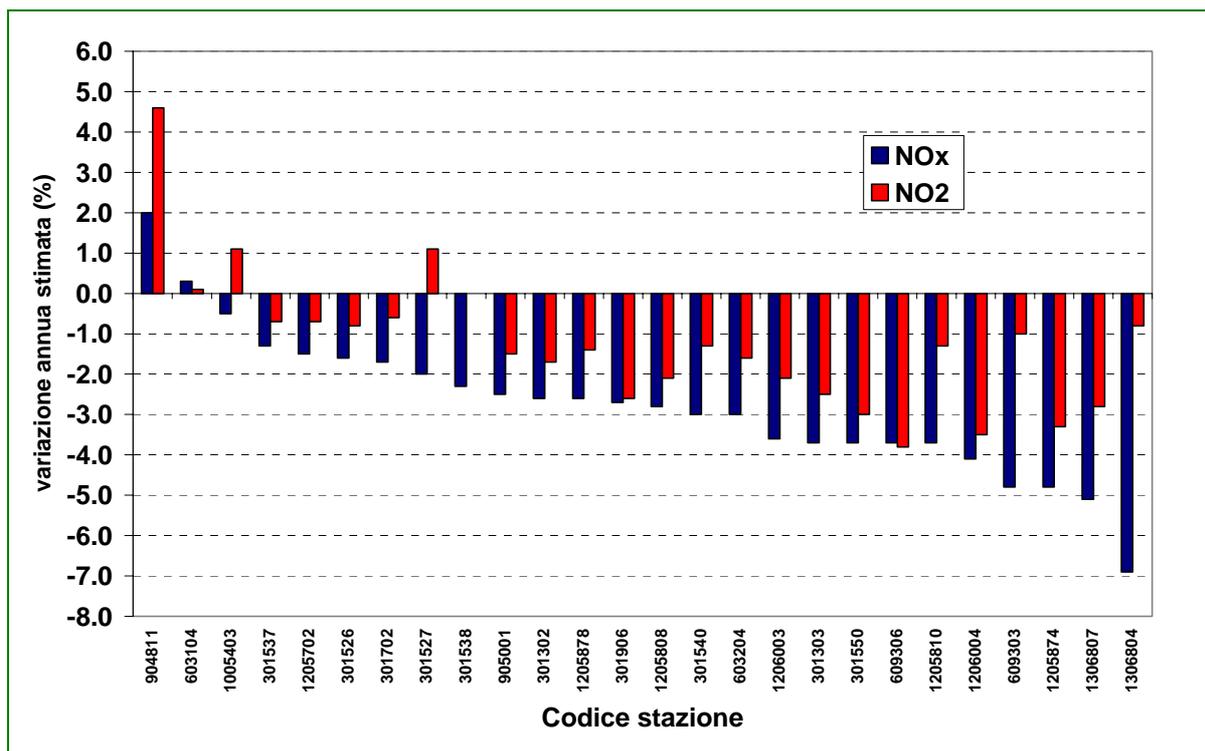
La quasi totalità (20 su 22) dei punti di misura lombardi presenta una tendenza di riduzione dei livelli di NO_x statisticamente significativa. Le province di Aosta, Lecco, Milano, Brescia, Cremona, Pordenone, Pisa, Latina e Pescara mostrano un trend coerente (decrescente) esteso a tutte le stazioni disponibili (figura 2.2.7).

Figura 2.2.7 – NO_x , 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Distribuzione sul territorio delle stazioni analizzate. Sono colorate le aree provinciali in cui il trend è coerente tra tutte le stazioni disponibili sul territorio, nel caso ce ne siano almeno due: verde chiaro in caso di trend decrescente; rosa in caso di trend crescente; grigio in caso di trend non significativo.



La figura 2.2.8 illustra il confronto tra le tendenze rilevate in 26 stazioni di traffico per le concentrazioni di NO₂ e NO_x. Si può osservare che la variazione percentuale annua media stimata è prevalentemente maggiore per gli NO_x rispetto all'NO₂. Abbiamo visto che le emissioni da trasporto stradale hanno avuto un andamento caratteristico legato all'evoluzione del parco veicolare: da una parte infatti diminuiscono complessivamente le emissioni di NO_x, dall'altra aumenta la quota di NO₂ primario emesso direttamente allo scarico, come risultato dell'aumento notevole del parco veicolare alimentato a gasolio.

Figura 2.2.8 – Confronto della variazione annua media stimata (in percentuale) nelle stazioni di traffico per NO₂ e NO_x. Sono riportati 26 casi disponibili.



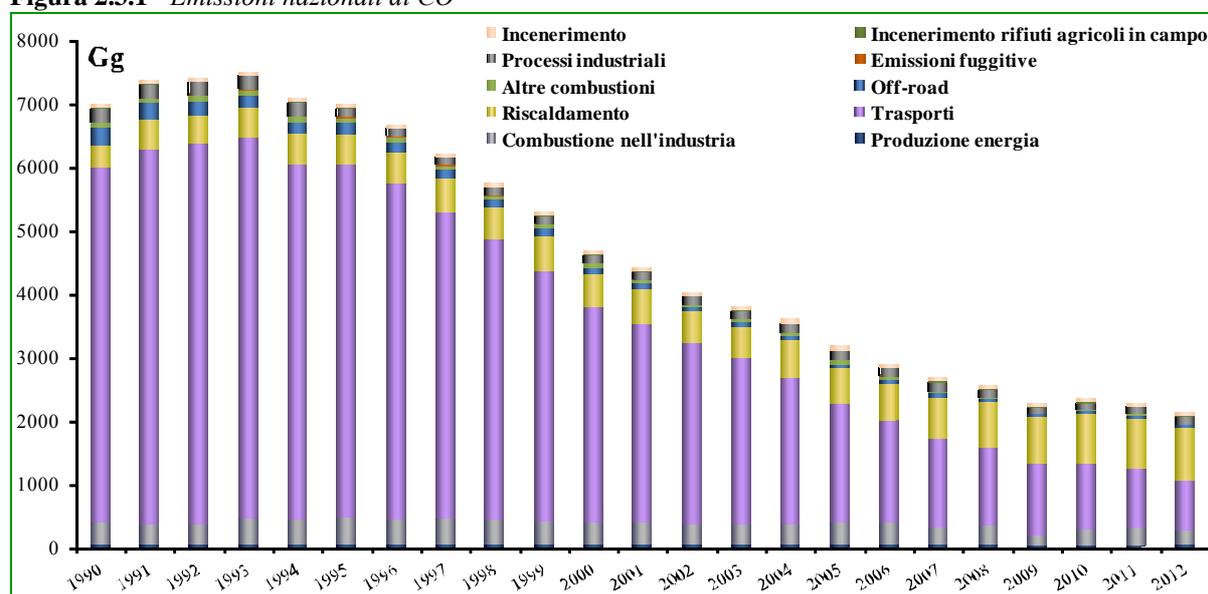
Codice Stazione	Nome stazione	Comune
904811	FI-GRAMSCI	Firenze
603104	MONFALCONE	Monfalcone (Gorizia)
1005403	P.S.GIOVANNI	Perugia
1205702	RIETI	Rieti
301537	MILANO - SENATO	Milano
301702	BRESCIA - BROLETTO	Brescia
301527	MEDA	Meda (Milano)
301906	CREMONA - P.ZZA CADORNA	Cremona
1205808	GUIDONIA	Guidonia Montecelio (Roma)
905001	PI-BORGHETTO	Pisa
301526	MILANO - V.LE MARCHE	Milano
1205878	CASSINO	Cassino (Frosinone)
301538	SESTO S.GIOVANNI	Sesto San Giovanni (Milano)
1206003	CECCANO	Ceccano (Frosinone)
301302	LECCO VIA AMENDOLA	Lecco
609306	PRATA DI PORDENONE	Prata Di Pordenone (Pordenone)
301540	MILANO - VERZIERE	Milano
603204	PIAZZA VICO	Trieste
1206004	FERENTINO	Ferentino (Frosinone)
1306804	PE - PIAZZA GRUE	Pescara
1205810	L.GO MAGNA GRECIA	Roma
301550	S. GIULIANO	San Giuliano Milanese (Milano)
609303	PORDENONE CENTRO	Pordenone
301303	MERATE	Merate (Lecco)
1205874	FROSINONE SCALO	Frosinone
1306807	PE - CORSO VIT. EMANUELE	Pescara

2.3 Monossido di Carbonio

2.3.1. CO – Il quadro emissivo

Le emissioni di CO a livello nazionale mostrano un trend decrescente nel periodo 1990 – 2012, da 6,970 Gg a 2,113 Gg (figura 2.3.1). La decrescita (-70% rispetto al 1990 e -44% rispetto al 2003) è dovuta principalmente al trend osservato per il settore dei trasporti (inclusendo trasporti su strada, ferroviari, marittimi e aerei) che mostra una riduzione di circa l'86% considerando che i trasporti su strada pesano nel 2012 per il 32% del totale mentre gli altri trasporti solo per l'8%. D'altra parte, le emissioni da riscaldamento, che rappresentano il 40% del totale, sono aumentate notevolmente (circa il 149% rispetto al 1990) a causa dell'aumento dell'uso della legna come combustibile. Anche i settori della gestione dei rifiuti e dell'agricoltura presentano dei trend crescenti ma contano solo per il 2% e l'1% del totale nazionale nel 2012.

Figura 2.3.1 - Emissioni nazionali di CO



Le emissioni nazionali di monossido di carbonio provenienti dal trasporto su strada diminuiscono dal 1990 al 2012 dell'87% (-72% dal 2003), in modo più marcato in ambito urbano ed extraurbano che autostradale. I veicoli alimentati a benzina forniscono il contributo maggiore al totale delle emissioni di monossido di carbonio derivante dal trasporto su strada, pari all'80%, mentre dai veicoli alimentati a gasolio, gpl e gas naturale originano rispettivamente il 14%, 5% ed 1% delle emissioni totali su strada. Tra i veicoli alimentati a benzina, le emissioni maggiori derivano dalle automobili (43% del totale su strada) e dai motocicli (26% del totale su strada), categorie fondamentali nella determinazione del trend generale.

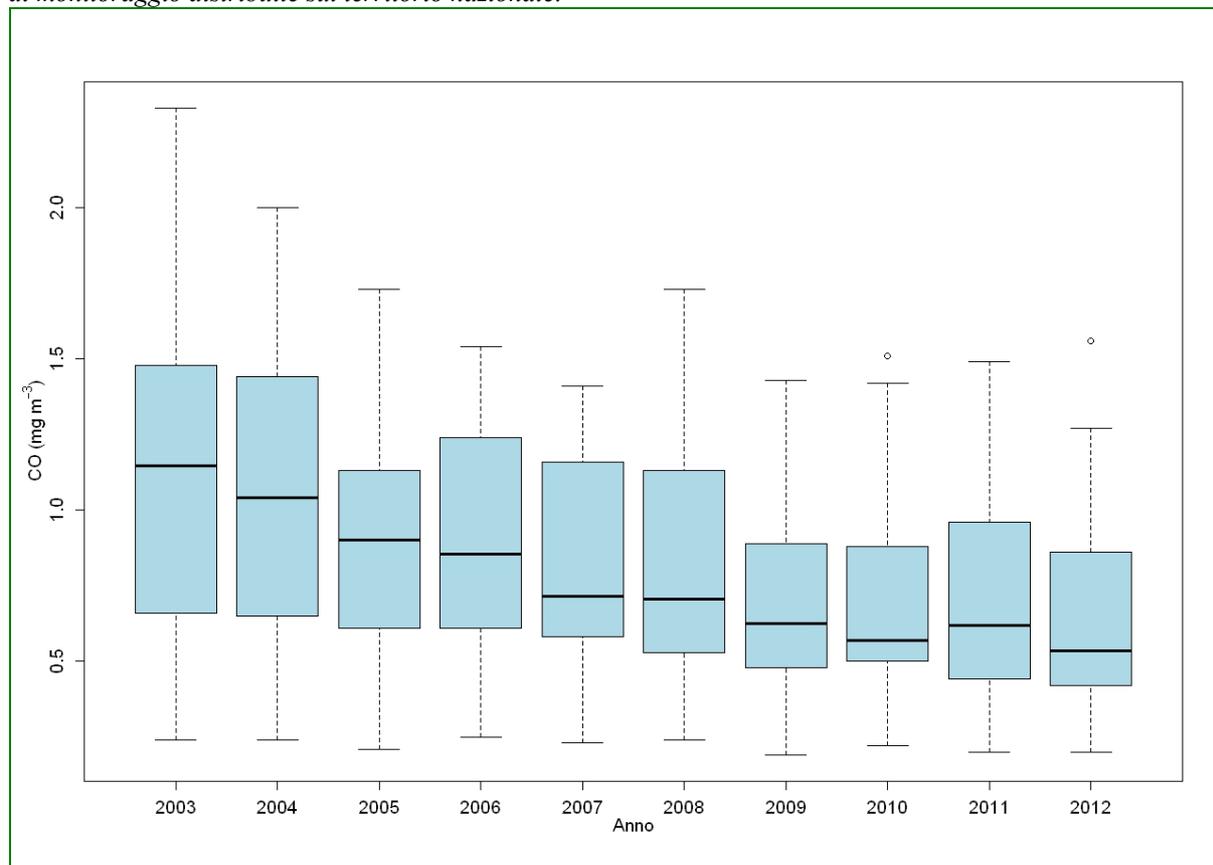
2.3.2. CO – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria

Nel 2012 tutte le zone in cui è suddiviso il territorio nazionale ai fini della valutazione e gestione della qualità dell'aria, eccetto una in Liguria, erano classificate al di sotto della soglia di valutazione inferiore (tale classificazione si basa sulle informazioni relative agli ultimi cinque anni). La normativa vigente consente in questo caso di effettuare la valutazione della qualità dell'aria con metodi alternativi alla misura in siti fissi (modelli, misure indicative e stime obiettive). Questo ha determinato una riduzione dei punti di misura sul territorio e di conseguenza le serie storiche disponibili sono relativamente poche. I livelli misurati negli ultimi anni sono spesso vicini al limite di rilevabilità, in particolare nei periodi in cui l'accumulo degli inquinanti è meno favorito. A livelli molto bassi di

concentrazione l'incertezza della misura aumenta e di conseguenza i risultati delle misure sono meno accurati. Questo rende più incerta l'analisi dei trend.

