

DIPARTIMENTO TEMATICO "SISTEMI PREVISIONALI"

Struttura Semplice 03 "Qualità dell'Aria"

OGGETTO:

**PROGETTO DI STUDIO DELLE SORGENTI DI INQUINAMENTO
 ATMOSFERICO NEL TERRITORIO CIRCOSTANTE LA CENTRALE
 TERMOELETTRICA DI IRIDE "TORINO NORD"**

**STUDIO MODELLISTICO
 SULL'AREA DI SAVONERA**

Elaborazioni modellistiche emissive	Francesca Bissardella, Valeria Garbero, Stefania Ghigo		
Elaborazioni modellistiche meteorologiche e dispersive	Valeria Garbero		
Redazione	Roberta De Maria, Valeria Garbero	Data: 31 MAG. 2013	Firma: <i>Roberta De Maria</i>
Coordinamento	Coll. Profess. Sanit. Esperto Roberta De Maria	Data: 31 MAG. 2013	Firma: <i>Roberta De Maria</i>
Verifica	Responsabile S.S. Qualità dell'Aria Mauro M. Grosa	Data: 31 MAG. 2013	Firma: <i>Mauro M. Grosa</i>
Approvazione	Responsabile Dipartimento Sistemi Previsionali Anna Maria Gaffodio	Data: 31 MAG. 2013	Firma: <i>Anna Maria Gaffodio</i>

<u>PREMESSA.....</u>	<u>3</u>
<u>DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA’.....</u>	<u>3</u>
<u>LEGISLAZIONE DI RIFERIMENTO.....</u>	<u>4</u>
<u>DESCRIZIONE DELLA CATENA MODELLISTICA.....</u>	<u>5</u>
<u>SCELTA DEL PERIODO DI SIMULAZIONE.....</u>	<u>8</u>
<u>DATI DI INPUT AL SISTEMA MODELLISTICO.....</u>	<u>12</u>
<u>Area di studio.....</u>	<u>12</u>
<u>Dati di input geografico.....</u>	<u>13</u>
<u>Dati di input meteorologico.....</u>	<u>15</u>
<u>Dati di input emissivo.....</u>	<u>16</u>
Emissioni del macrosettore 02 – Riscaldamento residenziale.....	17
Emissioni del macrosettore 07 – Trasporto su strada.....	21
Emissioni da impianti industriali.....	30
Emissioni della Centrale Termoelettrica Torino Nord.....	32
Emissioni complessive sul dominio.....	35
<u>SIMULAZIONI MODELLISTICHE.....</u>	<u>36</u>
<u>Ricostruzione meteorologica con MINERVE/SWIFT e SurfPRO.....</u>	<u>36</u>
<u>Risultati delle simulazioni di dispersione.....</u>	<u>39</u>
<u>Conclusioni.....</u>	<u>46</u>
<u>APPROFONDIMENTI.....</u>	<u>48</u>
Cluster analysis applicata al calcolo delle modulazioni temporali del traffico.....	48
Valutazione dei parametri di performance sulla simulazione meteorologica.....	54

PREMESSA

Il presente documento si colloca nell'ambito della "Convenzione tra il Comune di Collegno e Arpa Piemonte per lo studio delle sorgenti di inquinamento atmosferico nel territorio circostante la centrale termoelettrica Torino Nord", approvata dal Comune di Collegno con Delibera di Giunta n. 88 del 27 aprile 2011 e successivamente da Arpa con la Determinazione n. 642 del 20 luglio 2011 della Struttura Complessa (di seguito SC) Dipartimento di Torino. La Convenzione prevedeva una serie di attività di monitoraggio ambientale e una Valutazione Ambientale Integrata del quartiere di Savonera che tenesse conto delle pressioni ambientali generate dalle varie sorgenti emmissive presenti nell'area circostante la Centrale termoelettrica Torino Nord. In particolare, il Piano di Fattibilità presentato dalla SC Dipartimento di Torino e allegato alla Determinazione che approvava la Convenzione, prevedeva di:

- determinare, prima e dopo l'entrata in funzione della Centrale Termoelettrica Torino Nord, le quantità relative delle componenti primaria e secondaria del particolato aerodisperso rilevato nell'area circostante il sito che avrebbe ospitato la centrale stessa;
- valutare, in relazione all'immissione di particolato atmosferico primario e di ossidi di azoto in aria ambiente, il contributo percentuale delle principali sorgenti emmissive presenti nella medesima area, compresa la Centrale Termoelettrica, attraverso la realizzazione di simulazioni modellistiche meteo-dispersive.

La progettazione dello studio di modellizzazione, la predisposizione e realizzazione dello stesso sono state condotte dal Dipartimento Sistemi Previsionali di Arpa Piemonte e sono oggetto della presente trattazione.

DESCRIZIONE DELLE ATTIVITA'

La valutazione della qualità dell'aria di un'area caratterizzata da morfologia e meteorologia complesse, che includa le varie sorgenti presenti nella stessa, può essere affrontata in termini generali secondo due approcci che prevedono l'impiego di due modelli dispersivi tridimensionali che presentano peculiarità differenti.

Il primo approccio consiste nello stimare le concentrazioni degli inquinanti primari e secondari previsti dalla normativa vigente attraverso la descrizione di tutte le sorgenti presenti nell'area di studio (lineari, areali e puntuali) e nell'applicazione di un modello euleriano a griglia in grado di descrivere il **trasporto**, la **dispersione** e la **trasformazione chimica** delle sostanze immesse in atmosfera. Questa scelta non permette di discriminare il contributo delle varie sorgenti in relazione alle concentrazioni finali, necessita di condizioni iniziali e al contorno (ovvero della conoscenza delle concentrazioni nel dominio di calcolo all'inizio della simulazione e l'evoluzione delle concentrazioni esterne al dominio tridimensionale per tutta la durata della modellizzazione); le

caratteristiche del modello inoltre non permettono di fornire risultati a risoluzione spaziale (dimensioni orizzontali delle celle di calcolo) elevata.

Con il secondo approccio è possibile simulare il **trasporto** e la **dispersione** degli inquinanti considerati come inerti (inquinanti primari o poco reattivi) considerando le sorgenti di maggior impatto emissivo sull'area di studio attraverso l'applicazione di un modello tridimensionale lagrangiano a particelle. Questo permette di conoscere, al termine della simulazione, la concentrazione in atmosfera associata ad ogni sorgente o, più in generale, ad ogni comparto emissivo (sorgenti puntuali anche considerate singolarmente, traffico, riscaldamento, ecc.), fornendo un dettaglio spaziale delle concentrazioni più elevato rispetto a quello del modello euleriano a griglia. Per limitare gli elevati tempi di calcolo necessari a questo tipo di modelli, legati alla gestione delle numerose particelle emesse dalle singole sorgenti e all'elevata risoluzione del grigliato di calcolo, vengono solitamente simulati pochi inquinanti e una limitata tipologia di sorgenti.

In questo studio, secondo quanto concordato da Arpa con il Comune di Collegno nella fase di stesura della Convenzione, si è privilegiato il secondo approccio, concentrando le attività riguardanti la descrizione delle sorgenti di **ossidi di azoto** e **particolato PM10 di origine primaria** più significative presenti sul territorio in esame e adottando una risoluzione spaziale più elevata che permettesse di stimare con maggior dettaglio le concentrazioni nell'area di Savonera. Le emissioni prese in esame sono quelle associate al traffico (urbano, extraurbano e autostradale), quelle attribuite al riscaldamento domestico e alle principali sorgenti puntuali presenti nel dominio, inclusa la Centrale Termoelettrica Torino Nord. In una prima fase si è quindi provveduto ad individuare il periodo di simulazione e a definire il dominio di calcolo, in funzione della distribuzione spaziale delle sorgenti da considerare; successivamente sono stati selezionati i dati di ingresso al modello meteorologico e realizzate le relative simulazioni. Un'ampia parte delle attività è consistita nello studio e nell'elaborazione dei dati emissivi disponibili relativi alle sorgenti lineari e areali, ai quali è seguita la realizzazione delle simulazioni emissive. Infine sono state condotte le simulazioni dispersive con le post-elaborazioni dei risultati per la produzione di mappe tematiche e il calcolo degli indicatori (medie e valori massimi) sul periodo temporale esaminato.

LEGISLAZIONE DI RIFERIMENTO

La vigente normativa sulla qualità dell'aria (D. Lgs. 155/2010) prevede per il biossido e gli ossidi di azoto i limiti riportati nella tabella 1, mentre per il particolato PM10 quelli illustrati in tabella 2.

Il sistema modellistico utilizzato nel presente studio, non essendo basato su un codice dispersivo di tipo fotochimico, non permette il calcolo delle concentrazioni di inquinanti secondari; per tale ragione nella trattazione si farà riferimento agli ossidi di azoto totali (espressi come biossido di azoto) e al particolato PM10 di origine primaria.

VALORE LIMITE ORARIO PER LA PROTEZIONE DELLA SALUTE UMANA			
	Periodo di mediazione	Valore limite	Data alla quale il valore limite deve essere rispettato
Biossido di azoto NO ₂	1 ora	200 µg/m ³ da non superare più di 18 volte per anno civile	1° gennaio 2010
VALORE LIMITE ANNUALE PER LA PROTEZIONE DELLA SALUTE UMANA			
	Periodo di mediazione	Valore limite	Data alla quale il valore limite deve essere rispettato
Biossido di azoto NO ₂	anno civile	40 µg/m ³	1° gennaio 2010
VALORE LIMITE ANNUALE PER LA PROTEZIONE DELLA VEGETAZIONE			
	Periodo di mediazione	Valore limite	
Ossidi di azoto NO _x	anno civile	30 µg/m ³	
SOGLIA DI ALLARME			
Biossido di azoto NO ₂	400 µg/m ³ misurati su tre ore consecutive in località rappresentative della qualità dell'aria su almeno 100 km ² oppure una zona o un agglomerato completi, se tale zona o agglomerati sono meno estesi		

Tabella 1: Limiti previsti dal D. Lgs. 155/2010 per il biossido di azoto e gli ossidi di azoto

VALORE LIMITE GIORNALIERO			
	Periodo di mediazione	Valore limite	Data alla quale il valore limite deve essere rispettato
Particolato PM10	24 ore	50 µg/m ³ da non superare più di 35 volte per anno civile	In vigore dal 1° gennaio 2005
VALORE LIMITE ANNUALE			
	Periodo di mediazione	Valore limite	Data alla quale il valore limite deve essere rispettato
Particolato PM10	anno civile	40 µg/m ³	In vigore dal 1° gennaio 2005

Tabella 2: Limiti previsti dal D. Lgs. 155/2010 per il particolato PM10

DESCRIZIONE DELLA CATENA MODELLISTICA

L'individuazione della tipologia di modelli di dispersione da utilizzare nella valutazione delle ricadute al suolo di inquinanti aerodispersi viene effettuata sulla base di caratteristiche quali la tipologia delle sostanze in esame, le dimensioni dell'area di studio, le sue caratteristiche morfologiche e meteorologiche e la durata del periodo da simulare.

La scelta di stimare l'impatto relativo delle principali sorgenti di inquinanti inerti presenti nell'area di studio in condizioni meteorologiche complesse come quelle dell'area torinese, influenzata dalla presenza delle Alpi a ovest e della collina ad est, rende opportuno l'utilizzo di un modello di dispersione tridimensionale lagrangiano a particelle in grado di riprodurre il trasporto e la dispersione di sostanze chimicamente inerti rilasciate in condizioni meteorologicamente complesse (calme di vento, flussi su topografia complessa), spesso caratterizzati da

disomogeneità spaziali e temporali delle variabili meteo-diffusive. Il codice, incluso nel sistema modellistico di Arpa, è in grado di simulare emissioni da sorgenti puntuali, areali o lineari, sia continue che discontinue. In un modello di tipo lagrangiano a particelle la dispersione dell'inquinante in atmosfera è simulata attraverso l'emissione di un certo numero di particelle virtuali, ognuna delle quali rappresenta una porzione di massa dell'inquinante; tali particelle seguono il moto turbolento delle particelle di aria nelle quali sono immerse, in modo che la loro distribuzione spaziale ad un certo istante permetta la determinazione della concentrazione della specie emessa.

I dati meteorologici in input al modello di dispersione vengono prodotti da un modello mass-consistent di tipo diagnostico, basato sulla conservazione della massa e sulla minimizzazione della divergenza, in grado di ricostruire campi di vento, temperatura e umidità tridimensionali in condizioni di orografia complessa a partire da informazioni relative alla topografia del dominio e alle principali grandezze meteorologiche al suolo ed in quota. Per quanto riguarda le variabili che descrivono la turbolenza atmosferica si fa ricorso ad un pre-processore meteorologico diagnostico che utilizza in ingresso i campi meteorologici elaborati dal modello mass-consistent, i dati di precipitazione, di copertura nuvolosa o di radiazione solare e un dataset di uso del suolo nel dominio di calcolo.

La catena modellistica adottata è conforme alle indicazioni delle "Linee Guida per la selezione ed applicazione dei modelli di dispersione atmosferica per la valutazione della qualità dell'aria"¹, che prevede l'utilizzo di sistemi modellistici in grado di trattare situazioni territoriali ad orografia e anemologia complesse come quella in esame. In particolare, dovendo individuare il contributo in termini di ricaduta al suolo di una serie di sorgenti considerate anche separatamente, lo strumento più adeguato è rappresentato dal sistema tridimensionale "MINERVE/SWIFT/SurfPRO/EMMA-Emission Manager/TREFIC/SPRAY" (Arianet S.r.l.). Tale strumento è idoneo a soddisfare non solo le esigenze di complessità dell'area analizzata ad elevata risoluzione ma è anche in grado di descrivere in modo completo e accurato i fenomeni dispersivi che si verificano in atmosfera per inquinanti considerati come inerti.

La catena modellistica (il cui diagramma di flusso è riassunto in figura 1) è costituita da:

- Moduli per la gestione di dati di input geografico (topografia e uso del suolo);
- Un modulo per la gestione dei dati meteorologici al suolo e di profilo necessari ai modello diagnostico MINERVE/SWIFT;
- MINERVE/SWIFT 7.1 (Aria Technologies), modello meteorologico mass-consistent di tipo diagnostico, basato sulla conservazione della massa e sulla minimizzazione della divergenza, necessari alla ricostruzione dei campi di vento, temperatura e umidità tridimensionali in condizioni di orografia complessa;

¹ Quaderno RTI CTN_ACE 4/2001 – ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente)

- SurfPRO3 2.0 (Arianet), pre-processore meteorologico diagnostico, basato su metodi di bilancio energetico superficiale e sulla teoria della similarità di Monin-Obukhov, in grado di ricostruire campi bidimensionali e tridimensionali di parametri geofisici, flussi superficiali, parametri di scala del PBL, diffusività turbolente orizzontali e verticali, velocità di deposizione secca e umida per le diverse specie chimiche e di stimare il contributo eolico (erosione e/o risospensione) e marino alle emissioni di PM10. Gli input gestiti dal modello sono rappresentati dai campi meteorologici elaborati da MINERVE/SWIFT, dai dati osservati di precipitazione, dai campi di analisi di copertura nuvolosa o dai dati di radiazione solare e da un dataset di uso del suolo nel dominio di calcolo;
- EMMA - Emission Manager (Arianet, 2005), pre-processore che, a partire da informazioni relative alle sorgenti considerate, produce emissioni spazializzate sulla griglia di calcolo, modulate temporalmente su base oraria e compatibili con l'eventuale meccanismo chimico del modello di dispersione;
- TREFIC (Arianet, 2012), modello per la stima delle emissioni di inquinanti da traffico stradale, sulla base della metodologia ufficiale europea COPERT IV.
- SPRAY 3.1 (Arianet, Aria Technologies), modello di dispersione tridimensionale lagrangiano a particelle, in grado di riprodurre il trasporto, la dispersione, la deposizione secca e umida e il decadimento radioattivo di sostanze chimicamente inerti rilasciate in condizioni meteorologicamente complesse;
- applicativi di post-processamento dei risultati delle simulazioni modellistiche.

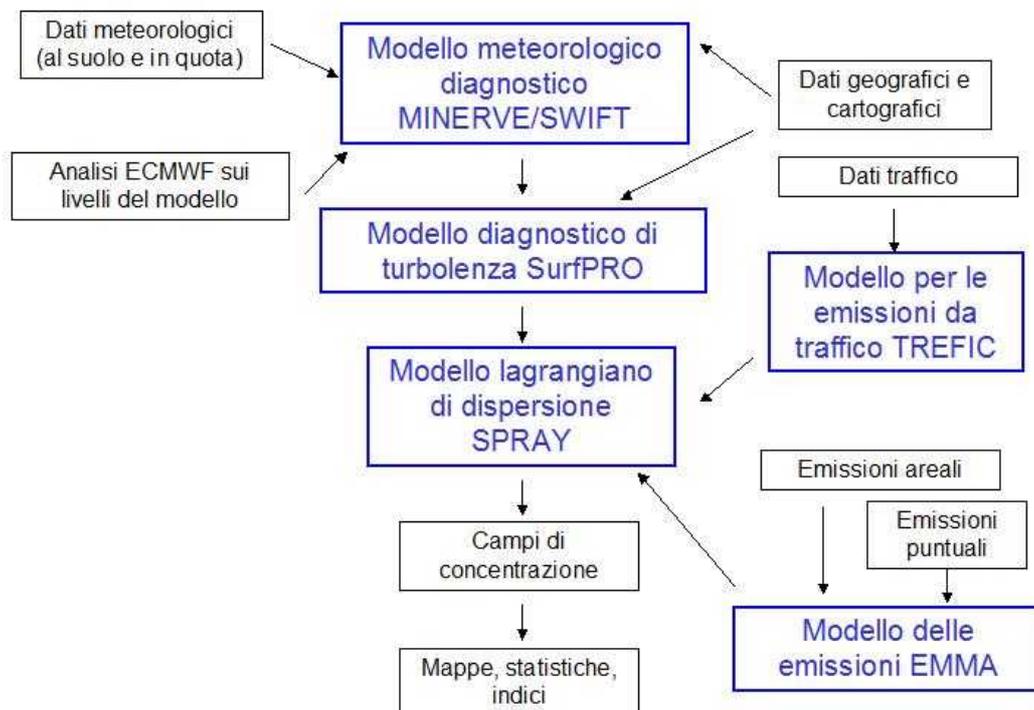


Figura 1. Il sistema modellistico

SCelta DEL PERIODO DI SIMULAZIONE

I criteri che hanno guidato l'individuazione del periodo di simulazione sono da un lato la necessità di rappresentare un episodio caratterizzato da condizioni meteorologiche sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti in atmosfera e, dall'altro, la disponibilità di misure di qualità dell'aria nell'area oggetto dello studio che permettano di valutare la bontà della ricostruzione modellistica attraverso il confronto con i dati osservati.

Nell'ambito della Convenzione fra il Comune di Collegno e Arpa, la SC Dipartimento di Torino ha provveduto a realizzare una serie di campagne di monitoraggio con Laboratorio Mobile nel periodo antecedente all'entrata in funzione della Centrale Termoelettrica Torino Nord, di cui una effettuata a Collegno in Via Boves nel periodo invernale dal 2 dicembre 2010 al 9 gennaio 2011. Nella scelta del periodo di simulazione si sono analizzati i dati acquisiti nel corso di questa campagna confrontandoli, su un arco temporale più ampio dal 1 ottobre 2010 al 28 febbraio 2011, con quelli registrati presso altre stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria della zona.

Il confronto delle serie orarie di biossido di azoto, riportato in figura 2, evidenzia la presenza di episodi caratterizzati da isolati superamenti del valore limite orario di $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nella città di Torino (29 ottobre 2010, 11, 17, 18, 24 dicembre 2010) mentre nel periodo di febbraio 2011 si osserva un periodo più critico che va dal 2 al 10 febbraio 2011 durante il quale si sono registrati superamenti presso alcune stazioni di Torino e in quella di Grugliasco. Non si sono verificati superamenti a Collegno nel sito di Via Boves.

Per quanto riguarda il particolato PM10, il cui andamento delle medie giornaliere è illustrato in figura 3, nel corso del periodo esaminato si sono verificati superamenti del valore limite della media giornaliera di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in tutti i punti di misura, incluso Collegno, con punte massime di oltre $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nelle stazioni della città di Torino in alcune giornate di dicembre 2010. Anche nel periodo fra il 31 gennaio e il 17 febbraio 2011 si osservano valori piuttosto elevati in molte stazioni. Il sito di Collegno, limitatamente al periodo di monitoraggio, riproduce bene l'andamento osservato nelle altre stazioni, sebbene con concentrazioni inferiori a quelle registrate a Torino e Borgaro ma superiori a quelle di Druento – La Mandria. Nella figura 3 sono riportate anche le precipitazioni giornaliere cumulate registrate presso la stazione di Torino Reiss Romoli, in corrispondenza delle quali si osservano significativi abbattimenti delle concentrazioni di particolato misurate.

Al fine di includere nel periodo di simulazione sia il monitoraggio condotto a Collegno sia periodi di particolare criticità nell'area metropolitana torinese, si è deciso di effettuare le simulazioni dal 1 dicembre 2010 al 28 febbraio 2011, comprendendo l'intero trimestre solitamente caratterizzato dalle concentrazioni più elevate per biossido di azoto e particolato PM10.

