

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in
Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

Valutazione dell'influenza dei parametri meteorologici sulla dispersione degli inquinanti nell'area urbana di Torino



Relatori

Prof.ssa Mariachiara Zanetti

Prof.ssa Deborah Panepinto

Dott. Ing. Marco Ravina

Candidato

Corrado Landi

Anno Accademico 2019/2020

Abstract

Nowadays, air pollution represents one of the most serious problems facing us. It is a problem from both a social and an environmental point of view. Polluting species, emitted by both natural and human activities, cause negative impacts on ecosystems, but especially on human health. The World Health Organisation estimates that air pollution causes about 3 million premature deaths per year, and that about 92% of the world's population is exposed to annual concentrations above the recommended limit. Moreover, this exposition is conditioned by a series of parameters, technical, meteorological and geographic, different for each area, which characterize the dispersion of pollutants in the atmosphere. In addition, European legislation and its transposition into Italian law encourage the development and use of air quality modelling systems. The operation of pollutant dispersion models consists of simulating the effects of one or more emission sources in terms of ground concentrations of pollutants at a given receptor. They are considered of primary importance in preliminary quality assessments and useful to complement the information content of direct measures. In this work, CALPUFF, a puff dispersion model recommended by the Environmental Protection Agency, has been applied to assess the dispersion of nitrogen oxides, significantly detrimental to human health, in the urban area of Turin. This puff dispersion model was chosen for its ability to handle weather data, different types of sources and the strong orographic complexity of the area around Turin. In this study, two different emission scenarios were simulated in January, i.e., emissions from thermoelectric power plants alone and emissions from domestic heating alone, over two different years, 2010 and 2015. These two years have been chosen because they represent two very different thermal peculiarities; 2010 was a very cold year compared to the average, while 2015 was a very hot year compared to the average. Therefore, the weather data, such as wind speed, direction and frequency, were first analysed; then the emission components have been calculated, using data from the power stations and the heat demand. Subsequently, the base files for simulations such as the geographical coordinates, the different terrain orography, wind fields and emission source files were set. Once the results were obtained, they were post-processed for both two-dimensional and three-dimensional visualization through the SURFER software. The simulations show that the concentration values and their dispersion are mainly influenced both by the position and the emission rate and by the wind direction and speed. Other parameters such as atmospheric stability, irradiation, temperature and mixing height influence the dispersion but less than the above mentioned parameters. Ultimately, the study obtained consistent results with the data measured by the weather stations. Finally, in order to obtain

concentration values and dispersion trajectories of nitrogen oxides, or of several pollutants, it is suggested to investigate in depth the influence of the single parameters with the species under study and to use further dispersion models, for example langrangian ones, for comparison.

Indice

Abstract	2
Indice.....	5
Indice delle figure.....	7
Indice delle tabelle	10
Introduzione	12
1. L'inquinamento in Atmosfera	15
1.1 Quadro normativo.....	17
1.2 I principali inquinanti	19
1.3 Gli ossidi di azoto (NOx).....	23
2. Il clima in Piemonte	33
2.1 L'influenza del vento.....	34
2.2 La situazione microclimatica di Torino	39
3. I modelli di dispersione degli inquinanti.....	43
3.1 I modelli di tipo Euleriano e Lagrangiano	44
3.2 I modelli di dispersione Gaussiani.....	48
3.3 I modelli di dispersione di tipo puff	52
3.3.1 CALMET	58
3.3.2 CALPUFF	60
3.3.3 CALPOST	60
4. Il caso studio nell'area urbana di Torino.....	62
4.1 Dominio di interesse	62
4.2 Analisi dei dati meteo	63
4.2.1 Gennaio 2010	64
4.2.2 Gennaio 2015	70
4.3 Scenari emissivi.....	75
4.3.1 Emissioni da centrali termoelettriche.....	75
4.3.2 Emissioni da impianti termici residenziali	85
4.4 Presentazione dei risultati.....	96
5. Conclusioni.....	99
Bibliografia.....	101
Ringraziamenti	103

Indice delle figure

Figura 1 - Principali effetti degli inquinanti sulla salute umana (Fonte: EU Clean Air Policy).....	16
Figura 2 - Innalzamento della temperatura terrestre dovuto alle attività antropiche. (Fonte: Report IPCC Global Warming)	17
Figura 3 - Schema dei meccanismi di formazione degli NOx (Fonte: Stazione Sperimentale per i Combustibili).....	26
Figura 4 - Ciclo fotochimico degli NOx in troposfera (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)	28
Figura 5 - Ciclo fotochimico degli NOx in stratosfera (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)	29
Figura 6 - Ciclo fotochimico complessivo degli NOx (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)	30
Figura 7 - Fotochimica della fase gas VOC-NOx che porta alla formazione dei PAN (Fonte: Roberts,2007)....	31
Figura 8 - Immagine satellitare del Nord Italia (Fonte: NASA).....	34
Figura 9 - Ortofoto del Piemonte (Fonte: Geoportale del Piemonte)	35
Figura 10 - Meccanismo di formazione e circolazione delle brezze (Fonte: www.3bmeteo.com).....	37
Figura 11 - Rappresentazione dei fenomeni climatici di Stau e Foehn (Fonte: www.ilmeteo.it)	38
Figura 12 - Classificazione di Köppen per la penisola italiana (Fonte: Adam Peterson, realizzata con i dati di WorldClim.org).....	39
Figura 13 - Ortofoto della città di Torino (Fonte: Geoportale Piemonte)	40
Figura 14 - Perturbazioni create dagli edifici (Fonte: Oke,1987).....	41
Figura 15 - Ripartizione per settore delle emissioni totali di NOx nel comune di Torino (Fonte: Inventario Regionale delle Emissioni in Atmosfera, 2013)	42
Figura 16 - Volume di controllo per il calcolo della conservazione della massa (Fonte: ARPA Lazio)	45
Figura 17 - Andamento del plume gaussiano in condizioni stazionarie (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)	51
Figura 18 - Interazione di un puff generico con i vortici turbolenti di piccole (a), medie (c) e grandi (b) dimensioni (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)	53
Figura 19 - Influenza della direzione del vento per un modello a puff (a sx) e per un modello a plume (a dx) (Fonte: Elena Negri,2011).....	53
Figura 20 - Schema di un puff generico con indicazione dei coefficienti di dispersione gaussiana (Fonte: Elena Negri, 2011).....	56
Figura 21 - Schema di funzionamento del software CALPUFF (Fonte: Zanetti, Panepinto and Ravina, 2017)..	58
Figura 22 - Diagramma di flusso del modello meteorologico CALMET (Fonte: Calpuff User Instructions)	59
Figura 23 - Generica rappresentazione grafica delle mappe di concentrazione al suolo (Fonte: Elena Negri, 2011)	61
Figura 24 - Rappresentazione del dominio di calcolo per l'analisi degli impatti ambientali locali.....	62
Figura 25 - Carta Tecnica Regionale della zona urbana di Torino (Fonte: ARPA Piemonte).....	63
Figura 26 - Temperatura potenziale durante il mese di Gennaio del 2010	64
Figura 27 - Precipitazioni nel mese di Gennaio 2010	65
Figura 28 - Altezza del geopotenziale nel primo trimestre del 2010 (Fonte: ARPA Piemonte)	65
Figura 29 - Andamento del modulo di intensità del vento nel mese di Gennaio 2010.....	66
Figura 30 - Direzioni, velocità e frequenze dei venti nella zona urbana di Torino a Gennaio 2010	67
Figura 31 - Frequenza delle classi di stabilità atmosferica nel mese di Gennaio 2010	68

Figura 32 – Lunghezza di Monin-Obukhov per il mese di Gennaio del 2010	69
Figura 33 - Altezza del geopotenziale nella prima parte di Gennaio del 2015 (Fonte: ARPA Piemonte).....	70
Figura 34 - Altezza del geopotenziale nella seconda parte di Gennaio del 2015 (Fonte: ARPA Piemonte)	71
Figura 35 - Temperatura potenziale durante il mese di Gennaio del 2015	71
Figura 36 – Precipitazioni nel mese di Gennaio 2015.....	72
Figura 37 - Andamento del modulo di intensità del vento nel mese di Gennaio 2015.....	72
Figura 38 - Direzioni, velocità e frequenze dei venti nella zona urbana di Torino a Gennaio 2015	73
Figura 39 - Frequenza delle classi di stabilità atmosferica nel mese di Gennaio 2015	74
Figura 40 - Lunghezza di Monin-Obukhov per il mese di Gennaio del 2015	74
Figura 41 - Estensione attuale della rete di teleriscaldamento nell'area urbana di Torino (Fonte: IREN Energia S.p.A.).....	76
Figura 42 - Ubicazione delle centrali termoelettriche nella zona urbana di Torino	76
Figura 43 – Impostazione generale dei dati di input per il file "sorgenti puntuali" (PTEMARB.DAT)	78
Figura 44 - "Pacchetto" delle emissioni su base oraria in cui sono descritti temperatura, velocità, σ_y , σ_z e portata per ciascuna sorgente emissiva puntuale.....	79
Figura 45 - Mappa di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2010. Scenario: Contributo delle centrali di produzione termoelettrica che alimentano la rete di teleriscaldamento.....	82
Figura 46 - Mappa 3D di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2010. Scenario: Contributo delle centrali di produzione termoelettrica che alimentano la rete di teleriscaldamento.	83
Figura 47 - Mappa di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2015. Scenario: Contributo delle centrali di produzione termoelettrica che alimentano la rete di teleriscaldamento.....	84
Figura 48 - Mappa 3D di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2015. Scenario: Contributo delle centrali di produzione termoelettrica che alimentano la rete di teleriscaldamento.	84
Figura 49 - Suddivisione delle zone utilizzate come sorgenti areali nel secondo scenario	85
Figura 50 - HDD nella zona urbana di Torino per il mese di Gennaio (sia 2010 che 2015) relazionati al valore di temperatura esterna	89
Figura 51 - Impostazione generale dei dati di input per il file "sorgenti areali" (BAEMARB.DAT)	91
Figura 52 - "Pacchetto" delle emissioni su base oraria in cui sono descritti coordinate geografiche, altezza, elevazione, temperatura, velocità, diametro, σ_z e portata per ciascuna sorgente emissiva areale.	92
Figura 53 - Mappa di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2010. Scenario: Contributo degli impianti termici residenziali.	93
Figura 54 - Mappa 3D di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2010. Scenario: Contributo degli impianti termici residenziali.	94
Figura 55 - Mappa di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2015. Scenario: Contributo degli impianti termici residenziali.	95
Figura 56 - Mappa 3D di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2015. Scenario: Contributo degli impianti termici residenziali.....	95
Figura 57 - Rappresentazione delle mappe di concentrazione ottenute per lo scenario "Emissioni da centrali termoelettriche"	97

<i>Figura 58 - Rappresentazione delle mappe di concentrazione ottenute per lo scenario “Emissioni da impianti termici residenziali”</i>	98
<i>Figura 59 - Rappresentazione 3D delle mappe di concentrazione ottenute per lo scenario “Emissioni da centrali termoelettriche”</i>	98
<i>Figura 60 - Rappresentazione 3D delle mappe di concentrazione ottenute per lo scenario “Emissioni da impianti termici residenziali”</i>	98