La figura 2.3.2 illustra l'andamento generale e la variabilità dei livelli medi annuali di CO. I dati sono relativi a un set di 42 stazioni di monitoraggio. L'andamento decrescente è molto chiaro e riflette la forte riduzione dei fattori di pressione, come illustrato nel paragrafo relativo al quadro emissivo. L'aumento delle emissioni da riscaldamento è stato ampiamente compensato, almeno fino al 2009, dalla riduzione delle emissioni da trasporto su strada. Peraltro tale aumento è strettamente legato al tipo di combustibile usato (i.e. legna). L'uso della legna come combustibile per il riscaldamento è fortemente variabile su scala spaziale ed eventuali effetti sulle concentrazioni sono possibili, ma possono essere apprezzabili con chiarezza solo localmente (mancando del tutto nella base dati a nostra disposizione serie storiche relative a siti di fondo rurale).

Figura 2.3.2 – CO, 2003 – 2012. Media annua - Statistiche descrittive calcolate su una selezione di 42 stazioni di monitoraggio distribuite sul territorio nazionale.



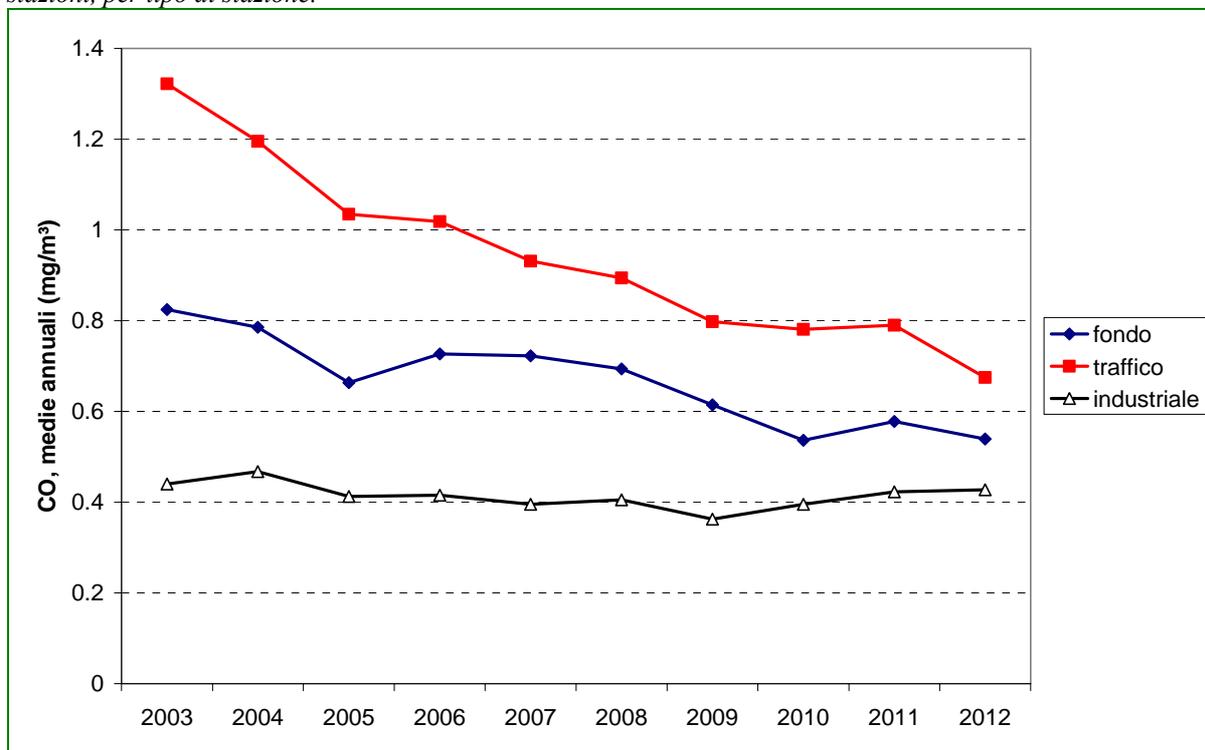
La figura 2.3.3 mostra la variazione interannuale della media delle medie annuali calcolata sullo stesso set di stazioni, raggruppate per tipo. Il campione è numericamente adeguato per le stazioni di traffico (29) e rappresentativo di alcune importanti aree urbane del nord e del centro-sud. Le stazioni di fondo urbano sono solo 9 e ancora meno quelle industriali (4).

Si può osservare confrontando gli andamenti delle serie di dati rilevati in stazioni di traffico urbano con quelle rilevate nelle stazioni di fondo della stessa area urbana, che le differenze assolute di concentrazione tendono a diminuire. Questo implica che, oltre a una riduzione dell'esposizione potenziale a questo inquinante della popolazione generale, si verifica nelle aree urbane una riduzione della variabilità spaziale, aspetto questo che può avere una rilevanza non trascurabile nella stima degli effetti a lungo termine sulla popolazione.

L'analisi statistica conferma queste osservazioni qualitative: in 35 casi su 42 osserviamo una tendenza di fondo statisticamente significativa (variazione annuale media stimata: $-0,06 \text{ mg m}^{-3} \text{ y}^{-1}$ [$-0,17 \text{ mg m}^{-3} \text{ y}^{-1} \div -0,01 \text{ mg m}^{-3} \text{ y}^{-1}$]). In nessun caso è stato evidenziato un trend crescente, mentre nei restanti 7 casi non è stato evidenziato un trend statisticamente significativo (tabella 2.3.1).

Come illustrato nella figura 2.3.4, quando sono presenti più stazioni di monitoraggio in una stessa area provinciale, i risultati sono convergenti.

Figura 2.3.3 – CO, 2003 – 2012. Andamento della media delle medie annuali calcolata su un campione di 42 stazioni, per tipo di stazione.

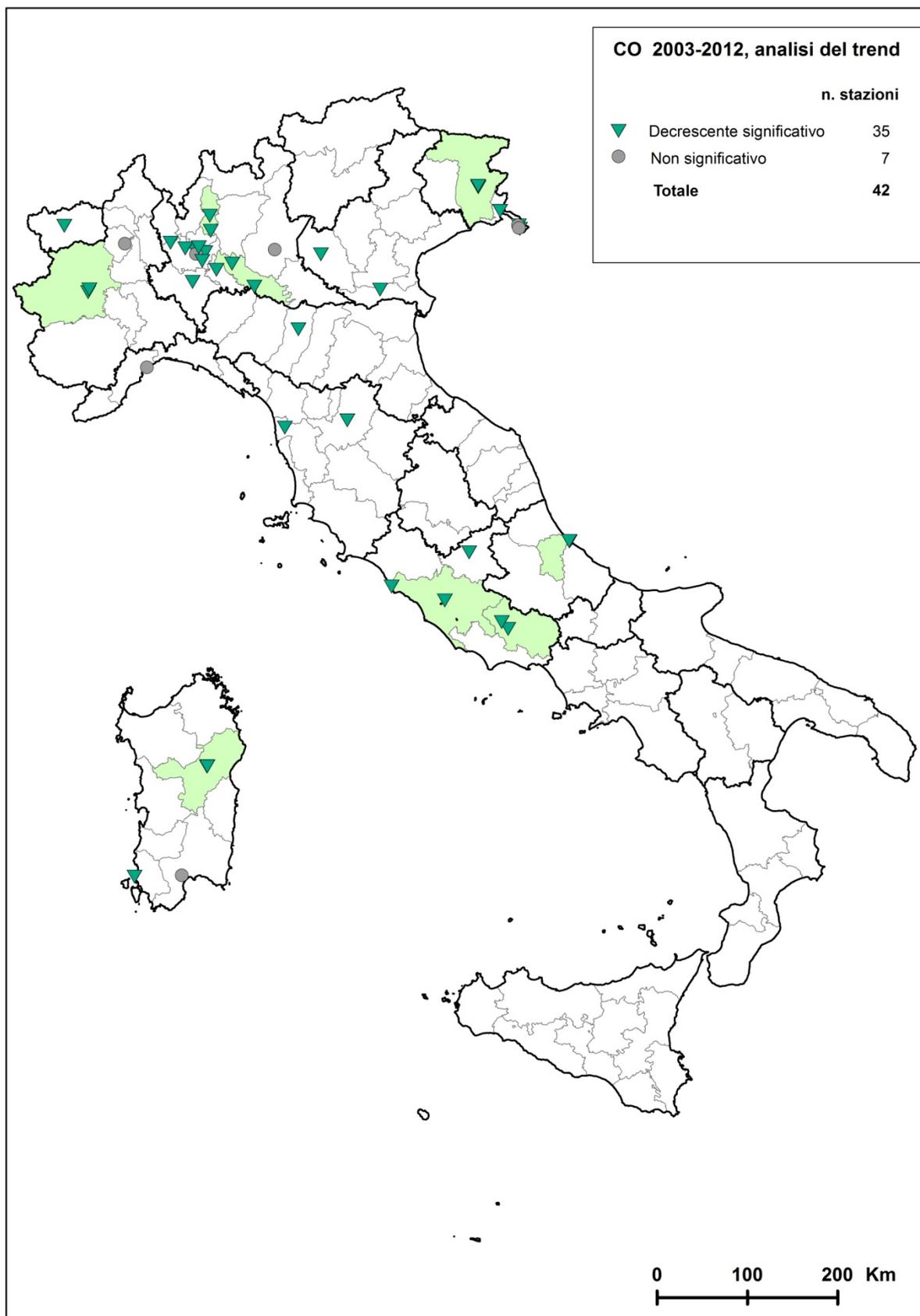


Legenda: fondo: stazioni di fondo urbano e suburbano (9); traffico: stazioni di traffico urbano e suburbano (29); industriale: stazioni industriali urbane, suburbane (4)

Tabella 2.3.1 – CO. Sintesi dei risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Casi di trend statisticamente significativo, variazione della concentrazione annua media stimata e intervallo di confidenza della stima.

	Trend decrescente ($p < 0,05$)		Trend crescente ($p < 0,05$)		Trend non significativo ($p > 0,05$)
	n	Δ_y ($\text{mg m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n	Δ_y ($\text{mg m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n
2003 – 2012 (42 stazioni)	35	-0.06 [-0,17 ÷ -0,01]	0	-	7

Figura 2.3.4 – CO, 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Distribuzione sul territorio delle stazioni analizzate. Sono colorate le aree provinciali in cui il trend è coerente tra tutte le stazioni disponibili sul territorio, nel caso ce ne siano almeno due: verde chiaro in caso di trend decrescente; rosa in caso di trend crescente; grigio in caso di trend non significativo.

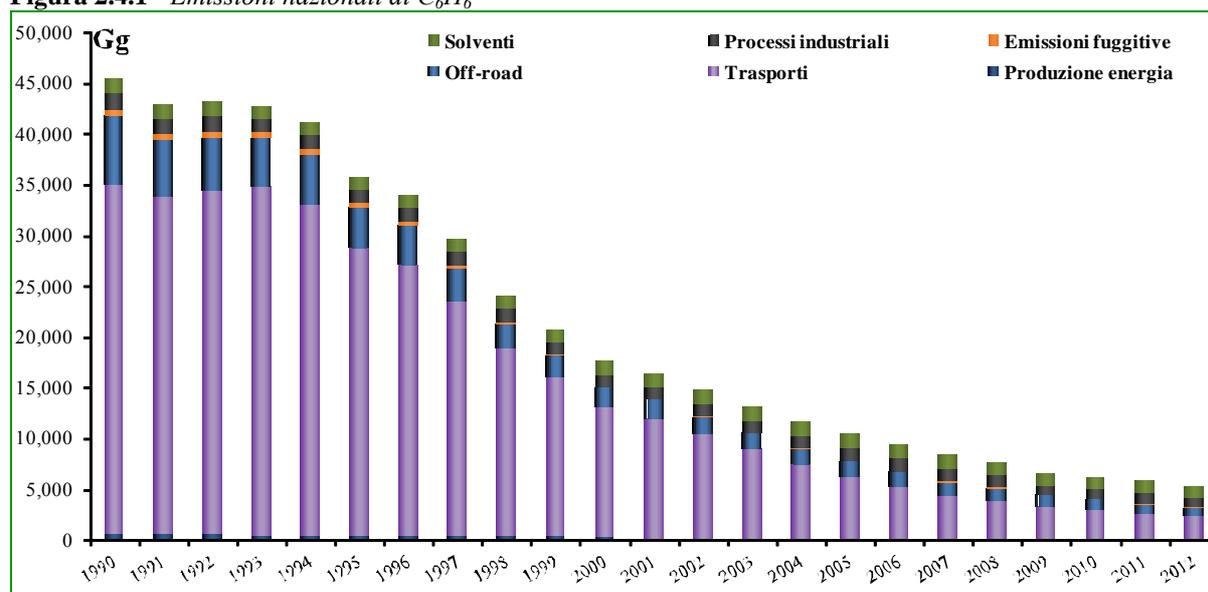


2.4. Benzene

2.4.1. C_6H_6 – Il quadro emissivo

Le emissioni nazionali totali di benzene presentano dal 1990 al 2012 una diminuzione pari all'89% (-60% dal 2003). Il settore che fornisce il maggiore contributo alle emissioni di questo inquinante è il trasporto stradale (settore dal quale deriva, nel 2012, il 45% delle emissioni totali nazionali), seguito dal settore dell'uso di solventi (21%), dai processi produttivi (18%) e dalle altre sorgenti mobili (15%).

Figura 2.4.1 - Emissioni nazionali di C_6H_6



L'analisi della serie storica delle emissioni nazionali di benzene derivanti dal trasporto stradale evidenzia una forte riduzione dal 1990 al 2012, pari al 93% (-73% dal 2003), principalmente imputabile ai veicoli a benzina, dai quali derivano prevalentemente le emissioni. Nel 2012 dalle automobili a benzina, dai ciclomotori e dai motocicli derivano rispettivamente il 50%, il 17% e il 15% delle emissioni totali su strada; le emissioni da queste categorie di veicoli diminuiscono rispetto al 1990 rispettivamente del 95% (-81% dal 2003) del 91% (-70% dal 2003) e del 61% (le emissioni dai motocicli, dal 2003, hanno un andamento abbastanza stabile, mostrando una variazione pari a +0.3%). Le emissioni evaporative, per le quali si osserva a partire dal 1990 una riduzione del 91% (-47% dal 2003), nel 2012 rappresentano il 9% del totale.