BIOSSIDO DI AZOTO

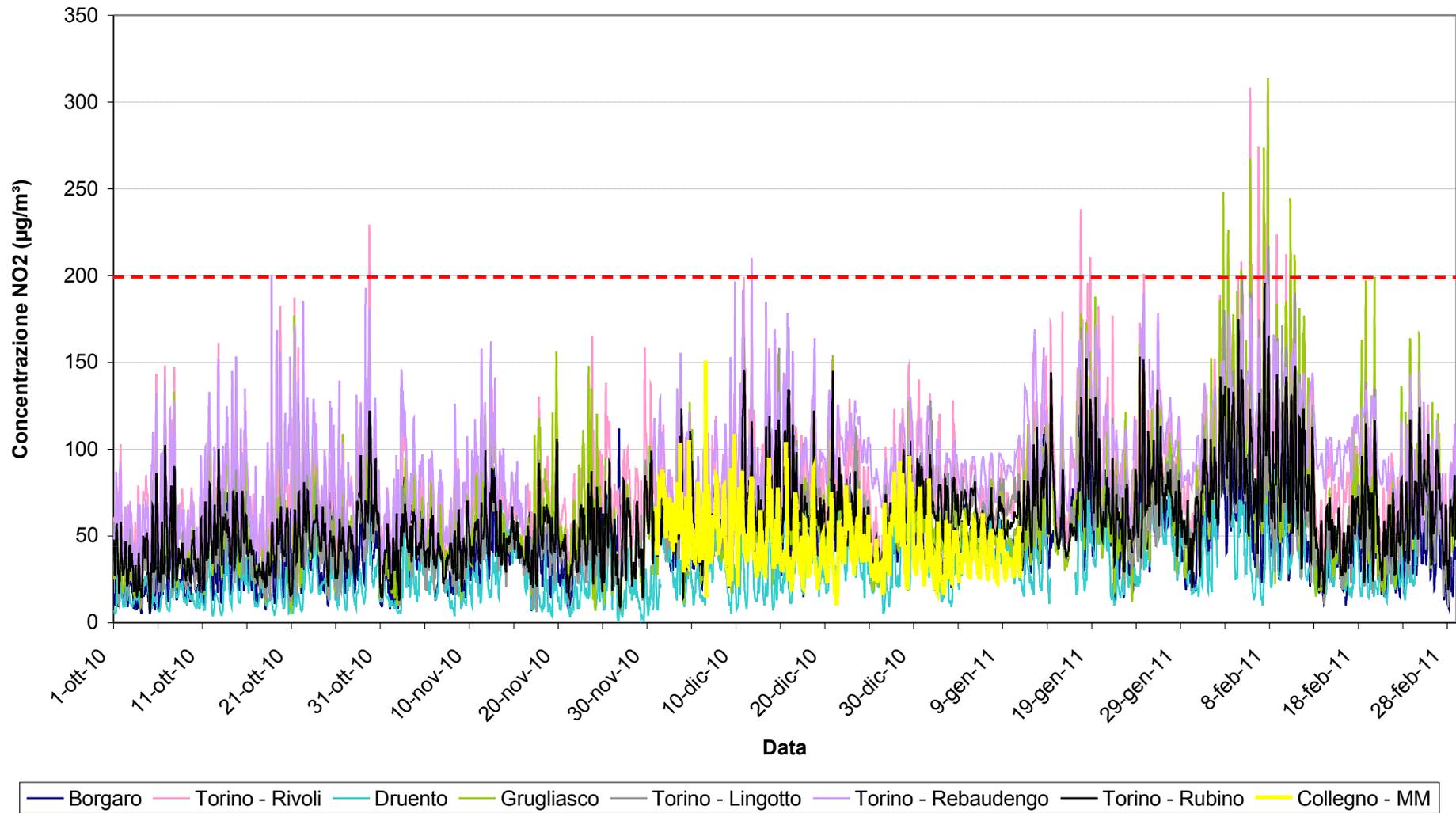


Figura 2: Medie orarie per il biossido di azoto NO₂ a Torino e comuni limitrofi

PARTICOLATO PM10

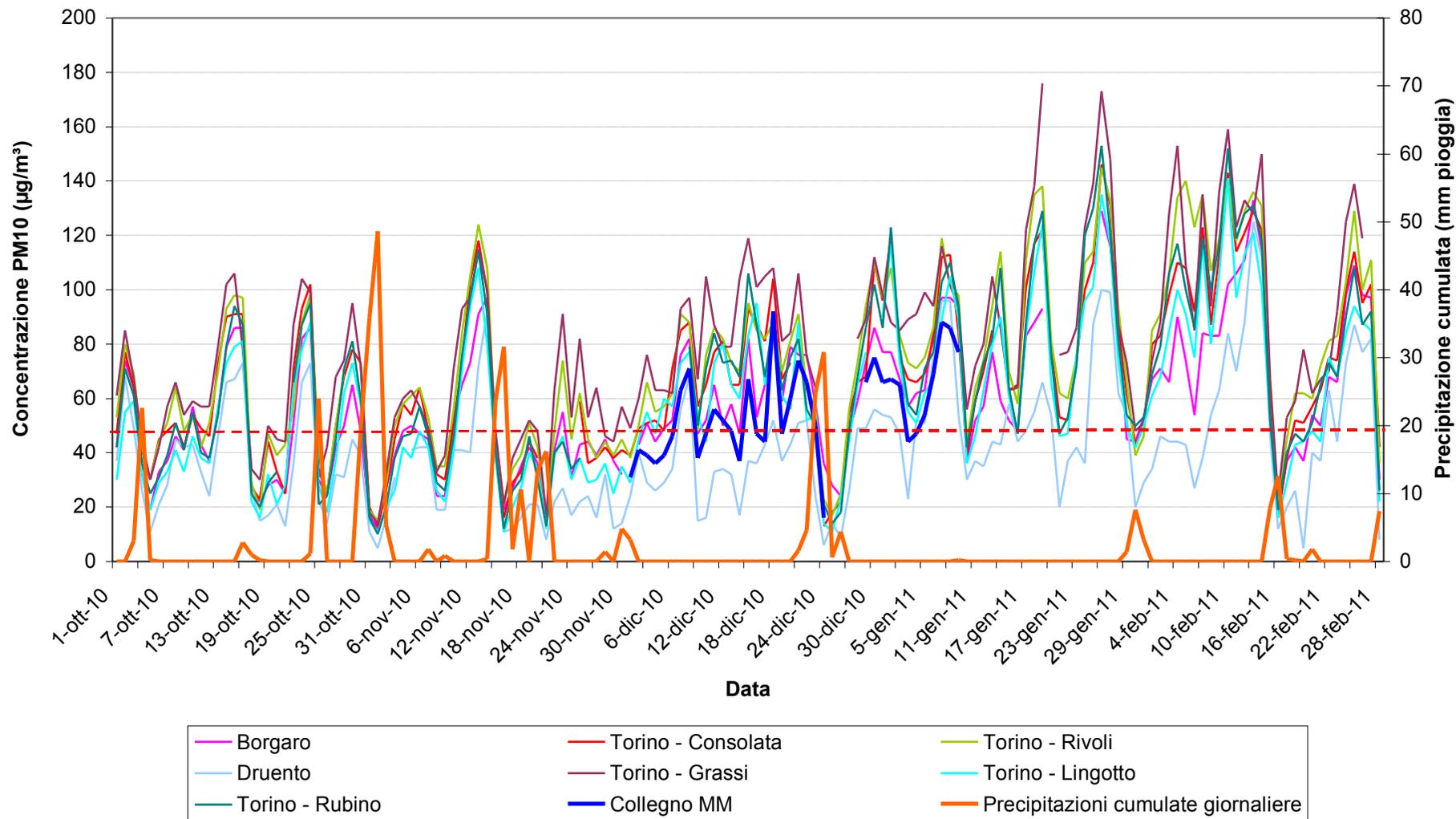


Figura 3: Medie giornaliere di particolato PM10 a Torino e comuni limitrofi e precipitazioni atmosferiche

DATI DI INPUT AL SISTEMA MODELLISTICO

Area di studio

L'area individuata per lo studio modellistico ha dimensioni pari a 14 x 14 km², è approssimativamente centrata sulla Frazione di Savonera e comprende l'intero comune di Collegno, la maggior parte del comune di Venaria, la zona nord-ovest di Torino e parte dei comuni di Caselle, Borgaro, Pianezza, Druento, Alpignano, Grugliasco e Rivoli.

Per la realizzazione delle simulazioni modellistiche sono stati utilizzati due diversi domini di calcolo, illustrati in Figura 4.

Il dominio più esteso, usato per la ricostruzione meteorologica, ha dimensioni di 35 x 35 km², una risoluzione orizzontale di 500 m (71 x 71 punti griglia) e origine nel punto SW avente coordinate UTM32-WGS84 pari a 370 km E e 4975 km N. Il grigliato verticale del dominio di calcolo è suddiviso in 20 livelli caratterizzati da spaziatura crescente verso l'alto, in modo tale da permettere una migliore descrizione dell'atmosfera negli strati più prossimi al terreno; il primo livello verticale è localizzato a circa 12 m di altezza dalla superficie mentre l'ultimo è posto a 6900 metri, vincolo imposto dalla presenza nel dominio di calcolo di rilievi orografici con quote pari a 1800 metri. La scelta di effettuare la simulazione meteorologica su un dominio più ampio rispetto a quello dispersivo è legata alla necessità di rappresentare al meglio le caratteristiche meteodispersive dell'area più interna, tenendo conto di un maggior numero di misure al suolo e dell'influenza dei rilievi orografici anche esterni al dominio sui flussi atmosferici simulati.

Il dominio utilizzato per le simulazioni di dispersione (visualizzato in rosso in figura 4) ha una risoluzione orizzontale di 250 m (57 x 57 punti griglia) e origine nel punto SW avente coordinate UTM32-WGS84 pari a 384 km E e 4989 km N. Il grigliato verticale è rappresentato da 3 livelli, che si estendono fino a 2000 metri di quota, il primo dei quali è collocato a circa 10 m dal suolo.

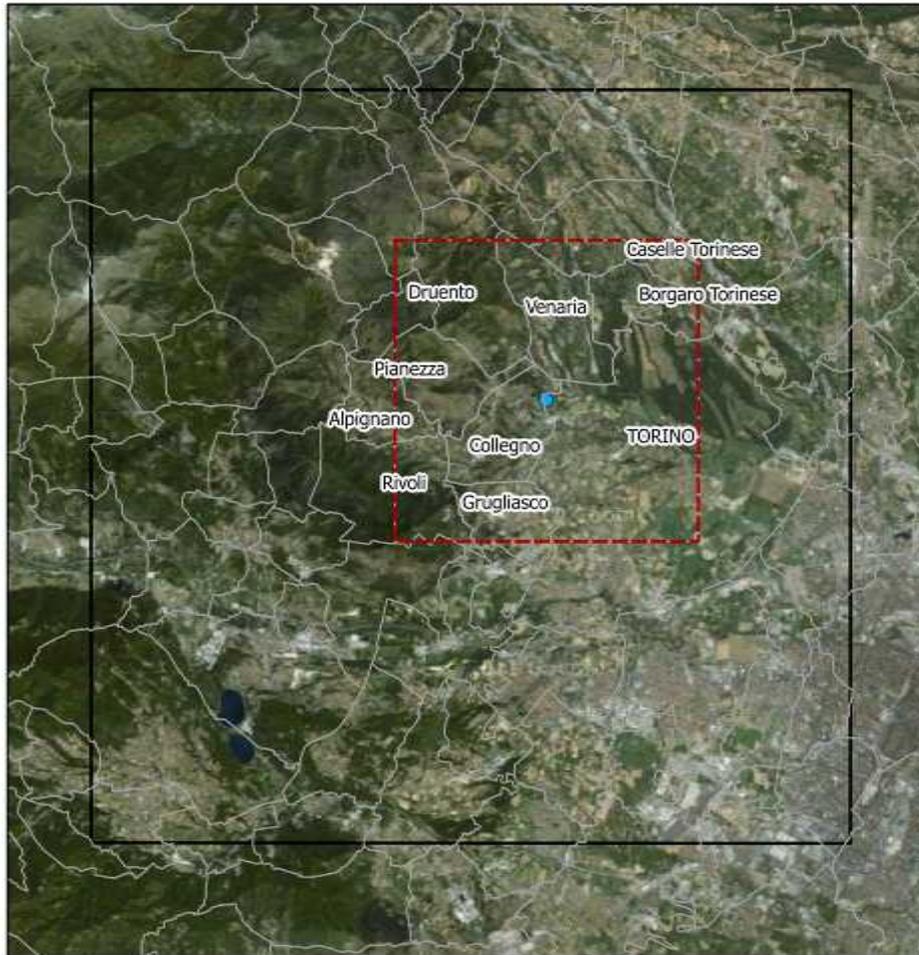


Figura 4. Area di studio: estensione dei domini di calcolo e posizione della Centrale Termoelettrica

Dati di input geografico

L'orografia per la simulazione meteorologica (figura 5) è stata estratta con il processore OROGEX a partire dal DEM SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, risoluzione 90 m) e processata con RELIEF utilizzando un filtro di convoluzione 2D, in modo tale da ottenere la risoluzione definita dal grigliato del dominio di calcolo, ossia 500 m.

I dati di uso del suolo sono stati elaborati mediante LANDEX a partire da un database a 10 m e 21 classi CORINE, che è stato ottenuto riclassificando il Land Cover Piemonte (CSI Piemonte, aggiornato al 31-12-2008) a 10 m di risoluzione e 47 classi.

Per quanto riguarda i dati di uso del suolo necessari alla ricostruzione dei campi di vento e temperatura fatta da MINERVE, con LANDEX sono stati aggregati i dati di uso del suolo a 500 m per classe prevalente (figura 6).

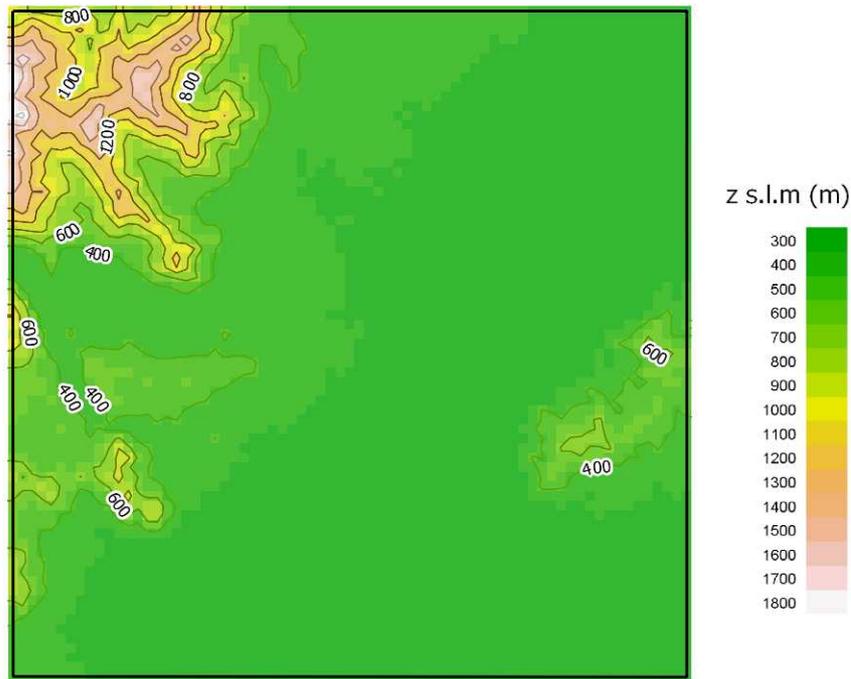


Figura 5. Orografia e isolinee altimetriche del dominio meteorologico

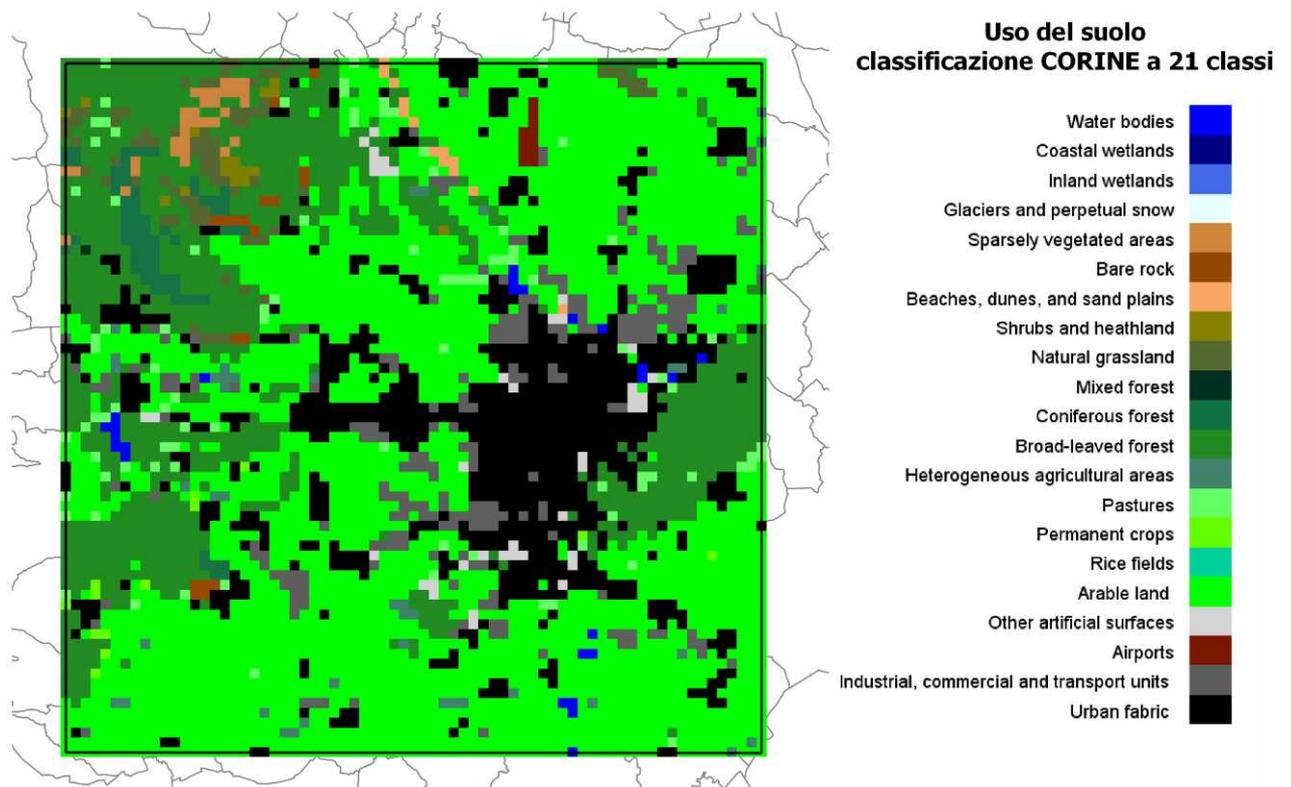


Figura 6. Mappa di uso del a 500 m di risoluzione

Per quanto riguarda i dati di uso del suolo necessari alla spazializzazione delle emissioni fatta da EMMA, il database a 10 m e 21 classi CORINE è stato rielaborato aggiungendo 2 classi, HWAY e ROAD, corrispondenti alle strade extraurbane e alle autostrade della Carta Tecnica Regionale (CTR), e riclassificato in 12 classi; i dati di uso del suolo sono quindi stati aggregati con LANDEX a 250 m, risoluzione del dominio utilizzato per la simulazione di dispersione, assegnando la

percentuale di occorrenza di ciascuna classe all'interno della cella. La figura 7 mostra le mappe di frequenza delle classi URFA, che corrisponde alla classe *Urban fabric* (edificato urbano) della classificazione CORINE a 21 classi e sulla quale sono spazializzate le emissioni da riscaldamento residenziale, e BUIL, che comprende le classi *Urban fabric*, *Industrial commercial and transport units*, *Airports* e *Other artificial surfaces* e sulla quale sono spazializzate le emissioni da traffico urbano.

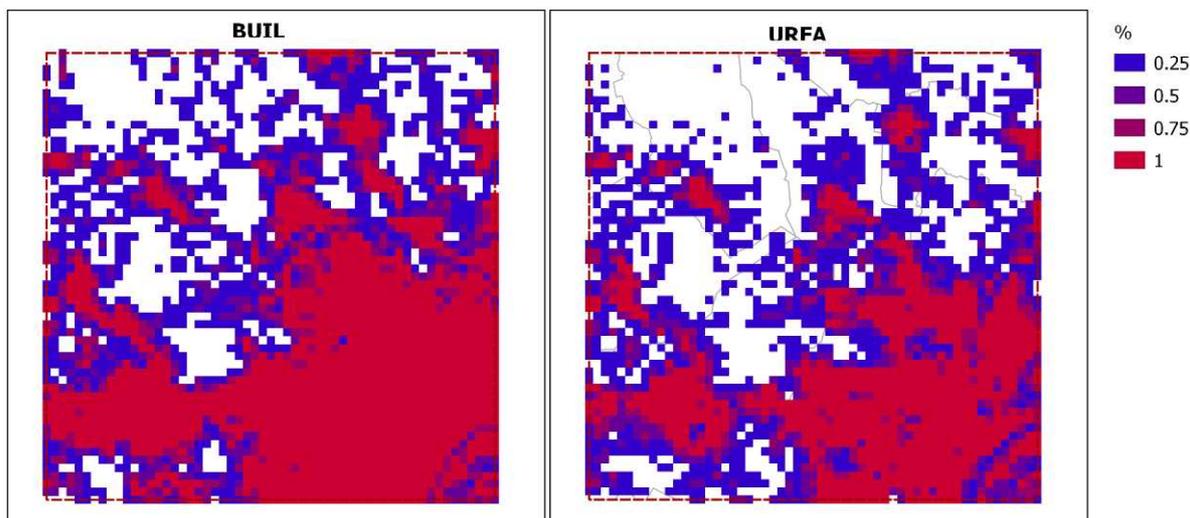


Figura 7. Mappe di frequenza delle classi URFA e BUIL a 250 m di risoluzione

Dati di input meteorologico

Nella ricostruzione dei campi tridimensionali di vento e temperatura è necessario disporre di dati al suolo e in quota. Come dati orari al suolo sono stati estratti dal database di Arpa quelli relativi alle stazioni appartenenti alla rete di monitoraggio meteoidrografica dell'Agenzia presenti nel dominio di calcolo e come dati di input in quota sono state acquisite le analisi del modello ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecast), effettuate con frequenza trioraria e a risoluzione orizzontale pari a 0.125° (circa 10 km).

Un'accurata analisi dei dati meteorologici disponibili è stata condotta al fine di effettuare una selezione delle osservazioni da utilizzare come input nella ricostruzione dei campi di vento e temperatura. La qualità e l'attendibilità dei dati meteorologici registrati presso le stazioni al suolo è stata valutata scartando le stazioni che presentavano un alto numero di dati mancanti, oppure incongruenza rispetto alle stazioni vicine e/o una rappresentatività spaziale limitata in quanto legata a caratteristiche orografiche puramente locali. La sovrabbondanza di informazioni in input per una determinata variabile, specie se riguarda punti di misura eccessivamente ravvicinati fra di loro rispetto alla distribuzione media delle informazioni nel dominio e al passo del grigliato, può infatti risultare controproducente ai fini di una corretta ricostruzione del campo di vento e/o temperatura. Allo stesso modo è stata effettuata una scelta dei profili verticali, valutandone la coerenza con i dati al suolo.

In figura 8 è rappresentata la localizzazione dei dati di input meteorologico scelti per la ricostruzione dei campi tridimensionali di temperatura e velocità del vento: i profili del modello ECMWF e le stazioni al suolo di Avigliana, Bauducchi, Caselle, Cumiana, Pino Torinese, Torino Alenia, Torino Reiss Romoli e Rivoli.