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1 - Limiti di esposizione agli ossidi di azoto previsti dalla normativa italiana (Fonte: D.Lgs 155/2010 e World Health Organization)</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 2 - Limiti di esposizione al particolato previsti dalla normativa italiana (Fonte: D.Lgs 155/2010 e World Health Organization)</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 3 - Caratteristiche e origine dei principali inquinanti in atmosfera (Fonte: Finzi e Brusasca,1991)</i>	<i>23</i>
<i>Tabella 4 - Classificazione del vento a seconda dell'intensità secondo Beaufort (Fonte: Arpa Emilia)</i>	<i>36</i>
<i>Tabella 5 - Condizioni meteorologiche che definiscono le classi di stabilità di Pasquill (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)</i>	<i>68</i>
<i>Tabella 6 - Caratteristiche geometriche e delle coordinate geografiche delle sorgenti emissive puntuali considerate (Fonte: IREN Energia S.p.A.).....</i>	<i>77</i>
<i>Tabella 7 - Caratteristiche geometriche e geografiche e ripartizione delle emissioni per le diverse zone.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabella 8 - Dati per il calcolo delle emissioni totali del 2010 nella zona urbana di Torino</i>	<i>87</i>
<i>Tabella 9 – Ripartizione mensile, giornaliera e oraria delle “emissioni areali”</i>	<i>88</i>
<i>Tabella 10 - Dati per il calcolo delle emissioni totali del 2015 nella zona urbana di Torino</i>	<i>90</i>

Introduzione

Al giorno d'oggi l'inquinamento atmosferico rappresenta uno dei problemi più gravi che l'essere umano si trova ad affrontare. Esso risulta essere un grave problema sia dal punto di vista sociale che dal punto di ambientale. Le specie inquinanti, emesse sia dalle attività naturali che da quelle umane, causano impatti negativi sugli ecosistemi e in particolare, avendo una visione antropocentrica del problema, soprattutto sulla salute dell'uomo. L'Organizzazione Mondiale della Sanità stima che l'inquinamento atmosferico provochi circa 3 milioni di morti premature all'anno e che circa il 92% della popolazione mondiale sia esposta a concentrazioni annuali superiori al limite raccomandato. Inoltre, questa esposizione è condizionata da una serie di parametri, tecnici, meteorologici e geografici, diversi per ogni area, che caratterizzano la dispersione degli inquinanti in Atmosfera. La legislazione europea e il suo recepimento nell'ordinamento italiano favoriscono lo sviluppo e l'utilizzo di sistemi di modellazione della qualità dell'aria. Il funzionamento di tali modelli consiste nel simulare gli effetti di una o più fonti di emissione, in termini di concentrazione al suolo degli inquinanti, per un determinato recettore. Essi sono considerati di primaria importanza nelle valutazioni preliminari sulla qualità dell'aria e utili per integrare il contenuto informativo delle misure dirette. In questo studio è stato applicato il software CALPUFF, un modello di dispersione a sbuffo raccomandato dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente americana (EPA); il suo impiego è servito per la valutazione della dispersione degli ossidi di azoto, significativamente dannosa per la salute umana, all'interno dell'area urbana di Torino. Questa tipologia di modello di dispersione è stata scelta per la sua capacità di gestire i dati meteorologici, le diverse tipologie di fonti e la forte complessità orografica dell'area torinese. Nel primo capitolo del presente lavoro di tesi è stata fatta una panoramica generale sul problema dell'inquinamento atmosferico, sulla sua trattazione nella normativa italiana, e sulla formazione ed evoluzione del contaminante oggetto di studio, ovvero gli ossidi di azoto. Nel secondo capitolo invece, è stata descritta la situazione climatica nella regione piemontese, le influenze che il vento ha su di essa e la situazione microclimatica della città di Torino. Nel terzo capitolo è stato descritto il quadro generale dei diversi modelli di dispersione degli inquinanti più utilizzati, focalizzando l'attenzione sul modello adoperato, ovvero i modelli di dispersione a puff, e sull'impostazione dei file necessari all'avviamento delle simulazioni. Il quarto capitolo invece, è quello in cui è stato rappresentato e analizzato il caso studio. In esso sono stati descritti due diversi scenari di emissione simulati, ovvero le emissioni dalle sole centrali termoelettriche e le emissioni del solo riscaldamento domestico; il tutto nel mese di Gennaio di due diversi anni, il 2010 e il 2015. Questi due anni

sono stati scelti poiché possiedono due peculiarità termiche molto diverse; il 2010 è stato un anno molto freddo rispetto alla media, mentre il 2015 è stato un anno molto caldo rispetto alla media. Sono stati quindi analizzati prima i dati meteorologici, come la velocità, la direzione e la frequenza del vento, la temperatura e la stabilità atmosferica, poi sono state calcolate le componenti di emissione, utilizzando i dati delle centrali termoelettriche e il fabbisogno termico. Successivamente sono stati impostati i parametri per i file di base per le simulazioni, come le coordinate geografiche, la diversa morfologia del terreno, i campi di vento e i file delle fonti di emissione. Una volta ottenuti i risultati, essi sono stati post-processati per la visualizzazione sia bidimensionale che tridimensionale attraverso il software SURFER. Infine sono state rappresentate e confrontate le mappe di concentrazione, che mostrano l'andamento spaziale delle medie nell'intero periodo simulato. Nel quinto ed ultimo capitolo sono state scritte le conclusioni finali ed i possibili sviluppi futuri sullo studio effettuato.

1. L'inquinamento in Atmosfera

L'Atmosfera è quell'involucro gassoso, composto da diversi elementi chimici e da una struttura complessa suddivisa in strati, che riveste il pianeta Terra. La lenta evoluzione del pianeta, durata milioni di anni, ha progressivamente trasformato l'Atmosfera fino a renderla l'ambiente ideale per la vita umana, animale e vegetale. In maniera più precisa, la maggior parte delle attività rapportate all'essere umano si svolgono in uno strato di Atmosfera piuttosto limitato chiamato Troposfera; esso è a diretto contatto con il suolo e caratterizzato da componenti chimico-fisiche che lo rendono chiaramente distinguibile dal resto degli strati atmosferici. Tuttavia l'avvento della rivoluzione industriale, sebbene abbia portato ad un rapido sviluppo scientifico e tecnologico con conseguente aumento delle attività industriali, ha determinato anche profondi cambiamenti in termini atmosferici. Le attività umane hanno difatti immesso in Atmosfera, o più precisamente nella Troposfera, sia sostanze dannose non presenti nella sua costituzione originaria e sia altre tipologie di sostanze, già naturalmente presenti in essa, aumentandone pericolosamente la concentrazione [1].

Questo fenomeno di contaminazione dell'ambiente atmosferico viene indicato generalmente con il termine di *inquinamento atmosferico*. Non è facile definire l'inquinamento in aria, per questo è possibile basarsi sulla definizione stilata dal DPR 203/1988, dal DL. 351/1999 e dal DM 60/2002: *“ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni pubblici e privati...”*. In termini pratici, l'inquinamento atmosferico può essere definito come la condizione per cui diverse sostanze (gas di vario genere, aerosol e particelle di varia granulometria) sono presenti in concentrazioni più elevate rispetto al valore naturale di esse in aria, tali da poter creare potenziali effetti dannosi misurabili sulla salute umana, sulla qualità della vita, sulla flora, sulla fauna, sul paesaggio e sul clima. Se si escludono gli eventi naturali, quali le eruzioni vulcaniche, la maggior parte delle sostanze emesse, dette appunto *inquinanti*, sono causate dalle attività antropiche. In particolare, tutti i processi di combustione che avvengono negli impianti industriali, negli impianti domestici di riscaldamento e nei mezzi di trasporto sono responsabili delle emissioni di alcune sostanze, quali ossidi di zolfo, di carbonio e di azoto, che determinano l'aumento delle naturali concentrazioni in atmosfera [1][2].

Seguendo il punto di vista antropocentrico, per cui l'essere umano è il soggetto principale di questa visione, possiamo definire gli *effetti* dell'inquinamento atmosferico come i danni tangibili o potenziali, immediati o a lungo termine, sottoposti agli esseri viventi ed alle superfici di interesse a seguito di un'esposizione istantanea o prolungata all'aria inquinata [1].

Per quanto riguarda la salute umana, le specie inquinanti maggiormente presenti soprattutto in zone urbane, tra cui gli ossidi di azoto (NO_x) ed il particolato (PM), sono in grado di provocare effetti nocivi sugli organi più importanti dell'organismo (Figura 1) [3].

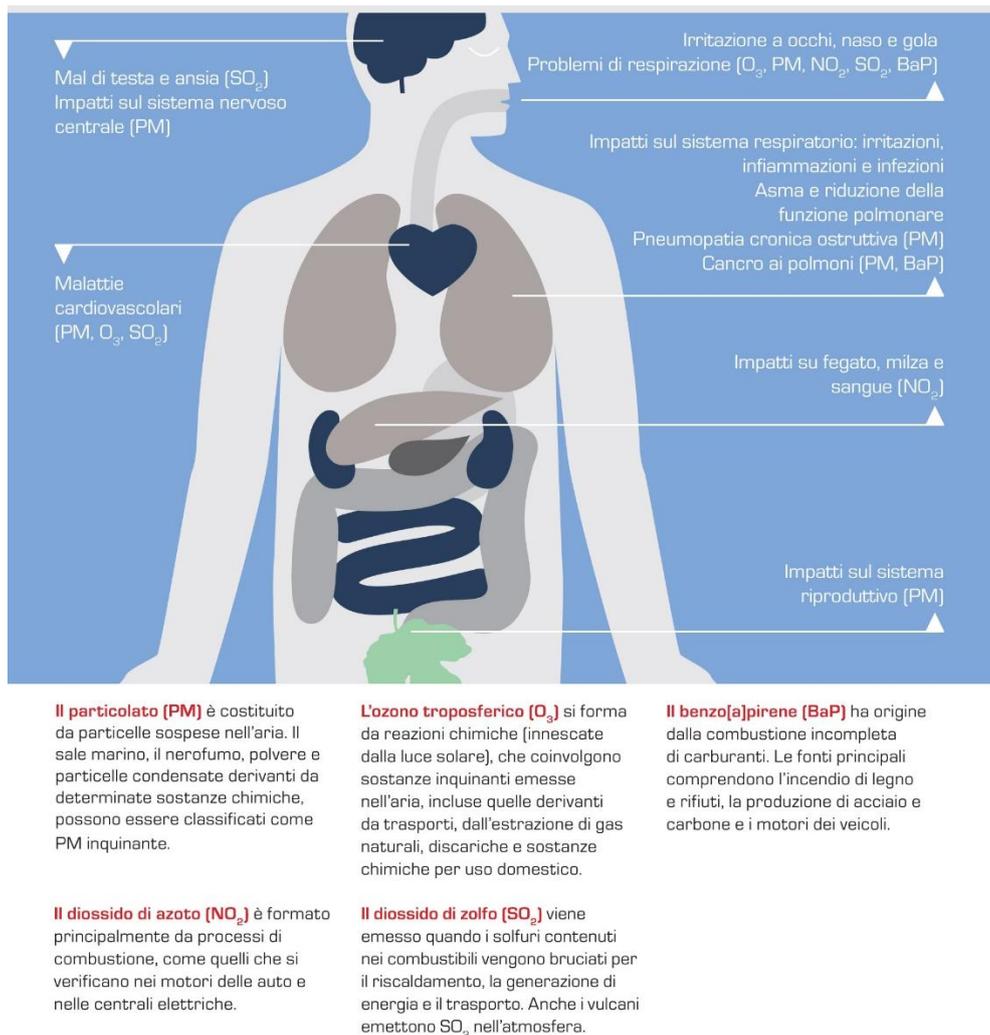


Figura 1 - Principali effetti degli inquinanti sulla salute umana (Fonte: EU Clean Air Policy)

Parlando invece degli effetti dannosi sull'ambiente, l'aumento delle concentrazioni di particolari gas nell'atmosfera, detti *gas a effetto serra*, capaci di trattenere la radiazione infrarossa emessa dal Sole e dalla superficie terrestre, ha provocato lo squilibrio energetico del sistema Terra-Atmosfera con conseguente aumento della temperatura media del Globo. Questo ha creato non poche preoccupazioni per la comunità scientifica che, in maniera preventiva, ha

analizzato diversi possibili scenari futuri a seconda delle misure di riduzione della CO₂ scelte dall'uomo (Figura 2) [4][5].