2.4.2. C_6H_6 – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria

La disponibilità di serie storiche di dati di benzene aventi i requisiti richiesti per l'analisi statistica dei trend è fortemente limitata. Nel periodo 2003 - 2012, sono disponibili solo 9 stazioni di monitoraggio con questi requisiti.

Una prima valutazione sommaria può essere fatta considerando che nel 2004 32 stazioni di monitoraggio su un campione di 78, non rispettavano il valore limite annuale di $5,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [37]. Nel 2012, partendo da un set di stazioni ben più ampio (158), si osserva un solo superamento [38].

È evidente che siamo di fronte a uno scenario di riduzione delle concentrazioni, trainato dalla diminuzione delle emissioni da trasporto stradale. Tuttavia tale andamento, data la carenza di serie storiche, non può essere valutato quantitativamente per il periodo in studio, se non con riferimento a casi specifici, illustrati singolarmente in tabella 2.4.1.

L'analisi statistica mostra un trend decrescente in 6 casi su 9, con un caso di trend crescente, in una stazione industriale della provincia di Cagliari.

Tabella 2.4.1 – C_6H_6 . Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Sono riportati in grassetto i casi statisticamente significativi ($p < 0,05$); in rosso i casi di trend crescente, e in nero i casi di trend decrescente. Nei restanti casi il trend non risulta statisticamente significativo.

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione (% y^{-1})	Trend
Aosta	Aosta (Piazza Plouves)	FU	-0.3 [-0.37 ÷ -0.22]	-10.8 [-11.9 ÷ -9.1]	Decrescente
Pavia	Pavia - Via Folperti	FU	-0.05 [-0.11 ÷ 0.01]	-2.8 [-5.1 ÷ 0.4]	Stazionario
Cremona	Cremona - P.Zza Cadorna	TU	0 [-0.04 ÷ 0.02]	-0.1 [-3 ÷ 2.3]	Stazionario
Merano	Me1 Merano	TU	-0.06 [-0.1 ÷ -0.02]	-2.6 [-4 ÷ -1]	Decrescente
Rieti	Rieti	TU	-0.24 [-0.27 ÷ -0.21]	-6.7 [-7.2 ÷ -6.3]	Decrescente
Roma	Villa Ada	FU	-0.17 [-0.18 ÷ -0.15]	-6.7 [-7 ÷ -6.4]	Decrescente
Frosinone	Frosinone Scalo	TU	-0.31 [-0.35 ÷ -0.27]	-5.6 [-6 ÷ -5]	Decrescente
Pescara	Pe - Viale G. Di Annunzio	TU	-0.86 [-0.95 ÷ -0.79]	-9.1 [-9.4 ÷ -8.6]	Decrescente
Sarroch	Censa2	IS	0.1 [0.07 ÷ 0.13]	12.6 [7.6 ÷ 19]	Crescente

2.5 Ozono

2.5.1. Il quadro emissivo dei precursori dell'ozono

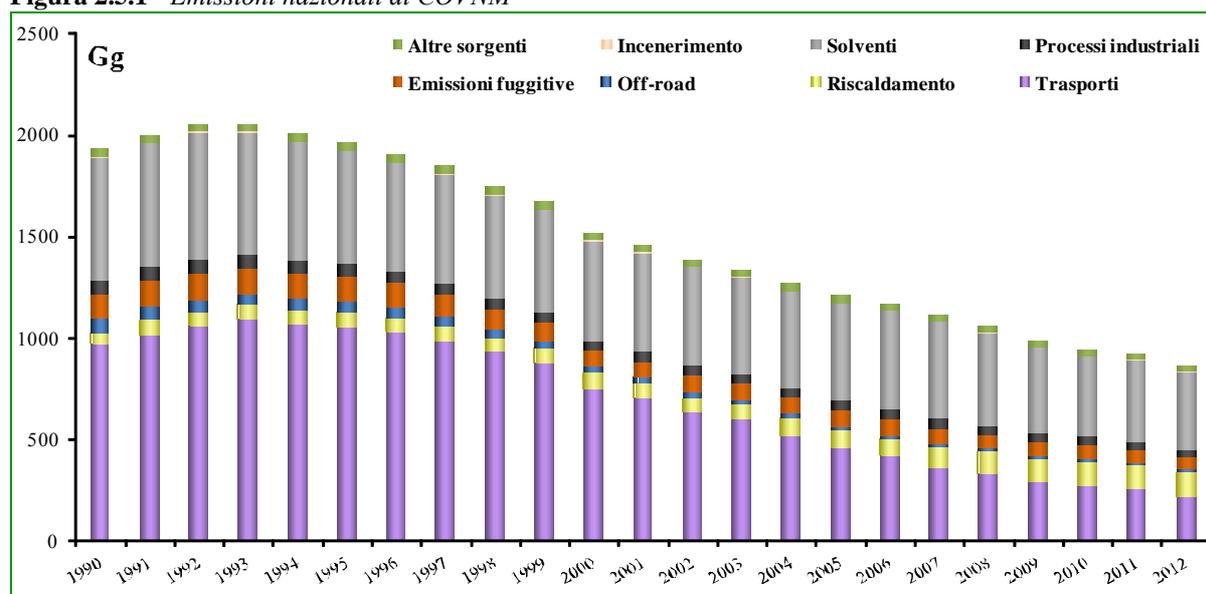
L'ozono (O_3) presente nella bassa troposfera origina in massima parte da una serie complessa di reazioni chimiche, a partire da altri inquinanti presenti nell'atmosfera (precursori), prevalentemente tramite l'azione dell'irraggiamento solare (reazioni fotochimiche).

I principali precursori coinvolti nella formazione dell' O_3 sono gli ossidi di azoto (NO_x) ed i Composti Organici Volatili non metanici (COVNM) che possono essere di origine antropica (combustioni, evaporazione di solventi organici) o derivare da sorgenti naturali di emissione (incendi, vegetazione, suolo). Le reazioni che portano alla formazione di O_3 sono reazioni fotochimiche e quindi le concentrazioni dell'inquinante aumentano con l'aumentare di radiazione solare e temperatura, determinando un gradiente geografico e periodicità stagionali e giornaliere (aumento nel periodo estivo e nelle ore del giorno immediatamente successive a quelle di massimo irraggiamento solare).

Il quadro emissivo relativo agli NO_x è stato delineato nel paragrafo 2.2, nel seguito si riporta l'analoga analisi per i COVNM.

Le emissioni totali nazionali di COVNM diminuiscono del 56% rispetto al 1990 (-36% dal 2003); esse derivano soprattutto dall'uso dei solventi (44% nel 2012), dai trasporti stradali (20% nel 2012) e dalla combustione non industriale (14% nel 2012).

Figura 2.5.1 - Emissioni nazionali di COVNM



Le emissioni originate dal trasporto stradale sono fortemente diminuite (-80% rispetto al 1990 e -65% rispetto al 2003). Tale riduzione è leggermente più marcata in ambito urbano ed extraurbano che autostradale; esse derivano prevalentemente dai veicoli alimentati a benzina (88% sul totale nel 2012), mentre dai veicoli diesel deriva una quota minoritaria, pari al 10% delle emissioni totali su strada.

Le emissioni evaporative, legate ai veicoli a benzina, rappresentano il 33% delle emissioni di COVNM su strada e mostrano una diminuzione pari al 69% dal 1990 e al 50% dal 2003, evidente in tutti gli ambiti. Le emissioni evaporative derivano sia dai veicoli parcheggiati che in movimento e sono fondamentalmente dovute a perdite legate all'evaporazione del carburante nel serbatoio durante la guida ed il parcheggio come conseguenza delle variazioni di temperatura diurna ed a fenomeni di permeazione e perdite di carburante. La stima delle emissioni evaporative prevede la distinzione tra: perdite diurne, dovute alle variazioni di temperatura; perdite in movimento, durante l'uso dei veicoli; perdite a caldo durante la sosta, successive all'uso dei veicoli [34].

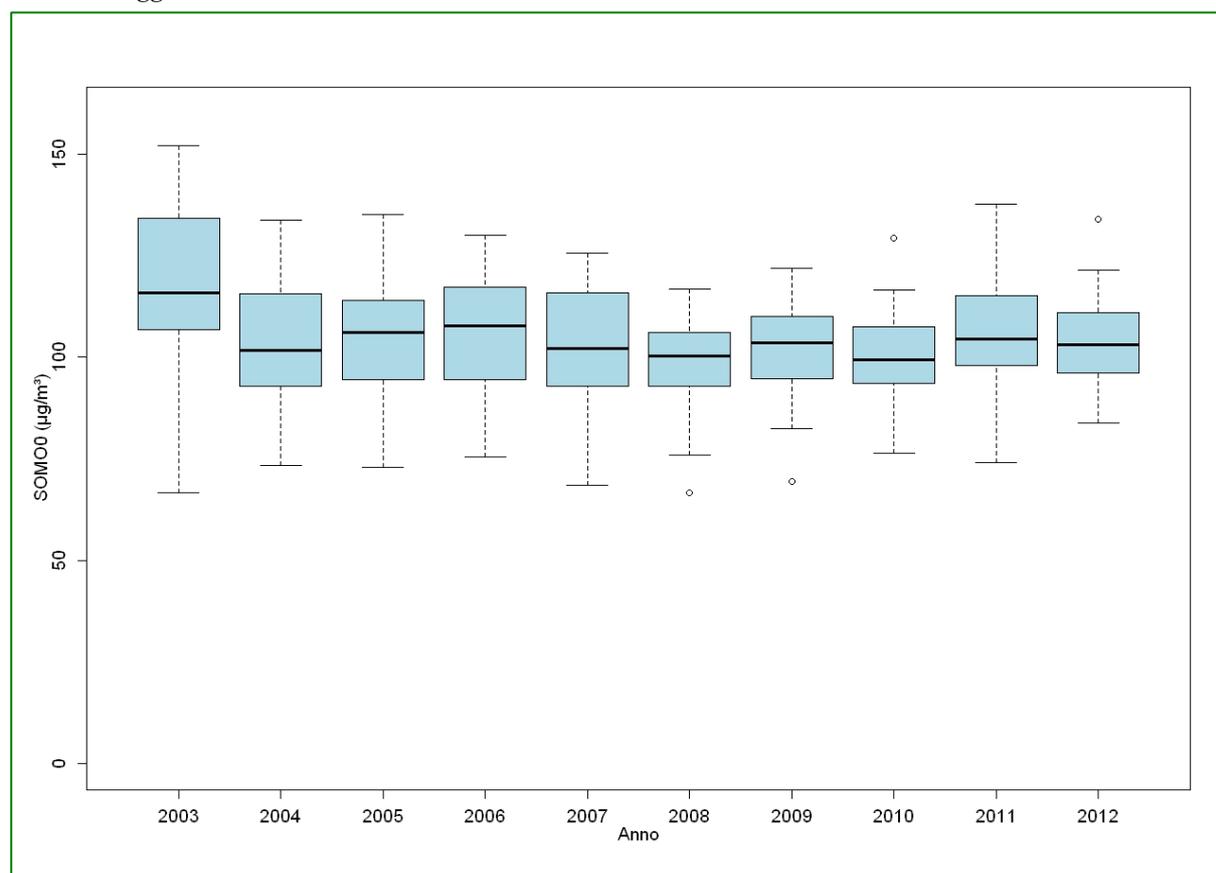
La generale riduzione delle emissioni evaporative deriva anche dall'introduzione di dispositivi anti inquinamento quali sistemi di controllo e limitazione dei processi evaporativi come il *canister*.

2.5.2. O₃ – Analisi dei trend delle concentrazioni in aria

L'analisi dei dati di ozono è stata condotta sulla base dei valori di un indicatore di esposizione (*Sum of Mean Over Zero, SOMO0*) con riferimento al periodo aprile – settembre, considerato il più rilevante ai fini dell'esposizione della popolazione, calcolato secondo i criteri riportati nella sezione metodi.

Nella figura 2.5.2 è riportata la distribuzione dei valori dell'indicatore *SOMO0* determinati dal 2003 al 2012 nelle 46 stazioni di monitoraggio sul territorio nazionale, dalla quale non sembra emergere una tendenza generale.

Figura 2.5.2 – Ozono (*SOMO0*), 2003 – 2012. - Statistiche descrittive calcolate su una selezione di 46 stazioni di monitoraggio distribuite sul territorio nazionale.



Analogamente dalla figura 2.5.3, che riporta l'andamento medio del *SOMO0* per tipo di stazione (urbana, suburbana e rurale) non si evince una diversa tendenza in funzione della classificazione della stazione.

I risultati dell'analisi dei trend dell'indicatore *SOMO0* rilevati nel periodo 2003 – 2012 riportati nella tabella 2.5.2 confermano le osservazioni qualitative emerse dall'analisi delle statistiche descrittive. Nella quasi totalità delle stazioni (40 su 46) non è possibile individuare un trend statisticamente significativo; la tendenza di fondo appare sostanzialmente monotona, e le oscillazioni interannuali sono attribuibili alle naturali fluttuazioni della componente stagionale.

Le provincie di Bolzano, Trento, Pordenone, Venezia, Genova, Roma, Nuoro e Cagliari, tutte con almeno due stazioni, non mostrano trend statisticamente significativo. I casi di trend decrescente sono attribuiti a stazioni singole nelle provincie di Cuneo, Trieste e Varese. I restanti tre casi sono stati registrati a Torino, Biella e Aosta, e sono sempre accompagnati da altre stazioni dove non si evidenzia un trend decrescente.