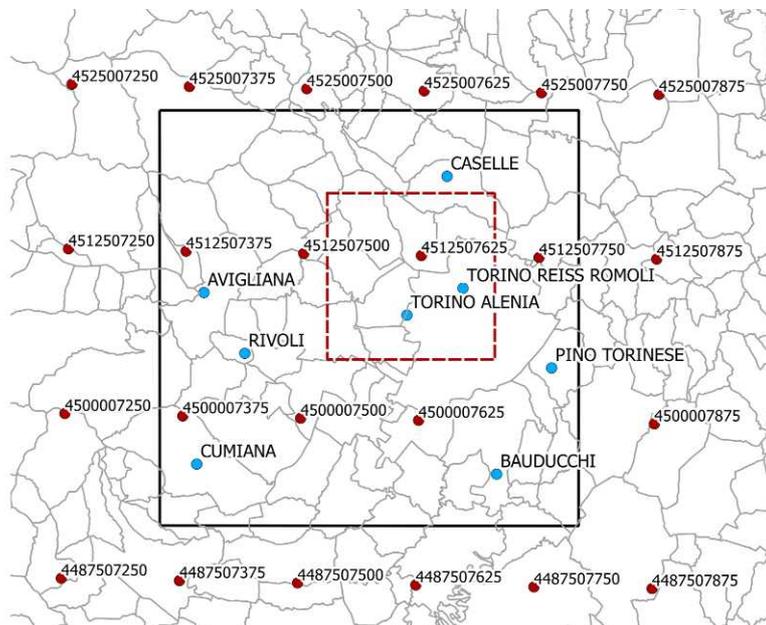


Figura 8. Localizzazione dei profili ECMWF (rosso) e delle stazioni al suolo della rete meteorografica (blu)

Per la ricostruzione dei campi di turbolenza, delle diffusività orizzontali e di quelle verticali con il modello SurfPRO, i dati di input sono rappresentati dai campi di vento e temperatura 3D generati da MINERVE/SWIFT e dalla radiazione solare diretta registrata presso la stazione della rete meteorografica di Arpa di Torino Reiss Romoli.

Dati di input emissivo

Obiettivo della simulazione è valutare l'impatto delle principali sorgenti emissive che insistono nell'area di studio, inclusa la Centrale Termoelettrica Torino Nord. Dopo un'analisi delle informazioni presenti nell'Inventario Regionale delle Emissioni (di seguito IREA, il cui più recente aggiornamento è relativo all'anno 2008) per valutare i contributi dei vari comparti emissivi sulle emissioni totali di NO_x e PM10, si è deciso di includere nella simulazione, oltre alle emissioni da traffico veicolare e quelle da riscaldamento residenziale, anche le emissioni da tutti gli impianti industriali - individuati come sorgenti puntuali all'interno di IREA - presenti nel dominio. Per fornire l'informazione relativa all'ordine di grandezza descritto dai vari comparti emissivi, in tabella 3 sono mostrati i contributi di ciascun macrosettore sulle emissioni totali diffuse di tutti i comuni compresi nel dominio² e in tabella 4 è mostrato in dettaglio il contributo del macrosettore *combustione non*

² Le emissioni riportate nelle tabelle 3 e 4 si riferiscono al totale comunale e non tengono conto della reale porzione di comune inclusa nel dominio di calcolo; a titolo di esempio, nelle tabelle sono incluse tutte le emissioni del comune di Torino che è solo in parte compreso nell'area di studio. I comuni considerati sono quelli indicati in Figura 4 (sono stati esclusi quelli la cui superficie all'interno del dominio di calcolo non è risultata di particolare rilevanza). Le emissioni riportate in tabella 5 si riferiscono invece ai soli impianti rappresentati come sorgenti puntuali interni al dominio di calcolo.

industriale, corrispondente al riscaldamento. Si noti che le emissioni da traffico veicolare e da riscaldamento contribuiscono insieme all'84.6% delle emissioni diffuse totali per l'NO_x e al 96.2% per il PM10. In tabella 5 sono descritte le emissioni di NO_x e PM10 derivanti da tutti gli impianti industriali presenti nell'area di studio e rappresentati come sorgenti puntuali.

Macrosettore	NO _x	Incidenza NO _x	PM10	Incidenza PM10
02 - Combustione non industriale	838.97	10.3%	132.35	10.4%
03 - Combustione nell'industria	701.20	8.6%	5.11	0.4%
04 - Processi produttivi	0.00	0.0%	0.59	0.0%
05 - Estrazione e distribuzione combustibili	0.00	0.0%	0.00	0.0%
06 - Uso di solventi	0.00	0.0%	0.00	0.0%
07 - Trasporto su strada	6250.98	76.4%	1097.06	85.9%
08 - Altre sorgenti mobili e macchinari	330.52	4.0%	19.48	1.5%
09 - Trattamento e smaltimento rifiuti	56.06	0.7%	1.72	0.1%
10 - Agricoltura	6.86	0.1%	2.22	0.2%
11 - Altre sorgenti e assorbimenti	0.00	0.0%	18.70	1.5%
Totale	8184.59	100%	1277.22	100%

Tabella 3. Emissioni di NO_x e PM10 espresse in t/anno relative a tutti i comuni presenti nel dominio: incidenza dei macrosettori

Macrosettore	Settore	NO _x	Incidenza NO _x	PM10	Incidenza PM10
02 - Combustione non industriale	01 - Impianti commerciali ed istituzionali	162.19	2.0%	0.85	0.1%
02 - Combustione non industriale	02 - Impianti residenziali	674.31	8.2%	131.25	10.3%
02 - Combustione non industriale	03 - Impianti in agricoltura silvicoltura e acquacoltura	2.48	0.0%	0.25	0.0%

Tabella 4. Emissioni di NO_x e PM10 espresse in t/anno relative a tutti i comuni presenti nel dominio: ripartizione del macrosettore combustione non industriale

Macrosettore	NO _x	Incidenza NO _x	PM10	Incidenza PM10
01 - Produzione energia e trasformazione combustibili	573.35	24.9%	3.46	10.2%
03 - Combustione nell'industria	1672.87	72.8%	2.56	7.6%
04 - Processi produttivi	42.69	1.9%	13.99	41.4%
05 - Uso di solventi	9.54	0.4%	13.78	40.8%
Totale	2298.45	100%	33.79	100%

Tabella 5. Emissioni di NO_x e PM10 espresse in t/anno relative agli impianti industriali presenti nel dominio come sorgenti puntuali: incidenza dei macrosettori

Emissioni del macrosettore 02 – Riscaldamento residenziale

Le emissioni da riscaldamento residenziale (IREA2008) associate ai comuni inclusi nel dominio sono state spazializzate da EMMA sulla griglia di calcolo della simulazione sulla base delle informazioni contenute nella mappa di frequenza della classe URFA. La spazializzazione delle emissioni sulla base di layer tematici, in cui ciascuna cella sia caratterizzata dalla percentuale di area occupata dai tematismi, consente di distribuire le emissioni sulle aree che ne sono effettivamente responsabili. In figura 9 sono visualizzate le mappe ottenute dalla spazializzazione

delle emissioni di NO_x e PM10 provenienti dal settore riscaldamento domestico, che rappresentano l'emissione media oraria sul periodo di simulazione.

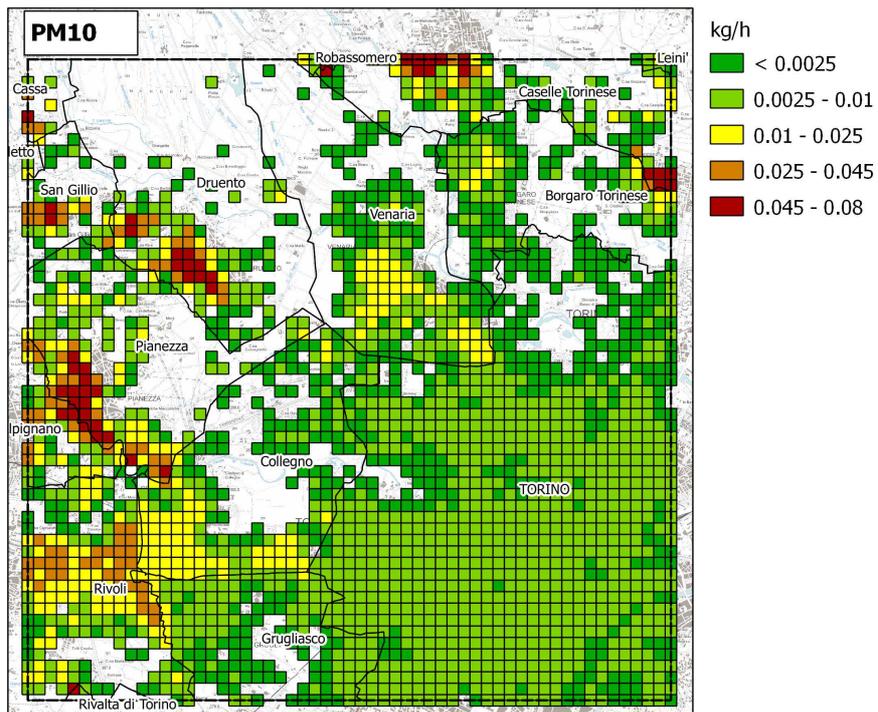
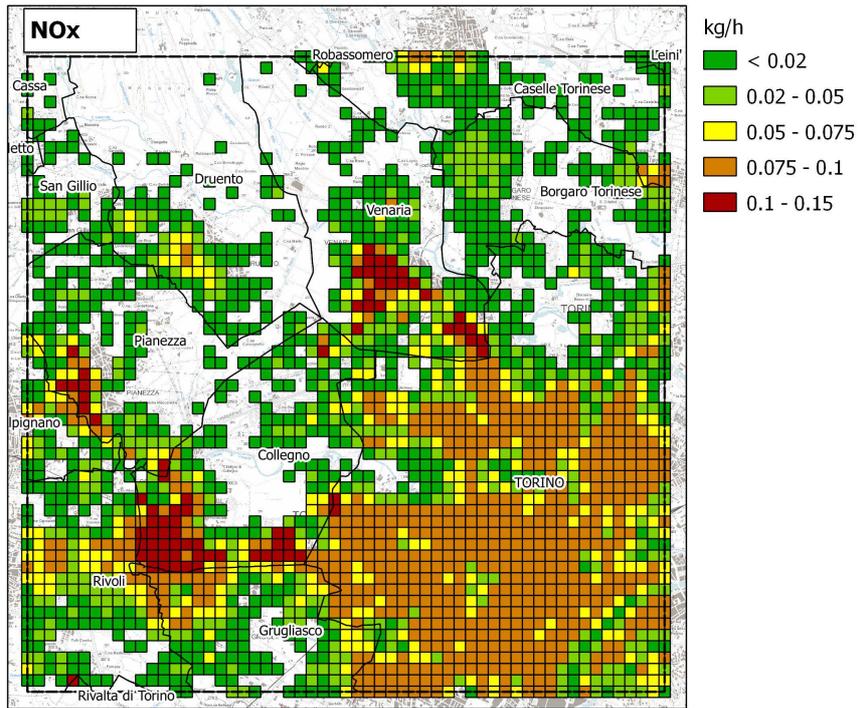


Figura 9. Spazializzazione delle emissioni da riscaldamento residenziale di NO_x e PM10

Comune	NO _x (t/anno)	PM10 (t/anno)
ALPIGNANO	18.77	10.19
COLLEGNO	34.46	4.62
DRUENTO	9.39	6.73
GRUGLIASCO	23.03	2.57
PIANEZZA	13.67	8.19
RIVOLI	45.18	18.11
TORINO	454.93	28.52
VENARIA	26.03	3.61

Tabella 6: Emissioni annue associate al riscaldamento residenziale (IREA2008)

In tabella 6 sono riportate le emissioni totali annue di ossidi di azoto e di particolato PM10 associate al riscaldamento residenziale per i comuni inclusi nel dominio di simulazione.

Il codice EMMA, oltre a spazializzare le emissioni dovute al riscaldamento residenziale, le distribuisce temporalmente sulla base di opportune modulazioni, ricavate dagli orari - tipici di ogni fascia climatica - di normale funzionamento degli impianti domestici di produzione di energia. In figura 10 sono visualizzate le modulazioni mensile, settimanale e giornaliera adottate, che ricalcano il periodo di accensione stagionale (da ottobre a maggio) e diurno (dalle 5 alle 22).

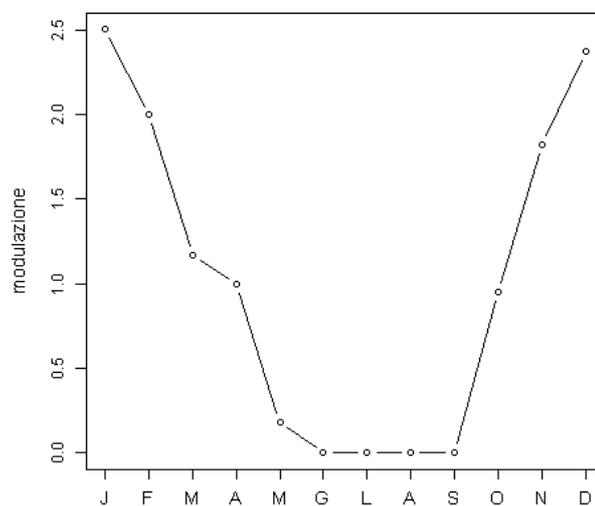
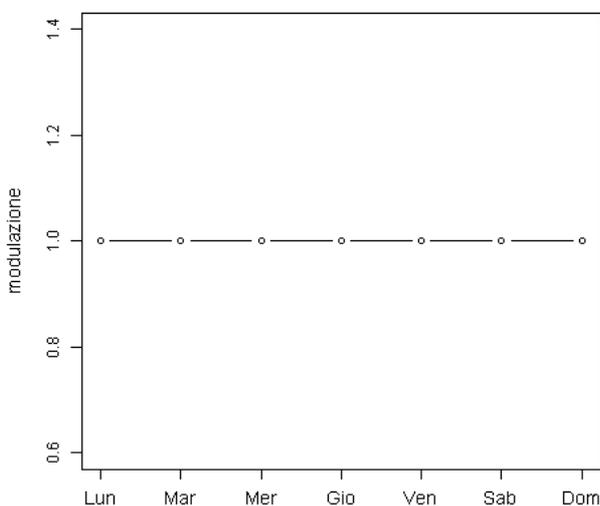
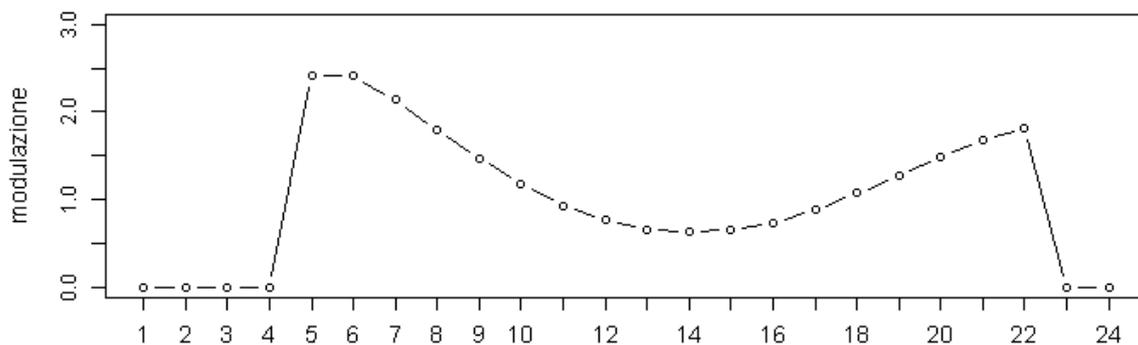


Figura 10. Modulazione temporale (giornaliera, settimanale e mensile) delle emissioni da riscaldamento residenziale

Emissioni del macrosettore 07 – Trasporto su strada

Le emissioni da traffico sono state calcolate a partire dai:

- flussi veicolari 5T, forniti dalla Provincia di Torino sulla base di stime modellistiche calcolate sul grafo stradale della provincia (figura 11) a partire dai passaggi veicolari presso un certo numero di spire sul grafo stesso;
- dati dell'Inventario Regionale IREA.

Le emissioni associate al grafo sono state trattate come emissioni lineari, mentre le emissioni residue, ossia associate al traffico non descritto dal grafo, sono state trattate come emissioni diffuse, calcolate imponendo la conservazione del dato di consumo di combustibile regionale (emissioni di CO₂) ricavato da IREA.

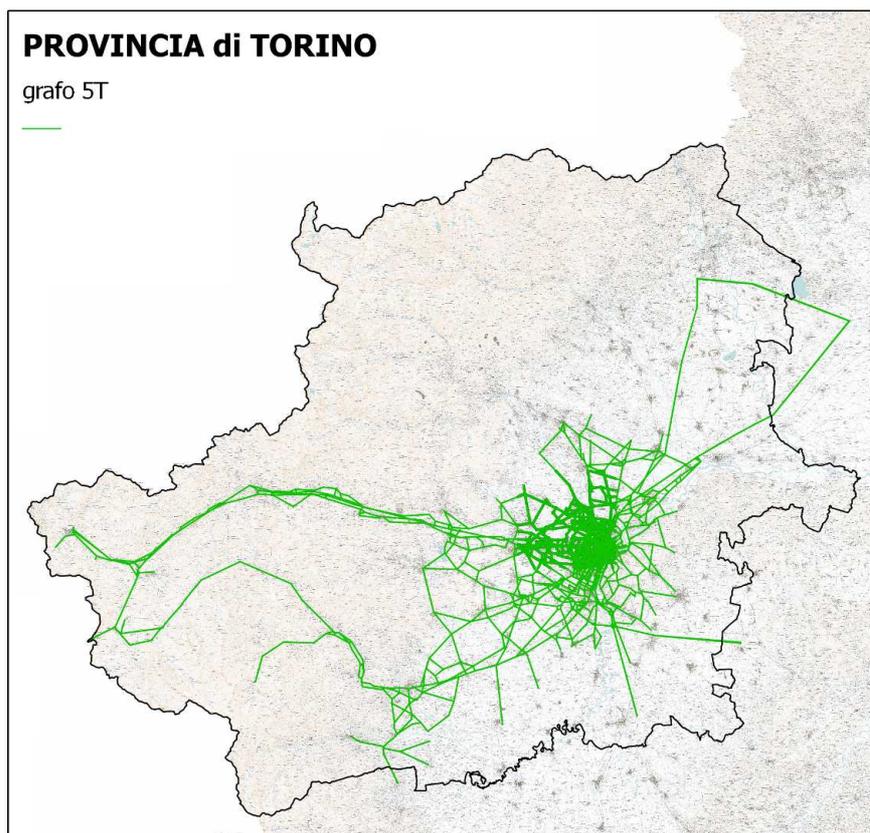


Figura 11. Grafo stradale della società 5T per la Provincia di Torino

Emissioni lineari

Le emissioni lineari associate a ciascun arco del grafo sono state calcolate mediante il codice TREFIC, utilizzando la metodologia di riferimento CORINAIR/COPERT IV, a partire dalla composizione del parco veicolare circolante della Provincia di Torino, da dati di flusso veicolare e velocità di percorrenza forniti da 5T per ciascun arco e da dati ambientali. Noti infatti il numero e la tipologia di veicoli che percorrono un arco in un'ora, la velocità con cui lo percorrono, la lunghezza dell'arco, i fattori di emissione COPERT espressi in g/km e riferiti alle diverse categorie di veicoli, le condizioni ambientali di temperatura e di piovosità, TREFIC calcola l'emissione oraria associata a quell'arco.

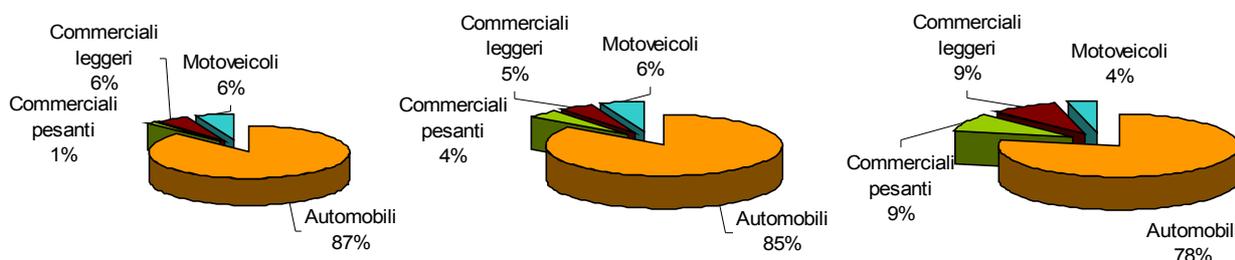
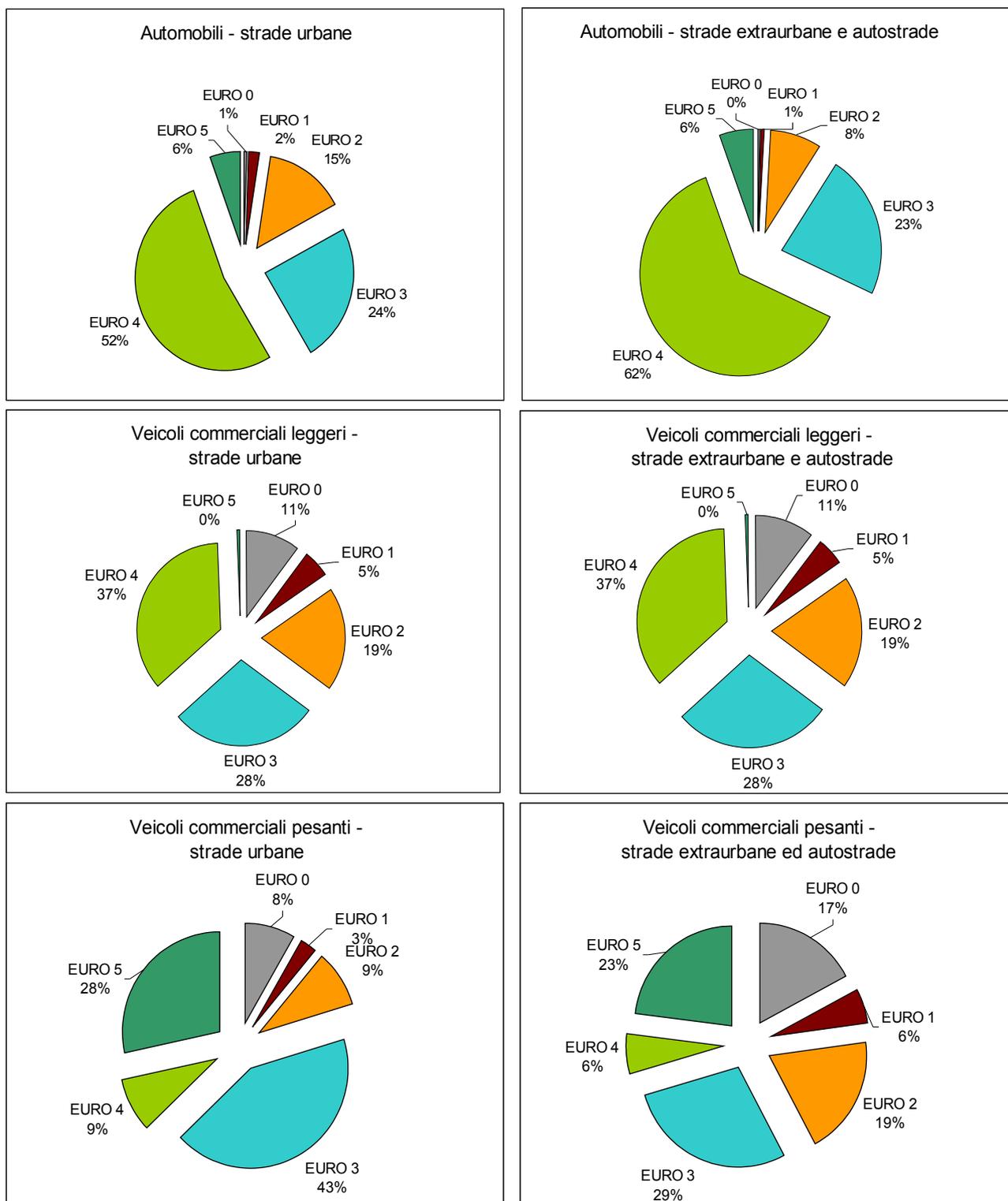


Figura 12. Ripartizione dei veicoli su strade urbane (sinistra), strade extraurbane (centro) e autostrade (destra)

La ripartizione dei veicoli nelle 4 macrocategorie previste da TREFIC (automobili, veicoli commerciali leggeri, veicoli commerciali pesanti e motoveicoli) è stata effettuata sulle diverse

tipologie di strade (strade urbane, strade extraurbane e autostrade) sulla base di dati statistici³. In figura 12 è riportata la ripartizione adottata nella modellizzazione.