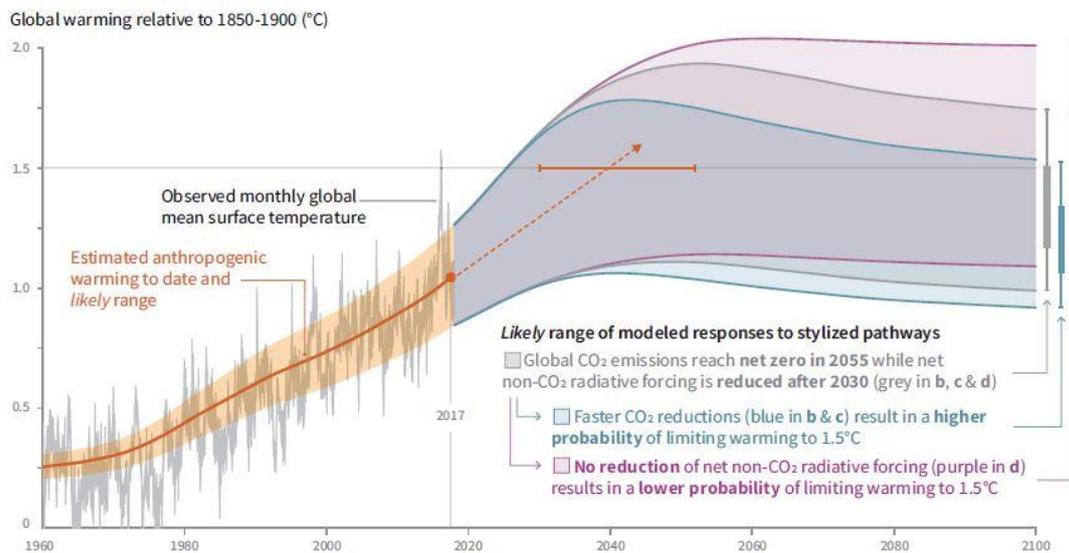


Figura 2 - Innalzamento della temperatura terrestre dovuto alle attività antropiche (Fonte: Report IPCC Global Warming)

1.1 Quadro normativo

La qualità dell'aria in Atmosfera viene tutelata, dalla normativa italiana, sia dal punto di vista delle emissioni, tramite il D.Lgs. 152/2006 che stabilisce dei limiti di concentrazione degli inquinanti nell'istante in cui vengono emessi dalla sorgente, sia dal punto di vista delle immissioni, attraverso il D.Lgs. 155/2010 che impone limiti di concentrazione di inquinanti in prossimità dei ricettori per salvaguardare la salute umana.

Il *Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n.152*, conosciuto anche come Testo Unico Ambientale, ha come obiettivo primario la promozione dei livelli di qualità della vita umana, da realizzare attraverso la salvaguardia ed il miglioramento delle condizioni dell'ambiente e l'utilizzazione accorta e razionale delle risorse naturali. Il Decreto si occupa principalmente delle emissioni di inquinanti in atmosfera. La parte V è volta a tutte le attività che producono emissioni in atmosfera stabilendo una autorizzazione alle emissioni, e quindi l'esercizio degli impianti, e dei limiti emissivi. In particolare, sono sanciti i valori limite di emissione, le prescrizioni, i metodi di campionamento e di analisi ed i criteri per la valutazione della conformità dei valori misurati. Inoltre, sono indicati gli stabilimenti produttivi a cui occorre un'autorizzazione alle emissioni, che viene rilasciata con riferimento all'intero stabilimento e definisce i limiti e le modalità di rilascio delle sostanze in atmosfera. Tuttavia, l'autorità competente può effettuare modifiche

alle direttive generali imposte dal decreto; ad esempio ha la facoltà di fissare nuovi limiti emissivi per le sostanze non regolate dal Decreto, o sostituire i limiti alle emissioni con nuove soglie più restrittive imposte dai piani e dai programmi di qualità dell'aria previsti dal D.Lgs. 155/2010 [6].

Il *Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n.155*, invece, recepisce la direttiva 2008/50/CE e istituisce un quadro normativo unitario per la valutazione della qualità dell'aria ambiente. Il Decreto è finalizzato ad individuare gli obiettivi di qualità dell'aria che non danneggino la salute umana e l'ambiente ed a indicare le metodologie di misura della qualità dell'aria e gli standard di riferimento comuni in tutto il Paese. La valutazione della qualità dell'aria è basata sulla suddivisione del territorio in zone, ognuna con specifiche ed omogenee modalità di valutazione, e sull'utilizzo di un'appropriata rete di misura, con campionamenti in continuo e discontinuo e con tecniche di modellazione e di stima, in grado di monitorare e segnalare il rispetto degli standard qualitativi e dei limiti imposti dal Decreto; tali valori sono mostrati in Tabella 1 e Tabella 2 [7][8].

Per tutelare il rispetto dei limiti, e per gestire la qualità dell'aria, le Regioni adottano dei piani che vengono redatti assicurando la partecipazione degli enti locali e dei cittadini. Questi piani si differenziano a seconda dell'entità dell'inquinamento e della zona interessata. Il Decreto identifica le tecniche di modellazione come un supporto fondamentale per prevedere i parametri di valutazione della qualità dell'aria, da integrare con le misurazioni sperimentali effettuate tramite strumentazione nei punti fissi delle zone. La modellazione può infatti essere un utile strumento per:

- Simulare i campi di concentrazione anche nelle aree all'interno delle zone ove non esistano stazioni di misurazione;
- Comprendere le complesse relazioni tra emissioni e immissioni ed individuare i contributi delle diverse sorgenti ai valori di concentrazione in una determinata zona;
- Pianificare le azioni future e valutare l'efficacia delle misure di contenimento delle emissioni in atmosfera.

Tabella 1 - Limiti di esposizione agli ossidi di azoto previsti dalla normativa italiana (Fonte: D.Lgs 155/2010 e World Health Organization)

Ossidi di azoto	Valore Limite (Condizioni standard)	Superamenti ed annotazioni
NO ₂ (media annuale)	40 µg/m ³	-
NO ₂ (media oraria)	200 µg/m ³	Da non superare più di 18 volte all'anno
NO _x (media annuale)	30 µg/m ³	-
Soglia di allarme	400 µg/m ³	Misurato per 3 ore consecutive su di un'area di almeno 100 km ²

Tabella 2 - Limiti di esposizione al particolato previsti dalla normativa italiana (Fonte: D.Lgs 155/2010 e World Health Organization)

Particolato	Valore Limite (Condizioni standard)	Superamenti ed annotazioni
PM _{2.5} (media annuale)	10 µg/m ³	-
PM _{2.5} (media giornaliera)	25 µg/m ³	-
PM ₁₀ (media annuale)	20 µg/m ³	-
PM ₁₀ (media giornaliera)	50 µg/m ³	Da non superare più di 35 volte all'anno

1.2 I principali inquinanti

L'aria, considerata secca e al livello del mare, è composta generalmente dal 78% di azoto, dal 21% di ossigeno e dal restante 1% di una serie di sostanze chimiche presenti solo in piccole concentrazioni. Agli inquinanti naturali presenti in atmosfera, si aggiungono le diverse sostanze immesse dall'attività dell'uomo; esse possono essere di diversa natura, tra cui gas, aerosol e particolato di varia granulometria; ognuna di esse può avere conseguenze sulla salute umana e/o sull'ambiente. In realtà, il problema dell'inquinamento di origine antropica è principalmente legato al fatto di essere altamente concentrato in zone di piccola estensione, soprattutto urbane ed industriali, e di non essere in grado di disperdersi in maniera uniforme, principalmente per l'orografia del terreno, nell'intera atmosfera. Generalmente, i contaminanti atmosferici sono suddivisi in inquinanti "primari" e inquinanti "secondari":

- *Inquinanti primari*: sono quelle sostanze emesse nell'ambiente liberamente e che interagiscono direttamente con la salute umana, ad esempio monossido di carbonio, monossido di azoto, idrocarburi, diossido di zolfo e particolato.
- *Inquinanti secondari*: sono quelle sostanze che si formano successivamente a delle reazioni chimico-fisiche tra inquinanti primari e i componenti naturali dell'atmosfera.

Sebbene siano suddivisi in due gruppi, i principali inquinanti hanno caratteristiche, peculiarità e interazioni con l'uomo e l'ambiente ben diverse tra loro; per questo di seguito sono descritte le principali proprietà degli inquinanti più presenti in troposfera:

- *CO (Monossido di carbonio)*: Il monossido di carbonio è un gas incolore, inodore, insapore, gassoso a temperature superiori ai -192°C , infiammabile e molto tossico che si forma dalla combustione incompleta degli idrocarburi presenti nei carburanti e nei combustibili. È uno degli inquinanti più comuni in atmosfera, soprattutto in aree urbane; è prodotto principalmente dai gas di scarico degli autoveicoli, dagli impianti di riscaldamento e da processi industriali quali la raffinazione del petrolio, la produzione di acciaio e ghisa, l'industria del legno e della carta. L'elevata pericolosità e tossicità di questo gas è dovuta alla sua affinità con l'emoglobina, che risulta essere circa 200-300 volte maggiore rispetto a quella dell'ossigeno. Questa peculiarità consente di legarsi facilmente con l'emoglobina del sangue ed ostacolare l'ossigenazione dei tessuti, dei muscoli e del cervello, con conseguenti effetti, lievi (come senso di affaticamento, sonnolenza, cefalea) che possono aumentare e portare ad effetti cronici o addirittura alla morte (aumento di cardiopatie e di disturbi circolari);
- *CO₂ (Diossido di carbonio)*: Il diossido di carbonio o anidride carbonica è un gas incolore e inodore, che prende parte nei processi vitali di piante e animali; è difatti di fondamentale importanza nella fotosintesi clorofilliana. È prodotto dalla respirazione delle piante e dalla combustione, in presenza di ossigeno, di un composto organico, tendenzialmente petrolio e carbone, che serve per portare a compimento il processo di ossidazione. I processi principali di produzione dell'anidride carbonica sono chiaramente antropici, in particolare dai processi di combustione delle centrali termoelettriche e degli autoveicoli. Sulla salute umana può provocare effetti solamente ad elevate concentrazioni, con acidificazione delle mucose della bocca ed irritazione delle vie respiratorie con conseguente diminuzione della percentuale di ossigeno presente in aria. L'effetto negativo principale di questo gas è però legato alla sua interazione con l'ambiente. Infatti, l'anidride carbonica è un gas a effetto serra che,

insieme a vapore acqueo e metano, intrappola la radiazione infrarossa della luce solare riflettendola nuovamente verso al superficie terrestre. Sebbene questo ruolo risulta essere di primaria importanza per la vita sulla terra poiché garantisce una temperatura media consona alle necessità primarie degli esseri viventi, un esagerato aumento della concentrazione in atmosfera, a partite dalla rivoluzione industriale, ha creato un grande squilibrio nel bilancio radiativo naturale. Questo scompenso ha favorito il surriscaldamento globale con diverse conseguenze ad esso legate, quali eventi climatici estremi, lo scioglimento dei ghiacciai con conseguente innalzamento dei mari, l'acidificazione degli oceani e la conseguente estinzione di molte specie animali.