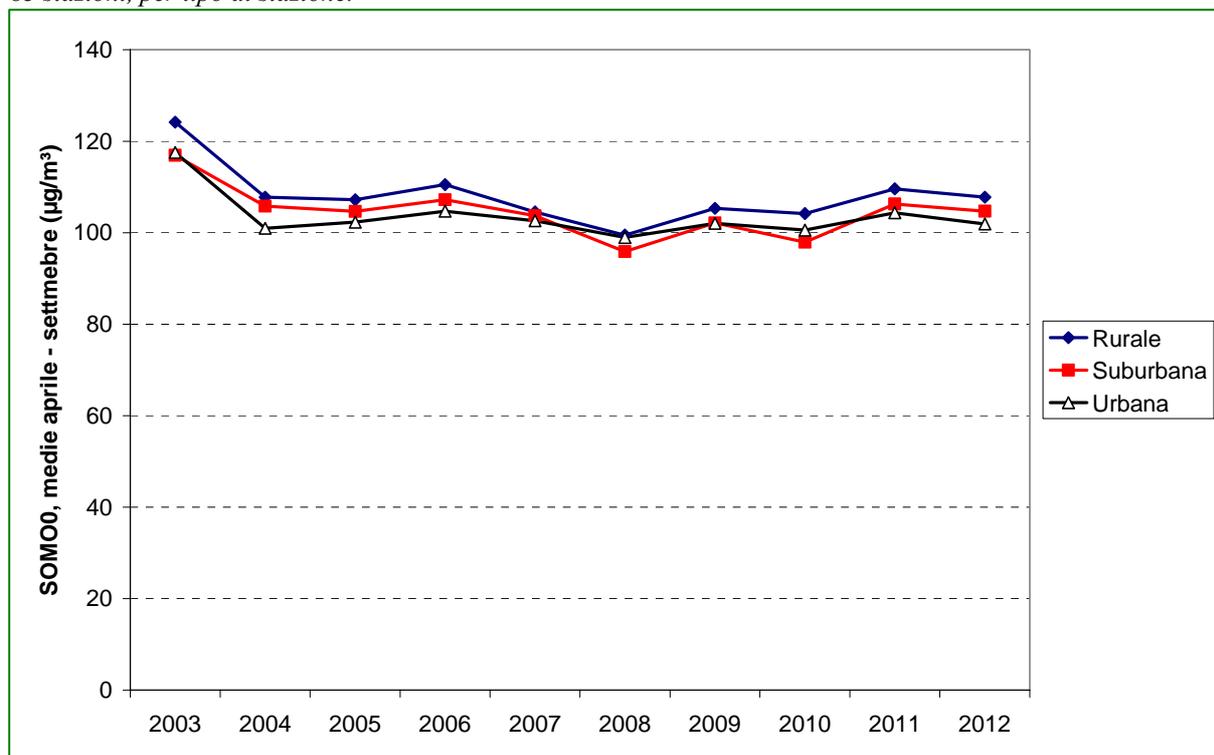
Non esiste una relazione lineare tra le concentrazioni di ozono nella bassa atmosfera e le emissioni dei precursori. La riduzione delle emissioni di quest'ultimi non corrisponde a una proporzionale riduzione dei livelli di ozono troposferico. Alcune ipotesi sono state proposte, per spiegare il ridotto impatto delle misure di risanamento, rivolte alla riduzione dei precursori dell'ozono troposferico.

Il contributo alla dispersione in aria di VOCNM e NOx fornito dalle emissioni biogeniche e quello dovuto alla combustione di biomassa volontaria, accidentale e naturale (gli incendi boschivi intensi e frequenti nel periodo estivo ad esempio) potrebbe avere un ruolo importante difficilmente quantificabile [27]. Un'altra possibile spiegazione potrebbe essere l'aumento dei livelli di metano aerodisperso, che contribuirebbe a mantenere elevati i livelli di ozono [39].

È stato evidenziato recentemente un trend crescente dei livelli di ozono nelle stazioni di monitoraggio europee posizionate in aree urbane in prossimità di importanti arterie stradali [40].

Questo fatto è stato attribuito alla diminuzione delle emissioni di ossidi di azoto che determinerebbe un minore consumo di ozono. Tale effetto non è stato osservato nell'analisi dei dati qui riportati; non sono infatti disponibili serie storiche per stazioni con queste caratteristiche in Italia. Il data set analizzato infatti è composto da stazioni classificate coerentemente con la normativa vigente, che prevede che anche le stazioni di monitoraggio collocate in aree urbane siano ubicate a distanza sufficiente da minimizzare l'influenza delle emissioni locali (vedi figura 2.5.4).

Figura 2.5.3 – SOMO0, 2003 – 2012. Andamento della media delle medie annuali calcolata su un campione di 83 stazioni, per tipo di stazione.

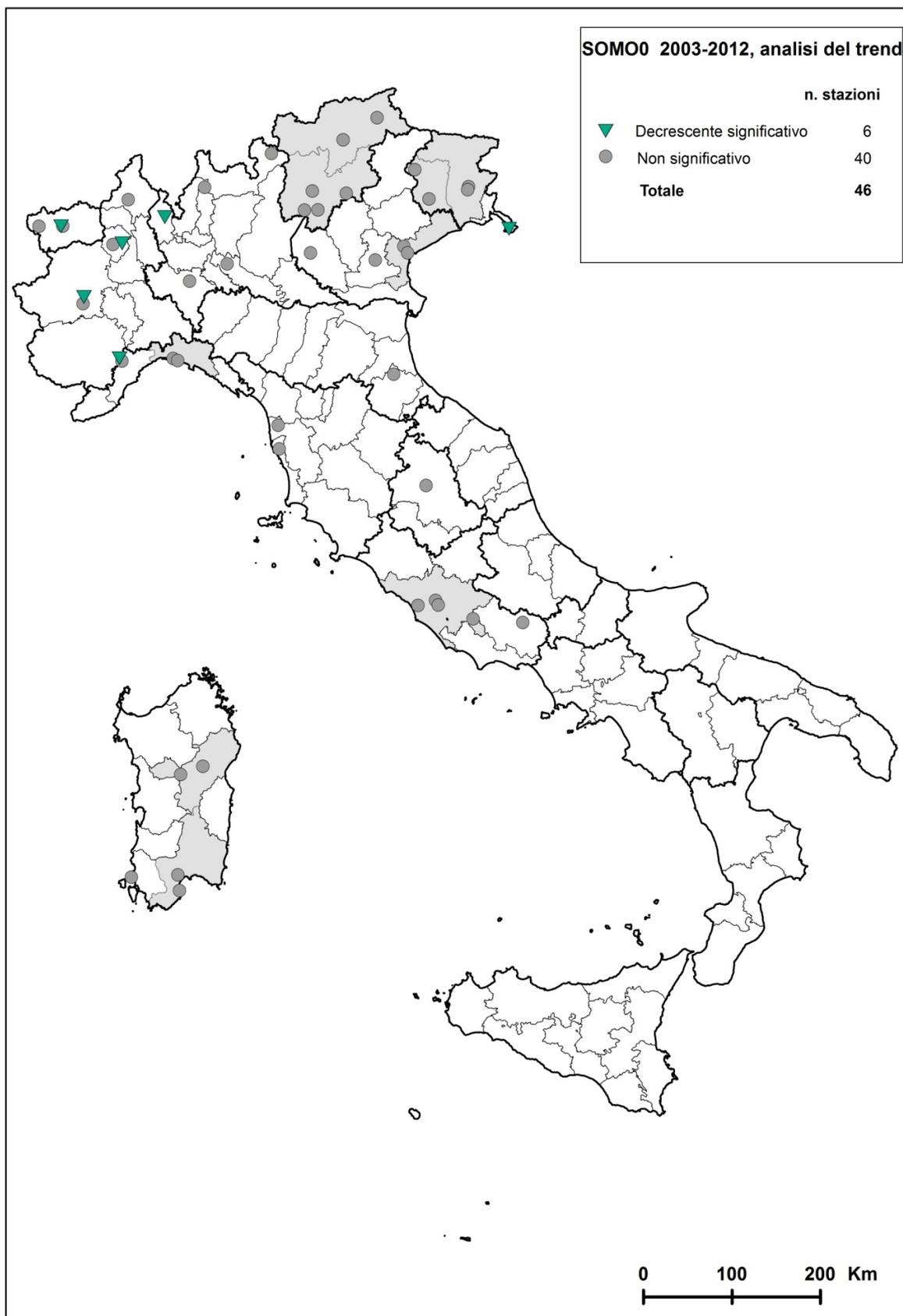


Legenda: stazioni di tipo rurale (9); stazioni di tipo suburbano (13); stazioni di tipo urbano (24)

Tabella 2.5.2 – Ozono, SOMO0. Sintesi dei risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall. Casi di trend statisticamente significativo ($p < 0,05$), variazione annua media stimata (Δ_y) e intervallo di confidenza della stima.

	Trend decrescente ($p < 0,05$)		Trend crescente ($p < 0,05$)		Trend non significativo ($p > 0,05$)
	n	Δ_y ($\mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n	Δ_y ($\mu\text{g m}^{-3}\text{y}^{-1}$)	n
2003 – 2012 (46 stazioni)	6	-2,5 [-3,2 ÷ -1,2]	-	-	40

Figura 2.5.4 – SOMO0, 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Distribuzione sul territorio delle stazioni analizzate. Sono colorate le aree provinciali in cui il trend è coerente tra tutte le stazioni disponibili sul territorio, nel caso ce ne siano almeno due: verde chiaro in caso di trend decrescente; rosa in caso di trend crescente; grigio in caso di trend non significativo.



3. CONCLUSIONI

Utilizzando il test di Kendall corretto per la stagionalità, è stato stimato in modo quantitativo il trend (2003 – 2012) delle concentrazioni dei principali inquinanti atmosferici.

Lo studio offre, per la prima volta in Italia con questa estensione, una visione d'insieme delle tendenze in atto. Pur con i limiti determinati dalla ridotta disponibilità di serie storiche rispondenti ai requisiti minimi necessari per applicare il test e dalla scarsa disponibilità di informazioni per le regioni del sud, lo studio delinea un quadro sufficientemente esauriente delle tendenze nazionali, oltre a rappresentare lo spunto per futuri approfondimenti per la comprensione dei fenomeni sottesi alla evidenza statistica da condurre su scala locale e regionale.

Nel periodo studiato la concentrazione in aria di inquinanti primari, (CO, C₆H₆), la cui fonte di emissione principale sono le emissioni dei veicoli alimentati da motori a combustione interna, ha subito una notevole riduzione. I risultati dell'analisi statistica dei trend sono coerenti con le stime di riduzione delle emissioni, ed è possibile individuare una relazione di tipo lineare tra emissioni e concentrazioni in aria.

Si rileva anche una larga prevalenza di casi in cui le concentrazioni di PM₁₀ e NO₂ diminuiscono; le osservazioni sono coerenti con le stime di riduzione delle emissioni primarie; tuttavia non mancano le eccezioni in particolare per l'NO₂ le cui cause andrebbero indagate localmente.

La mancata riduzione delle concentrazioni dell'ozono è spiegabile, almeno in parte, con la sua natura di inquinante secondario per il quale manca una relazione di proporzionalità diretta con la riduzione delle emissioni dei precursori.

BIBLIOGRAFIA

1. Bachmann, J. "Will the Circle Be Unbroken: A History of the U.S. National Ambient Air Quality Standards". *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 2007, (57), 652–697.
2. World Health Organisation. "Air Quality Guidelines. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global Update 2005", Copenhagen, WHO Regional Office for Europe Regional Publications, (2006).
3. World Health Organisation. "Air quality guidelines for Europe". Second Edition, Copenhagen, WHO Regional Office for Europe Regional Publications, European Series, n. 91(2000).
4. Unione Europea (UE). Direttiva 96/62/CE del Consiglio del 27 settembre 1996 in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria ambiente. Gazzetta ufficiale CE L 296, 21 novembre 1996.
5. Unione Europea (UE). Direttiva 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo. Gazzetta Ufficiale CE L 163, 29 giugno 1999.
6. Unione Europea (UE). Direttiva 16 novembre 2000, n. 2000/69/CE, concernente i valori limite per il benzene ed il monossido di carbonio nell'aria ambiente.
7. Unione Europea (UE). Direttiva 12 febbraio 2002, n. 2002/3/CE, Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio relativa all'ozono nell'aria.
8. Unione Europea (UE). Direttiva 15 dicembre 2004, n. 2004/107/CE, Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio relativa ad arsenico, cadmio, mercurio, nichel e idrocarburi policiclici aromatici nell'aria.
9. Unione Europea (UE). Direttiva 2008/50/ce del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 maggio 2008 relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa. Gazzetta Ufficiale CE L 152, 11 giugno 2008.
10. Decreto legislativo 13 agosto 2010, n. 155. Attuazione della direttiva 2008/50/CE relative alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa. SO n.217 alla Gazzetta Ufficiale n. 216, del 15 settembre 2010.
11. Harrison, R.M., Stedman, J.R., Derwent, D. "New Directions: why are PM₁₀ concentrations in Europe not falling"? *Atmospheric Environment*, 2008 (42), 603-606.
12. Unione Europea (UE). 97/101/CE: Decisione del Consiglio del 27 gennaio 1997 che instaura uno scambio reciproco di informazioni e di dati provenienti dalle reti e dalle singole stazioni di misurazione dell'inquinamento atmosferico negli Stati membri. Gazzetta ufficiale n. L 035, 05 febbraio 1997.
13. Decisione 17 ottobre 2001, n. 2001/752/CE, Decisione della Commissione che modifica gli allegati della Decisione 97/101/CE del Consiglio che instaura uno scambio reciproco di informazioni e di dati provenienti dalle reti e dalle singole stazioni di misurazione dell'inquinamento atmosferico negli Stati membri.
14. McLeod, A.I. "Trend analysis methodology for water quality time series". *Environmetrics*, 1991, (2) 169–200.
15. Rao, S.T., Zurbenko, I.G. "Detecting and tracking changes in ozone air quality". *Journal of Air and Waste Management Association*, 1994, (44) 1089–1092.
16. Eskridge, R.E. "Separating different scales of motion in time series of meteorological variables", *Bulletin of American Meteorological Society*, 1997, (78) 1473–1483.
17. Mann, H.B. "Non-parametric test against trend". *Econometrica*, 1945, (13) 245-259.
18. Kendall, M. "A New Measure of Rank Correlation", *Biometrika*, 1938, 30 (1–2): 81–89.
19. Hirsch, R.M., and Slack, L.R. "A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence". *Water Resources Research*, 1984, (20), 727-732.
20. Theil, H., 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 1, 2, and 3. Ned. Akad. Wetsh. Proceedings, Vol. 53, pp. 386–392, 521–525, 1397–1412.
21. Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendalls tau. *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379–1389
22. Ann Hessa, Hari Iyera, William MalmbGardner, Linear trend analysis: a comparison of methods 2000 *Atmospheric Environment* 35 (2001) 5211–5222