³ Fonte "Modellistica della qualità dell'aria nell'area metropolitana torinese (CIG 0418162631) – Relazione conclusiva" della Provincia di Torino http://www.provincia.torino.gov.it/ambiente/inquinamento/eventi/convegno_2011-11-30

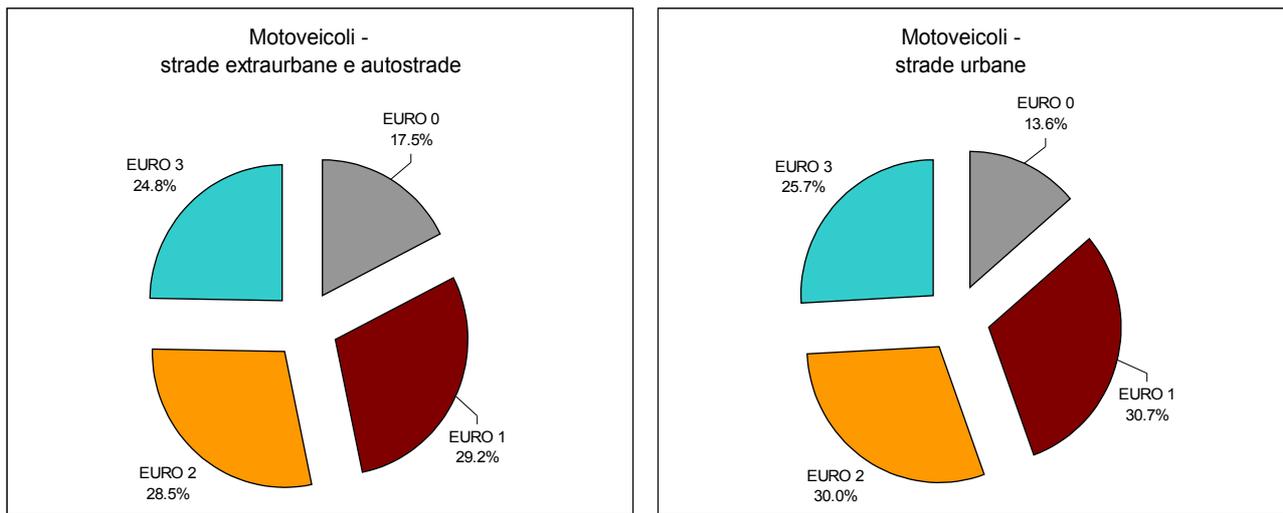


Figura 13. Ripartizione dei veicoli nelle classi di omologazione ambientale su strade urbane, strade extraurbane e autostrade

All'interno di ogni classe veicolare è stata poi effettuata una ripartizione in classi COPERT, che distinguono i veicoli sulla base di parametri quali standard emissivi, cilindrata ed alimentazione, a partire dal parco veicolare circolante. Il parco veicolare circolante nella Provincia di Torino, non essendo disponibile l'aggiornamento 2010 al momento della realizzazione del presente lavoro, è stato stimato applicando al parco veicoli 2008 (fornito dal Settore Tributi della Regione Piemonte) i trend evolutivi al 2010 previsti da GAINS-Italy⁴. Il parco veicolare così ottenuto è stato successivamente 'pesato' su dati di percorrenze medie disponibili nell'IREA per ottenere il parco veicolare circolante da utilizzare in TREFIC. In figura 13 i diagrammi a torta mostrano la ripartizione dei veicoli sulle classi di omologazione ambientale previste da COPERT per categoria veicolare su strade urbane, strade extraurbane e autostrade adottata in TREFIC e derivate dal parco circolante. Va sottolineato che i trend evolutivi previsti da GAINS al momento della realizzazione del presente lavoro non tenevano conto dell'attuale crisi economica e, di conseguenza, della corrispondente contrazione dei consumi; si tratta quindi di un'evoluzione ottimistica che tende a sovrastimare le eurocategorie più alte, alle quali corrispondono, in generale, emissioni più ridotte.

I dati di flusso e di velocità, forniti dalla Provincia di Torino, sono ottenuti dalla società 5T che stima, mediante un modello di assegnazione, il numero dei veicoli e le velocità di percorrenza su ciascun arco del grafo a cadenza oraria. I dati 5T sono strutturati in file mensili e si riferiscono al periodo di simulazione, ossia ai mesi di dicembre 2010, gennaio e febbraio 2011. Gli archi del grafo sono definiti da un nodo iniziale e un nodo finale, distinti per senso di marcia e per tipologia di strada (viale principale o controviale) e caratterizzati da informazioni quali la lunghezza, la

⁴ Sistema modellistico che, integrato nel sistema MINNI, quantifica il potenziale ed i costi di riduzione delle emissioni dei gas ad effetto serra e dei principali inquinanti atmosferici (<http://www.minni.org/>)

pendenza, il numero di corsie e il tipo di classificazione della strada all'interno dei piani urbani del traffico.

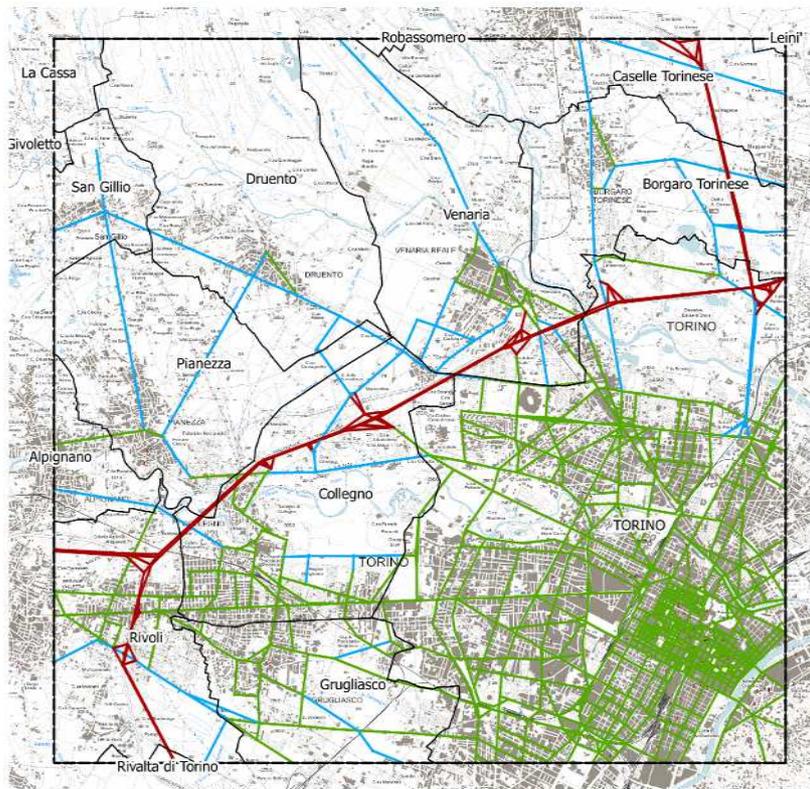


Figura 14. Grafo stradale utilizzato in TREFIC: strade urbane in verde, strade extraurbane in blu e autostrade in rosso

Il grafo stradale utilizzato in TREFIC risulta dall'intersezione del grafo provinciale di 5T con l'area di studio. Considerando trascurabili i valori di pendenza degli archi, il grafo è stato semplificato assegnando le informazioni di archi originariamente distinti per senso di marcia e tipologia di strada ad un unico arco, caratterizzato dalla stessa lunghezza di quelli originali, da un flusso veicolare pari alla somma dei flussi e da una velocità di percorrenza (media, pesata sui flussi, delle velocità). Il grafo risultante è costituito da 1989 archi (figura 14), di cui 1774 urbani, 105 extraurbani e 110 autostradali, a ciascuno dei quali sono associati 2160 valori orari (744 per il mese di dicembre, 744 per gennaio e 672 per febbraio). Per la simulazione modellistica, ogni arco rappresenta una sorgente lineare alla quale è stata assegnata un'altezza e una larghezza che dipendono dalla tipologia di strada (urbana, extraurbana, autostrada).

Al fine di limitare il numero di informazioni orarie (flusso e velocità) che il modello di stima delle emissioni (TREFIC) dovrebbe gestire per una simile quantità di tratti stradali, gli archi con andamento temporale del traffico simile sono stati raggruppati in gruppi o *cluster* caratterizzati da una modulazione temporale rappresentativa, preservando al tempo stesso la variabilità temporale e spaziale dei dati di traffico di

5T e ottenendo così un numero limitato di modulazioni. Il dettaglio della metodologia adottata è disponibile nel paragrafo “Approfondimento” riportato al termine della presente relazione.

Sono stati così individuati, solamente per quanto riguarda gli archi stradali urbani ed extraurbani, 5 gruppi, ognuno dei quali è caratterizzato da una modulazione temporale oraria che rappresenta il valore di traffico più probabile (in base ai dati 5T) per gli archi appartenenti allo stesso gruppo e per la stessa ora. Per le modulazioni degli archi autostradali invece ci si è basati sulle informazioni rilevate come passaggi alle barriere di esazione di Bruere, Settimo, Falchera, Beinasco e Trofarello forniti da ATIVA S.p.A. relativamente al periodo di simulazione; anche in questo caso la *cluster analysis* ha permesso di raggruppare le barriere caratterizzate da modulazioni temporali del traffico, differenziato in veicoli pesanti e leggeri, fra di loro simili.

Definite le modulazioni temporali, a partire dai dati 5T sono stati ricavati e assegnati a ciascun arco i valori di flusso orario medio (figura 15); questi, moltiplicati per la modulazione caratteristica dell'arco, forniscono a TREFIC, ora per ora, il numero di veicoli che percorrono il tratto stradale.

Sulla base della composizione del parco auto circolante descritta precedentemente, TREFIC ha quindi stimato le emissioni orarie associate al grafo applicando la metodologia COPERT. Le altre opzioni di calcolo scelte per la stima delle emissioni sono state una temperatura media di 3.5°C (dato medio del periodo dicembre 2010 – febbraio 2011 registrato presso le stazioni meteorologiche presenti nel dominio) e la lunghezza del trip medio pari a 8.5 km (lunghezza media dello spostamento con auto privata⁵). In figura 16 sono visualizzate le emissioni medie orarie di ossidi di azoto e di particolato PM10 sugli archi stradali calcolate nel periodo di simulazione.

Le emissioni totali dovute al traffico sul grafo - risultanti dalla sommatoria delle emissioni orarie di tutti gli archi nel periodo simulato - sono riassunte in tabella 7. L'emissione di PM10 include il termine di risospensione, valutato tramite la formula di Lohmeyer implementata in TREFIC.

⁵ Fonte “Indagine sulla Mobilità del 2004”

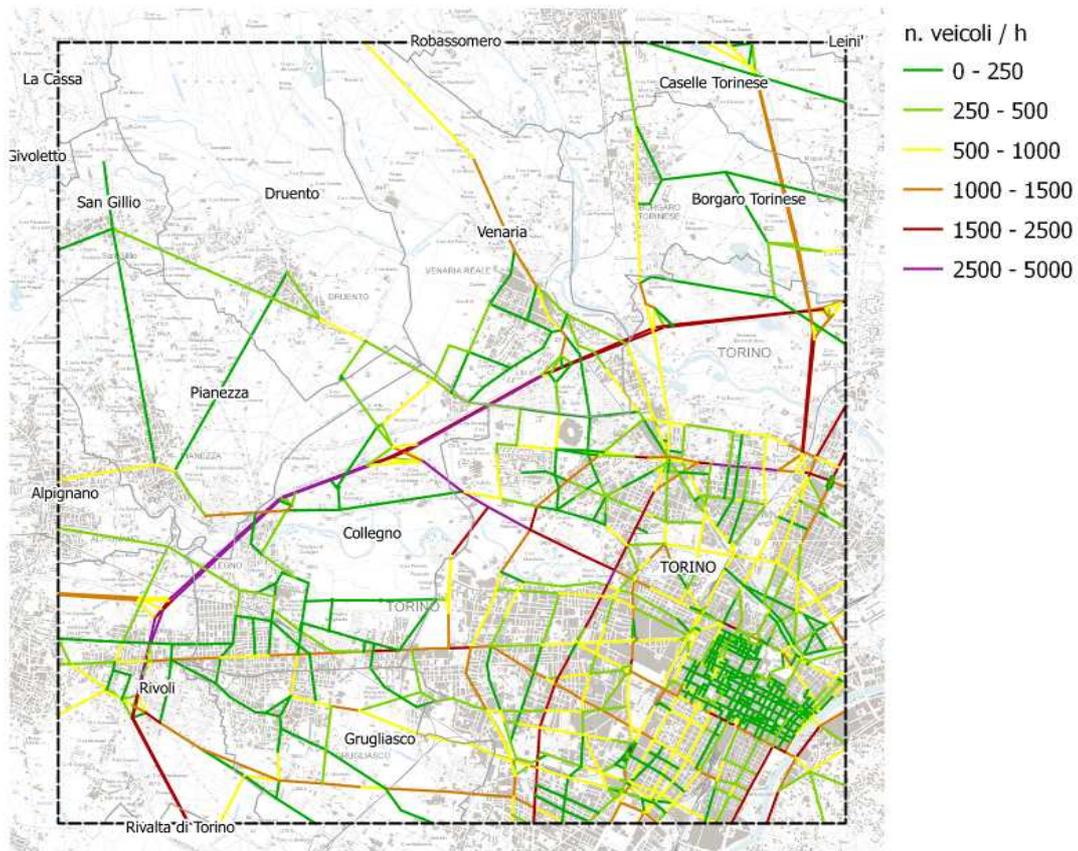


Figura 15: Flusso orario medio orario degli archi stradali inclusi nel dominio di simulazione

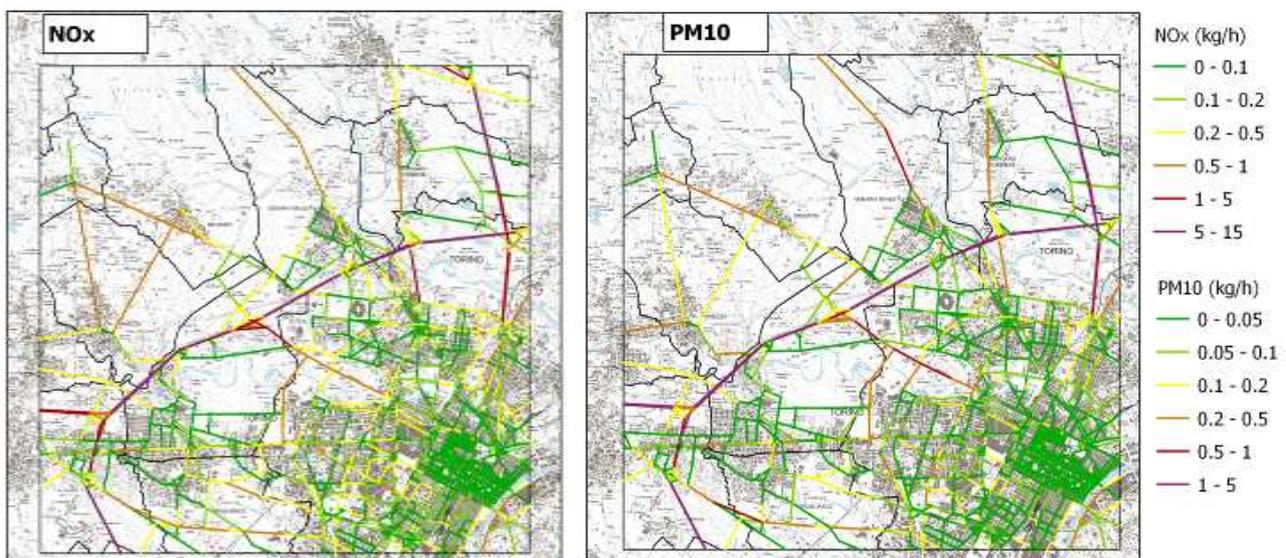


Figura 16: Emissioni medie orarie di ossidi di azoto (sinistra) e particolato PM10 (destra) sul periodo di simulazione

	CO ₂	NO _x	PM10
Trasporto su strada - lineare	191	640	263

Tabella 7. Emissioni associate al traffico lineare, espresse in t/anno (CO₂ in kt), relative al periodo simulato

Emissioni diffuse

Poichè il grafo stradale risulta una schematizzazione della rete viaria esistente, per stimare le emissioni dovute al traffico circolante nelle strade non descritte dal grafo, si sono confrontate le emissioni totali ottenute da TREFIC con le emissioni da traffico presenti nell'Inventario Regionale delle Emissioni e spazializzate sul dominio. Imponendo la conservazione del dato di consumo di combustibile, ossia delle emissioni di CO₂, le emissioni residue di NO_x e PM10 sono state stimate sulla base dei rapporti NO_x/CO₂ e PM10/CO₂ calcolati sugli archi del grafo. In tabella 8 sono riportate le emissioni da traffico "residuo" sul periodo di simulazione.

	CO ₂	NO _x	PM10
Trasporto su strada - diffuso	77	220	80

Tabella 8. Emissioni residue associate al traffico diffuso, espresse in t/anno (CO₂ in kt), relative al periodo simulato

Le emissioni residue sono state trattate come diffuse e spazializzate sulla griglia di calcolo a passo 250 m sulla base delle informazioni contenute nella mappa di frequenza della classe BUIL; in figura 17 è riportata la spazializzazione delle emissioni da traffico urbano residuo in termini di media oraria sul periodo di simulazione.

La modulazione temporale del traffico residuo è stata ricavata aggregando la modulazione oraria associata al gruppo di archi urbani ed extraurbani più consistente, in termini di numero di archi e numero di veicoli, ottenuto dalla cluster analysis⁶, in modo da ottenere le modulazioni settimanale e giornaliera (differenziata per giorni feriali, prefestivi e festivi) da introdurre in EMMA. In Figura 18 si osservano due picchi giornalieri e una sensibile diminuzione del traffico nel fine settimana.

⁶ E' il gruppo 1, come dettagliato nel paragrafo Approfondimento al termine della relazione.

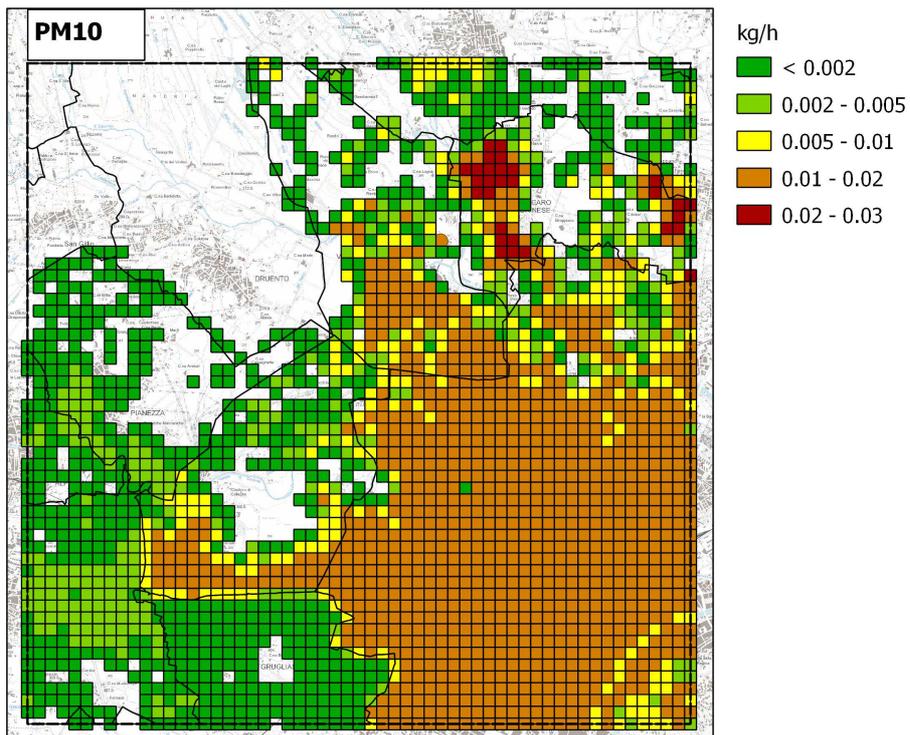
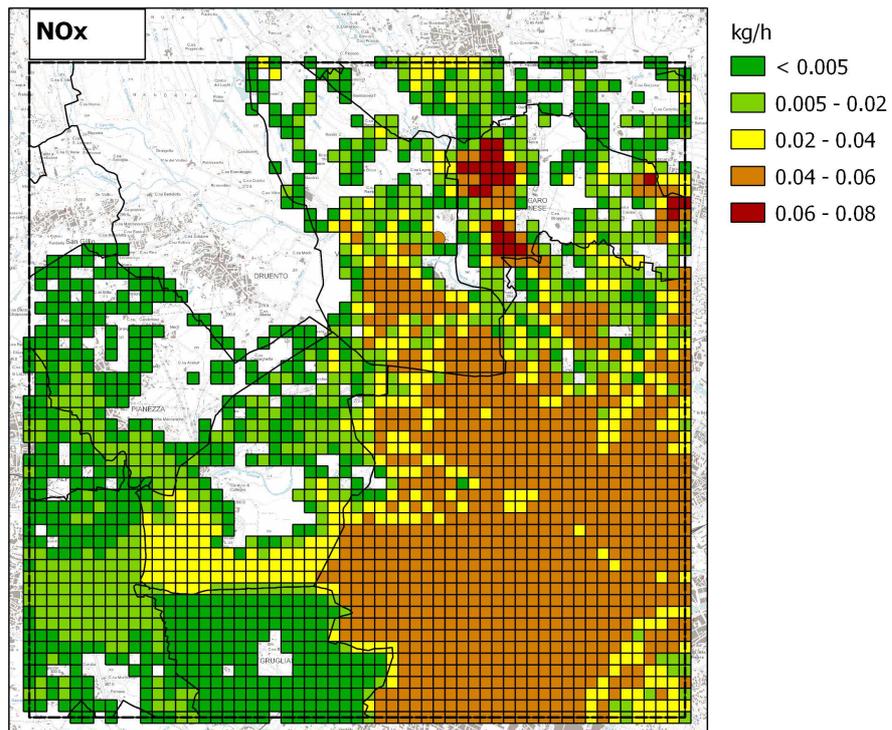


Figura 17. Spazializzazione delle emissioni medie orarie da traffico urbano residuo

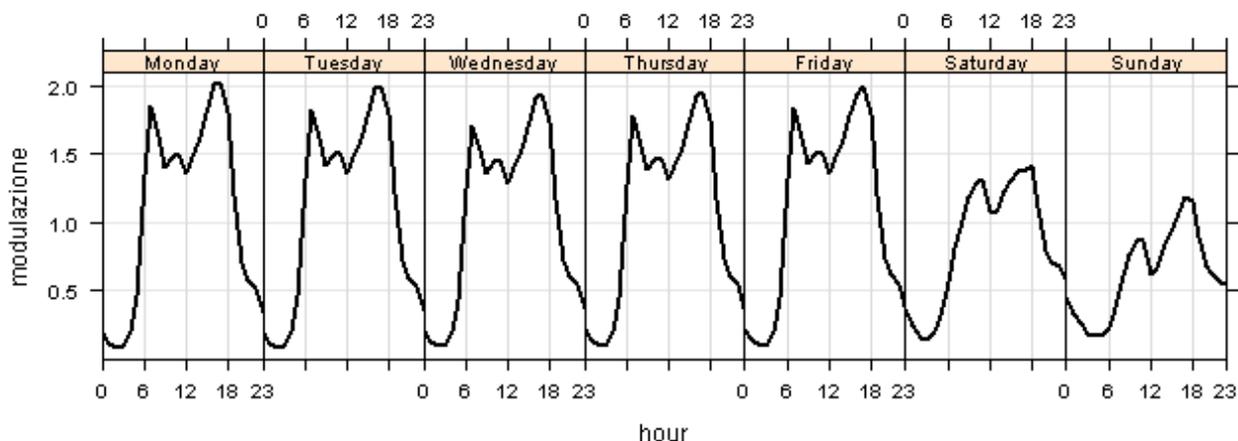


Figura 18: Modulazione del traffico residuo

Emissioni da impianti industriali

Oltre alle emissioni da riscaldamento residenziale e da traffico veicolare, sono state considerate le emissioni degli impianti industriali presenti nel dominio nel periodo di simulazione ed elencate nella tabella 9; il quantitativo emesso è rappresentativo del periodo di simulazione in termini di medie orarie. Le modulazioni temporali utilizzate derivano da dati di letteratura e sono caratteristiche delle categorie emissive cui appartengono gli impianti.