- *NO_x (Ossidi di azoto)*: Il monossido di azoto (NO) è un gas incolore e inodore, mentre il diossido di azoto (NO₂) è un gas di colore rosso bruno dall'odore pungente ed altamente tossico e corrosivo. Essi si formano in qualsiasi processo di combustione che utilizza l'aria come comburente, per reazione tra ossigeno e azoto ad alte temperature. L'azoto, combinandosi con l'ossigeno, dà luogo a diversi composti denominati appunto NO_x. Anche questi gas sono prodotti sia da fonti naturali, quali batteri, vulcani e fulmini, sia da fonti antropiche, quali centrali termoelettriche, riscaldamento domestico ed autoveicoli. A seconda della composizione chimica, questi gas hanno un diverso effetto sulla salute umana. L'inalazione del diossido di azoto può provocare una forte irritazione agli occhi, al naso e alla bocca; un'esposizione prolungata può causare bronchiti, edemi polmonari ed enfisemi. Dal punto di vista ambientale, l'NO₂ concorre alla formazione dello smog fotochimico, in quanto precursore dell'ozono troposferico, e contribuisce allo sviluppo delle piogge acide, reagendo con l'acqua e formando acido nitrico. L'N₂O invece riesce ad arrivare in Stratosfera e reagisce con l'ozono favorendo la distruzione della barriera schermante naturale.
- *SO₂ (Diossido di zolfo)*: Il diossido di zolfo o anidride solforosa è un gas incolore, non infiammabile, molto solubile in acqua e dal tipico odore pungente ed irritante. Esso si forma nel processo di combustione per ossidazione dello zolfo presente nei combustibili solidi e liquidi fossili, quali carbone e petrolio. Le fonti principali di produzione sono legate all'uomo, nuovamente tramite centrali termoelettriche, impianti industriali (ad esempio le raffinerie di petrolio), impianti di riscaldamento domestico non alimentati a gas naturale e traffico veicolare con motori diesel. È prodotto anche da fonti naturali come emissioni vulcaniche e processi biochimici microbici ma in quantità decisamente inferiori. Questo gas risulta essere, anche a basse concentrazioni, irritante e nocivo per gli occhi, la pelle e le mucose dell'apparato respiratorio; a concentrazioni più elevate,

evidente alla comparsa di un sapore metallico in bocca, può causare patologie ben più gravi, quali asma, bronchiti ed edemi polmonari. In atmosfera questa sostanza si ossida e diventa anidride solforica (SO_3) responsabile principale delle piogge acide. Questo fenomeno arreca danni elevati alle vegetazioni e al raccolto con conseguente necrosi delle piante stesse.

- *PM (Materia particolata)*: Il particolato, o polveri sospese, è costituito da micro-particelle solide e liquide di diametro variabile fra i $100 \mu\text{m}$ e $0.1 \mu\text{m}$. Questa grande variabilità di dimensioni è data dai diversi processi di origine del particolato. La formazione di questa sostanza deriva in buona parte da fenomeni naturali, quali eruzioni vulcaniche, incendi boschivi e dall'azione del vento sulle rocce, sulla polvere e sul terreno. Sebbene l'azione naturale sia una componente importante del particolato, le emissioni principali derivano anch'esse dalle attività antropiche, come gli impianti termoelettrici, i motori diesel e tutti quei processi industriali che generano polveri, come ad esempio la lavorazione di metalli, la produzione di cemento e la lavorazione delle rocce. Inoltre, è da considerare anche la quota che il traffico urbano genera attraverso la lenta polverizzazione della gomma degli pneumatici al contatto con l'asfalto. Un'altra caratteristica principale di questo inquinante è data dai tempi di sospensione in atmosfera; questa proprietà è molto variabile a seconda del diametro della particella e può variare da pochi secondi a molti mesi causando impatti consistenti sia sull'inquinamento a scala locale sia sul clima a scala globale. Il rischio sanitario legato alle sostanze presenti sotto forma di particelle sospese in aria dipende, oltre che dalla loro concentrazione, anche dalla loro dimensione. Le particelle di dimensioni più piccole costituiscono un grande pericolo per la salute umana, in quanto possono bypassare i filtri naturali dell'organismo. In particolare: le particelle con diametro superiore ai $10 \mu\text{m}$ si fermano nelle prime vie respiratorie; le particelle con diametro tra i $5 \mu\text{m}$ e i $10 \mu\text{m}$ raggiungono la trachea e i bronchi; le particelle con diametro inferiore ai $5 \mu\text{m}$ possono raggiungere gli alveoli polmonari. Gli studi epidemiologici hanno mostrato una correlazione elevata tra concentrazione di polveri in atmosfera e la comparsa di malattie croniche alle vie respiratorie, come asma, bronchiti ed enfisemi. Inoltre, il particolato non ha una specifica tossicità poiché essa dipende dalle dimensioni, dalla capacità adsorbente e dalla composizione chimica dell'inquinante. Infine, il particolato fine funge da veicolo per sostanze ad elevata tossicità o cancerogenicità, quali i metalli e gli idrocarburi policiclici aromatici.

Nella successiva tabella sono sintetizzati alcuni parametri di interesse dei principali inquinanti presenti in atmosfera.

Tabella 3 - Caratteristiche e origine dei principali inquinanti in atmosfera (Fonte: Finzi e Brusasca, 1991)

<i>Inquinante</i>	<i>Sorgente antropica</i>	<i>Sorgenti naturali</i>	<i>% Emissione antropica</i>	<i>Tempo di persistenza</i>	<i>Rimozione naturale</i>
SO ₂	Combustione	Vulcani	100	4 giorni	ossidazione in SO ₄ e rimozione da parte della pioggia
H ₂ S	Trattamento fanghi industriali	Vulcani Azione biologica	3	2 giorni	Ossidazione in SO ₂
NO _x	Combustione ad alta temperatura	Azione batterica nel suolo	0.5	5 giorni	ossida in NO ₃ ⁻
NH ₃	Trattamento rifiuti	Decomposizione biologica	0.3	7 giorni	reazione con SO ₂ per formare (NH ₄) ₂ SO ₄
CO ₂	Combustione	Depurazione. Decomposizione. Oceani	1.4	2-4 anni	fotosintesi, oceani
CO	Combustione	Incendi di foreste Oceani	79	< 3 anni	nessuna prova
HC	Combustione Industria chimica	Processi biologici	7.6	3 anni	reazione fotochimica con NO-H ₂ O

1.3 Gli ossidi di azoto (NO_x)

Il presente studio è volto all'analisi delle variabili che influenzano l'inquinamento da ossidi di azoto in ambiente urbano, per questo motivo si è deciso di descrivere nel dettaglio le caratteristiche di questa tipologia di inquinanti. Si è scelto questo inquinante poiché il contributo antropico emissivo, eccetto per gli N₂O, è decisamente alto per via della loro formazione tramite i processi di combustione. Come visto in precedenza, con la sigla NO_x vengono raggruppati tutti i diversi tipi di ossidi di azoto. In termini di inquinamento atmosferico destano molto interesse poiché, oltre ad essere dannosi per la salute umana, danno origine a reazioni fotochimiche in atmosfera, precursori dell'ozono troposferico, e in stratosfera, per la distruzione della barriera di ozono necessaria a schermare i raggi ultravioletti; in più hanno un ruolo importante anche nella formazione delle piogge acide che danneggiano l'ambiente alterandone gli equilibri.

Partendo dall'elemento principale, sappiamo che l'azoto è un elemento monovalente, bivalente, trivalente e pentavalente, distinto dalla sua capacità di accoppiamento. Questa proprietà gli permette di formare un numero cospicuo di strutture e composti. Preso singolarmente, l'azoto molecolare è molto stabile, con un'energia di legame molto elevata; questo comporta che la reazione di dissociazione dell'N₂, descritta dal meccanismo di Zel'dovič, risulta possibile solo

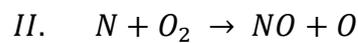
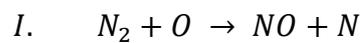
quando la molecola incontra un radicale. Tra i composti appartenenti a questa classe, quelli maggiormente pericolosi sono:

- *Monossido di azoto (NO)*: è incolore, è un forte ossidante e reagisce con materiali combustibili e riducenti; al contatto con l'aria reagisce con l'ossigeno trasformandosi in biossido di azoto. Il monossido di azoto è irritante per gli occhi ed il tratto respiratorio. L'inalazione può causare edema polmonare, inoltre può avere effetti sul sangue, causando formazione di metaemoglobina. Nei casi più gravi può portare alla morte.
- *Diossido di azoto (NO₂)*: è di colore giallastro-marroncino bruno, a temperatura ambiente dall'odore soffocante e irritante. Ha una densità maggiore dell'aria, pertanto tende a rimanere a livello del suolo. È un forte irritante delle vie polmonari; già a moderate concentrazioni nell'aria provoca tosse acuta, toracoalgia e insufficienza circolatoria. Può inoltre provocare danni irreversibili ai polmoni che possono manifestarsi anche molti mesi dopo l'attacco.
- *Protossido di azoto (N₂O)*: in condizioni standard è un gas incolore, non infiammabile e dall'odore leggermente dolce. È un gas con effetti euforizzanti e dissociativi; infatti fin dai primi anni del '700 venne utilizzato per scopi ludici. Ai giorni d'oggi è utilizzato anche in campo medico per scopi analgesici e anestetici. La pericolosità di questo composto è data dall'essere un gas a effetto serra; secondo l'EPA (Environmental Protection Agency) ha un potenziale di riscaldamento climatico 300 volte più impattante rispetto a quello dell'anidride carbonica.

Gli ossidi di azoto creano problematiche sotto diversi aspetti: dal punto di vista "micro", sono composti tossici e pericolosi per la salute umana; dal punto di vista "meso", possono reagire in troposfera creando acido nitrico, contribuendo così alla formazione delle piogge acide e di particolato secondario organico, quali i PAN (perossiacetilnitrati), e inorganico, come gli NO₃⁻ (nitrati); dal punto di vista "macro" invece, sono responsabili della distruzione dell'ozono stratosferico, oltre ad essere, NO₂ e N₂O, dei gas a effetto serra [1][4].

Per tali motivi, negli ultimi anni, è stato necessario comprendere come contenere le emissioni dei suddetti contaminanti. È, quindi, indispensabile comprendere e chiarire i diversi meccanismi di formazione degli NO_x, per poter eventualmente prevenire la formazione e agire nei campi di interesse. In relazione ai tre meccanismi principali che portano alla loro formazione durante i processi di combustione, gli NO_x sono definiti come:

- *Thermal NOx*: sono gli ossidi di azoto che si formano in condizioni di temperature alte e in presenza di eccessi d'aria. Il problema principale è dato dal fatto che, in tutti i sistemi di combustione, sfruttando l'aria come comburente, è presente l'azoto; ed in alcuni combustibili, come il carbone, è presente nel combustibile stesso. Come anticipato in precedenza, la dissociazione dell'azoto molecolare è possibile solo grazie alla presenza, nei sistemi di combustione, di automatismi innescati dai radicali come OH, HO₂. La successione di reazioni fisiche che avvengono per la formazione dei Thermal NOx è detta *meccanismo di Zel'dovič*. Questo processo è composto da molte reazioni consecutive ma alcune hanno una rilevanza così piccola da renderle trascurabili rispetto alle tre reazioni principali elencate seguentemente.



La prima reazione ha un'energia di attivazione elevata, che risulta essere circa venti volte maggiore rispetto alla seconda reazione. Questo comporta che ogni volta che compare un N questo si tramuta automaticamente in NO. I fattori principali che influenzano la creazione dei Thermal NOx sono: la temperatura massima, necessaria ad attivare la prima reazione del meccanismo, e l'eccesso d'aria in prossimità del punto in cui si raggiunge la temperatura massima. Infatti, la temperatura assume un ruolo fondamentale, sia per l'attivazione del meccanismo sopracitato, sia per la produzione di molti radicali O.