-
23. Anttila P, Tuovinen JP. Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994-2007. *Atmospheric Environment*, 2010, (44), 30-41.
 24. Cortes, D.R., Hites, R.A., “Detection of Statistically Significant Trends in Atmospheric Concentrations of Semivolatile Compounds
 25. Gupta, I., Kumar, R. “Trends of particulate matter in four cities in India”. *Atmospheric Environment*, 2006, (40), 2552–2566.
 26. Hoogerbrugge R, Denier van der Gon HAC, Van Zanten MC, Matthijesen J. *Trends in particulate matter*, Bihlthoven, Netherlands research program on particulate matter, report 500099014 (2010).
 27. European Environment Agency. “Air quality in Europe – 2012 Report”, EEA report 4/2012
 28. Cattani, G., Di Menno di Bucchianico, A., Dina, D., Inglessis, M., Notaro, C., Settimo, G., Viviano, G., Marconi, A. “Evaluation of the temporal variation of air quality in Rome, Italy from 1999 to 2008”. *Ann Ist Super Sanità*, 2010, (46) 242-253.
 29. R Development Core Team (2008). “R: A language and environment for statistical computing”. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>
 30. Carslaw, D.C. and K. Ropkins, “Openair — an R package for air quality data analysis”. *Environmental Modelling & Software.*, 2012, (27-28), 52-61.
 31. Martuzzi, M., Mitis, F., Iavaone, I., Serinelli, M. “Impatto sanitario di PM₁₀ e ozono in 13 città Italiane”. APAT, 2006.
 32. ISPRA, 2014 [a]. D. Romano, C. Arcarese, A. Bernetti, A. Caputo, R. D. Córdor, M. Contaldi, R. De Lauretis, E. Di Cristofaro, A. Gagna, B. Gonella, F. Lena, R. Liburdi, E. Taurino, M. Vitullo “Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2012. National Inventory Report 2014” Rapporto ISPRA 198/2014
 33. ISPRA, 2014 [b]. D. Romano, A. Bernetti, R. D. Córdor, R. De Lauretis, E. Di Cristofaro, A. Gagna, B. Gonella, F. Lena, M. Pantaleoni, E. Peschi, E. Taurino, M. Vitullo “Italian Emission Inventory 1990-2012. Informative Inventory Report 2014” Rapporto ISPRA 201/2014
 34. EMEP/EEA, 2013. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook. EEA. Technical report No 12/2013.
 35. Decreto 2 aprile 2002, n. 60. Recepimento della direttiva 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 concernente i valori limite di qualità dell’aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo e della direttiva 2000/69/CE relativa ai valori limite di qualità dell’aria ambiente per il benzene ed il monossido di carbonio. Gazzetta Ufficiale - Serie Generale n. 87, del 13 aprile 2002.
 36. Unione Europea (UE). Direttiva 2001/81/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2001 relativa ai limiti nazionali di emissione di alcuni inquinanti atmosferici. Gazzetta Ufficiale CE L 309/22, 27 novembre 2001.
 37. ISPRA. Annuario dei dati ambientali edizione 2005-2006. Serie Stato dell’ambiente 2006.
 38. ISPRA. “Annuario dei dati ambientali 2012” Serie Stato dell’ambiente 38/2013.
 39. Dlugokencky, E., J., and Bruhwiler, L. (2009). “Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden”, *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36 (18), 1-5.
 40. de Leeuw, F., 2012, AirBase: a valuable tool in air quality assessments at a European and local level, ETC/ACM Technical Paper 2012/4.

ALLEGATO A. TABELLE RIASSUNTIVE PER SINGOLA STAZIONE DI MONITORAGGIO

Tabella 1 – PM_{10} , 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Sono riportati in grassetto i casi statisticamente significativi ($p < 0,05$): in rosso i casi di trend crescente, e in nero i casi di trend decrescente. Nei restanti casi il trend non risulta statisticamente significativo.

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione ($\% \text{y}^{-1}$)	Trend
Druento	Druento - La Mandria	FR	-0.6 [-1 ÷ -0.2]	-1.7 [-2.7 ÷ -0.7]	DECRESCENTE
Torino	Torino - Consolata	TU	-2.1 [-2.6 ÷ -1.6]	-3.3 [-4 ÷ -2.6]	DECRESCENTE
Saliceto	Saliceto - Moizo	FR	-0.5 [-0.9 ÷ -0.2]	-1.6 [-2.6 ÷ -0.6]	DECRESCENTE
Biella	Biella - Sturzo	FU	-1.3 [-1.7 ÷ -1]	-3.8 [-4.6 ÷ -2.9]	DECRESCENTE
Cossato	Cossato - Pace	FU	-0.4 [-0.8 ÷ 0.1]	-1.2 [-2.4 ÷ 0.2]	NON SIGNIFICATIVO
Busto Arsizio	Busto Arsizio - Accam	FS	-1.9 [-2.3 ÷ -1.4]	-3.9 [-4.6 ÷ -3]	DECRESCENTE
Como	Como	TU	-1.4 [-1.8 ÷ -1.1]	-3.1 [-3.9 ÷ -2.5]	DECRESCENTE
Sondrio	Sondrio - Via Merizzi	FU	-2 [-2.5 ÷ -1.5]	-4.4 [-5.1 ÷ -3.6]	DECRESCENTE
Magenta	Magenta Vf	FU	-1.3 [-1.9 ÷ -0.8]	-2.5 [-3.5 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Meda	Meda	TU	-1.6 [-2.2 ÷ -1.2]	-2.9 [-3.8 ÷ -2.2]	DECRESCENTE
Milano	Milano - Juvara	FU	-1.4 [-2 ÷ -0.9]	-2.6 [-3.4 ÷ -1.8]	DECRESCENTE
Milano	Milano - Verziere	TU	-1.2 [-1.6 ÷ -0.7]	-2.3 [-3 ÷ -1.4]	DECRESCENTE
Pioltello	Limite	FU	-1.3 [-1.7 ÷ -0.8]	-2.5 [-3.1 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Brescia	Brescia - Broletto	TU	-1.2 [-1.7 ÷ -0.8]	-2.5 [-3.3 ÷ -1.6]	DECRESCENTE
Rezzato	Rezzato	IS	-0.7 [-1.1 ÷ -0.2]	-1.3 [-2 ÷ -0.5]	DECRESCENTE
Pavia	Pavia - P.Zza Minerva	TU	-1 [-1.4 ÷ -0.7]	-2.2 [-2.9 ÷ -1.5]	DECRESCENTE
Mantova	Mantova - Via Ariosto	FU	-1.6 [-2.1 ÷ -1]	-3 [-3.7 ÷ -2]	DECRESCENTE
Lecco	Lecco Via Amendola	TU	-1.5 [-1.8 ÷ -1.1]	-3.7 [-4.3 ÷ -2.8]	DECRESCENTE
Lodi	Lodi	TU	-2.2 [-2.7 ÷ -1.6]	-3.9 [-4.5 ÷ -3.1]	DECRESCENTE
Bolzano	Bz5 Piazza Adriano	TU	-1.9 [-2.2 ÷ -1.5]	-5.9 [-6.8 ÷ -5.2]	DECRESCENTE
Bressanone	Bx1 Bressanone	TU	-1.2 [-1.4 ÷ -1]	-4.8 [-5.4 ÷ -4.1]	DECRESCENTE
Brunico	Br1 Brunico	TU	-1.2 [-1.5 ÷ -0.8]	-4.8 [-5.9 ÷ -3.6]	DECRESCENTE
Merano	Me1 Merano	TU	-1.9 [-2.3 ÷ -1.4]	-5.5 [-6.3 ÷ -4.5]	DECRESCENTE
Borgo Valsugana	Borgo Val	FU	-0.4 [-0.7 ÷ -0.1]	-1.2 [-2.1 ÷ -0.3]	DECRESCENTE
Riva Del Garda	Riva Gar	FU	-0.9 [-1.3 ÷ -0.4]	-2.6 [-3.7 ÷ -1.4]	DECRESCENTE
Rovereto	Rovereto Lgp	FU	-0.9 [-1.3 ÷ -0.5]	-2.7 [-3.8 ÷ -1.5]	DECRESCENTE
Udine	Osoppo Urban	TU	0.9 [0.5 ÷ 1.2]	3.9 [2.2 ÷ 5.7]	CRESCENTE
Gorizia	Lucinico	FS	-0.8 [-1.1 ÷ -0.5]	-3.1 [-4.3 ÷ -1.9]	DECRESCENTE
Muggia	Muggia	IU	-0.9 [-1.3 ÷ -0.5]	-3 [-4.3 ÷ -1.8]	DECRESCENTE
Trieste	Piazza Liberta	TU	0.2 [-0.2 ÷ 0.5]	0.9 [-0.8 ÷ 2.6]	NON SIGNIFICATIVO
Trieste	Pitacco	IU	-0.2 [-0.7 ÷ 0.2]	-0.8 [-2.6 ÷ 1.1]	NON SIGNIFICATIVO
Trieste	Via Svevo	IU	-0.1 [-0.5 ÷ 0.3]	-0.2 [-1.6 ÷ 1.3]	NON SIGNIFICATIVO
Pordenone	Pordenone Centro	TU	-0.3 [-0.6 ÷ 0]	-1 [-1.9 ÷ 0]	NON SIGNIFICATIVO
Reggio Nell'emilia	S. Lazzaro	FU	-0.2 [-0.7 ÷ 0.2]	-0.7 [-1.8 ÷ 0.8]	NON SIGNIFICATIVO
Bologna	Porta San Felice	TU	-0.9 [-1.2 ÷ -0.6]	-2.1 [-2.7 ÷ -1.5]	DECRESCENTE
Ferrara	Isonzo	TU	-0.3 [-0.7 ÷ 0]	-0.9 [-1.7 ÷ 0]	NON SIGNIFICATIVO
Firenze	Fi-Bassi	FU	-1.2 [-1.7 ÷ -0.8]	-3.5 [-4.6 ÷ -2.5]	DECRESCENTE
Firenze	Fi-Boboli	FU	-0.7 [-1 ÷ -0.4]	-2.4 [-3.4 ÷ -1.4]	DECRESCENTE
Scandicci	Fi-Scandicci	FU	-1.4 [-1.7 ÷ -1]	-3.3 [-3.8 ÷ -2.6]	DECRESCENTE
Pisa	Pi-Borghetto	TU	0 [-0.3 ÷ 0.2]	-0.1 [-0.9 ÷ 0.8]	NON SIGNIFICATIVO
Prato	Po-Roma	FU	-0.2 [-0.6 ÷ 0.2]	-0.6 [-1.9 ÷ 0.7]	NON SIGNIFICATIVO
Roma	L .Go Arenula	TU	-1.9 [-2.2 ÷ -1.6]	-3.9 [-4.4 ÷ -3.5]	DECRESCENTE
Roma	L.Go Magna Grecia	TU	-1.5 [-1.9 ÷ -1.2]	-3.4 [-3.9 ÷ -2.7]	DECRESCENTE
Roma	P.Zza E.Fermi	TU	-2.4 [-2.7 ÷ -2.1]	-4.5 [-4.8 ÷ -4.2]	DECRESCENTE
Roma	Villa Ada	FU	-0.6 [-0.9 ÷ -0.3]	-1.9 [-2.7 ÷ -1]	DECRESCENTE

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione ($\% \text{y}^{-1}$)	Trend
Pescara	Pe - Piazza Grue	TU	-1.2 [-1.8 ÷ -0.6]	-3 [-4.1 ÷ -1.5]	DECRESCENTE
Pescara	Pe - Via Firenze	TU	-2 [-2.8 ÷ -1.2]	-4 [-5.3 ÷ -2.6]	DECRESCENTE
Palermo	Giulio Cesare	TU	-0.6 [-0.9 ÷ -0.3]	-1.4 [-2.1 ÷ -0.7]	DECRESCENTE
Palermo	Castelnuovo	TU	-0.5 [-0.8 ÷ -0.3]	-1.4 [-2.1 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Palermo	Di Blasi	TU	-0.7 [-1.1 ÷ -0.3]	-1.5 [-2.2 ÷ -0.7]	DECRESCENTE
Assemini	Cenas8	IS	-0.1 [-0.4 ÷ 0.2]	-0.3 [-1.3 ÷ 0.8]	NON SIGNIFICATIVO
Nuraminis	Cennm1	IR	0.1 [-0.8 ÷ 1]	0.5 [-2.5 ÷ 5.6]	NON SIGNIFICATIVO
Sarroch	Censa2	IS	-0.8 [-1.1 ÷ -0.4]	-2.6 [-3.5 ÷ -1.3]	DECRESCENTE
Villasor	Cenvs1	FS	-1.2 [-1.6 ÷ -0.7]	-3.2 [-4.2 ÷ -2.2]	DECRESCENTE
Portoscuso	Cenps2	IS	0 [-0.6 ÷ 0.5]	0.1 [-1.8 ÷ 2.1]	NON SIGNIFICATIVO
Portoscuso	Cenps6	IS	0.3 [0 ÷ 0.7]	2.2 [0.1 ÷ 5.2]	CRESCENTE
Portoscuso	Cenps7	IS	0.4 [0 ÷ 0.7]	1.7 [0.1 ÷ 3.2]	CRESCENTE

Tabella 2 – NO₂, 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Sono riportati in grassetto i casi statisticamente significativi ($p < 0,05$): in rosso i casi di trend crescente, e in nero i casi di trend decrescente. Nei restanti casi il trend non risulta statisticamente significativo.