Nelle figure 19 e 20 è riportata la localizzazione degli impianti (individuabili tramite l'ID riportato in tabella 9); le dimensioni e i colori dei simboli rappresentano le quantità di inquinanti emesse nel periodo di simulazione, espresse in kg/h.

ID	X (m)	Y (m)	Nome	PM10 (kg/h)	NO _x (kg/h)
1	397243	4996418	ROCKWOOD ITALIA	0.448	0.305
2	394310	4990990	IRIDE SPA	0.004	0.675
3	392233	4995152	IRIDE SPA (Centrale Le Vallette)	0.134	68.581
4	397216	4996466	ELYO ITALIA SRL	0.013	8.424
5	387704	4989934	FENICE SPA	0.001	0.29
6	386514	4991406	REL SRL	0.020	1.03
7	391352	4990062	FONDPRESS SRL	0.122	0.24
8	386367	4992742	FOAM SPA	0.269	0
9	392721	4999232	AUTOMOTIVE LIGHTING ITALIA SPA	0.191	0.088
10	389066	4991552	SERVIZI ENERGETICI	0.001	0.548

Tabella 9. Elenco degli impianti individuati come sorgenti puntuali interni al dominio di calcolo

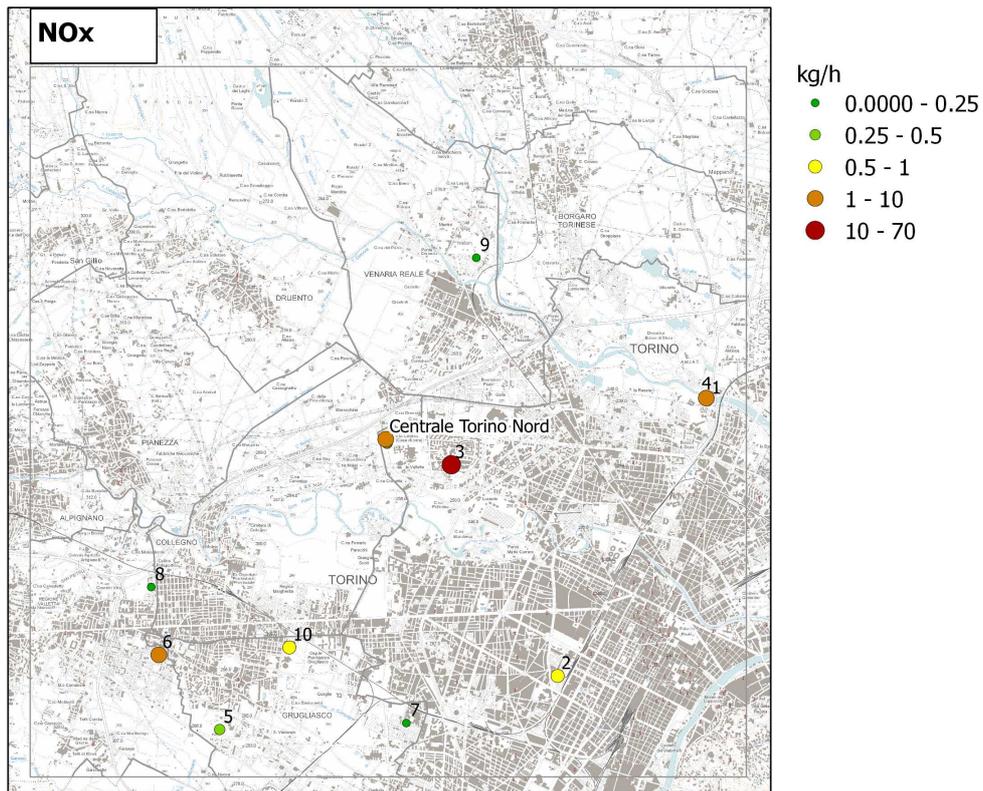


Figura 19. Localizzazione ed emissioni di NO_x dagli impianti industriali presenti nel dominio

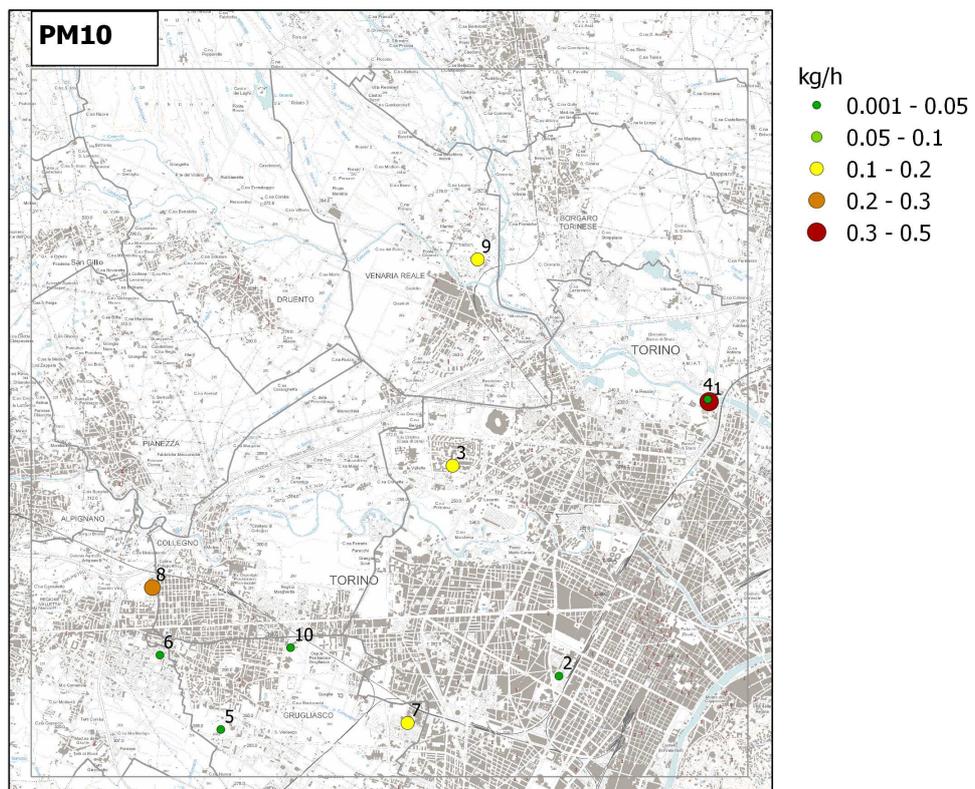


Figura 20. Localizzazione ed emissioni di PM₁₀ dagli impianti industriali presenti nel dominio

Emissioni della Centrale Termoelettrica Torino Nord

Sebbene la Centrale Termoelettrica Torino Nord non fosse ancora entrata in funzione nel periodo oggetto di studio e, quindi, non abbia potuto contribuire alle concentrazioni registrate, la sua simulazione permette di stimarne il contributo relativo rispetto alle altre sorgenti presenti nel dominio e modellizzate, in particolare rispetto alla precedente Centrale IRIDE le Vallette.

Le emissioni in atmosfera in fase di esercizio della centrale sono costituite dai gas di scarico generati dalla combustione del metano nella turbina a gas per la produzione di energia elettrica e calore in cogenerazione e nelle 4 caldaie di integrazione e riserva. Considerando il tipo di impianto previsto e l'utilizzo del metano come combustibile, gli inquinanti emessi di interesse per il presente studio modellistico sono gli ossidi di azoto (NO_x).

Le caratteristiche emissive descritte nell'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) sono riassunte in tabella 10 e si riferiscono al generatore di vapore a recupero, camino C1, e alle 4 caldaie di integrazione, camini C2-C5, convogliate in un unico camino di diametro 8 m.

La localizzazione dell'impianto è visualizzata nelle figure 19 e 20; la dimensione e il colore del simbolo rappresenta le quantità di inquinanti emesse nel periodo di simulazione, espresse in kg/h.

L'AIA prescrive un Sistema di Monitoraggio in continuo delle Emissioni (SME) sugli effluenti gassosi provenienti dalla linea turbogas e dalle caldaie di integrazione e riserva, che prevede misurazioni in continuo delle concentrazioni di NO_x , dell'ossigeno, della temperatura, della pressione, della portata volumetrica e del vapore acqueo dei fumi sia in condizioni di normale funzionamento dell'impianto, sia durante le fasi di accensione e spegnimento del ciclo combinato e durante il funzionamento a potenza inferiore al minimo tecnico. I report orari forniti dallo SME sono stati messi a disposizione dal Dipartimento di Torino per il periodo maggio – dicembre 2012 per quanto riguarda il camino C1 e per il mese di dicembre 2012 per quanto riguarda i camini C2-C5. I dati dello SME sono stati esaminati al fine di individuare, per il periodo di simulazione, un andamento che riproducesse al meglio le caratteristiche di funzionamento dell'impianto nel periodo invernale.

Camino	Portata (Nm^3/h)	Flusso massa (kg/h)	Flusso massa (kg/anno)	Limite prescritto (mg/Nm^3)	% O_2	X (m)	Y (m)	Altezza (m)	Diametro (m)	funzionamento h/anno
C1	1738976	20	123944	10	15	390950	4995656	60	7.0	6197
C2	62299	5.1	3215	80	3	390976	4995572	60	1.8	630
C3	62299	5.1	3215	80	3	390974	4995574	60	1.8	630
C4	62299	5.1	3215	80	3	390978	4995573	60	1.8	630
C5	62299	5.1	3215	80	3	390977	4995576	60	1.8	630

Tabella 10. Caratteristiche emissive della Centrale Termoelettrica Torino Nord

Camino C1

Dopo aver analizzato i dati SME del camino C1, considerando che il periodo della simulazione comprende il mese di dicembre (2010) e altri due mesi invernali, si è deciso di adottare come

parametri caratteristici delle condizioni emissive del camino C1, fra quelli relativi ai mesi a disposizione (ovvero da maggio a dicembre 2012), i valori rappresentativi delle condizioni di normale funzionamento del mese di dicembre 2012 descritti in Tabella 11. Tale scelta risulta cautelativa, dato che ipotizza per tutti i mesi invernali della simulazione le condizioni associate al mese che, sulla base dei dati disponibili, risulta essere caratterizzato dalle emissioni più elevate.

Camino 1	
Diametro [m]	7.0
altezza [m]	60.0
temperatura fumi [°C]	76.5
pressione fumi [hPa]	981.5
umidità fumi [%V]	6.8
concentrazione O ₂ misurato nei fumi [%V]	14.2
portata fumi secca e corretta in O ₂ [Nm ³ /h]	1952906
velocità fumi [m/s]	17.6
flusso di massa (kg/h)	7.2

Tabella 11. Caratteristiche emissive del camino C1 relative al dicembre 2012 e derivanti dallo SME

In figura 21 sono invece poste a confronto le modulazioni settimanali e giornaliere di “normale funzionamento” dell’impianto ricavate dai valori di flusso di massa di NO_x associati allo stato dell’impianto definito “servizio regolare” con quelle legate al “reale funzionamento” dell’impianto, ricavate dai valori di flusso di massa di NO_x associati agli stati dell’impianto definiti ‘servizio regolare’ e ‘minimo tecnico’.

Per le simulazioni modellistiche si è scelto di adottare, in un’ottica conservativa, il flusso di massa e la modulazione temporale dell’emissione ricavati dai valori relativi al “reale funzionamento” del camino nel dicembre 2012, comprendendo, oltre allo stato di normale funzionamento, anche le fasi di accensione e spegnimento (minimo tecnico).

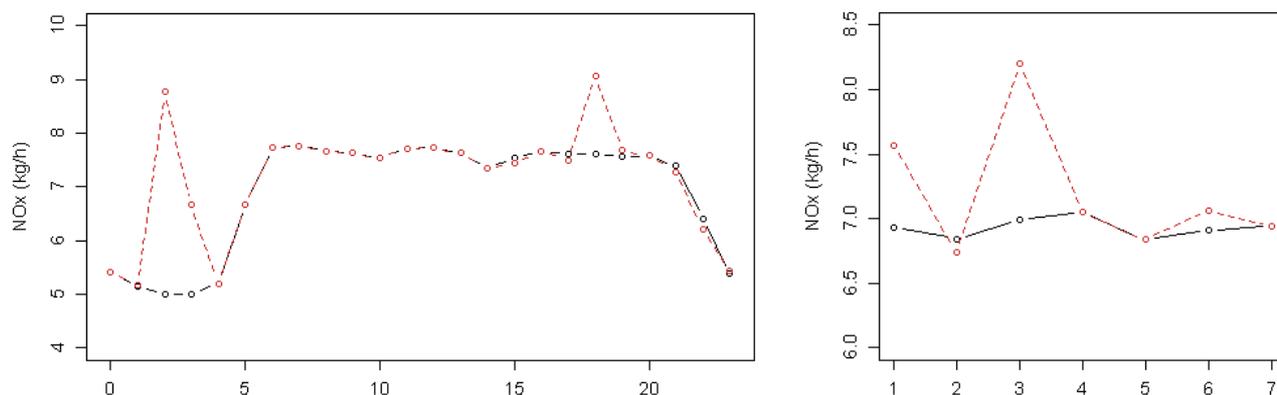


Figura 21. Modulazione giornaliera (1-24) e settimanale (1-7) del flusso di massa di NO_x durante il funzionamento normale (in nero) e reale (in rosso) dell’impianto

Si nota che, mentre il funzionamento normale dell’impianto prevede modulazione settimanale pressoché costante e modulazione giornaliera ridotta nelle ore notturne (22-5), il funzionamento reale presenta due picchi settimanali il lunedì e il mercoledì e due picchi giornalieri alle 2 e alle 18, legati alle accensioni dell’impianto avvenute a dicembre.

Camini C2-C5

Dall'analisi dei dati SME dei camini C2-C5 relativi al mese di dicembre 2012 sono stati ricavati i parametri emissivi rappresentativi delle condizioni di normale funzionamento, descritti in tabella 12. Si osserva che nel periodo esaminato i camini C4 e, in particolare, C5 hanno avuto un numero di ore di funzionamento piuttosto limitato sul totale mensile (744 ore).

	C2	C3	C4	C5
diametro [m]	1.8	1.8	1.8	1.8
altezza [m]	60	60	60	60
temperatura fumi [°C]	94.4	94.6	95.5	101.1
pressione fumi [hPa]	978.1	980.4	982.9	978
umidità fumi [%V]	14.6	15.3	14.5	15.2
concentrazione O ₂ misurato nei fumi [%V]	5.2	4.45	5.4	4.5
portata fumi secca e corretta in O ₂ [Nm ³ /h]	63671	69203	91444	7882
velocità fumi [m/s]	13.0	13.5	18.7	1.6
funzionamento (h/mese)	275	257	82	10

Tabella 12. Caratteristiche emissive dei camini C2-C5 relative al dicembre 2012 e derivanti dallo SME

A causa dell'estrema variabilità dei dati, non è stato possibile ricavare una modulazione temporale rappresentativa dei singoli camini e si è quindi deciso di introdurre un camino virtuale, la cui modulazione temporale è stata ottenuta sommando, ora per ora, i flussi di massa dei singoli camini ed è rappresentata in figura 22. Si osservi che la modulazione giornaliera dedotta dalle elaborazioni prevede che tutte le caldaie siano spente dalle 22 alle 5, con massimi di funzionamento tra le 7 e le 9, tra le 11 e le 12 e tra le 16 e le 19; la modulazione settimanale mostra un picco il venerdì, rappresentativo delle condizioni operative riscontrate nel mese di dicembre 2012.

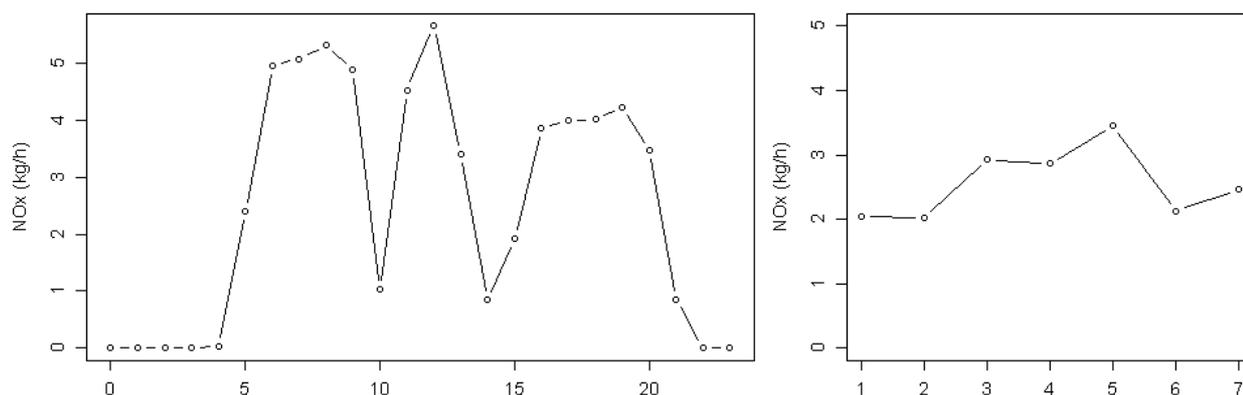


Figura 22. Modulazione giornaliera (1-24) e settimanale (1-7) del flusso di massa di NO_x totale emesso dai 4 camini

Le caratteristiche emissive del camino virtuale sono state ottenute a partire da quelle specifiche dei camini C2 e C3, assumendo quindi che il normale funzionamento delle caldaie consista nei camini C2 e C3 accesi (secondo la modulazione di figura 22) e C4 e C5 spenti. Tale assunzione è cautelativa poiché le ore in cui 2 caldaie funzionano contemporaneamente

costituiscono circa il 50 % del totale delle ore di funzionamento, mentre nel restante 50% risulta in funzione una sola caldaia. In tabella 13 sono descritti i parametri emissivi del camino virtuale (portata equivalente Q_E , velocità equivalente v_E , sezione equivalente S_E , temperatura equivalente T_E , etc.) ottenuti effettuando una media ponderata rispetto alla portata dei fumi effettiva espressa in m^3/h dei parametri dei camini C2 e C3:

$$Q_E = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad v_E = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{S_i} \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \right), \quad S_E = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{v_E}, \quad T_E = \sum_{i=1}^n \left(T_i \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \right)$$

Camino equivalente	
diametro [m]	2.5
altezza [m]	60
temperatura fumi [°C]	94.5
pressione fumi [hPa]	979.3
umidità fumi [%V]	15
concentrazione O ₂ misurato nei fumi [%V]	4.8
portata fumi secca e corretta in O ₂ [Nm ³ /h]	132874
velocità fumi [m/s]	13.2
flusso di massa (kg/h)	2.5

Tabella 13. Caratteristiche del camino equivalente che sostituisce nella simulazione le emissioni dei camini C2+C5

Emissioni complessive sul dominio

Per fornire un quadro d'insieme delle pressioni sull'area di studio associate al traffico (autostradale, urbano ed extraurbano), al riscaldamento civile e agli impianti industriali (ad eccezione della Centrale Termoelettrica di Torino Nord), nelle figure 23 e 24 sono riportate le ripartizioni percentuali dei contributi - per gli ossidi di azoto e il particolato PM10 - da parte dei diversi comparti emissivi.