- *Fuel NOx*: sono gli ossidi di azoto presenti nel combustibile. L'azoto presente all'interno di un materiale organico è trivalente, e prende il posto di un carbonio nell'anello benzenico; per questo lo si ritrova spesso negli aromatici. Questo azoto, durante il processo di combustione e la conseguente diminuzione del carbonio, si presenta sotto forma di azoto atomico che, diversamente da quanto visto per i Thermal NOx, riesce a ridurre la produzione di NO tramite delle reazioni di riduzione, come la seguente.



In definitiva, possiamo dire che la conversione del combustibile in NO diminuisce nel momento in cui si hanno condizioni ricche.

- *Prompt NOx*: sono gli ossidi di azoto che si formano quando l'azoto molecolare viene attaccato dai radicali di natura organica, come CH, CH₂, e CH₃ formando l'acido cianidrico HCN. Il nome deriva dall'inglese, ed è legato alla rapidità di formazione di

rallenta il passaggio delle sostanze tra i due strati. Questo passaggio degli elementi risulta essere molto più lento rispetto al mixing che avviene nella troposfera stessa; questo fa sì che gli inquinanti immessi in questo strato abbiano una mobilità indotta più elevata. Sebbene la radiazione solare con la più energetica lunghezza d'onda sia schermata dalla stratosfera, la luce con lunghezza d'onda che arriva in troposfera è sufficientemente energetica da promuovere le reazioni fotochimiche che avvengono. Tralasciando il processo di formazione dei radicali ossidrilici, che entreranno a far parte del ciclo degli NO_x, l'innescò del ciclo è dato dall'interazione del diossido di azoto (NO₂) con la radiazione solare giornaliera (hν), come descritto dalla reazione 1. Successivamente, l'ossigeno atomico formatosi reagisce con l'ossigeno presente in aria, e con altre sostanze organiche raggruppate in un unico composto (R), e produce ozono troposferico, come indicato nella reazione 2. L'ozono troposferico è il principale componente dello smog fotochimico. Lo *smog fotochimico*, in sintesi, è il processo di formazione di ozono, iniziato dalle reazioni che coinvolgono i radicali ossidrilici, in particolare OH radicale, con le molecole organiche, e catalizzate dagli ossidi di azoto, principalmente NO e NO₂. Trascurando le reazioni secondarie, il ciclo catalitico si "chiude" con la distruzione dell'ozono tramite la reazione con l'NO, descritta nella reazione 3.



Analizzando il ciclo sopradescritto, si nota come è la quantità di NO₂ ad influenzare principalmente la formazione di O₃, mentre la presenza di NO agisce da distruttore di ozono. Per questo, il rapporto tra [NO₂] / [NO] risulta direttamente proporzionale alla quantità di ozono troposferico prodotta. La successione di reazioni appena descritte, che costituiscono un loop, avviene con una velocità di formazione e distruzione di NO₂ tale per cui il ciclo può essere considerato stazionario. La cessazione di questo loop è data dalla formazione di acido nitrico (HNO₃), che compare grazie all'interazione occasionale tra gli NO₂ e l'OH radicale. L'HNO₃ formato diventa responsabile della produzione di particolato secondario. In breve, il *particolato secondario* è la miscela di componenti originata dai complessi fenomeni chimico-fisici, su grande scala spaziale e temporale, che comportano la trasformazione in particolato di sostanze che originariamente erano state emesse in forma gassosa; gli ossidi di azoto sono i principali precursori di questa sostanza. L'abilità di HNO₃ di formare particolato secondario, come verrà

visto in seguito nel dettaglio, dipende, sia dall'interazione con l'acqua e quindi dalla capacità di depositarsi umidamente, sia dall'interazione con l'ammoniaca (NH₃), prodotta principalmente da attività agricole, per la formazione dello ione ammonio (NH₄⁺) [4][10]. In Figura 4 è mostrato il ciclo degli NO_x appena descritto.

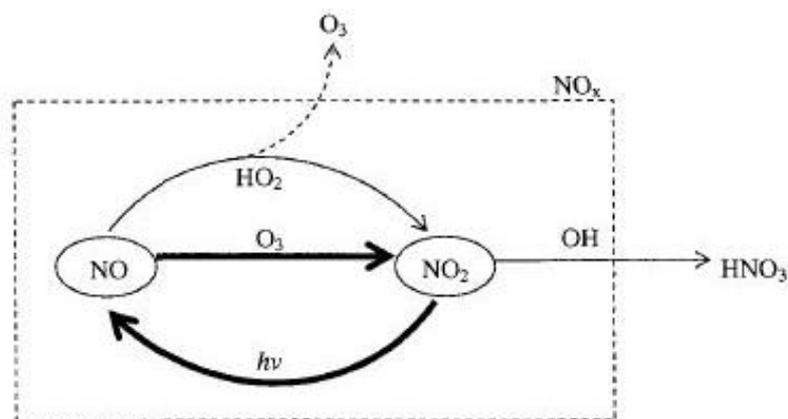


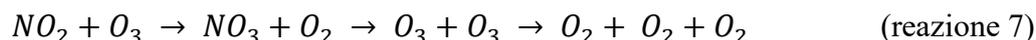
Figura 4 - Ciclo fotochimico degli NO_x in troposfera (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)

La *stratosfera* invece risulta essere molto più estesa dello strato sottostante e il gradiente termico cambia in maniera molto inferiore rispetto a quanto succede in troposfera, questo comporta una certa stabilità ed un mixing termico meno evidente. La principale fonte di NO_x che arriva in stratosfera è data dall'N₂O; questo perché NO e NO₂ hanno una vita relativamente breve e non riescono in tempi rapidi ad oltrepassare lo strato tra troposfera e stratosfera. Diversamente invece, il protossido di azoto ha una vita lunghissima e anche se in basse concentrazioni, essendo non sottoposto a reazioni in troposfera, riesce a raggiungere la stratosfera. Di tutto il protossido che arriva in stratosfera, circa il 90% è distrutto dalla fotolisi con produzione, come descritto nella reazione 4, di azoto molecolare e di ossigeno atomico in stato di singoletto O(¹D). Questa forma particolare di ossigeno prodotto ha una reattività molto elevata e reagisce nuovamente con N₂O. Ma la reazione che avviene può avvenire in due forme diverse, e quindi avere diversi prodotti. Le reazioni in questione sono la reazione 5a e la reazione 5b.

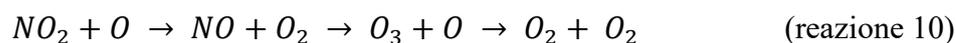


La principale produzione di NO_x in stratosfera è dovuta alla reazione 5a. Gli NO_x creati, specialmente gli NO, danno inizio al ciclo che porta alla distruzione di ozono. In generale, si

sviluppano le stesse reazioni viste per il ciclo troposferico; ma la tipologia delle reazioni dipende dalle concentrazioni di ozono. Questo parametro risulta fondamentale, poiché la stratosfera ha un'estensione tale da avere basse concentrazioni di ozono nella parte inferiore e alte concentrazioni di ozono nella parte superiore. In particolare, in *bassa stratosfera* avviene il ciclo descritto dalle reazioni 6,7 e 8; che producono tre molecole di ossigeno al netto di due di ozono.



Invece, in *alta stratosfera*, dove le concentrazioni di ozono sono molto alte, avvengono le reazioni 9 e 10, in cui si distrugge una molecola di ozono per creare due molecole di ossigeno.



In Figura 5 è schematizzato il ciclo stratosferico degli NOx.

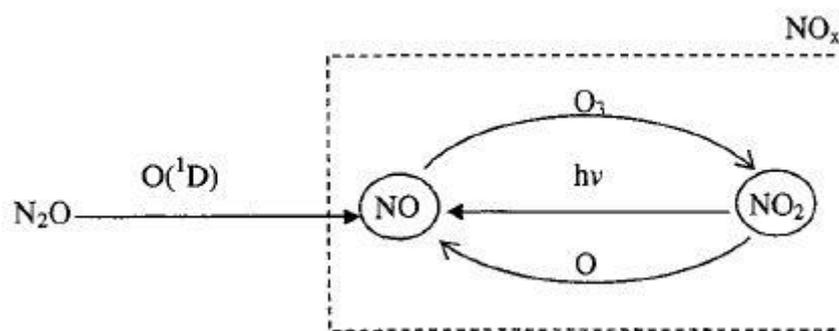


Figura 5 - Ciclo fotochimico degli NOx in stratosfera (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)

In definitiva è possibile affermare che, il ciclo complessivo degli NOx avviene sia in troposfera che in stratosfera, con il passaggio tra uno strato e l'altro limitato al solo protossido di azoto. Infine, come visto in precedenza, l'attivazione di questo ciclo, data dalla radiazione solare, e lo svolgimento di esso, comportano effetti negativi sia per la salute umana che per l'ambiente; difatti, in troposfera si forma smog fotochimico pericoloso per la salute umana, in stratosfera invece si distrugge l'ozono, necessario allo schermaggio dei raggi ultravioletti, con impatti sia

dalla condensazione che porta solo ad un incremento della massa senza un aumento di particelle [11].

In definitiva, questa serie di processi chimici possono portare, a seconda delle diverse condizioni atmosferiche, alla formazione di nuove particelle molto piccole, con dimensioni inferiori a $0.1 \mu\text{m}$, o all'accrescimento di particelle preesistenti. I fattori principali che condizionano la formazione dell'aerosol secondario sono: la concentrazione dei precursori e delle specie gassose più reattive come ozono e radicali ossidrilici; le condizioni atmosferiche, quali radiazione solare, umidità e temperatura; e le interazioni tra gas primari e lo strato sottile di acqua che può avvolgere la particella solida [11].

2. Il clima in Piemonte

L'Italia è una penisola del continente europeo, più precisamente situata nel sud del continente, che si protende nel centro del mar Mediterraneo. La considerevole estensione in latitudine, e la forte variabilità orografica, caratterizzata dalla presenza di catene montuose come Alpi e Appennini, fanno sì che le caratteristiche climatiche siano molto mutevoli. In linea generale, sebbene l'Italia entri a far parte della fascia temperata con clima mediterraneo, possiamo dividere la penisola in zone con caratteristiche climatiche simili. Le principali zone climatiche della Penisola italiana sono: la Regione Alpina, la Pianura Padana e l'Alto Adriatico, il Medio Adriatico, il versante Ligure-tirrenico, la zona appenninica e la Regione Mediterranea. Essendo la città di Torino oggetto di studio di questa tesi, verranno analizzati solo le zone in cui ricade la regione in cui è ubicata, ovvero il Piemonte.

La *Regione Alpina* comprende diverse aree, tra cui la zona montuosa del Piemonte. Il clima in questa regione è detto appunto clima alpino, ed è riconducibile al clima temperato freddo ma, dato che è influenzato dalla quota, ad altezze maggiori dei 2600 metri diventa clima nivale. In questa regione ricadono le Alpi e le Prealpi che, a seconda del versante, hanno precipitazioni annuali ben diverse. Infatti, il settore orientale, esposto alle perturbazioni atlantiche, ha precipitazioni abbondanti nelle stagioni intermedie ed in estate; i versanti di confine con la Valle d'Aosta invece presentano maggiori precipitazioni in autunno e inverno poiché esposti ai venti provenienti da Nord-Ovest. Tipici delle Alpi sono i venti Foehn e Stau; il primo è una corrente d'aria calda discendente, che compare sul versante sottovento quando una massa d'aria scavalca una catena montuosa; il secondo è una corrente d'aria fredda ascendente, che si manifesta sul versante sopravvento quando una massa d'aria sale lungo il versante fino alla cresta con raggiungimento del livello di condensazione e conseguente formazione di nubi e precipitazioni [12].