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione (% y^{-1})	Trend
Orbassano	Orbassano - Gozzano	FS	-1.1 [-1.4 ÷ -0.7]	-2.4 [-3 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Torino	Torino - Lingotto	FU	-0.9 [-1.3 ÷ -0.4]	-1.7 [-2.4 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Torino	Torino - Rebaudengo	TU	-0.8 [-1.5 ÷ -0.2]	-1 [-1.8 ÷ -0.3]	DECRESCENTE
Vinovo	Vinovo - Volontari	FS	-0.7 [-1.1 ÷ -0.3]	-1.7 [-2.5 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Saliceto	Saliceto - Moizo	FR	-0.4 [-0.7 ÷ -0.1]	-2.3 [-3.5 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Biella	Biella - Sturzo	FU	-0.9 [-1.1 ÷ -0.6]	-2.5 [-3.1 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Cossato	Cossato - Pace	FU	-0.7 [-0.9 ÷ -0.5]	-2.2 [-2.8 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Aosta	Aosta (Piazza Plouves)	FU	-0.5 [-0.7 ÷ -0.2]	-1.3 [-2 ÷ -0.5]	DECRESCENTE
La Thuile	La Thuile	FR	-0.5 [-0.7 ÷ -0.3]	-7.7 [-9.2 ÷ -5.4]	DECRESCENTE
Busto Arsizio	Busto Arsizio - Accam	FS	-1.1 [-1.4 ÷ -0.7]	-2.6 [-3.2 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Varese	Varese - Via Vidoletti	FS	0 [-0.5 ÷ 0.4]	-0.1 [-1.5 ÷ 1.4]	NON SIGNIFICATIVO
Como	Como	TU	-2.2 [-2.7 ÷ -1.7]	-2.9 [-3.4 ÷ -2.3]	DECRESCENTE
Bormio	Bormio	FU	0.6 [0.4 ÷ 0.8]	4 [2.5 ÷ 6.4]	CRESCENTE
Arconate	Arconate	FS	-0.9 [-1.3 ÷ -0.6]	-2.6 [-3.4 ÷ -1.8]	DECRESCENTE
Meda	Meda	TU	0.5 [-0.3 ÷ 1.2]	1.1 [-0.5 ÷ 2.6]	NON SIGNIFICATIVO
Milano	Milano - V.Le Marche	TU	-0.7 [-1.3 ÷ 0]	-0.8 [-1.6 ÷ 0]	DECRESCENTE
Milano	Milano - Senato	TU	-0.5 [-1.2 ÷ 0.1]	-0.7 [-1.7 ÷ 0.2]	NON SIGNIFICATIVO
Milano	Milano - Verziere	TU	-0.8 [-1.1 ÷ -0.5]	-1.3 [-1.9 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Pioltello	Limite	FU	-1.6 [-1.9 ÷ -1.3]	-3.3 [-3.8 ÷ -2.8]	DECRESCENTE
Rho	Rho Centro	FU	-0.2 [-0.8 ÷ 0.4]	-0.4 [-1.4 ÷ 0.9]	NON SIGNIFICATIVO
San Giuliano Milanese	S. Giuliano	TU	-1.9 [-2.4 ÷ -1.4]	-3 [-3.7 ÷ -2.3]	DECRESCENTE
Sesto San Giovanni	Sesto S. Giovanni	TU	0 [-0.5 ÷ 0.5]	0 [-0.7 ÷ 0.9]	NON SIGNIFICATIVO
Turbigo	Turbigo	FU	-2.7 [-3.5 ÷ -1.8]	-6.3 [-7.4 ÷ -4.8]	DECRESCENTE
Osio Sotto	Osio Sotto	FS	0.9 [0.5 ÷ 1.3]	3.3 [1.8 ÷ 5.1]	CRESCENTE
Brescia	Brescia - Broletto	TU	-0.3 [-0.7 ÷ 0.2]	-0.6 [-1.4 ÷ 0.5]	NON SIGNIFICATIVO
Gambara	Gambara	FR	-0.2 [-0.4 ÷ 0.1]	-0.6 [-1.4 ÷ 0.3]	NON SIGNIFICATIVO
Lonato	Lonato	FU	-1 [-1.4 ÷ -0.7]	-3.6 [-4.7 ÷ -2.6]	DECRESCENTE
Rezzato	Rezzato	IS	-1.5 [-1.8 ÷ -1.2]	-3.5 [-4.1 ÷ -2.8]	DECRESCENTE
Pavia	Pavia - Via Folperti	FU	0.2 [-0.2 ÷ 0.7]	0.6 [-0.4 ÷ 2.1]	NON SIGNIFICATIVO
Pavia	Pavia - P.Zza Minerva	TU	-2.3 [-3.6 ÷ -1.1]	-3.6 [-5.2 ÷ -1.8]	DECRESCENTE
Crema	Via Xi Febbraio	FU	-0.5 [-0.8 ÷ -0.2]	-1.4 [-2.2 ÷ -0.5]	DECRESCENTE
Cremona	P.Zza Cadorna	TU	-1.1 [-1.3 ÷ -0.8]	-2.6 [-3.2 ÷ -2.1]	DECRESCENTE
Colico	Colico	FS	-0.7 [-1 ÷ -0.4]	-2.3 [-3.1 ÷ -1.4]	DECRESCENTE
Lecco	Lecco Via Amendola	TU	-1 [-1.6 ÷ -0.4]	-1.7 [-2.4 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Merate	Merate	TU	-1.5 [-2.1 ÷ -0.9]	-2.5 [-3.2 ÷ -1.6]	DECRESCENTE
Lodi	Lodi	TU	-1.6 [-2.1 ÷ -1.1]	-3.1 [-3.8 ÷ -2.2]	DECRESCENTE
Bressanone	Bx1 Bressanone	TU	-0.8 [-1.1 ÷ -0.6]	-2.4 [-3 ÷ -1.8]	DECRESCENTE
Brunico	Br1 Brunico	TU	-0.7 [-1 ÷ -0.4]	-2.9 [-3.9 ÷ -1.8]	DECRESCENTE
Merano	Me1 Merano	TU	-0.5 [-0.8 ÷ -0.3]	-1.5 [-2 ÷ -0.9]	DECRESCENTE
Renon	Re1 Renon	FR	0.1 [0 ÷ 0.2]	1.9 [0 ÷ 5.6]	NON SIGNIFICATIVO
Rovereto	Rovereto Lgp	FU	-0.5 [-0.8 ÷ -0.3]	-1.5 [-2.1 ÷ -0.9]	DECRESCENTE
Verona	Vr - Borgo Milano	TU	-2.8 [-3.1 ÷ -2.4]	-4.9 [-5.3 ÷ -4.5]	DECRESCENTE
Verona	Vr - Cason	FS	-0.6 [-1 ÷ -0.3]	-1.9 [-2.7 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Vicenza	Vi - Quartiere Italia	FU	-1 [-1.3 ÷ -0.7]	-2.4 [-2.9 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Venezia	Ve - Parco Bissuola	FU	-0.8 [-1.2 ÷ -0.4]	-2 [-2.9 ÷ -1]	DECRESCENTE
Venezia	Ve - Sacca Fisola	FU	-0.7 [-1.1 ÷ -0.4]	-1.8 [-2.6 ÷ -1]	DECRESCENTE
Padova	Pd - Mandria	FU	-1.7 [-2.1 ÷ -1.4]	-3.4 [-4 ÷ -2.9]	DECRESCENTE
Rovigo	Ro - Centro	TU	-0.7 [-1 ÷ -0.3]	-1.5 [-2.2 ÷ -0.6]	DECRESCENTE
Udine	Cairoli	FU	-0.9 [-1.1 ÷ -0.6]	-2.9 [-3.7 ÷ -2.1]	DECRESCENTE
Udine	Manzoni	TU	0.2 [-0.6 ÷ 0.9]	0.5 [-1.4 ÷ 2.4]	NON SIGNIFICATIVO

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione ($\% \text{y}^{-1}$)	Trend
Udine	Osoppo Urban	TU	0.1 [-0.6 ÷ 0.9]	0.2 [-1.1 ÷ 1.7]	NON SIGNIFICATIVO
Monfalcone	Monfalcone	TU	0 [-0.2 ÷ 0.3]	0.1 [-0.9 ÷ 1.3]	NON SIGNIFICATIVO
Trieste	Piazza Vico	TU	-1.1 [-2.1 ÷ 0]	-1.6 [-3 ÷ -0.1]	DECRESCENTE
Trieste	Via Carpineto	IS	0.8 [0.2 ÷ 1.6]	3.3 [0.6 ÷ 7.1]	CRESCENTE
Brugnera	Brugnera	IS	-0.9 [-1.3 ÷ -0.4]	-2.5 [-3.5 ÷ -1.2]	DECRESCENTE
Pordenone	Pordenone Centro	TU	-0.5 [-1.4 ÷ 0.4]	-1 [-2.6 ÷ 1]	NON SIGNIFICATIVO
Prata Di Pordenone	Prata Di Pordenone	TS	-1.7 [-2.3 ÷ -1.1]	-3.8 [-4.8 ÷ -2.8]	DECRESCENTE
Cairo Montenotte	Farina - Cairo M.	IS	0.8 [0.4 ÷ 1.2]	5.1 [2.5 ÷ 9.5]	CRESCENTE
Cengio	Campo Di Calcio	FR	0.3 [-0.2 ÷ 0.8]	2 [-1.1 ÷ 6.1]	NON SIGNIFICATIVO
Vado Ligure	Vado Ligure	TU	-0.1 [-0.4 ÷ 0.3]	-0.2 [-1.2 ÷ 0.8]	NON SIGNIFICATIVO
Genova	Corso Firenze -	FU	-1.4 [-2.1 ÷ -0.8]	-2.9 [-3.9 ÷ -1.8]	DECRESCENTE
La Spezia	San Cipriano/Liberta	TU	-0.9 [-1.4 ÷ -0.3]	-1.7 [-2.6 ÷ -0.7]	DECRESCENTE
La Spezia	Fossamastra - La Spezia	IU	-0.1 [-0.6 ÷ 0.3]	-0.3 [-1.4 ÷ 0.8]	NON SIGNIFICATIVO
La Spezia	Maggiolina	FU	-0.9 [-1.5 ÷ -0.4]	-2.7 [-4.1 ÷ -1.1]	DECRESCENTE
Portovenere	Le Grazie	IS	-0.6 [-0.9 ÷ -0.4]	-3 [-4.1 ÷ -2]	DECRESCENTE
Parma	Cittadella	FU	-0.3 [-0.6 ÷ 0]	-1 [-1.7 ÷ -0.1]	DECRESCENTE
Reggio Nell'emilia	Timavo	TU	-1.9 [-2.3 ÷ -1.4]	-3.3 [-3.9 ÷ -2.5]	DECRESCENTE
Firenze	Fi-Bassi	FU	-0.5 [-1 ÷ 0.2]	-1.1 [-2.2 ÷ 0.6]	NON SIGNIFICATIVO
Firenze	Fi-Gramsci	TU	3.1 [2.3 ÷ 4.1]	4.6 [3.3 ÷ 6.4]	CRESCENTE
Scandicci	Fi-Scandicci	FU	-1.1 [-1.5 ÷ -0.6]	-2.4 [-3.1 ÷ -1.6]	DECRESCENTE
Pisa	Pi-Borghetto	TU	-0.7 [-1 ÷ -0.3]	-1.5 [-2.1 ÷ -0.7]	DECRESCENTE
Pisa	Pi-Passi	FU	-0.1 [-0.3 ÷ 0.1]	-0.3 [-1.4 ÷ 0.7]	NON SIGNIFICATIVO
Perugia	P.S.Giovanni	TU	0.3 [0 ÷ 0.7]	1.1 [-0.1 ÷ 2.4]	NON SIGNIFICATIVO
Civita Castellana	Civita Castellana	FU	-1.8 [-2.3 ÷ -1.3]	-3.5 [-4.2 ÷ -2.6]	DECRESCENTE
Leonessa	Leonessa	FR	-0.1 [-0.1 ÷ 0]	-0.8 [-1.7 ÷ 0.2]	NON SIGNIFICATIVO
Rieti	Rieti	TU	-0.2 [-0.4 ÷ 0]	-0.7 [-1.3 ÷ 0.1]	NON SIGNIFICATIVO
Allumiere	Allumiere	FR	0.1 [0 ÷ 0.2]	1.1 [0.2 ÷ 2.2]	CRESCENTE
Civitavecchia	Civitavecchia	FU	0.2 [-0.2 ÷ 0.5]	0.5 [-0.6 ÷ 1.9]	NON SIGNIFICATIVO
Colleferro	Colleferro Oberdan	IS	-0.6 [-0.9 ÷ -0.2]	-1.3 [-2 ÷ -0.4]	DECRESCENTE
Colleferro	Colleferro Europa	IS	-1.2 [-1.6 ÷ -0.8]	-2.6 [-3.3 ÷ -1.9]	DECRESCENTE
Guidonia Montecelio	Guidonia	TS	-0.9 [-1.2 ÷ -0.5]	-2.1 [-2.7 ÷ -1.3]	DECRESCENTE
Roma	Castel Di Guido	FR	-0.4 [-0.6 ÷ -0.3]	-2.2 [-2.9 ÷ -1.4]	DECRESCENTE
Roma	Cinecitta	FU	-0.9 [-1.2 ÷ -0.4]	-1.5 [-2.1 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Roma	L.Go Magna Grecia	TU	-1 [-1.4 ÷ -0.5]	-1.3 [-1.8 ÷ -0.7]	DECRESCENTE
Roma	Tenuta Del Cavaliere	FS	0.4 [-0.2 ÷ 1]	1 [-0.6 ÷ 3.1]	NON SIGNIFICATIVO
Roma	L.Go Perestrello	FU	-0.6 [-1 ÷ -0.2]	-1.1 [-1.8 ÷ -0.5]	DECRESCENTE
Aprilia	Aprilia 2	FU	-0.7 [-0.9 ÷ -0.6]	-2.4 [-2.8 ÷ -1.9]	DECRESCENTE
Latina	Lt Tasso	FU	-0.8 [-1.1 ÷ -0.5]	-2 [-2.7 ÷ -1.2]	DECRESCENTE
Alatri	Alatri	FU	0.2 [-0.2 ÷ 0.6]	0.5 [-0.4 ÷ 1.4]	NON SIGNIFICATIVO
Anagni	Anagni	FU	-1.2 [-1.6 ÷ -0.8]	-2.6 [-3.3 ÷ -1.9]	DECRESCENTE
Cassino	Cassino	TU	-0.8 [-1.2 ÷ -0.5]	-1.4 [-2 ÷ -0.9]	DECRESCENTE
Ceccano	Ceccano	TU	-0.8 [-1.3 ÷ -0.4]	-2.1 [-3 ÷ -1]	DECRESCENTE
Ferentino	Ferentino	TU	-2.3 [-3.2 ÷ -1.5]	-3.5 [-4.6 ÷ -2.6]	DECRESCENTE
Fontechiari	Fontechiari	FR	-0.5 [-0.5 ÷ -0.4]	-4.2 [-4.6 ÷ -3.7]	DECRESCENTE
Frosinone	Frosinone Scalo	TU	-2.1 [-2.4 ÷ -1.7]	-3.3 [-3.7 ÷ -2.8]	DECRESCENTE
Pescara	Pe - Piazza Grue	TU	-0.3 [-0.6 ÷ 0]	-0.8 [-1.6 ÷ 0.1]	NON SIGNIFICATIVO
Pescara	Pe - Corso Vit. Emanuele	TU	-2.3 [-3.1 ÷ -1.2]	-2.8 [-3.6 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Nuoro	Cennu1	TU	0.8 [-0.5 ÷ 2.2]	2.8 [-1.4 ÷ 9.3]	NON SIGNIFICATIVO
Ottana	Cenot3	IS	-0.3 [-0.4 ÷ -0.2]	-2.8 [-3.7 ÷ -1.9]	DECRESCENTE
Assemini	Cenas6	IS	-0.1 [-0.3 ÷ 0.1]	-0.6 [-1.9 ÷ 1]	NON SIGNIFICATIVO
Assemini	Cenas8	IS	0.2 [0.1 ÷ 0.4]	2.1 [0.8 ÷ 3.4]	CRESCENTE
Nuraminis	Cennm1	IR	-0.2 [-0.4 ÷ -0.1]	-2 [-3.2 ÷ -0.6]	DECRESCENTE