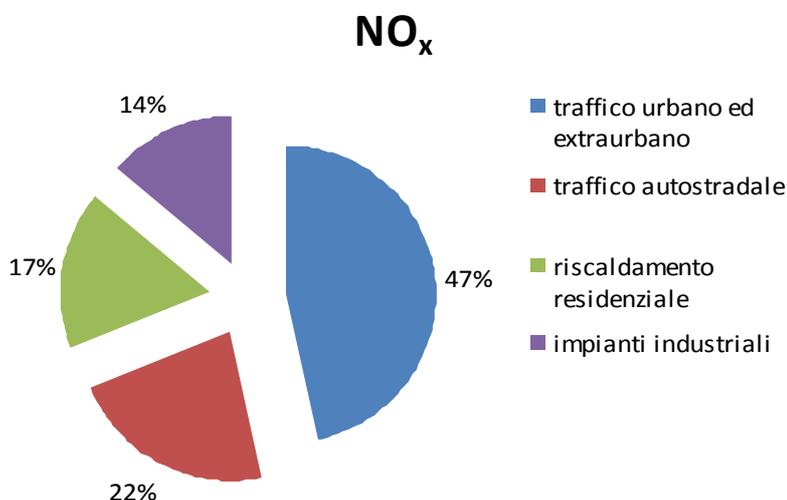


Figura 23. Ripartizione delle emissioni di ossidi di azoto considerate nelle simulazioni sul dominio di calcolo

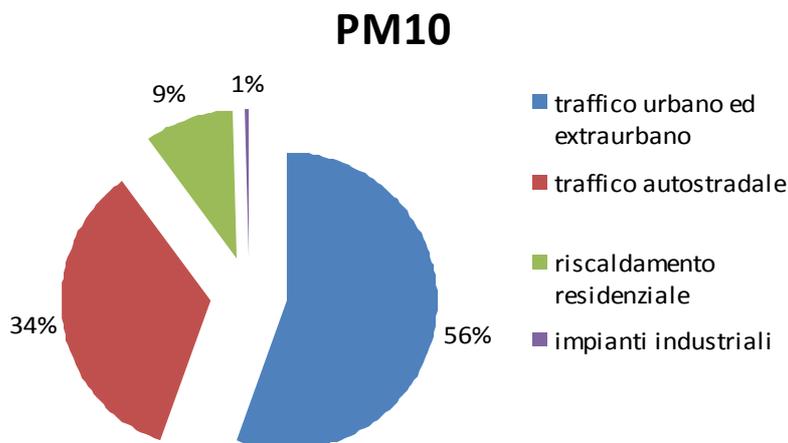


Figura 24. Ripartizione delle emissioni di particolato PM10 considerate nelle simulazioni sul dominio di calcolo

Per entrambi gli inquinanti il contributo più significativo risulta essere quello associato al traffico urbano ed extraurbano, seguito dal traffico autostradale. Per gli ossidi di azoto, riscaldamento civile e sorgenti industriali contribuiscono in modo confrontabile, mentre decisamente modesto è il contributo al particolato PM10 primario da parte degli impianti industriali.

SIMULAZIONI MODELLISTICHE

Ricostruzione meteorologica con MINERVE/SWIFT e SurfPRO

A seguito delle simulazioni svolte con il preprocessore meteorologico MINERVE/SWIFT, sono state effettuate delle analisi finalizzate al confronto dei risultati del modello con i dati meteorologici misurati e a fornire delle valutazioni di performance del codice tramite opportuni indicatori statistici; i risultati ottenuti sono riportati nel paragrafo “Approfondimenti” al termine della presente relazione.

Come ulteriore strumento di confronto sono stati utilizzati scatter plot, istogrammi e la rosa dei venti sulle diverse stazioni. In figura 25 sono mostrati gli scatter plot e gli istogrammi relativi alla stazione di Torino Consolata, mentre il confronto fra le rose del vento osservate e simulate è riportato nella figura 26.

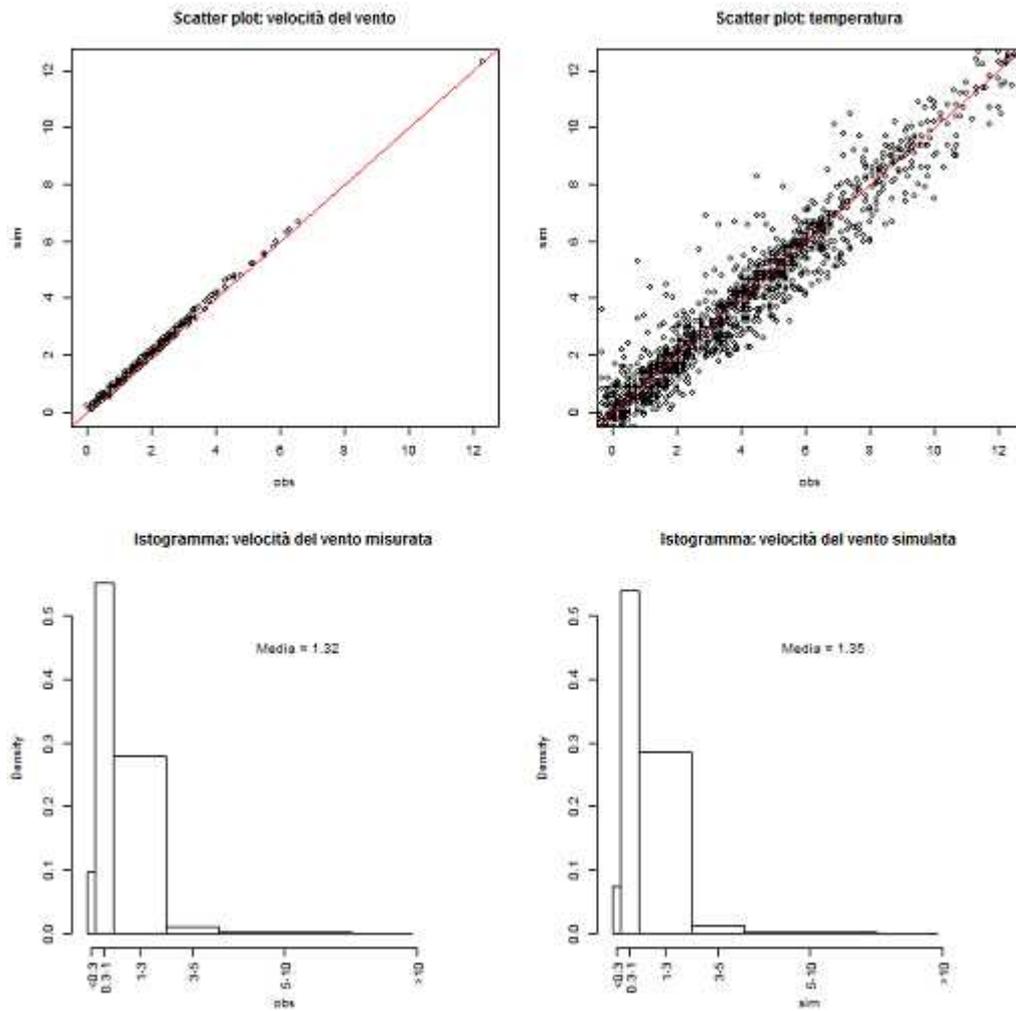


Figura 25. Valutazione dei risultati della ricostruzione meteorologica presso la stazione di Torino Consolata

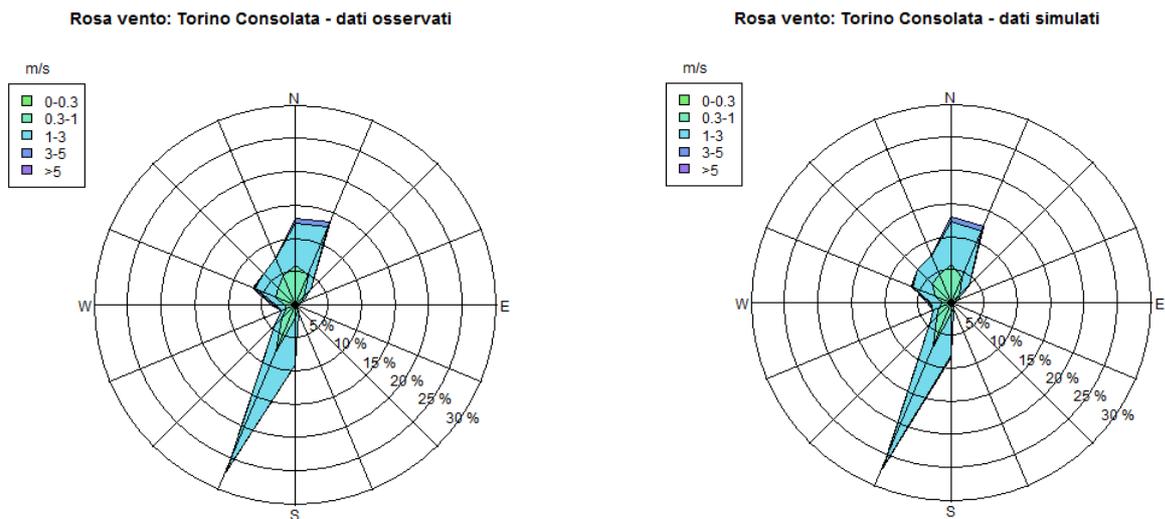


Figura 26. Torino Consolata: rose del vento elaborate a partire dai dati osservati e simulati

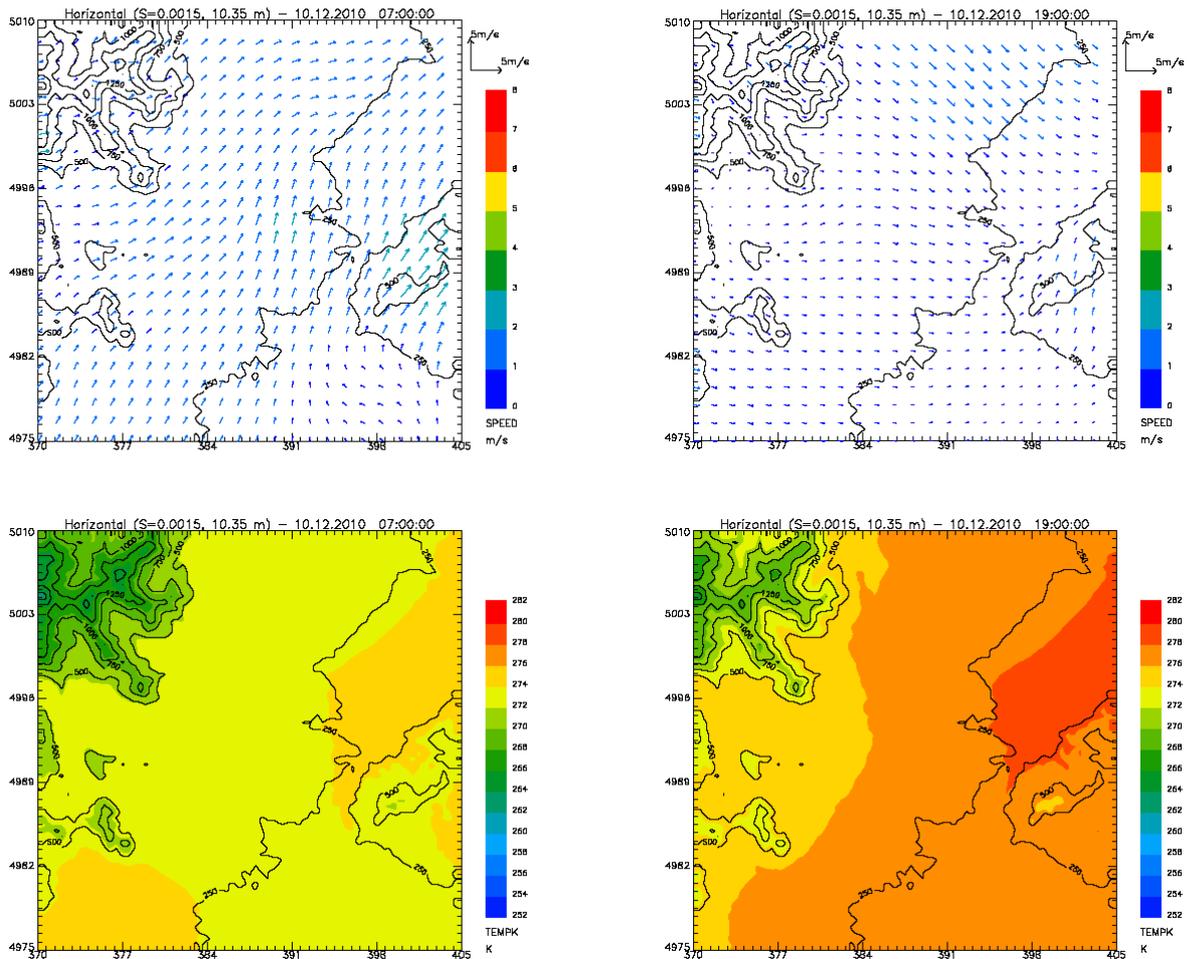


Figura 27. Campi di vento (in alto) e temperatura (in basso) in prossimità del suolo per il giorno 10/12/2010 alle ore 7:00 (a sinistra) e 19:00 (a destra).

Un esempio dei campi di vento e temperatura risultanti dalla simulazione di MINERVE/SWIFT in prossimità del suolo (a circa 10 m) è riportato per la giornata del 10 dicembre 2010 in orario mattutino (ore 7) e serale (ore 19). Il campo di vento evidenzia al mattino del 10 dicembre vento diretti prevalentemente verso nord-est, mentre la sera si osservano venti diretti in prevalenza verso est caratterizzati da intensità decisamente più modeste rispetto al mattino. I campi di temperatura mostrano, in corrispondenza dei rilievi, temperature inferiori rispetto alle zone di pianura, dimostrando come il modello – pur non disponendo in ingresso di stazioni al suolo situate in quota - sia in grado di tenere conto delle differenze altimetriche nella ricostruzione di questa grandezza meteorologica.

Infine, in figura 35 è riportata la rosa del vento simulata in corrispondenza della Centrale Torino Nord; i dati fanno riferimento ad una quota pari a 10 m dal suolo.

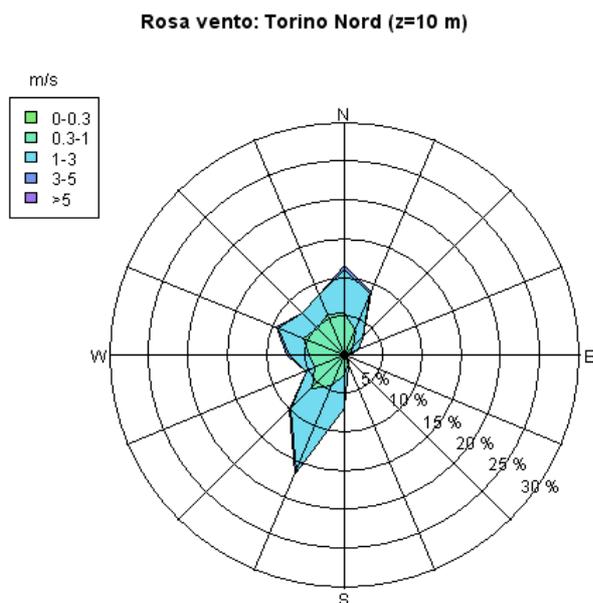


Figura 28. Rosa del vento simulata presso la Centrale Torino Nord, ad una quota di 10 m dal suolo.

Risultati delle simulazioni di dispersione

I risultati delle simulazioni di dispersione, espressi come concentrazioni medie dei singoli inquinanti per ogni ora del periodo di simulazione (1 dicembre 2010 – 28 febbraio 2011), sono stati elaborati al fine di ottenere concentrazioni medie e massime orarie per gli ossidi di azoto e medie e massime medie giornaliere per il particolato PM10 sul trimestre esaminato e successivamente rappresentati in mappe tematiche riportate nell'Allegato alla presente relazione.

Per ogni inquinante sono rappresentati, oltre alle concentrazioni associate al totale delle emissioni in input al modello dispersivo, anche i contributi dei diversi comparti emissivi.

Per quanto riguarda gli ossidi di azoto NO_x (espressi come biossido di azoto NO_2) sono descritti il contributo medio del traffico urbano ed extraurbano (figura A1), del traffico autostradale (figura A2), del riscaldamento civile (figura A3) e degli impianti industriali (esclusa la Centrale Termoelettrica Torino Nord, figura A4). La sommatoria dei vari contributi, con illustrate le postazioni delle stazioni di misura presenti nel dominio, è riportata in figura A5. Come si può osservare, il contributo maggiore per i comuni di Collegno e Venaria è costituito dal traffico sia autostradale (in particolare nelle immediate vicinanze della tangenziale di Torino) che urbano ed extraurbano, seguito dal riscaldamento domestico. Piuttosto limitato è il contributo delle sorgenti puntuali, in termine di media sul periodo.

I valori massimi delle medie orarie (per ogni cella del dominio le mappe riportano il valore massimo orario stimato nel periodo di simulazione) sono invece illustrati per il traffico urbano ed extraurbano in figura A6, per il traffico autostradale in figura A7, per il riscaldamento domestico in figura A8, per gli impianti industriali (esclusa la Centrale Termoelettrica Torino Nord) in figura A9. Il valore massimo delle medie orarie per i vari comparti emissivi è riportato in figura A10. In questo

caso i valori massimi orari sono decisamente elevati soprattutto per quanto riguarda il contributo del traffico autostradale in prossimità della tangenziale di Torino; è comunque da ricordare che tale valore rappresenta il massimo assoluto che, in ogni cella, si è stimato sul periodo in esame quindi la concentrazione descritta nella mappa può essere rappresentativa anche di solo un dato orario sull'intero trimestre di simulazione. Per quanto riguarda le sorgenti puntuali, le concentrazioni orarie più elevate si osservano nella zona a sud-est della tangenziale e interessa prevalentemente il territorio comunale di Torino e, parzialmente, alcune aree di Collegno e Venaria. Nelle figure A11 e A12 sono riportate rispettivamente la mappa delle concentrazioni medie e massime orarie di NO_x dovute alla Centrale IRIDE Le Vallette⁷.

Nella tabella 14 sono illustrati i valori massimi - sia sulla media del periodo sia sulle massime medie orarie - stimati per gli ossidi di azoto, suddivisi per singoli comparti emissivi e per il loro totale, accompagnati dalle coordinate del punto di accadimento e dall'indicazione comune nel quale si trova la cella corrispondente. La concentrazione media più elevata (88 µg/m³) dovuta al traffico urbano ed extraurbano è stimata nel comune di Torino, nei pressi di Piazza Rebaudengo (figura A1), mentre quella associata al solo traffico autostradale (176 µg/m³) è situata in prossimità dello svincolo della tangenziale di Cascine Vica (figura A2) a Rivoli; per quanto riguarda il riscaldamento domestico si stima una massima sul periodo pari a 22 µg/m³ nella città di Torino (figura A3). All'insieme delle sorgenti puntuali (esclusa la Centrale Torino Nord) è associato un contributo medio massimo di 8.5 µg/m³ situato nel comune di Torino nell'area prossima allo Juventus Stadium (figura A4); fra gli impianti industriali considerati, la Centrale IRIDE Le Vallette (figura A11) è quello responsabile delle concentrazioni più elevate, con un contributo medio massimo sul periodo di 8.3 µg/m³, quasi coincidente con quello del totale delle sorgenti esaminate. La somma dei vari contributi emissivi (esclusa la Centrale Torino Nord) presenta un massimo della media sul periodo di 197 µg/m³ collocato a Rivoli nei pressi della tangenziale.

⁷ Per agevolare la visualizzazione delle concentrazioni stimate, le mappe relative alle Centrali IRIDE Le Vallette e Torino Nord, che presentano un contributo inferiore rispetto a quello degli altri comparti emissivi, sono state riprodotte utilizzando una legenda differente da quella delle precedenti mappe.

Media sul periodo - Valore massimo				
	x(m)	y (m)	Comune	NOx (ug/m ³)
traffico urbano ed extraurbano	397375	4995375	Torino	88
traffico autostradale	386125	4993125	Rivoli	176
riscaldamento residenziale	397375	4989125	Torino	22
impianti industriali	392875	4995875	Torino	8.5
totale	385625	4991875	Rivoli	197
IRIDE SPA - centrale Le Vallette	392875	4995875	Torino	8.3
Centrale Torino Nord	391625	4996375	Torino/ Collegno	0.7

Valore massimo delle medie orarie				
	x(m)	y (m)	Comune	NOx (ug/m ³)
traffico urbano ed extraurbano	397375	4989125	Torino	585
traffico autostradale	385625	4992375	Rivoli	1385
riscaldamento residenziale	385625	4992375	Rivoli	235
impianti industriali	392375	4995125	Torino	206
totale	385625	4992375	Rivoli	1428
IRIDE SPA - centrale Le Vallette	392375	4995125	Torino	206
Centrale Torino Nord	390375	4993625	Collegno	17

Tabella 14. Ossidi di azoto: concentrazioni massime delle medie sul periodo e massime orarie assolute per tipologia di emissione e sul totale delle sorgenti considerate (inclusi i contributi separati della Centrale IRIDE Le Vallette e della Centrale Torino Nord)

Per quanto riguarda i valori massimi orari, la concentrazione più elevata stimata per il traffico urbano ed extraurbano (figura A6) è pari a 585 µg/m³ in un punto di Torino all'estremità SE del dominio, mentre per quello autostradale (figura A7) si ottengono 1385 µg/m³ localizzati a Rivoli in corrispondenza dello svincolo di Cascine Vica. Per il riscaldamento domestico (figura A8) la concentrazione massima pari a 235 µg/m³ è stimata in Torino a SE del Po. Il massimo derivante dalle sorgenti puntuali è calcolato essere pari a 206 µg/m³ in zona Vallette a Torino (figura A9), coincidente con il contributo associato alla Centrale IRIDE Le Vallette (la cui mappa delle ricadute massime è riportata in figura A12).

Il contributo della Centrale Torino Nord per gli ossidi di azoto, sebbene non in funzione nel periodo di simulazione, è riportato nella figura A13 per la media sul periodo di simulazione con un massimo pari a 0.7 µg/m³ in una cella nella zona al confine fra Torino e Collegno ad ovest dello stadio. Le concentrazioni massime medie orarie dovute sono invece riportate in figura A14; il massimo assoluto sul periodo corrisponde ad una concentrazione di 17 µg/m³ di NO_x, localizzato a Collegno in zona rurale a sud della Dora Riparia.

All'entrata in funzione della Centrale Torino Nord è corrisposto lo spegnimento della Centrale IRIDE Le Vallette; pertanto, per valutare la differenza fra i contributi dei due impianti è stata calcolata la differenza fra le concentrazioni medie stimate sul periodo; la mappa risultante è illustrata in figura A15 nella quale le concentrazioni negative indicano la diminuzione media che, nel periodo di simulazione, si avrebbe avuto se al posto della Centrale IRIDE Le Vallette fosse stata in funzione (alle condizioni emissive ipotizzate) la Centrale Torino Nord. Dalla mappa si

osserva che con la nuova centrale in funzione si stima una riduzione delle concentrazioni medie di ossidi di azoto sul trimestre di circa $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nell'area est del Comune di Collegno, mentre il Comune di Venaria è interessato nella zona SE a una riduzione media compresa fra 1 e $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. esaminando più in dettaglio, le riduzioni maggiori si riscontrano a Torino con una riduzione massima di $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mentre a Venaria il decremento massimo è pari a $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ immediatamente a nord dello Juventus Stadium; a Collegno, meno impattata dalle ricadute della centrale, la riduzione stimata è dell'ordine di $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al confine con il territorio comunale del capoluogo piemontese.

Le successive figure illustrano per il particolato PM10 di origine primaria il contributo medio del traffico urbano ed extraurbano (figura A16), quello del traffico autostradale (figura A17), del riscaldamento civile (figura A18) e delle sorgenti puntuali (figura A19). Il totale dei vari contributi medi sul periodo è illustrato in figura A20. Come nel caso degli ossidi di azoto, il contributo prevalente nei comuni di Collegno e Venaria alle concentrazioni di particolato PM10 di origine primaria è associato principalmente al traffico autostradale, seguito da quello urbano ed extraurbano. E' da ricordare che questi risultati non considerano l'apporto al particolato delle componenti secondarie organica e inorganica, che – come emerso dalle misurazioni e analisi condotte dal Dipartimento di Torino nell'ambito del presente studio - rappresentano una quota significativa delle concentrazioni misurate.