La *Pianura Padana* e l'*Alto Adriatico* racchiudono invece diversi settori di pianura di diverse regioni, tra cui quello del Piemonte. Queste zone hanno un comportamento termico e pluviometrico paragonabile a quello del clima temperato fresco continentale. Infatti, la caratteristica principale di questa zona italiana è la forte escursione termica stagionale, con massime estive sopra i 30°C e minime invernali frequentemente sotto lo zero. Dal punto di vista delle precipitazioni, le piogge non risultano essere molto abbondanti, con picchi durante la stagione autunnale e quella primaverile. Molto frequenti invece sono le nebbie e le inversioni termiche, di fondamentale importanza per lo studio della dispersione degli inquinanti. In Figura

8 è rappresentato il Nord Italia (durante la stagione invernale del 2003), territorio di cui le caratteristiche climatiche sono state appena descritte.



Figura 8 - Immagine satellitare del Nord Italia (Fonte: NASA)

2.1 L'influenza del vento

Uno dei principali fattori che influenza maggiormente la dispersione degli inquinanti è *il vento*. Esso costituisce il movimento delle masse d'aria nelle tre direzioni spaziali; per questo motivo possiamo distinguere due "tipi" di vento diversi, il vento orizzontale e il vento verticale. Il primo è distinto da velocità e direzione agenti sul piano orizzontale dato dalla superficie terrestre, il secondo da velocità e direzione perpendicolari alla superficie stessa. Per le successive analisi, è stata considerata sempre e solo l'azione del vento orizzontale; di seguito, descrivendo le caratteristiche del vento, si sottintenderà quindi, come soggetto, il vento orizzontale. L'innescò di ogni movimento delle masse d'aria è l'energia solare. Difatti, il Sole, tramite irraggiamento, riscalda la terra in maniera molto disomogenea, sia considerando la diversa incidenza dei raggi tra equatore e poli, sia la riflessione diversa delle differenti superfici; il risultato di questo squilibrio energetico è la creazione di differenze termiche che vengono quindi trasmesse all'aria sovrastante. Inoltre, questa differenza termica crea, a sua volta, differenze di densità di pressione; ed è proprio la pressione, espressione della forza che l'aria esercita in tutte le direzioni, a governare il movimento delle masse d'aria a scala globale e a tramutarsi in quello che viene chiamato vento. L'aria si sposterà quindi da zone ad alta

pressione, ovvero dove l'aria è più calda, a zone a bassa pressione, dove l'aria è più fredda. La forza che permette lo spostamento di queste masse d'aria è detta forza di gradiente barico. Essa però non è l'unica forza agente, molte forze agiscono sull'aria quando essa è già in movimento. Tra le forze secondarie agenti, le più importanti sono: la forza di Coriolis, dovuta al moto rotatorio della Terra e la forza di attrito, dovuta alle asperità della superficie. Tuttavia, essendo il dominio di interesse abbastanza ridotto, e quindi a scala locale, le considerazioni sull'andamento e la velocità del vento verranno fatte trascurando la forza di Coriolis poiché agente su scala sinottica. Inoltre, al di là della forza di attrito, un altro fattore da considerare è la morfologia del terreno; infatti, la presenza di promontori e valli, fa sì che si manifesti un effetto dinamico sugli spostamenti delle masse d'aria, con conseguenti accelerazioni e decelerazioni, correnti ascendenti e discendenti, e creazioni di vortici turbolenti ed incanalamento del vento [12].



Figura 9 - Ortofoto del Piemonte (Fonte: Geoportale del Piemonte)

I parametri fondamentali per la caratterizzazione di un vento sono l'intensità, o velocità, e la direzione. La velocità del vento è calcolata, secondo il Sistema Internazionale, in metri al secondo (m/s) in un intervallo di tempo medio di dieci minuti. La direzione invece, è la direzione di provenienza del vento e si misura in gradi sessagesimali, con angolo di origine posto nel Nord. La rosa dei venti è utilizzata come strumento pratico per la definizione della direzione del vento. Invece, per identificare la tipologia di vento, si utilizza una scala empirica,

mostrata in Tabella 4, ideata dall'ammiraglio inglese Francis Beaufort nel 1805. Questa scala classifica il vento in dodici "classi" basandosi sulla sua intensità agente su superfici o oggetti esposti al vento stesso. Sebbene sia una scala creata per scopi di navigazione, e quindi rappresentativa dello stato del vento sulla superficie marina, ha una valenza indicativa anche per la situazione dei venti sulla terraferma [12].

Tabella 4 - Classificazione del vento a seconda dell'intensità secondo Beaufort (Fonte: Arpa Emilia)

Classe	Velocità vento		Effetti vento nodi	Altezza probabile onde (metri) sul mare (al largo)	media	max
	Descrittivo	m/sec				
0	Calma	0 - 0,2	fino a 1	Il mare è liscio come l'olio e il fumo sale verticalmente	-	-
1	Bava di vento	0,3 - 1,5	1 - 3	Leggere increspature sulla superficie assomiglianti a squame di pesce. Ancora non si formano creste bianche di schiuma.	0,1	0,1
2	Brezza leggera	1,6 - 3,3	4 - 6	Ondine minute, ancora molto corte ma ben evidenziate. Le creste non si rompono ancora ma hanno aspetto vitreo.	0,2	0,3
3	Brezza tesa	3,4 - 5,4	7 - 10	Ondine grandi con creste che cominciano a rompersi con schiuma di aspetto vitreo. Si notano alcune "pecorelle" con la cresta bianca di schiuma.	0,6	1,0
4	Vento moderato	5,5 - 7,9	11 - 16	Onde piccole con tendenza ad allungarsi. Le pecorelle sono più frequenti.	1,0	1,5
5	Vento teso	8,0 - 10,7	17 - 21	Onde moderate dalla forma che si allunga. Le pecorelle sono abbondanti e c'è possibilità di spruzzi.	2,0	2,5
6	Vento fresco	10,8 - 13,8	22 - 27	Onde grosse (cavalloni) dalle creste imbiancate di schiuma. Gli spruzzi sono probabili.	3,0	4,0
7	Vento forte	13,9 - 17,1	28 - 33	I cavalloni si ingrossano. La schiuma formata dal rompersi delle onde viene "soffiata" in strisce nella direzione del vento.	4,0	5,5
8	Burrasca	17,2 - 20,7	34 - 40	Onde moderatamente alte. Le creste si rompono e formano spruzzi vorticosi che vengono risucchiati dal vento.	5,5	7,5
9	Burrasca forte	20,8 - 24,4	41 - 47	Onde alte con le creste che iniziano a frangere. Strisce di schiuma che si fanno più dense. Gli spruzzi possono ridurre la visibilità.	7,0	10,0
10	Tempesta	24,5 - 28,4	48 - 55	Onde molto alte sormontate da creste (marosi) molto lunghe. Le strisce di schiuma tendono a compattarsi e il mare pare tutto biancastro. I frangenti sono molto più intensi e la visibilità è ridotta.	9,0	12,5
11	Tempesta violenta	28,5 - 32,6	56 - 63	Onde enormi che potrebbero anche nascondere alla vista le navi di piccole o medie dimensioni. Il mare è tutto coperto da banchi di schiuma. Il vento nebulizza la sommità delle creste e la visibilità è ridotta.	11,5	16,0
12	Uragano	oltre 32,7	oltre 64	L'aria è piena di spruzzi e la schiuma imbianca il mare completamente. La visibilità è molto ridotta.	14,0	-

Secondo gli studi effettuati da ARPA Piemonte, nella zona oggetto di studio, durante il periodo che va dal 1990 al 2003 si è registrata, in media annua, un'elevata frequenza delle *calme di vento* nelle prime ore del mattino e della sera, non trascurando i fenomeni turbolenti e il Planetary Boundary Layer. Questo fenomeno risulta determinante nel favorire l'aumento delle concentrazioni degli inquinanti in atmosfera poiché ostacola il naturale rimescolamento delle sostanze [12].

Oltre alle calme di vento anche le *brezze di monte e di valle* influenzano in maniera considerevole la dispersione degli inquinanti nell'atmosfera sovrastante la regione piemontese.

La formazione di questi venti a scala locale, che talvolta interagiscono anche con i venti a scala sinottica, è dovuta principalmente alla presenza delle Alpi e delle colline che, oltre a creare effetti dinamici sul vento, provocano anche effetti termici su di esso. L'elevata superficie esposta al riscaldamento giornaliero e al raffreddamento notturno, e la scarsa quantità d'aria racchiusa tra i monti, fanno sì che l'aria in montagna si riscaldi più velocemente rispetto all'aria, sulla stessa quota, in pianura. Questa differenza termica comporta anche una differenza locale di pressione; bassa in montagna dove l'aria è più calda e alta in pianura dove l'aria è più fredda. Il risultato è una brezza che spira, trascurando la sua interazione con i venti a scala sinottica, dalla pianura alla montagna durante la giornata. Durante la notte la circolazione si inverte; l'aria in montagna si raffredda più velocemente rispetto a quella in pianura causando la discesa verso la valle e quindi la brezza di monte. Diversamente da quella di valle, la brezza di monte si limita ad uno strato d'aria con spessore limitato e molto vicino al suolo; inoltre questa brezza ha comunque un'intensità inferiore rispetto alla brezza di valle. In Figura 10 è mostrato il meccanismo appena descritto [12].

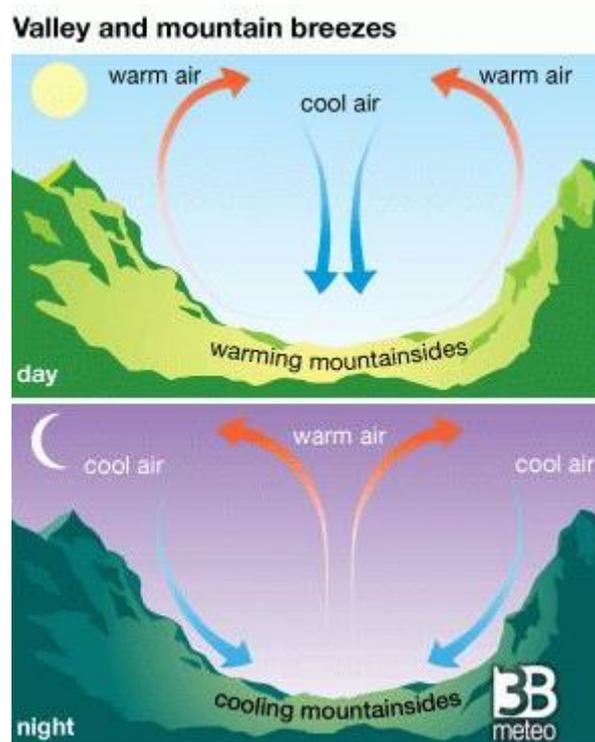


Figura 10 - Meccanismo di formazione e circolazione delle brezze (Fonte: www.3bmeteo.com)

In aggiunta, un altro fenomeno da tenere in considerazione, per i movimenti delle masse d'aria in Piemonte, è la manifestazione dei venti di *Foehn* e di *Stau*. Come detto in precedenza, la complessa orografia presente nella regione piemontese interagisce con i flussi d'aria e determina dei venti locali generati da differenze di pressione e di temperatura. Questi fenomeni

compaiono in tutte le zone in cui sono presenti catene montuose e avvengono soprattutto durante l'inverno per via del diverso irraggiamento e delle diverse temperature. Il Foehn è una corrente di aria calda discendente, che si manifesta sul lato sottovento del promontorio quando una massa di aria supera una catena montuosa; caratteristiche come velocità, temperatura e direzione dipendono strettamente dall'altezza e dall'ubicazione delle catene montuose rispetto al tragitto delle masse d'aria. Esistono diverse teorie sull'origine di questa corrente discendente; la "teoria termodinamica" indica il Foehn come un vento caldo e secco e presume che la massa d'aria che lo genera salga lungo il versante sopravvento della montagna, fino alla cresta, con formazione di nubi e precipitazioni. La condensazione e la salita della corrente d'aria proveniente dal basso fanno parte del fenomeno meteorologico chiamato Stau. Secondo questa teoria infatti, la comparsa di uno dei fenomeni è legata alla presenza dell'altro. In definitiva e in maniera più dettagliata, durante l'ascesa di una corrente d'aria umida su di una catena montuosa, tramite una forza motrice che spesso è di origine sinottica, essa si espande e si raffredda fino a raggiungere un livello di condensazione tale da formare nubi e precipitazioni ad una quota inferiore sul versante sopravvento, in sostanza la formazione dello Stau; una volta superata la cima, l'aria inizia a diventare secca ad una quota superiore sul versante sottovento rispetto al versante opposto e quindi ha maggiore tempo e "spazio", in termini di quota, per essere compressa e quindi riscaldarsi fino al raggiungimento del suolo ad una temperatura più elevata e completamente secca. Il meccanismo si chiude quindi con la comparsa del Foehn in valle [12]. In Figura 11 è mostrato quanto appena descritto.