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione ($\% \text{y}^{-1}$)	Trend
Sarroch	Censa1	IS	-0.1 [-0.3 ÷ 0]	-1.5 [-2.6 ÷ -0.1]	DECRESCENTE
Sarroch	Censa2	IS	0 [-0.1 ÷ 0.1]	0.2 [-1 ÷ 1.2]	NON SIGNIFICATIVO
Villasor	Cenvs1	FS	-0.4 [-0.7 ÷ -0.2]	-2.9 [-3.9 ÷ -1.7]	DECRESCENTE
Portoscuso	Cenps4	IS	-0.5 [-0.6 ÷ -0.4]	-5 [-5.5 ÷ -3.9]	DECRESCENTE
Portoscuso	Cenps6	IS	-0.5 [-0.6 ÷ -0.4]	-4.8 [-5.3 ÷ -4.1]	DECRESCENTE
Portoscuso	Cenps7	IS	0.4 [0 ÷ 0.8]	2.8 [-0.3 ÷ 7.8]	NON SIGNIFICATIVO
Sant'antioco	Censt1	FR	-0.1 [-0.2 ÷ 0.1]	-1.9 [-3.9 ÷ 1.2]	NON SIGNIFICATIVO

Tabella 3 – NO_x , 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Sono riportati in grassetto i casi statisticamente significativi ($p < 0,05$): in rosso i casi di trend crescente, e in nero i casi di trend decrescente. Nei restanti casi il trend non risulta statisticamente significativo.

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione ($\% \text{y}^{-1}$)	Trend
Aosta	Aosta (Piazza Plouves)	FU	-2 [-2.6 ÷ -1.5]	-2.7 [-3.3 ÷ -2]	DECRESCENTE
La Thuile	La Thuile	FR	-0.6 [-1.1 ÷ -0.4]	-7.8 [-11.6 ÷ -5.5]	DECRESCENTE
Varese	Varese - Via Vidoletti	FS	0.1 [-0.5 ÷ 0.7]	0.2 [-1 ÷ 1.4]	NON SIGNIFICATIVO
Busto Arsizio	Busto Arsizio - Accam	FS	-2.7 [-3.6 ÷ -2]	-3.1 [-3.8 ÷ -2.3]	DECRESCENTE
Colico	Colico	FS	-0.9 [-1.4 ÷ -0.4]	-1.7 [-2.7 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Lecco	Lecco Via Amendola	TU	-3.6 [-5 ÷ -2]	-2.6 [-3.3 ÷ -1.5]	DECRESCENTE
Merate	Merate	TU	-6.3 [-8 ÷ -5]	-3.7 [-4.5 ÷ -3.1]	DECRESCENTE
Arconate	Arconate	FS	-1.8 [-2.3 ÷ -1.3]	-3 [-3.6 ÷ -2.3]	DECRESCENTE
Pioltello	Limite	FU	-4.5 [-5.6 ÷ -3.5]	-3.3 [-3.9 ÷ -2.7]	DECRESCENTE
Milano	Milano - V.Le Marche	TU	-3 [-4.5 ÷ -1.3]	-1.6 [-2.3 ÷ -0.8]	DECRESCENTE
Meda	Meda	TU	-2.1 [-2.7 ÷ -1.6]	-2 [-2.4 ÷ -1.5]	DECRESCENTE
Rho	Rho Centro	FU	-3.4 [-5.2 ÷ -2]	-2.6 [-3.8 ÷ -1.6]	DECRESCENTE
Milano	Milano - Senato	TU	-1.7 [-3 ÷ -0.3]	-1.3 [-2 ÷ -0.2]	DECRESCENTE
Sesto San Giovanni	Sesto S.Giovanni	TU	-3.4 [-5 ÷ -2]	-2.3 [-3.2 ÷ -1.5]	DECRESCENTE
Milano	Milano - Verziere	TU	-4 [-4.9 ÷ -3.2]	-3 [-3.6 ÷ -2.5]	DECRESCENTE
San Giuliano Milanese	S. Giuliano	TU	-6.1 [-7.3 ÷ -4.9]	-3.7 [-4.4 ÷ -3.1]	DECRESCENTE
Turbigo	Turbigo	FU	-5.8 [-7.1 ÷ -4.5]	-6.6 [-7.3 ÷ -5.6]	DECRESCENTE
Osio Sotto	Osio Sotto	FS	0.1 [-0.5 ÷ 0.8]	0.1 [-0.8 ÷ 1.3]	NON SIGNIFICATIVO
Brescia	Brescia - Broletto	TU	-1.7 [-2.5 ÷ -0.8]	-1.7 [-2.3 ÷ -0.9]	DECRESCENTE
Gambara	Gambara	FR	-0.6 [-1.2 ÷ -0.1]	-1.2 [-2.2 ÷ -0.2]	DECRESCENTE
Lonato	Lonato	FU	-1.8 [-2.4 ÷ -1.3]	-3.4 [-4.3 ÷ -2.6]	DECRESCENTE
Rezzato	Rezzato	IS	-2.5 [-3.2 ÷ -1.9]	-2.8 [-3.5 ÷ -2.3]	DECRESCENTE
Crema	Via XI Febbraio	FU	-1.3 [-1.9 ÷ -0.8]	-1.9 [-2.6 ÷ -1.2]	DECRESCENTE
Cremona	P.Zza Cadorna	TU	-2.1 [-2.7 ÷ -1.6]	-2.7 [-3.3 ÷ -2.2]	DECRESCENTE
Rovereto	Rovereto Lgp	FU	-1.4 [-1.9 ÷ -1]	-2.2 [-2.8 ÷ -1.6]	DECRESCENTE
Monfalcone	Monfalcone	TU	0.1 [-0.3 ÷ 0.5]	0.3 [-0.9 ÷ 1.9]	NON SIGNIFICATIVO
Trieste	Piazza Vico	TU	-4.5 [-6.7 ÷ -2.6]	-3 [-4.4 ÷ -1.9]	DECRESCENTE
Trieste	Via Carpineto	IS	0.8 [-0.2 ÷ 1.9]	2.1 [-0.4 ÷ 5.2]	NON SIGNIFICATIVO
Brugnera	Brugnera	IS	-2.7 [-3.6 ÷ -1.8]	-3.5 [-4.3 ÷ -2.4]	DECRESCENTE
Pordenone	Pordenone Centro	TU	-6.3 [-7.3 ÷ -5.2]	-4.8 [-5.3 ÷ -4.1]	DECRESCENTE
Prata Di Pordenone	Prata Di Pordenone	TS	-3.8 [-5 ÷ -2.8]	-3.7 [-4.5 ÷ -2.9]	DECRESCENTE
Firenze	Fi-Bassi	FU	-2.1 [-3.1 ÷ -1]	-2.7 [-3.7 ÷ -1.4]	DECRESCENTE
Firenze	Fi-Gramsci	TU	3.6 [1.4 ÷ 5.7]	2 [0.7 ÷ 3.3]	CRESCENTE
Scandicci	Fi-Scandicci	FU	-3.7 [-4.5 ÷ -2.8]	-4 [-4.7 ÷ -3.2]	DECRESCENTE
Pisa	Pi-Borghetto	TU	-2.2 [-2.9 ÷ -1.6]	-2.5 [-3.1 ÷ -1.9]	DECRESCENTE
Pisa	Pi-Passi	FU	-0.7 [-1.1 ÷ -0.3]	-1.8 [-2.7 ÷ -0.9]	DECRESCENTE
Perugia	P.S.Giovanni	TU	-0.3 [-0.8 ÷ 0.2]	-0.5 [-1.3 ÷ 0.4]	NON SIGNIFICATIVO
Civita Castellana	Civita Castellana	FU	-5.4 [-6.5 ÷ -4.3]	-4.8 [-5.5 ÷ -4.1]	DECRESCENTE
Leonessa	Leonessa	FR	0 [-0.1 ÷ 0.1]	0 [-1 ÷ 1.1]	NON SIGNIFICATIVO
Rieti	Rieti	TU	-0.7 [-1.1 ÷ -0.3]	-1.5 [-2.2 ÷ -0.6]	DECRESCENTE
Allumiere	Allumiere	FR	0 [-0.1 ÷ 0.1]	0.1 [-0.5 ÷ 1.1]	NON SIGNIFICATIVO
Roma	Castel Di Guido	FR	-0.2 [-0.6 ÷ 0]	-1 [-2.2 ÷ 0.1]	NON SIGNIFICATIVO
Roma	Cinecitta	FU	-3.1 [-4 ÷ -2.3]	-2.8 [-3.5 ÷ -2.2]	DECRESCENTE
Civitavecchia	Civitavecchia	FU	0.4 [0 ÷ 1.1]	1.2 [-0.1 ÷ 3.1]	NON SIGNIFICATIVO
Colleferro	Colleferro Oberdan	IS	-2.7 [-3.4 ÷ -2]	-2.7 [-3.3 ÷ -2.1]	DECRESCENTE
Colleferro	Colleferro Europa	IS	-3.4 [-3.9 ÷ -2.9]	-3.7 [-4.1 ÷ -3.2]	DECRESCENTE
Guidonia Montecelio	Guidonia	TS	-2.2 [-2.8 ÷ -1.6]	-2.8 [-3.5 ÷ -2.2]	DECRESCENTE
Roma	L.Go Magna Grecia	TU	-6 [-7 ÷ -5]	-3.7 [-4.1 ÷ -3.1]	DECRESCENTE
Roma	Tenuta Del Cavaliere	FS	0.1 [-0.6 ÷ 0.8]	0.1 [-0.9 ÷ 1.4]	NON SIGNIFICATIVO
Roma	Villa Ada	FU	-0.3 [-0.9 ÷ 0.5]	-0.4 [-1.3 ÷ 0.8]	NON SIGNIFICATIVO

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione ($\% \text{y}^{-1}$)	Trend
Frosinone	Frosinone Scalo	TU	-8.7 [-10 ÷ -7.6]	-4.8 [-5.4 ÷ -4.4]	DECRESCENTE
Roma	L.Go Perestrello	FU	-2.3 [-3.2 ÷ -1.4]	-2.1 [-2.9 ÷ -1.4]	DECRESCENTE
Cassino	Cassino	TU	-3.2 [-4.1 ÷ -2.5]	-2.6 [-3.1 ÷ -2.1]	DECRESCENTE
Aprilia	Aprilia 2	FU	-1 [-1.3 ÷ -0.8]	-2.5 [-3.1 ÷ -1.9]	DECRESCENTE
Latina	Lt Tasso	FU	-1.8 [-2.4 ÷ -1.3]	-2.7 [-3.4 ÷ -2]	DECRESCENTE
Alatri	Alatri	FU	-0.7 [-1.5 ÷ 0]	-0.7 [-1.4 ÷ 0]	NON SIGNIFICATIVO
Anagni	Anagni	FU	-2.6 [-3.2 ÷ -2.2]	-3.5 [-4 ÷ -2.9]	DECRESCENTE
Ceccano	Ceccano	TU	-3.5 [-4.2 ÷ -2.8]	-3.6 [-4.1 ÷ -3]	DECRESCENTE
Ferentino	Ferentino	TU	-5 [-6.6 ÷ -4]	-4.1 [-5 ÷ -3.4]	DECRESCENTE
Fontechiari	Fontechiari	FR	-0.4 [-0.5 ÷ -0.4]	-3.6 [-4.1 ÷ -3.1]	DECRESCENTE
Pescara	Piazza Grue	TU	-5.8 [-7.7 ÷ -4.3]	-6.9 [-8.5 ÷ -5.5]	DECRESCENTE
Pescara	Corso Vit. Emanuele	TU	-10.2 [-12.6 ÷ -8.3]	-5.1 [-5.9 ÷ -4.4]	DECRESCENTE

Tabella 4 – CO, 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Sono riportati in grassetto i casi statisticamente significativi ($p < 0,05$): in rosso i casi di trend crescente, e in nero i casi di trend decrescente. Nei restanti casi il trend non risulta statisticamente significativo.