Il valore della massima media giornaliera è riportato, per i diversi comparti, nelle figure dalla A21 alla A25, rispettivamente per il traffico urbano ed extraurbano, il traffico autostradale, il riscaldamento civile, gli impianti industriali e il totale dei contributi.

Media sul periodo - Valore massimo				
	x(m)	y (m)	Comune	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
traffico urbano ed extraurbano	397125	4995625	Torino	36
traffico autostradale	386125	4993125	Rivoli	81
riscaldamento residenziale	385375	4995125	Pianezza	6
impianti industriali	397375	4996375	Torino	0.9
totale	385625	4991875	Rivoli	86
IRIDE SPA - centrale Le Vallette	392875	4995875	Torino	< 0.1

Valore massimo delle medie giornaliere				
	x(m)	y (m)	Comune	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
traffico urbano ed extraurbano	397375	4989125	Torino	67
traffico autostradale	386125	4991125	Rivoli	187
riscaldamento residenziale	385365	4995625	Pianezza	11
impianti industriali	397625	4996625	Torino	4
totale	386125	4993125	Rivoli	192
IRIDE SPA - centrale Le Vallette	392865	4995625	Torino	< 0.1

Tabella 15. Particolato PM10: concentrazioni massime delle medie sul periodo e massime medie giornaliere per tipologia di emissione e sul totale delle sorgenti considerate (inclusi i contributi separati della Centrale IRIDE Le Vallette e della Centrale Torino Nord)

In tabella 15 sono descritti i valori delle concentrazioni medie massime e delle concentrazioni massime medie giornaliere sul periodo di simulazione, con le coordinate del punto di accadimento e l'indicazione del comune dove si stima il massimo. Nel caso dei valori medi di PM10 sul trimestre

esaminato, il contributo massimo del traffico urbano ed extraurbano (figura A16) è pari a $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in zona Piazza Rebaudengo a Torino, mentre per quello autostradale si ottiene un valore di $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$, calcolato a Rivoli nei dintorni dello svincolo di Cascine Vica (figura A17). Per il riscaldamento civile (figura A 18) il valore massimo stimato a Pianezza è pari a $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mentre gli impianti industriali (figura A19) si ottiene un massimo di $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a Torino in zona Basse di Stura (e un massimo secondario di $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a Collegno). Analogamente a quanto fatto per gli ossidi di azoto, si è valutato singolarmente anche il contributo associato alla Centrale IRIDE Le Vallette, riportato in figura A26, che risulta per il PM10 primario decisamente trascurabile, con un massimo della media sul periodo inferiore a $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, collocato in zona Juventus Stadium. L'insieme delle sorgenti emmissive simulate (figura A20) presenta un massimo pari al $86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a Rivoli.

Per quanto riguarda i valori massimi delle medie giornaliere, per il traffico urbano ed extraurbano (figura A21) si stima una concentrazione di $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ localizzata a Torino a SE del dominio e per quello autostradale (figura A22) un valore di $187 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a Rivoli zona Cascine Vica. Il riscaldamento civile ha un massimo della media giornaliera di $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a Pianezza (figura A23), mentre le sorgenti industriali (figura A24) contribuiscono con un massimo di $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a Torino in zona Basse di Stura (e un massimo secondario di $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a Collegno). L'insieme delle sorgenti considerate (figura A25) mostra un massimo di $192 \mu\text{g}/\text{m}^3$ localizzato a Rivoli, sempre nei pressi della tangenziale. In figura A27 è riportata la mappa delle massime giornaliere di PM10 primario attribuibili alla Centrale IRIDE Le Vallette, che evidenzia un massimo inferiore a $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nei pressi dello Juventus Stadium di Torino.

Il contributo percentuale di ogni comparto emmissivo rispetto al totale simulato è stato calcolato, per i due inquinanti, considerando il rapporto fra le concentrazioni medie delle diverse sorgenti emmissive e le concentrazioni medie totali calcolate su tutto il periodo di simulazione e per ogni cella. Per evitare la presenza di valori non significativi sono state escluse dal calcolo le celle con concentrazioni medie inferiori a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per gli ossidi di azoto e a $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM10. Le mappe risultanti sono riportate nelle figure dalla A28 alla A31 per gli ossidi di azoto, rispettivamente, per il traffico urbano ed extraurbano, il traffico autostradale, il riscaldamento civile e le sorgenti puntuali. Le mappe evidenziano come per il comune di Collegno il contributo più rilevante risulti essere quello associato al traffico autostradale, seguito dal traffico urbano ed extraurbano; il riscaldamento domestico incide in modo particolare nelle aree adiacenti Corso Francia. Per il comune di Venaria contribuiscono in modo confrontabile (sebbene in aree differenti del territorio comunale) il traffico autostradale e quello urbano ed extraurbano (con leggera prevalenza di quest'ultimo), seguiti dal riscaldamento domestico. Non è stata riportata una mappa percentuale che illustri il contributo della singola Centrale Torino Nord in quanto, dati i livelli molto modesti riscontrati in termini di medie sul periodo, si è ritenuta di più immediata interpretazione la cartografia precedentemente illustrata relativa alla differenza fra i contributi della Centrale IRIDE Le Vallette e del nuovo impianto.

Per il particolato PM10 le figure dalla A32 alla A34 evidenziano il contributo percentuale del traffico urbano ed extraurbano, il traffico autostradale e il riscaldamento civile. Anche in questo caso il contributo più rilevante nel comune di Collegno è attribuito al traffico autostradale, mentre per quello di Venaria prevale il contributo del traffico urbano ed extraurbano e, a livelli di poco inferiori, quello autostradale. La mappa relativa al PM10 primario associato alle emissioni industriali non è stata prodotta, essendo le concentrazioni medie massime stimate inferiori alla soglia di $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ che si è preventivamente definita per il calcolo del contributo percentuale stesso.

Al fine di valutare la capacità del sistema di riprodurre i dati osservati, le concentrazioni medie orarie simulate sono state quindi estratte dai risultati della simulazione in corrispondenza dei punti di monitoraggio della qualità dell'aria, in particolare andando ad esaminare i risultati ottenuti dal modello nel sito di Collegno - Via Boves; in figura A35 sono riportati gli andamenti orari degli ossidi di azoto osservati e simulati durante la campagna di monitoraggio condotta nel periodo dal 2 dicembre 2010 al 9 gennaio 2011.

L'andamento temporale delle concentrazioni simulate riproduce piuttosto bene quello delle osservazioni, pur evidenziando una sottostima rispetto alle misure che può essere spiegata da diversi fattori:

- va considerato il fatto che in input non è stata simulata la totalità delle emissioni di ossidi di azoto presenti nel dominio (come precedentemente illustrato, sono state riprodotte le sole emissioni associate al traffico, al riscaldamento domestico e alle sorgenti puntuali presenti nel dominio);
- la tipologia di modello non prevede l'uso di condizioni al contorno, ovvero il contributo delle sorgenti esterne al dominio stesso che – a causa della circolazione atmosferica – possono contribuire ai valori registrati internamente all'area di studio;
- il contributo del traffico urbano fornito dalle stime 5T al di fuori dell'area di Torino è limitato a un numero molto ristretto di archi stradali; pertanto, come descritto precedentemente, per migliorare la riproduzione delle emissioni da traffico urbano, alle emissioni calcolate sul grafo è stato sommato il contributo del macrosettore 07 stimato dall'REA per la quota identificata come residuo a partire dal dato di consumo di combustibile: il risultato potrebbe risentire del diverso approccio nelle modalità di calcolo delle emissioni;
- un'ulteriore ragione della sottostima è attribuibile in generale alla difficoltà nel rappresentare correttamente il contributo del traffico urbano nella sua totalità (fattori emissivi da perfezionare, parco auto realmente circolante, effetti di congestione del traffico).

Come illustrato precedentemente, In figura A36 sono invece riportati gli andamenti dei contributi dei diversi comparti emissivi per gli ossidi di azoto presso Via Boves. Si osserva come il contributo preponderante sia ascrivibile al traffico autostradale, seguito dal traffico urbano ed

extraurbano; le sorgenti puntuali contribuiscono prevalentemente ad incrementare i valori di picco in corrispondenza di particolari condizioni atmosferiche, mentre il contributo del riscaldamento contribuisce alle concentrazioni di fondo del periodo.

I confronti delle serie temporali osservato-simulato per il particolato PM10 presso il sito di monitoraggio di Collegno sono riportati, per le medie giornaliere, in figura A37. Il profilo delle concentrazioni appare abbastanza rispettato dal modello (almeno nella prima parte del periodo); la sottostima evidenziata nel caso degli ossidi di azoto in questo caso è accentuata dal fatto che – come dimostrano le misure condotte dal Dipartimento di Torino - una frazione significativa del particolato misurato è attribuibile alla frazione secondaria, fatto che giustifica ampiamente le differenze osservate nella figura, oltre alla presenza di possibili episodi di accumulo associati a contributi esterni al dominio. A differenza del caso degli ossidi di azoto, nel quale al termine del periodo di monitoraggio si osserva una significativa decrescita nelle concentrazioni misurate e simulate, nel caso del PM10 le concentrazioni misurate crescono rapidamente dopo le precipitazioni registrate dal 21 al 24 dicembre 2010, mentre quelle simulate rimangono su valori molto modesti; si può ipotizzare che, in corrispondenza di questo episodio, vi sia apporto più significativo di quanto evidenziato in altri periodi di simulazione di particolato di origine secondaria che il modello, per le sue caratteristiche, non può riprodurre. In figura A38 sono riportati gli andamenti dei contributi dei diversi comparti emissivi per il PM10 primario presso il sito di Collegno. Si osserva come il contributo preponderante corrisponda alle emissioni da traffico autostradale; non è stato riportato il contributo dovuto agli impianti industriali in quanto molto modesto (sempre per la frazione primaria).

Per una valutazione complessiva dei contributi dei comparti emissivi considerati in questo studio alle concentrazioni simulate presso il punto di monitoraggio di Collegno, in figura A39 è stata riportata la distribuzione percentuale delle concentrazioni sull'intero periodo di studio per biossido di azoto e particolato PM10. Sia per gli ossidi di azoto che per il particolato PM10 il contributo più elevato è legato al traffico autostradale (49% nel caso degli NO_x e 64% per il PM10), seguito da quello urbano ed extraurbano (30% nel caso degli NO_x e 29% in quello del PM10) e dal riscaldamento residenziale (responsabile del 18% degli NO_x e del 7% dei PM10). Le sorgenti industriali (Centrale IRIDE Le Vallette inclusa, esclusa la Centrale Torino Nord) contribuiscono per il 3% degli ossidi di azoto e in modo trascurabile (0.1%) per il PM10.

Al fine di valutare l'andamento della simulazione anche in altri punti del dominio, nelle figure successive sono riportati alcuni esempi degli andamenti osservato-simulato degli NO_x presso alcune stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria interne al dominio, Torino Rebaudengo (figura A40) e Torino Consolata (figura A41), che vengono classificate da traffico urbano. In questo caso si notano un fondo nelle concentrazioni osservate che contribuisce alla sottostima dei valori simulati rispetto alle misure e alcuni episodi di accumulo che la simulazione non riesce a riprodurre; ad interpretazione di questo comportamento, oltre alle ragioni precedentemente

riportate è necessario tenere conto sia delle caratteristiche sito-specifiche delle stazioni (ad esempio Torino Consolata è collocata in un canyon stradale, non descrivibile alla risoluzione del modello) sia della posizione nel dominio di calcolo (Torino Rebaudengo è collocata a bordo dominio quindi può risentire in modo più evidente della mancanza di condizioni al contorno).

Per quanto riguarda il PM10 simulato presso altre stazioni di misura interne al domino, la sottostima conferma sia quanto osservato per gli ossidi di azoto sia l'assenza del significativo contributo del particolato di origine secondaria (Torino Rivoli e Torino Consolata, rispettivamente in figura 42 e 43).

Conclusioni

Il Dipartimento Sistemi Previsionali nell'ambito del "Progetto di studio delle sorgenti di inquinamento atmosferico nel territorio circostante la centrale termoelettrica di IRIDE Torino Nord" ha realizzato una serie di simulazioni modellistiche su un dominio di 14x14 km² che include i comuni di Collegno e Venaria, al fine di valutare i contributi relativi delle principali sorgenti emmissive (traffico autostradale, urbano ed extraurbano, riscaldamento domestico, impianti industriali) rispetto alle concentrazioni di ossidi di azoto e particolato PM10 (di origine primaria) sull'area di studio. La simulazione è stata condotta su un periodo di tre mesi, dal 1 dicembre 2010 al 28 febbraio 2011, all'interno del quale (dal 1 dicembre al 9 gennaio) è stata realizzata dal Dipartimento di Torino e nell'ambito dello stesso progetto, una campagna di monitoraggio condotta con Laboratorio Mobile presso Via Boves a Collegno.

Oltre alle sorgenti industriali più significative presenti all'interno del domino, considerate nel loro complesso, è stata valutata singolarmente l'incidenza sia della Centrale IRIDE Le Vallette (ancora in funzione nel periodo studiato) sia della Centrale Torino Nord (che la sostituisce); inoltre, limitatamente agli ossidi di azoto, è stata valutata la differenza in termini di concentrazioni medie prodotte sul periodo di simulazione dalle due centrali.

Le sorgenti più impattanti sui comuni di Collegno e Venaria risultano essere per entrambi gli inquinanti e gli indicatori considerati (media sul periodo, massime medie orarie per gli NO_x e massime medie giornaliere per il PM10) quelle legate al traffico sia autostradale, in particolare nelle zone più a ridosso della tangenziale torinese, che urbano ed extraurbano. Il riscaldamento domestico incide prevalentemente per quanto riguarda gli ossidi di azoto sulle aree edificate, mentre le sorgenti industriali hanno una modesta incidenza sugli ossidi di azoto e, soprattutto, sul particolato PM10 di origine primaria.

I risultati della simulazione sono stati quindi confrontati con le misure condotte fra dicembre e inizio gennaio a Collegno in Via Boves. L'andamento temporale delle concentrazioni misurate di NO_x risulta piuttosto ben riprodotto dal modello, sebbene si osservi una sottostima che può trovare spiegazione in una non completa descrizione delle emissioni dovuta sia al fatto che non tutte le sorgenti che insistono sull'area sono state simulate (scelta legata alla tipologia di modello utilizzato ma che, per contro, permette di distinguere i contributi delle diverse tipologie emmissive) e alla

manca del contributo delle sorgenti esterne al dominio di simulazione. Per quanto riguarda il particolato PM10 la sottostima è più evidente e, oltre alle ragioni precedentemente citate, tiene conto del fatto che, come anche dimostrato dalle analisi condotte dal Dipartimento di Torino nell'area, la componente secondaria del particolato (non descritta dal tipo di modello utilizzato) assume un peso rilevante sulle concentrazioni misurate. E' infine stata valutata l'incidenza delle sorgenti considerate sulle concentrazioni simulate presso il punto di misura di Collegno, rilevando che il contributo più significativo è legato alla presenza del traffico autostradale, rappresentato dalla tangenziale di Torino, seguito da quello del traffico urbano ed extraurbano.

Per quanto riguarda il peso assunto dalla Centrale di Torino Nord che ha sostituito quella di IRIDE Le Vallette, il modello ha stimato una decrescita delle concentrazioni medie di ossidi di azoto associato all'entrata in funzione della nuova centrale, che raggiunge un massimo $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a Torino e di $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a Venaria, mentre a Collegno le riduzioni sono più modeste e valutabili intorno a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

APPROFONDIMENTI

Cluster analysis applicata al calcolo delle modulazioni temporali del traffico

La metodologia utilizzata è consistita nel calcolare i coefficienti di correlazione temporale tra i vari archi e raggruppare per mezzo di una *cluster analysis* quelli aventi coefficiente di correlazione elevato, ovvero con una modulazione temporale simile. Lo scopo della *cluster analysis* è quello di raggruppare le unità sperimentali in classi secondo criteri di similarità, determinando un certo numero di classi all'interno delle quali le osservazioni siano il più possibile omogenee. L'approccio utilizzato è il *clustering gerarchico* con algoritmo *bottom-up*, che crea tanti gruppi quanti sono gli oggetti (archi) e unisce gli oggetti tra loro più vicini fino ad ottenere un gruppo contenente tutti gli oggetti. I risultati del clustering si possono visualizzare mediante un dendrogramma - che presenta sulle ordinate l'altezza di fusione degli archi; la scelta del numero di gruppi (che idealmente varia tra 2 e 6) è effettuata confrontando le altezze di fusione del dendrogramma, poiché un'alta differenza tra un'altezza di fusione e l'altra denota una divisione netta tra i gruppi (mentre una altezza bassa corrisponde a un'alta coerenza interna tra gli elementi che compongono il gruppo).

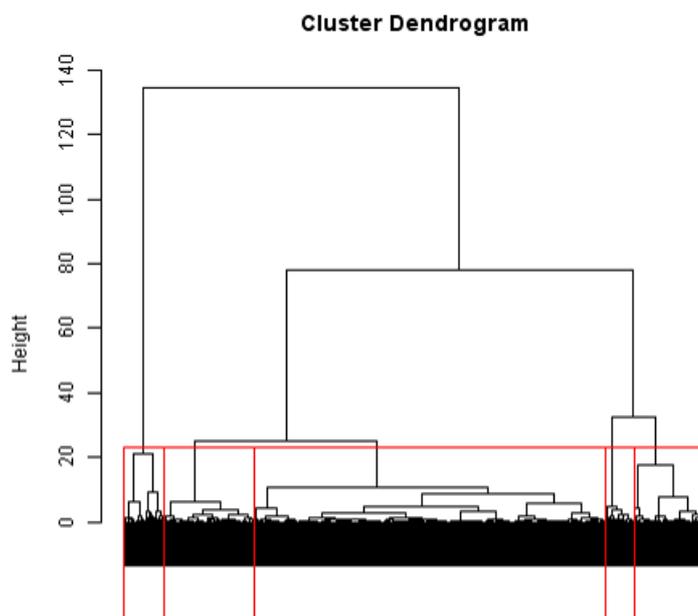


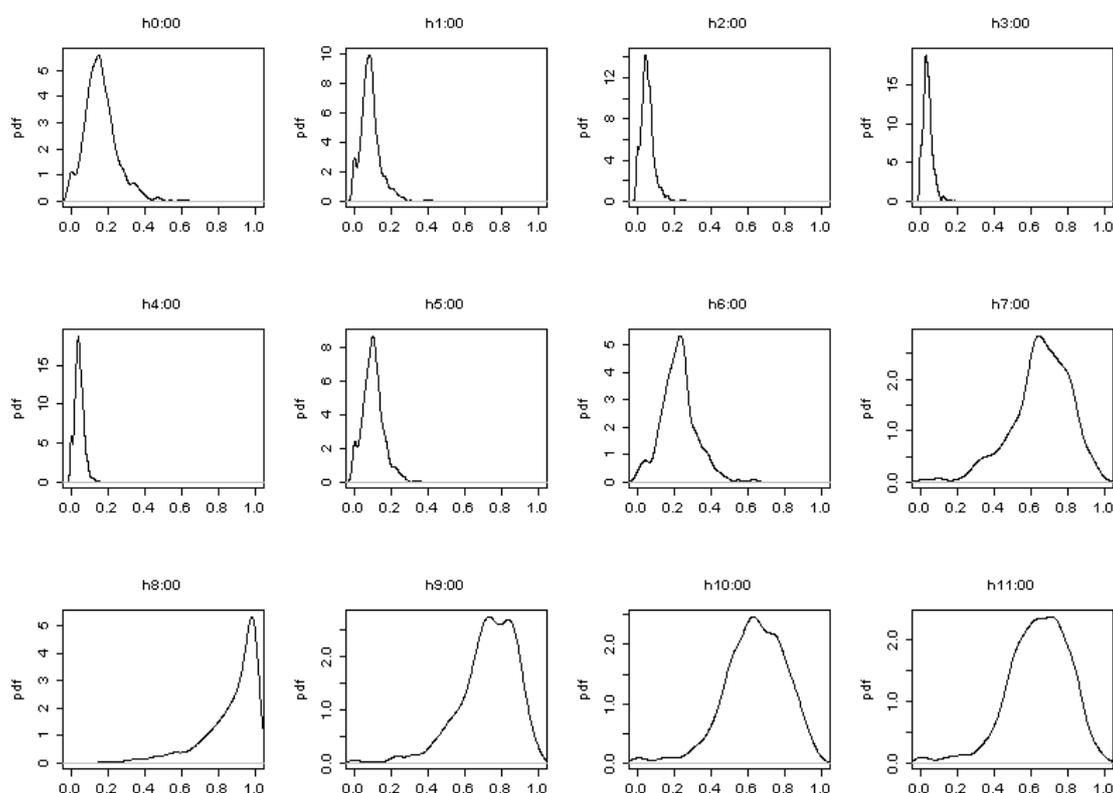
Figura 29. Dendrogramma relativo al mese di gennaio: in rosso i 5 gruppi (cluster) individuati

Gruppo	Numero archi	Flusso di traffico (n. veicoli/h)	Incidenza sul flusso totale
1	1052	681337	91%
2	218	19893	3%
3	267	35020	5%
4	122	7637	1%
5	87	989	< 1%

Tabella 16. Caratteristiche dei 5 gruppi individuati mediante la *cluster analysis*

Disponendo di informazioni dettagliate sui passaggi alle barriere di esazione forniti da ATIVA S.p.A. per il periodo di studio con i quali determinare in modo più preciso le modulazioni da attribuire alla tangenziale, si è deciso di applicare questa metodologia solamente agli archi urbani ed extraurbani. Per ciascun mese analizzato (dicembre, gennaio, febbraio) sono stati individuati 5 gruppi per ognuno dei quali è stata calcolata una modulazione che rappresenta, ora per ora, il valore di traffico più probabile tra gli archi appartenenti allo stesso gruppo per quella stessa ora. A titolo di esempio, in figura 29 il dendrogramma relativo ai flussi degli archi urbani ed extraurbani del mese di gennaio individua 5 gruppi, all'interno dei quali l'andamento temporale del traffico è omogeneo, con le caratteristiche illustrate in tabella 16.

Se consideriamo la giornata del 10 gennaio 2011, la modulazione oraria rappresentativa del gruppo 1 è stata ricavata come valore più probabile della funzione densità di probabilità dei dati di traffico, normalizzati a 1, degli archi appartenenti al gruppo 1. A titolo di esempio, in figura 30 sono rappresentate le funzioni densità di probabilità per le 24 ore del 10 gennaio 2011 e in figura 31 è visualizzata la modulazione che ne deriva, i cui valori orari corrispondono al valore più probabile della funzione densità di probabilità. Si osservano due picchi di traffico giornaliero, con valori prossimi ad 1, alle ore 8 di mattina e 18 di sera.