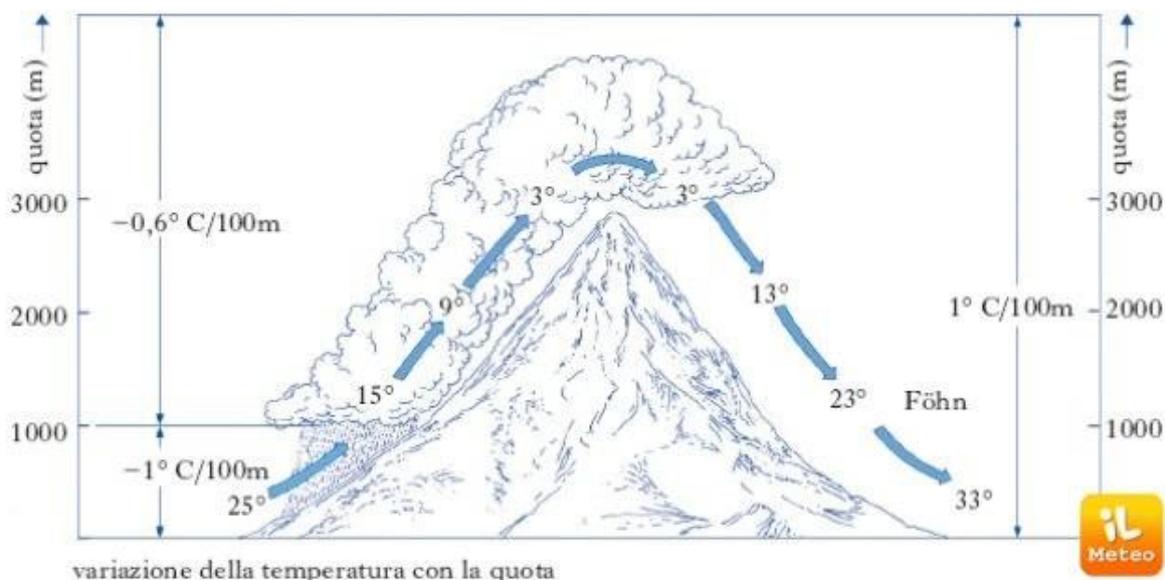


Figura 11 - Rappresentazione dei fenomeni climatici di Stau e Foehn (Fonte: www.ilmeteo.it)

2.2 La situazione microclimatica di Torino

Torino sorge nella pianura demarcata dai fiumi Stura di Lanzo, Sangone e Po, ed è circondata dalla catena alpina occidentale e dal Colle della Maddalena. Considerando la classificazione dei climi di Wladimir Köppen, fondata sull'analisi delle associazioni vegetali, dell'andamento annuale delle temperature e delle precipitazioni mensili, si può affermare che Torino appartiene alla fascia di clima temperato umido delle medie latitudini. In questa fascia, le temperature medie del mese più freddo sono comprese tra i 2°C e i 15°C e le precipitazioni, di entità variabile, sono moderate e permettono lo sviluppo della vegetazione per tutto l'anno. In definitiva, per queste zone si ha un'estate generalmente calda e l'inverno regolarmente freddo, secco e soleggiato. In Figura 12 è mostrata la classificazione di Köppen per la penisola italiana.

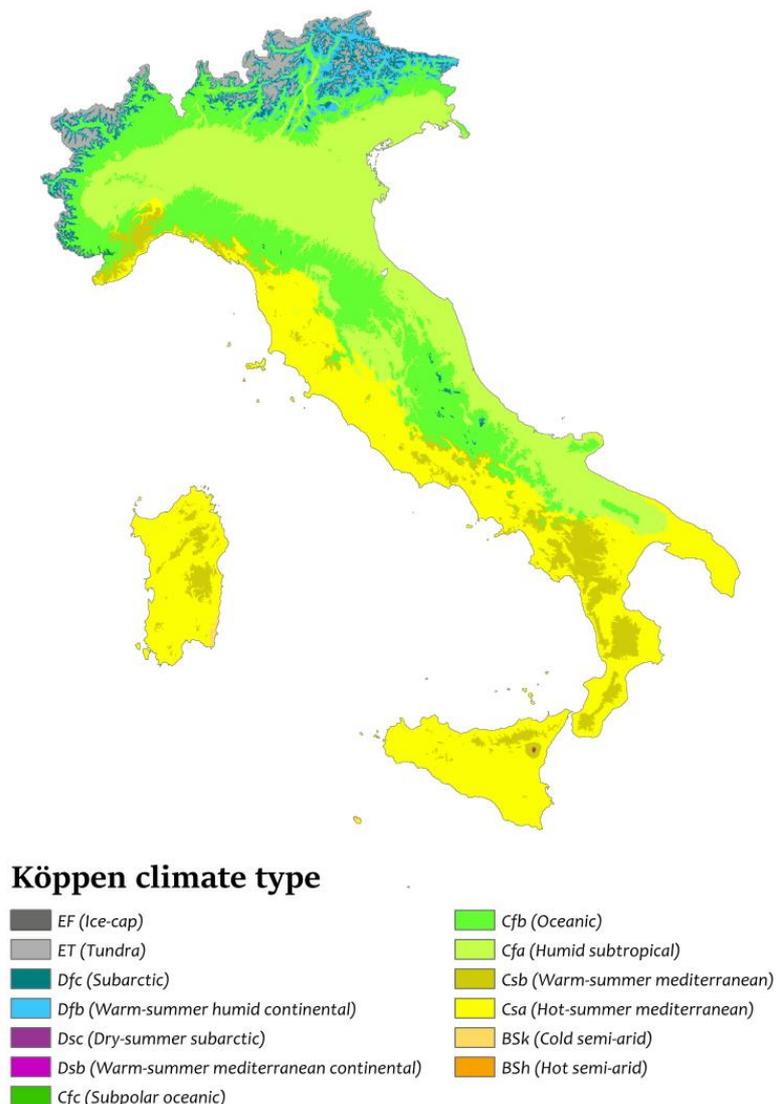


Figura 12 - Classificazione di Köppen per la penisola italiana (Fonte: Adam Peterson, realizzata con i dati di WorldClim.org)

Durante la stagione invernale, il particolare assetto geomorfologico della regione fa in modo che il capoluogo piemontese resti “coperto” e “attorniato” dall’arco alpino ad Ovest e a Nord e dalla zona collinare ad Est. Si ha così la formazione del cosiddetto “cuscinetto freddo”, dovuto ai flussi di aria continentali che provengono da Nord. Come visto in precedenza, l’interazione di queste masse d’aria con questa particolare conformazione orografica resiste in maniera ostinata ad alcuni venti miti che spirano su scala sinottica, quali lo Scirocco. Questo fenomeno fisico, tende quindi a favorire le calme di vento, con conseguente ristagnamento dell’aria su tutta la zona pianurale, che porta conseguentemente ad uno scarso ricambio di masse d’aria e ad una poca dispersione degli inquinanti immessi in atmosfera da tutte le attività svolte in zona urbana [12]. In Figura 13 è mostrata l’estensione urbana della città di Torino; si può notare come sia racchiusa tra la collina e le Alpi.

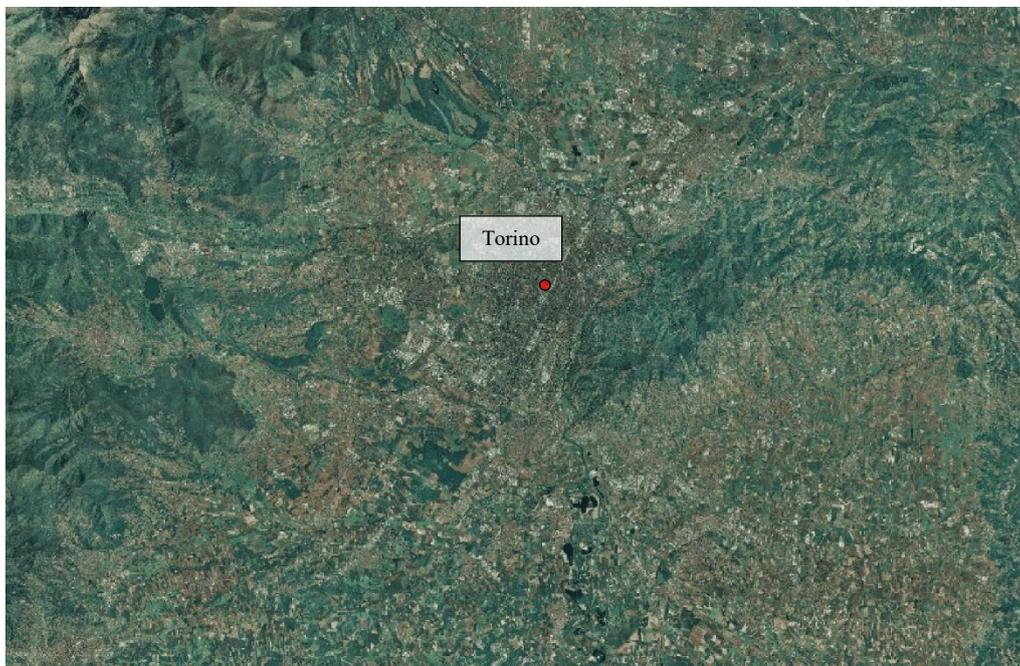


Figura 13 - Ortofoto della città di Torino (Fonte: Geoportale Piemonte)

Con un’estensione di circa 2300 km², la città di Torino è frutto di un forte processo di urbanizzazione della regione, che ha prodotto notevoli cambiamenti nella natura della superficie e delle proprietà atmosferiche della zona. Difatti, una zona così urbanizzata altera i bilanci radiativi, di energia ed i trasferimenti di masse d’aria. Le principali cause di queste alterazioni sono da imputare alla presenza massiccia, e alla geometria a blocchi, di dense costruzioni abitative che, oltre ad aumentare la capacità termica e l’impermeabilità del sistema, producono “trappole” per la radiazione e stagnazione di aria. Inoltre, questa conformazione urbana aumenta la rugosità superficiale; per questo motivo le masse d’aria provenienti da zone

rurali, nel momento in cui si avvicinano al centro città si imbattono in una maggiore scabrezza della superficie generando uno *strato limite urbano* (*UBL, Urban Boundary Layer*). Al di sotto di questo strato si sviluppa un vero e proprio microclima urbano, completamente distinto dalle zone circostanti, strettamente dipendente dalla forma e dalla geometria degli edifici che creano forti perturbazioni al flusso d'aria. Un esempio delle possibili perturbazioni create dall'interazione tra il flusso e gli edifici è raffigurato in Figura 14 [12][13].