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione ($\% \text{y}^{-1}$)	Trend
Torino	Torino - Consolata	TU	-0.03 [-0.04 ÷ -0.01]	-1.9 [-3 ÷ -0.6]	DECRESCENTE
Torino	Torino - Rebaudengo	TU	-0.04 [-0.07 ÷ -0.01]	-2.4 [-4.3 ÷ -0.5]	DECRESCENTE
Cossato	Cossato - Pace	FU	0 [-0.01 ÷ 0]	-0.7 [-1.4 ÷ 0.1]	NON SIGNIFICATIVO
Aosta	Aosta (Piazza Plouves)	FU	-0.04 [-0.05 ÷ -0.03]	-4.8 [-5.3 ÷ -4.1]	DECRESCENTE
Busto Arsizio	Busto Arsizio - Accam	FS	-0.04 [-0.05 ÷ -0.03]	-6.5 [-7.4 ÷ -5.6]	DECRESCENTE
Lecco	Lecco Via Amendola	TU	-0.1 [-0.12 ÷ -0.08]	-7.4 [-8 ÷ -6.7]	DECRESCENTE
Merate	Merate	TU	-0.08 [-0.1 ÷ -0.07]	-7.4 [-8.5 ÷ -6.4]	DECRESCENTE
Pioltello	Limite	FU	-0.02 [-0.04 ÷ -0.01]	-2.2 [-3.8 ÷ -0.7]	DECRESCENTE
Milano	Milano - V.Le Marche	TU	-0.02 [-0.04 ÷ -0.01]	-1.5 [-2.7 ÷ -0.4]	DECRESCENTE
Rho	Rho Centro	FU	-0.03 [-0.05 ÷ -0.02]	-2.5 [-3.6 ÷ -1.3]	DECRESCENTE
Milano	Milano - Senato	TU	0.01 [0 ÷ 0.03]	1 [-0.4 ÷ 2.7]	NON SIGNIFICATIVO
Sesto San Giovanni	Sesto S.Giovanni	TU	-0.07 [-0.09 ÷ -0.06]	-5 [-5.8 ÷ -4.1]	DECRESCENTE
San Giuliano Milanese	S. Giuliano	TU	-0.03 [-0.05 ÷ 0]	-1.9 [-3.6 ÷ -0.1]	DECRESCENTE
Rezzato	Rezzato	IS	0 [-0.02 ÷ 0.01]	-0.8 [-2.8 ÷ 1]	NON SIGNIFICATIVO
Pavia	Pavia - P.Zza Minerva	TU	-0.17 [-0.19 ÷ -0.15]	-8 [-8.5 ÷ -7.3]	DECRESCENTE
Crema	Via Xi Febbraio	FU	-0.02 [-0.02 ÷ -0.01]	-2.4 [-2.8 ÷ -1.9]	DECRESCENTE
Cremona	P.Zza Cadorna	TU	-0.03 [-0.04 ÷ -0.03]	-4.4 [-5.2 ÷ -3.6]	DECRESCENTE
Lodi	Lodi	TU	-0.06 [-0.08 ÷ -0.04]	-4.4 [-5.5 ÷ -3.2]	DECRESCENTE
Verona	Vr - Borgo Milano	TU	-0.06 [-0.07 ÷ -0.05]	-6.5 [-7 ÷ -5.8]	DECRESCENTE
Rovigo	Ro - Centro	TU	-0.03 [-0.04 ÷ -0.03]	-4.5 [-5 ÷ -3.9]	DECRESCENTE
Udine	Manzoni	TU	-0.03 [-0.03 ÷ -0.02]	-3.6 [-4.3 ÷ -3.1]	DECRESCENTE
Udine	Osoppo Urban	TU	-0.1 [-0.12 ÷ -0.09]	-7 [-7.5 ÷ -6.5]	DECRESCENTE
Monfalcone	Monfalcone	TU	-0.02 [-0.03 ÷ -0.01]	-4.4 [-5.3 ÷ -3]	DECRESCENTE
Trieste	Monte San Pantaleone	FS	-0.02 [-0.03 ÷ -0.01]	-4.1 [-5.4 ÷ -2.1]	DECRESCENTE
Trieste	Via Battisti	TU	-0.09 [-0.12 ÷ -0.06]	-5.8 [-7.4 ÷ -4.5]	DECRESCENTE
Trieste	Piazza Liberta	TU	-0.02 [-0.04 ÷ 0.02]	-2 [-4.4 ÷ 2.7]	NON SIGNIFICATIVO
Trieste	Via Svevo	IU	-0.01 [-0.01 ÷ 0]	-0.9 [-1.8 ÷ 0.5]	NON SIGNIFICATIVO
Albisola Superiore	Corso Ferrari	TU	0 [-0.01 ÷ 0.01]	-0.8 [-2.9 ÷ 2]	NON SIGNIFICATIVO
Reggio Nell'emilia	Timavo	TU	-0.08 [-0.09 ÷ -0.07]	-6.6 [-7.1 ÷ -6.2]	DECRESCENTE
Firenze	Fi-Gramsci	TU	-0.04 [-0.05 ÷ -0.04]	-2.9 [-3.4 ÷ -2.4]	DECRESCENTE
Pisa	Pi-Borghetto	TU	-0.06 [-0.07 ÷ -0.05]	-5.6 [-6.7 ÷ -4.8]	DECRESCENTE
Rieti	Rieti	TU	-0.04 [-0.05 ÷ -0.03]	-5.3 [-5.9 ÷ -4.7]	DECRESCENTE
Civitavecchia	Civitavecchia	FU	-0.03 [-0.03 ÷ -0.02]	-4.4 [-5 ÷ -3.9]	DECRESCENTE
Roma	Villa Ada	FU	-0.03 [-0.03 ÷ -0.03]	-4.3 [-4.7 ÷ -3.9]	DECRESCENTE
Frosinone	Frosinone Scalo	TU	-0.1 [-0.11 ÷ -0.09]	-6.4 [-6.8 ÷ -6]	DECRESCENTE
Ferentino	Ferentino	TU	-0.11 [-0.12 ÷ -0.1]	-8.3 [-8.6 ÷ -7.7]	DECRESCENTE
Pescara	Viale G. Di Annunzio	TU	-0.12 [-0.14 ÷ -0.11]	-7.6 [-8.1 ÷ -7]	DECRESCENTE
Pescara	Corso Vit. Emanuele	TU	-0.04 [-0.05 ÷ -0.03]	-4.3 [-5.4 ÷ -3.1]	DECRESCENTE
Nuoro	Cennu1	TU	-0.11 [-0.13 ÷ -0.09]	-6.8 [-7.2 ÷ -5.8]	DECRESCENTE
Nuoro	Cennu2	TU	-0.09 [-0.11 ÷ -0.06]	-5.8 [-6.6 ÷ -4.5]	DECRESCENTE
Assemini	Cenas8	IS	0 [0 ÷ 0.01]	0.8 [-0.8 ÷ 2.7]	NON SIGNIFICATIVO
Portoscuso	Cenps4	IS	-0.01 [-0.01 ÷ 0]	-2.5 [-3.5 ÷ -1.5]	DECRESCENTE

Tabella 5 – O₃ (SOMO0), 2003 – 2012. Risultati dell'analisi del trend con il test di Kendall corretto per la stagionalità. Sono riportati in grassetto i casi statisticamente significativi ($p < 0,05$): in rosso i casi di trend crescente, e in nero i casi di trend decrescente. Nei restanti casi il trend non risulta statisticamente significativo.

Comune	Stazione	tipo stazione	Slope ($\mu\text{g m}^{-3} \text{y}^{-1}$)	Variazione (% y^{-1})	Trend
Pieve Vergonte	Pieve Vergonte - Industria	FS	-2.4 [-5.7 ÷ 0.9]	-2 [-4.2 ÷ 0.9]	NON SIGNIFICATIVO
Saliceto	Saliceto - Moizo	FR	-3.1 [-4.7 ÷ -1.4]	-2.4 [-3.3 ÷ -1.2]	DECRESCENTE
Torino	Torino - Lingotto	FU	-3.2 [-5.4 ÷ -1.2]	-2.6 [-4 ÷ -1.1]	DECRESCENTE
Vinovo	Vinovo - Volontari	FS	-1.4 [-6.2 ÷ 1]	-1.2 [-4.7 ÷ 1]	NON SIGNIFICATIVO
Biella	Biella - Sturzo	FU	-2.3 [-6.9 ÷ 0.2]	-1.8 [-5 ÷ 0.2]	NON SIGNIFICATIVO
Cossato	Cossato - Pace	FU	-2.4 [-5 ÷ -0.1]	-1.8 [-3.6 ÷ -0.1]	DECRESCENTE
Aosta	Aosta (Mont Fleury)	FS	-3.1 [-4.1 ÷ -1]	-2.5 [-3.3 ÷ -0.9]	DECRESCENTE
Aosta	Aosta (Piazza Plouves)	FU	0.1 [-1.4 ÷ 1.6]	0.1 [-1.4 ÷ 2]	NON SIGNIFICATIVO
La Thuile	La Thuile	FR	1.2 [-2.9 ÷ 3.2]	1.3 [-2.7 ÷ 4.4]	NON SIGNIFICATIVO
Varese	Varese - Via Vidoletti	FS	-2.1 [-5 ÷ -0.1]	-1.6 [-3.5 ÷ -0.1]	DECRESCENTE
Colico	Colico	FS	-0.9 [-3.1 ÷ 1.4]	-0.8 [-2.6 ÷ 1.3]	NON SIGNIFICATIVO
Bormio	Bormio	FU	-2.8 [-5.6 ÷ 0.6]	-2.4 [-4 ÷ 0.6]	NON SIGNIFICATIVO
Pavia	Pavia - Via Folperti	FU	-1.5 [-6 ÷ 1.8]	-1.3 [-4.4 ÷ 1.7]	NON SIGNIFICATIVO
Crema	Via Xi Febbraio	FU	-1.1 [-3.9 ÷ 0.1]	-0.9 [-3 ÷ 0.1]	NON SIGNIFICATIVO
Brunico	Br1 Brunico	TU	0.5 [-0.5 ÷ 1.7]	0.6 [-0.5 ÷ 2.3]	NON SIGNIFICATIVO
Renon	Re1 Renon	FR	-0.6 [-2.8 ÷ 0.1]	-0.5 [-2.1 ÷ 0.1]	NON SIGNIFICATIVO
Borgo Valsugana	Borgo Val	FU	-0.2 [-3.7 ÷ 1.6]	-0.2 [-3.4 ÷ 1.8]	NON SIGNIFICATIVO
Vezzano	Monte Gaza	FR	0.6 [-5.1 ÷ 4.7]	0.5 [-3.6 ÷ 4.8]	NON SIGNIFICATIVO
Riva Del Garda	Riva Gar	FU	0.9 [-2 ÷ 2.3]	0.9 [-1.9 ÷ 2.5]	NON SIGNIFICATIVO
Rovereto	Rovereto Lgp	FU	-0.7 [-2.6 ÷ 2.4]	-0.6 [-2.1 ÷ 2.5]	NON SIGNIFICATIVO
Verona	Vr - Cason	FS	-1.2 [-3.7 ÷ 0.6]	-1 [-2.8 ÷ 0.5]	NON SIGNIFICATIVO
Venezia	Ve - Parco Bissuola	FU	2.1 [-3.6 ÷ 4]	2.3 [-3.3 ÷ 5.1]	NON SIGNIFICATIVO
Venezia	Ve - Sacca Fisola	FU	-1.4 [-2.7 ÷ 1.4]	-1.3 [-2.4 ÷ 1.5]	NON SIGNIFICATIVO
Padova	Pd - Mandria	FU	-0.2 [-3.5 ÷ 2.5]	-0.2 [-2.8 ÷ 2.7]	NON SIGNIFICATIVO
Udine	Cairolì	FU	-1.6 [-4.4 ÷ 2.6]	-1.3 [-3.4 ÷ 2.9]	NON SIGNIFICATIVO
Udine	S.Osvaldo	FS	0.3 [-2.9 ÷ 2.7]	0.2 [-2.3 ÷ 2.7]	NON SIGNIFICATIVO
Trieste	Monte San Pantaleone	FS	-1.2 [-4.1 ÷ -0.6]	-1.1 [-3.4 ÷ -0.6]	DECRESCENTE
Pordenone	Pordenone Centro	TU	-0.2 [-3 ÷ 1.9]	-0.2 [-2.8 ÷ 2.3]	NON SIGNIFICATIVO
Claut	Località Porto Pinedo	FR	-2.2 [-6.7 ÷ 1.1]	-1.9 [-5.4 ÷ 1.2]	NON SIGNIFICATIVO
Cengio	Campo Di Calcio	FR	-0.6 [-2 ÷ 3]	-0.6 [-1.8 ÷ 4.1]	NON SIGNIFICATIVO
Genova	Corso Firenze - Genova	FU	0.7 [-2.5 ÷ 5.5]	0.8 [-2.4 ÷ 8.2]	NON SIGNIFICATIVO
Genova	Quarto - Genova	FU	1.5 [-0.5 ÷ 5.2]	1.5 [-0.5 ÷ 6.5]	NON SIGNIFICATIVO
Forlì	Parco Resistenza	FU	-0.9 [-3.1 ÷ 0.8]	-0.9 [-2.7 ÷ 0.8]	NON SIGNIFICATIVO
Livorno	Li-Gabbro	FR	-3 [-7 ÷ 0.9]	-2.5 [-5.4 ÷ 1]	NON SIGNIFICATIVO
Pisa	Pi-Passi	FU	-0.9 [-2.2 ÷ 0.7]	-0.9 [-2.2 ÷ 0.8]	NON SIGNIFICATIVO
Perugia	P.S.Giovanni	TU	0.4 [-1 ÷ 2.8]	0.4 [-0.9 ÷ 3.2]	NON SIGNIFICATIVO
Roma	Castel Di Guido	FR	-1.4 [-4.2 ÷ 0]	-1.5 [-3.7 ÷ 0]	NON SIGNIFICATIVO
Colleferro	Colleferro Oberdan	IS	-0.4 [-6.2 ÷ 2.4]	-0.4 [-6.2 ÷ 3.2]	NON SIGNIFICATIVO
Roma	Villa Ada	FU	-1.6 [-5.5 ÷ 3.1]	-1.5 [-4.8 ÷ 3.9]	NON SIGNIFICATIVO
Roma	L.Go Perestrello	FU	0.3 [-3.3 ÷ 3.1]	0.3 [-3 ÷ 3.6]	NON SIGNIFICATIVO
Fontechiari	Fontechiari	FR	1.6 [-0.4 ÷ 4.4]	1.6 [-0.4 ÷ 5.2]	NON SIGNIFICATIVO
Nuoro	Cennu2	TU	-0.7 [-7.1 ÷ 2]	-0.7 [-6.8 ÷ 2.8]	NON SIGNIFICATIVO
Ottana	Cenot3	IS	1 [-2.5 ÷ 3]	1 [-2.4 ÷ 3.6]	NON SIGNIFICATIVO
Assemini	Cenas8	IS	-1.6 [-3.3 ÷ 2.5]	-1.6 [-3.1 ÷ 3.2]	NON SIGNIFICATIVO
Sarroch	Censa2	IS	-0.3 [-5.8 ÷ 4.9]	-0.3 [-5.7 ÷ 8.2]	NON SIGNIFICATIVO
Portoscuso	Cenps7	IS	1.7 [-2.2 ÷ 5.3]	2.1 [-2.4 ÷ 8.1]	NON SIGNIFICATIVO