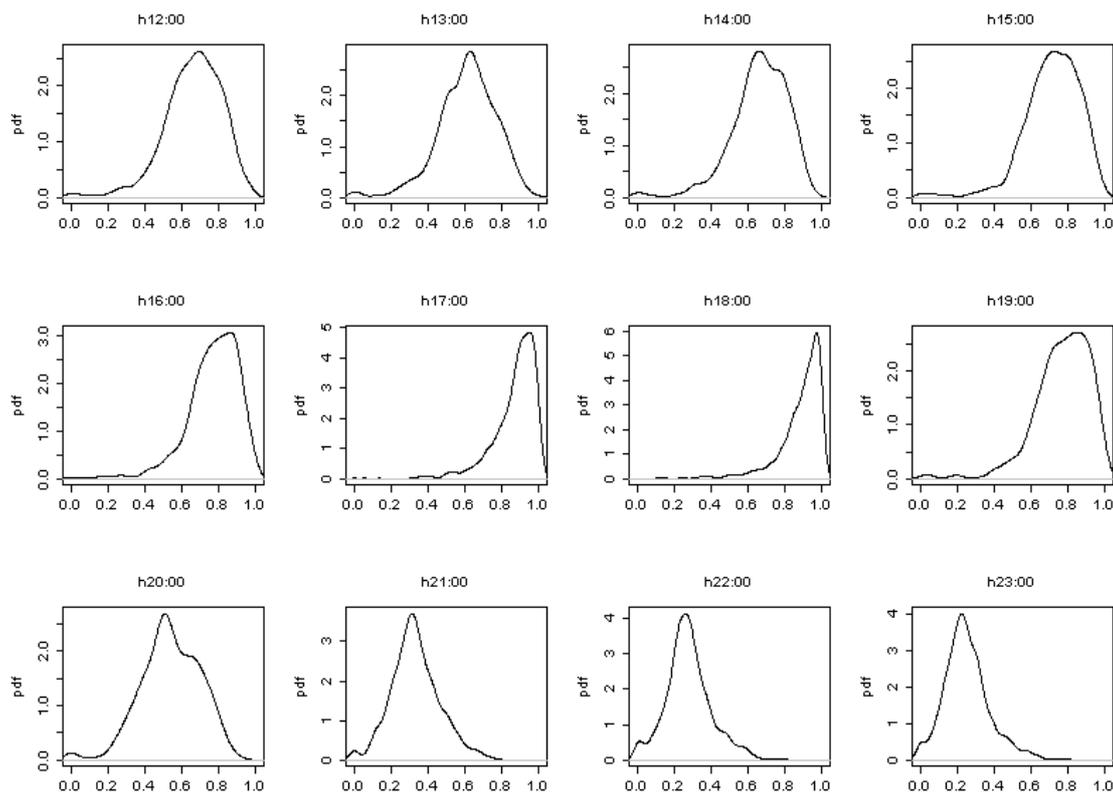


Figura 30. Evoluzione giornaliera della funzione densità di probabilità dei valori di traffico degli archi appartenenti al gruppo 1 - 10 gennaio 2011

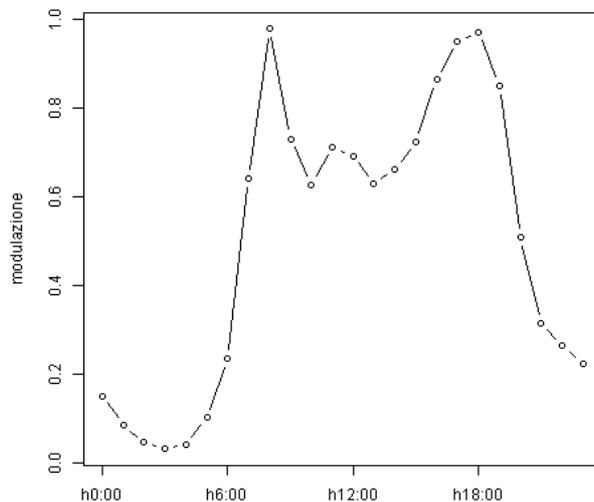


Figura 31. Modulazione oraria del 10 gennaio 2011

Come si può osservare dalla precedente tabella 17, il gruppo 1 comprende la maggior parte degli archi (60%) e la quasi totalità del traffico (91%). La figura 32 mostra come gli archi appartenenti ai gruppi siano distribuiti spazialmente: i gruppi 1 e 2 si riferiscono generalmente a strade principali e secondarie esterne al centro di Torino, il gruppo 3 si riferisce alle strade principali del centro di Torino e i gruppi 4 e 5 alle strade secondarie del centro di Torino.

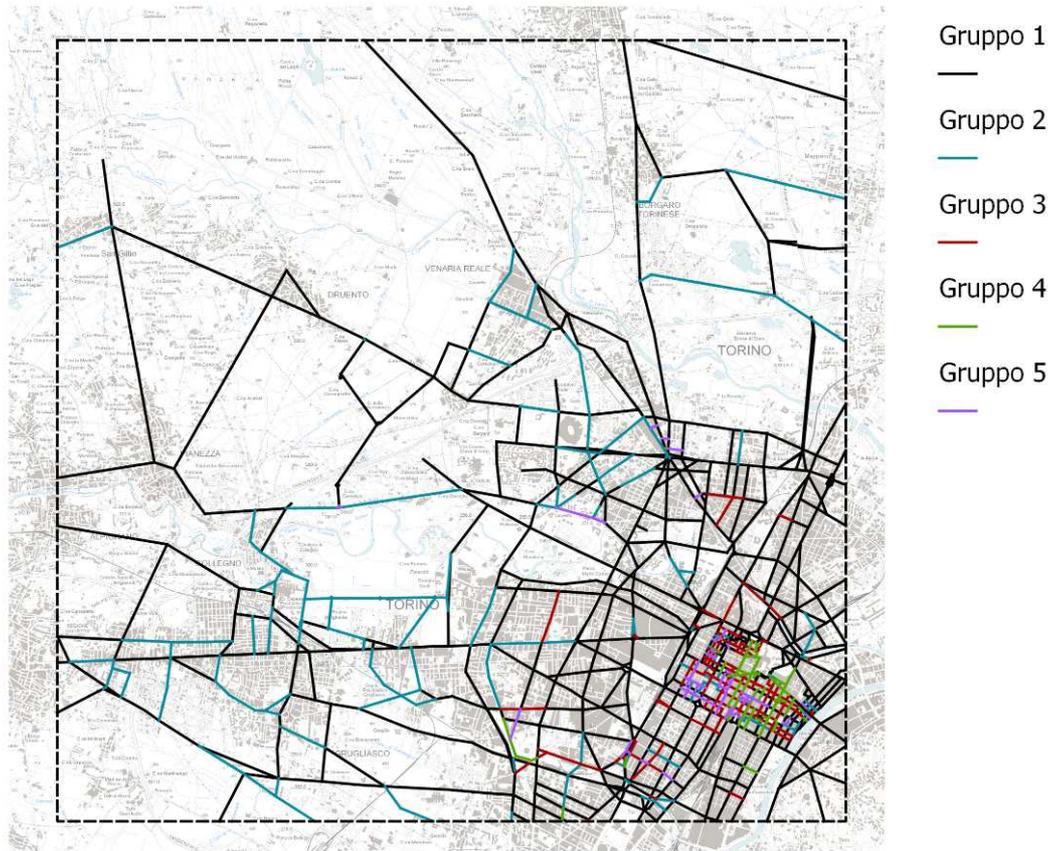
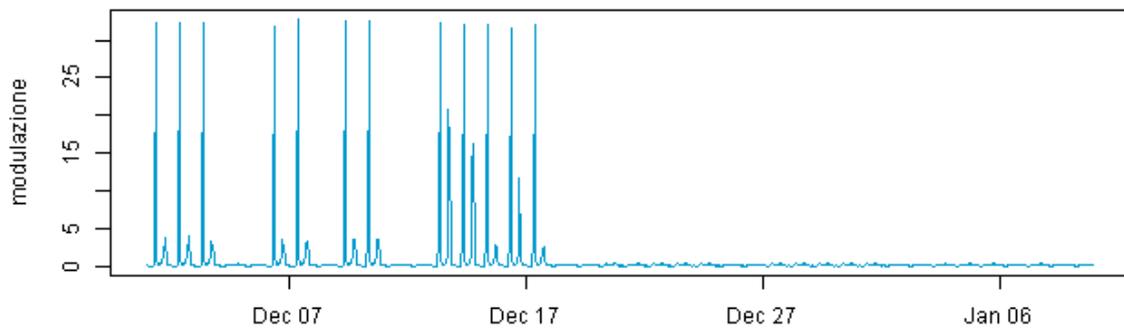
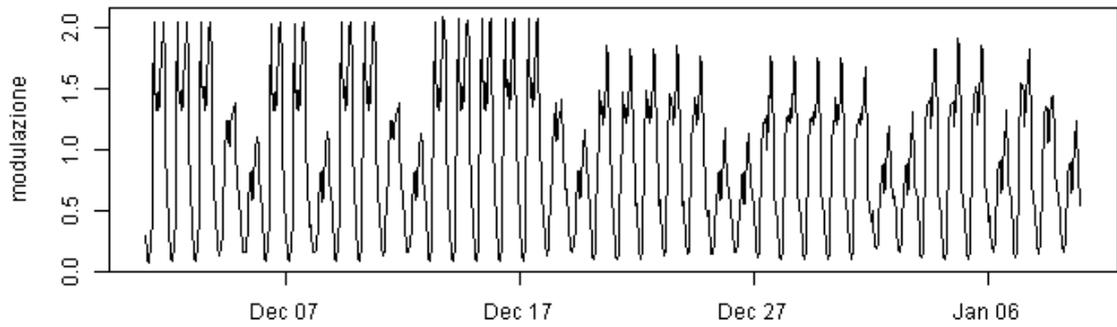


Figura 32. Distribuzione spaziale dei 5 gruppi individuati dalla *cluster analysis* applicata alle strade urbane ed extraurbane



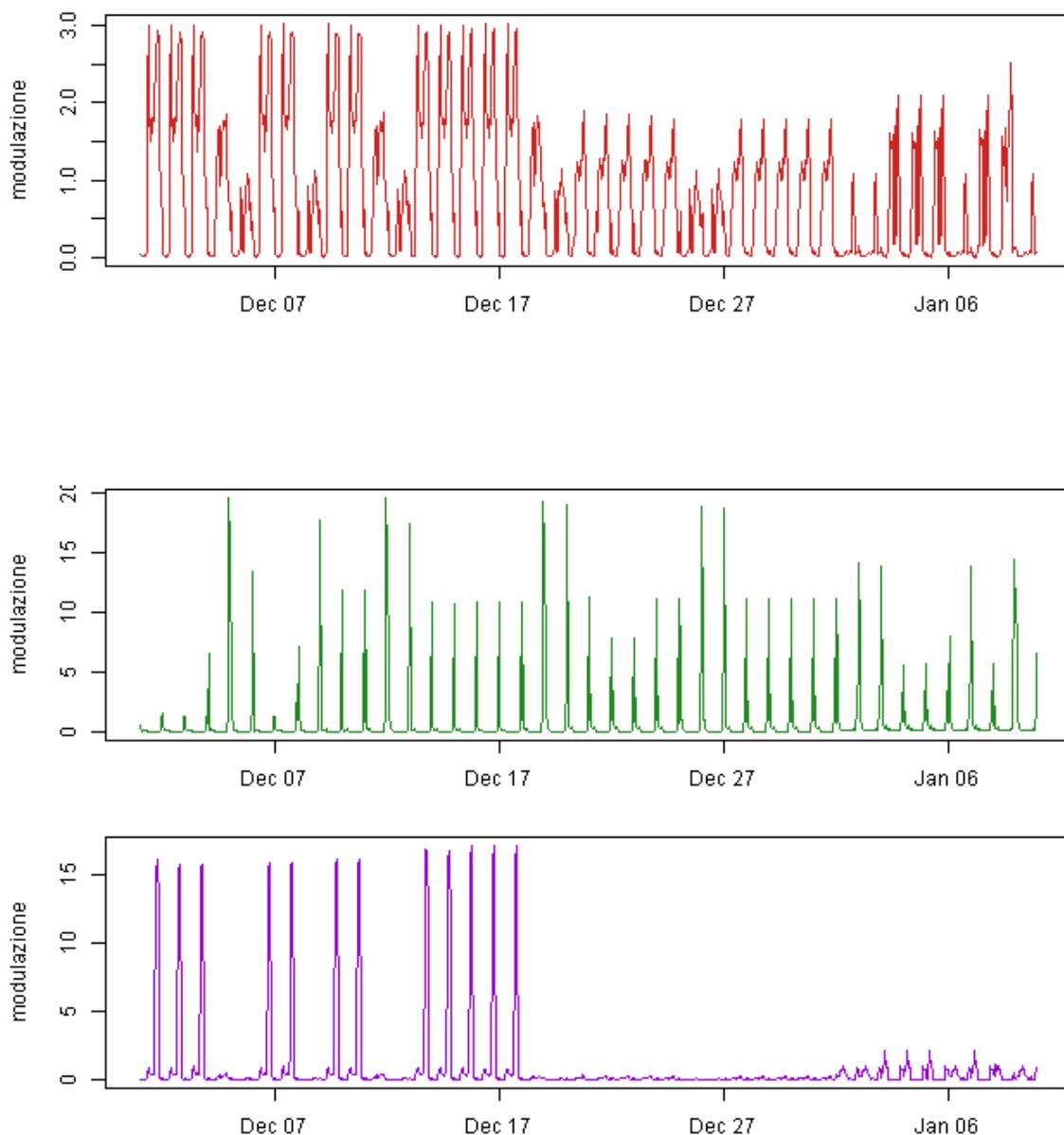


Figura 33. Modulazione temporale dei 5 gruppi individuati dalla *cluster analysis* per strade urbane ed extraurbane: gruppo 1 in nero, gruppo 2 in blu, gruppo 3 in rosso, gruppo 4 in verde e gruppo 5 in viola

Le modulazioni rappresentative dei 5 gruppi sono mostrate in figura 33 (per ragioni di leggibilità i dati si riferiscono al solo periodo dal 1 dicembre al 9 gennaio 2011): le modulazioni dei gruppi 1 e 3, che rappresentano il 96% del traffico totale, prevedono due picchi giornalieri e una sensibile diminuzione del traffico il sabato, la domenica e i festivi infrasettimanali; le modulazioni degli altri gruppi descrivono situazioni particolari, poiché la 2 prevede la presenza di traffico solo tra le 6 e le 9 di mattina e tra le 14 e le 18 di pomeriggio dei giorni infrasettimanali, la 4 rappresenta strade caratterizzate dal solo traffico serale, e la 5 prevede un solo picco pomeridiano alle 17 dei giorni infrasettimanali. L'utilizzo di modulazioni temporali orarie permette di ricostruire l'effettivo andamento del traffico, ad esempio la riduzione del traffico in giornate festive infrasettimanali che si può osservare l'8 dicembre e il 6 gennaio o durante le vacanze natalizie dal 24 dicembre al 9 gennaio. I valori delle modulazioni in ordinate sono normalizzati affinché la loro somma equivalga a

2160, ossia il numero delle ore della simulazione; in questo modo il flusso totale su ciascun arco, ottenuto moltiplicando la somma delle modulazioni per il flusso medio orario associato a ciascun arco, è conservato.

Come accennato precedentemente, le modulazioni degli archi autostradali sono state ricavate, dai passaggi alle barriere forniti da ATIVA. I dati di traffico, espressi in termini di numero di veicoli all'ora e differenziati tra veicoli leggeri e pesanti e direzione nord e sud, sono stati analizzati per le barriere di Bruere, Settimo, Falchera, Beinasco e Trofarello relativamente ai mesi di dicembre 2010, gennaio e febbraio 2011. Una cluster *analysis* è stata effettuata per raggruppare le barriere con simili modulazioni temporali del traffico, differenziato tra veicoli pesanti e leggeri; dai dendrogrammi in figura 34 si distingue un gruppo con modulazioni simili, che comprende le barriere di Falchera, Beinasco e Trofarello per entrambe le direzioni e che è stato scelto per ricostruire le modulazioni temporali da associare agli archi autostradali del grafo.

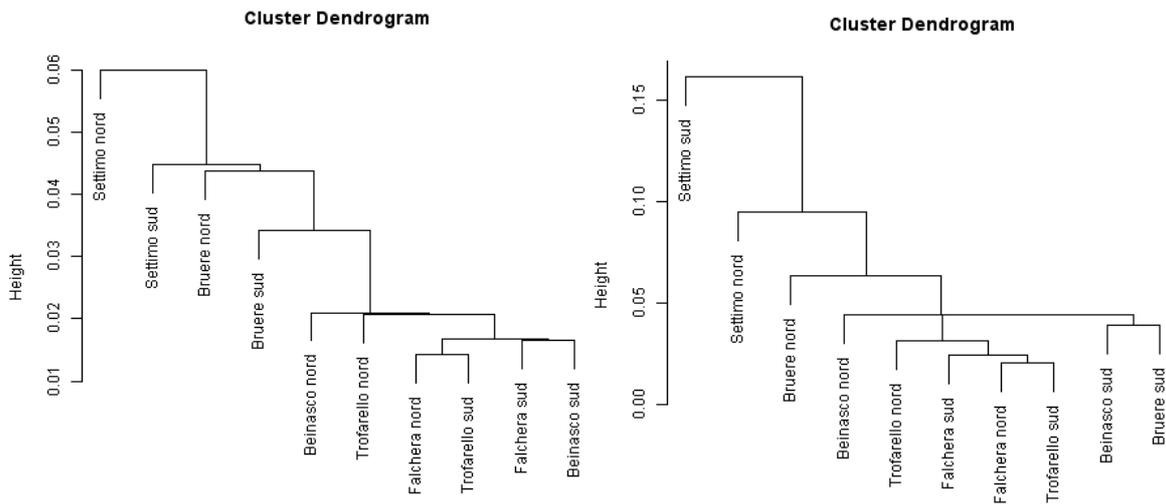


Figura 34. Dendrogrammi relativi al traffico di veicoli pesanti (a sinistra) e leggeri (a destra) presso le barriere di Settimo, Bruere, Trofarello, Falchera e Beinasco

Le modulazioni orarie degli archi autostradali sono state ottenute dalla mediana dei dati orari dei passaggi alle barriere di Falchera, Beinasco e Trofarello (direzione nord e sud) per i veicoli leggeri e per i veicoli pesanti e sono descritte in figura 35.

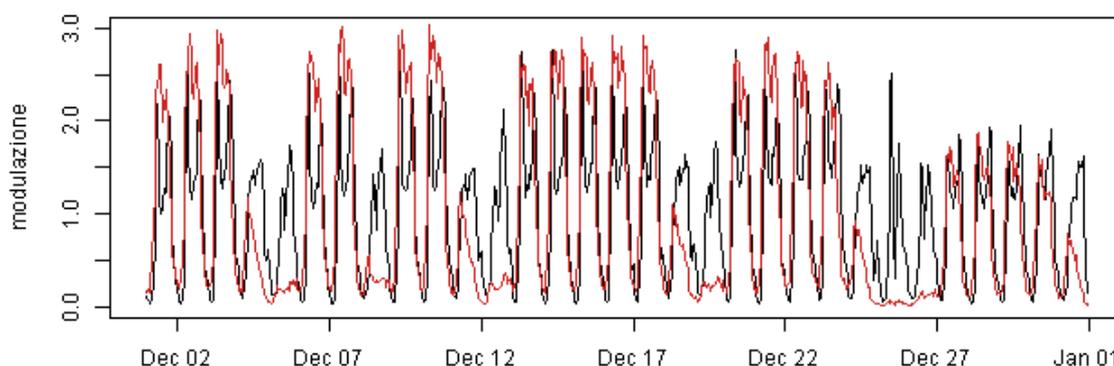


Figura 35. Modulazione temporale dei veicoli leggeri (in nero) e pesanti (in rosso) per il mese di dicembre

Valutazione dei parametri di performance sulla simulazione meteorologica

Gli indicatori statistici utilizzati nella valutazione della performance della simulazione meteorologica sono i seguenti:

- MEDIA dei parametri meteorologici sia per quanto riguarda i valori osservati (C_o) che i valori stimati dal modello (C_s), definita rispettivamente come

$$\overline{C^o} = \sum_1^n \frac{C_i^o}{N} \quad \text{e} \quad \overline{C^s} = \sum_1^n \frac{C_i^s}{N}$$

- BIAS, definito come la differenza fra la media dei valori osservati e quella dei simulati

$$Bias = \overline{C^o} - \overline{C^s} ;$$

un modello perfetto darà BIAS=0; se BIAS > 0, il modello sottostima le misure, se BIAS < 0 le sovrastima;

- FRACTIONAL BIAS, ovvero il BIAS normalizzato in modo da essere adimensionale; varia fra +2 e -2, con un valore ottimale di 0.
- R, coefficiente di correlazione lineare

$$Cor = \frac{(\overline{C^o} - \overline{C^s})(\overline{C^s} - \overline{C^o})}{\sigma^o \sigma^s}$$

dove σ^s e σ^o sono rispettivamente la deviazione standard dei valori simulati e osservati; un modello perfetto darà R=1

- FA2, frazione entro il valore 2: indica la frazione di valori tale che il rapporto C_i^s / C_i^o deve essere compreso tra 0.5 e 2; un modello perfetto darà FA2=1;
- RMSE, errore quadratico medio; un modello perfetto darà RMSE=0.

A titolo di esempio, nella tabella 17 si riportano i valori di alcuni dei parametri sopra descritti relativamente alle grandezze temperatura e velocità del vento, che mostrano un ottimo

comportamento del modello nella ricostruzione di entrambi i parametri. Si noti che tutte le stazioni sono state utilizzate come input meteorologico del modello.

	MB	FB	FA2	RMSE	R
	velocità del vento				
Avigliana	-0.02	-0.019	0.994	0.112	0.993
Bauducchi	0.003	0.003	0.998	0.051	0.995
Caselle	0.013	0.01	0.999	0.068	0.995
Cumiana	-0.012	-0.014	0.995	0.09	0.976
Pino Torinese	-0.078	-0.047	0.998	0.159	0.992
Torino Consolata	-0.032	-0.024	0.999	0.074	0.997
Torino Reiss Romoli	-0.014	-0.011	0.998	0.069	0.995
Rivoli	-0.023	-0.019	0.999	0.064	0.997
	temperatura				
Avigliana	-0.411	-0.148	0.777	1.059	0.984
Bauducchi	-1.034	-0.438	0.655	1.579	0.956
Caselle	-0.476	-0.163	0.808	0.814	0.989
Cumiana	-0.096	-0.026	0.935	0.532	0.993
Pino Torinese	1.081	0.418	0.663	2.087	0.908
Torino Consolata	0.113	0.034	0.855	0.792	0.98
Torino Reiss Romoli	0.002	0.001	0.901	0.645	0.986
Rivoli	0.023	0.009	0.791	1.02	0.978

Tabella 17. Risultati analisi statistiche finalizzate alla valutazione delle prestazioni del modello