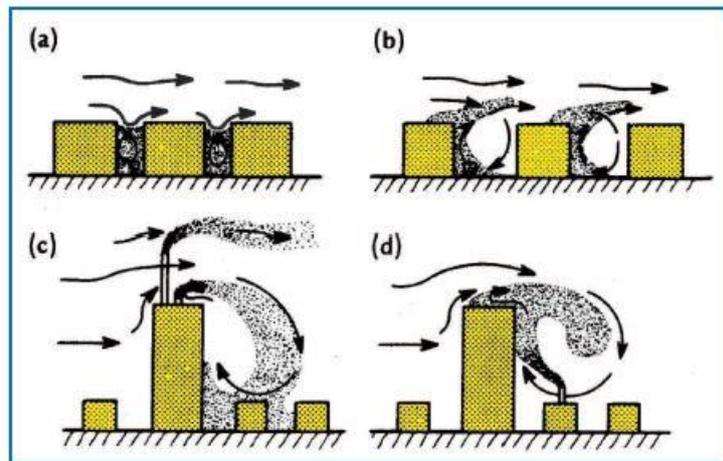


Figura 14 - Perturbazioni create dagli edifici (Fonte: Oke, 1987)

In aggiunta, l'inquinamento atmosferico dovuto agli autoveicoli, al riscaldamento domestico, alla produzione di energia e ad altre sorgenti, viene spesso intrappolato all'interno delle perturbazioni create dagli edifici; questo non fa altro che aumentare le concentrazioni dei contaminanti e quindi il livello di inquinamento cittadino [12][13].

Una volta illustrato e compreso il background geomorfologico e capiti i complessi fenomeni fisico-chimici che avvengono in seguito alle interazioni tra masse d'aria, contaminanti e superficie urbana, è possibile fare un "quadro" specifico della situazione a Torino. Come illustrato in precedenza, e come evidenziato in Figura 15 tramite i dati dell'Inventario Regionale delle Emissioni in Atmosfera (IREA), l'inquinamento cittadino, in particolare focalizzando lo studio sugli ossidi di azoto che, come spiegato nel paragrafo 1.3, hanno un effetto estremamente dannoso sulla salute umana, è causato principalmente dal trasporto su strada, dalla combustione industriale, dalla combustione domestica e dalla produzione di energia. Per questo motivo, successivamente sono state svolte diverse simulazioni modellistiche, con differenti scenari emissivi, volte a comprendere l'andamento delle concentrazioni e la dispersione degli NOx in questo complesso dominio di interesse.

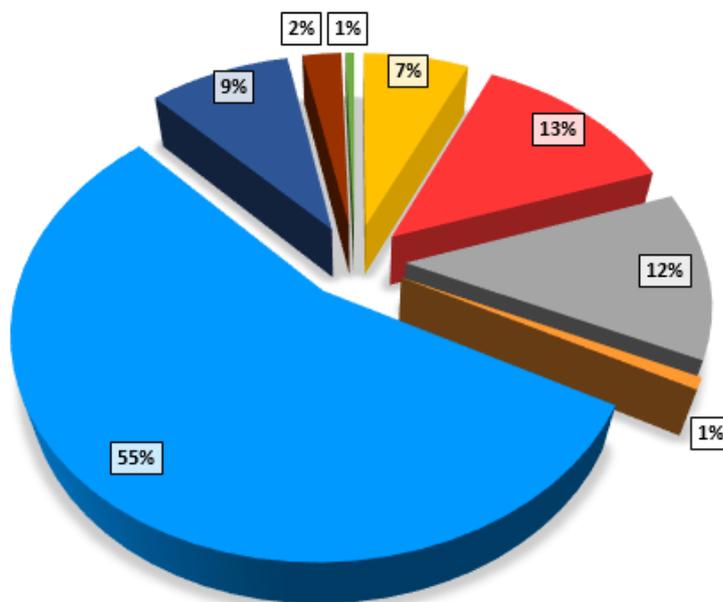
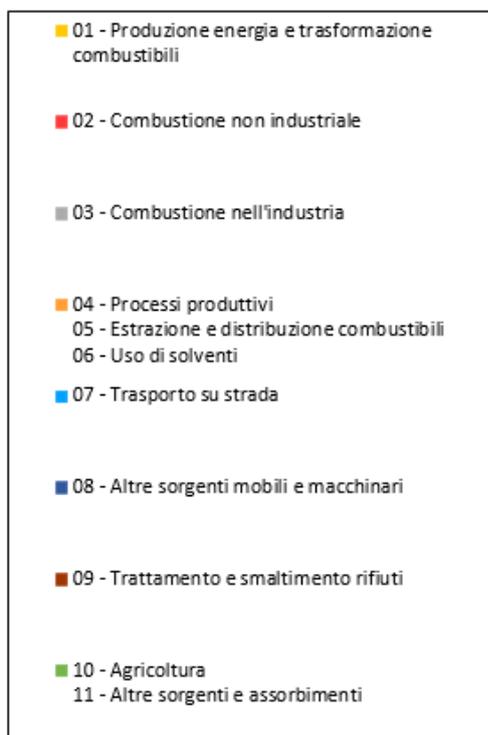


Figura 15 - Ripartizione per settore delle emissioni totali di NOx nel comune di Torino (Fonte: Inventario Regionale delle Emissioni in Atmosfera, 2013)

3. I modelli di dispersione degli inquinanti

Per poter simulare ed analizzare la dispersione di un inquinante in atmosfera è necessario l'ausilio di un modello. Come sappiamo, un modello è uno strumento, basato su un insieme di relazioni matematiche, capace di schematizzare la realtà al fine di poter riprodurre, descrivere e prevedere l'evoluzione di un particolare fenomeno. Nel caso in esame, il modello diventa un sistema matematico/informatico che cerca di ricostruire, nel modo più fedele possibile, lo stato delle concentrazioni in un dominio spazio-temporale di interesse. Secondo quanto dichiarato nel D.Lgs 155/2010, in generale i modelli di dispersione degli inquinanti risultano essere uno strumento utile per diversi motivi: ottenere dei campi di concentrazioni anche in zone ove non esistano stazioni di misurazione; comprendere le relazioni tra emissioni e immissioni, indicando i contributi delle diverse sorgenti alle concentrazioni in una determinata area; integrare e combinare le misurazioni effettuate tramite le stazioni di monitoraggio; valutare la qualità dell'aria sulla base di scenari ipotetici di emissione o in funzione di variazioni delle condizioni meteorologiche; e infine valutare l'efficacia di eventuali misure di contenimento delle emissioni in atmosfera. Il corretto utilizzo di un modello non è scontato, ed è necessario al fine di ottenere un risultato affidabile e veritiero. Per ottenere ciò, è indispensabile una procedura rigorosa di scelta dei dati di input, che devono essere "validati", o comunque confrontati, con i dati ottenuti dalle misurazioni in campo in modo da poter calibrare il modello stesso. Sebbene i modelli odierni siano in grado di generare un risultato molto attendibile, esso è frutto di un certo grado di approssimazione e quindi di incertezza dovuta principalmente all'indeterminatezza dei fenomeni atmosferici e climatologici. Infine, per quanto detto finora, risulta fondamentale la scelta del modello opportuno a seconda del problema in esame, basandosi principalmente sul dominio, spaziale e temporale, sulle caratteristiche delle sorgenti di emissione e sulle caratteristiche degli inquinanti da considerare [1][7][14].

Una prima, generale ma importante, suddivisione dei modelli riguarda l'approccio analitico impiegato, mediante i quali abbiamo dei modelli statistici o dei modelli deterministici.

I *modelli statistici*, o *stocastici*, non stimano la concentrazione degli inquinanti sulla base di relazioni fisiche di causa-effetto, ma basandosi sulla misura dei dati registrati sulla rete nel passato. Questo comporta una limitazione notevole poiché sono in grado di prevedere la concentrazione degli inquinanti solo in quei determinati punti della rete di monitoraggio, seppur il risultato è più affidabile rispetto ai modelli deterministici. Tuttavia l'utilizzo di questo tipo di modelli è poco frequente per la loro inadeguatezza nello studiare i fenomeni in atto.

I *modelli deterministici*, invece, sono composti da un numero elevato di diversi modelli, tutti accomunati dal fatto di basarsi su relazioni causa-effetto tra le emissioni delle sorgenti e la meteorologia, che risultano essere le cause, e le concentrazioni degli inquinanti nel dominio di calcolo, ovvero gli effetti. All'interno dei modelli deterministici, esistono altre suddivisioni a seconda di diversi aspetti, quali: l'evoluzione nel tempo del fenomeno, la modalità di descrizione del fenomeno nello spazio e la sua scala spaziale [1].

Basandosi sul criterio dell'evoluzione di un fenomeno nel tempo, si possono distinguere i modelli in *stazionari* o *dinamici*. Nei modelli stazionari, l'evoluzione di un fenomeno di inquinamento è trattata come una sequenza di stati "istantanei" e "quasi-stazionari"; nel secondo, invece, essa è trattata in un intervallo di tempo definito e continuo.

Un'altra importante distinzione è data dalla tipologia di evoluzione nello spazio di un fenomeno, e dalla scala spaziale che si utilizza nel modello. La scala spaziale, ovviamente, deve essere coerente con la grandezza del dominio di interesse; parliamo di scala: locale, per zone con pochi chilometri di estensione, mesoscala, per zone con estensione dell'ordine di centinaia di chilometri, sinottica, per zone con estensione dell'ordine di migliaia di chilometri. Invece, a seconda dell'approccio utilizzato per la descrizione spaziale del fenomeno, i modelli si distingueranno in *Euleriani* e *Lagrangiani* [1]. Si rimanda al prossimo capitolo per una descrizione più dettagliata di questi approcci.

Per completezza, si specifica che tutte le successive trattazioni verranno fatte per emissioni di sostanze inquinanti che avvengono all'interno del Planetary Boundary Layer (PBL). Si ricorda inoltre che, rifacendosi alla teoria di Stull, il PBL è definito come quella porzione di Troposfera direttamente influenzata dalla superficie terrestre, che risponde all'immissione di energia da essa proveniente con scale temporali dell'ordine dell'ora [15].

3.1 I modelli di tipo Euleriano e Lagrangiano

Per poter descrivere la dispersione degli inquinanti all'interno del PBL esistono due approcci metodologici profondamente diversi che descrivono il fenomeno nello spazio.

Il primo metodo si basa sulla *Teoria Euleriana*. Secondo tale approccio, la dinamica della dispersione degli inquinanti è descritta prendendo come riferimento spaziale un sistema fisso di coordinate cartesiane ortogonali solidale con la superficie terrestre. L'ipotesi di base si affida quindi alla sicurezza portata dalle leggi della fluidodinamica nel descrivere in modo

deterministico il fenomeno della dispersione degli inquinanti entro il PBL, basandosi sulla scrittura dell'equazione di conservazione della massa delle sostanze inquinanti all'interno del PBL stesso. Inoltre, questo è il metodo con cui vengono solitamente descritti matematicamente i campi meteorologici in micrometeorologia. Si consideri inizialmente un inquinante generico, ed un volume d'aria sufficientemente piccolo per scrivere la variazione istantanea della massa, come mostrato in Figura 16. Trascurata la diffusività molecolare, il bilancio di massa istantaneo richiede che la variazione di concentrazione entro il volume di controllo sia pari alla somma algebrica dei flussi, delle sorgenti presenti nel volume e dei processi di trasformazione e rimozione che hanno luogo all'interno del volume stesso [1][4][14].

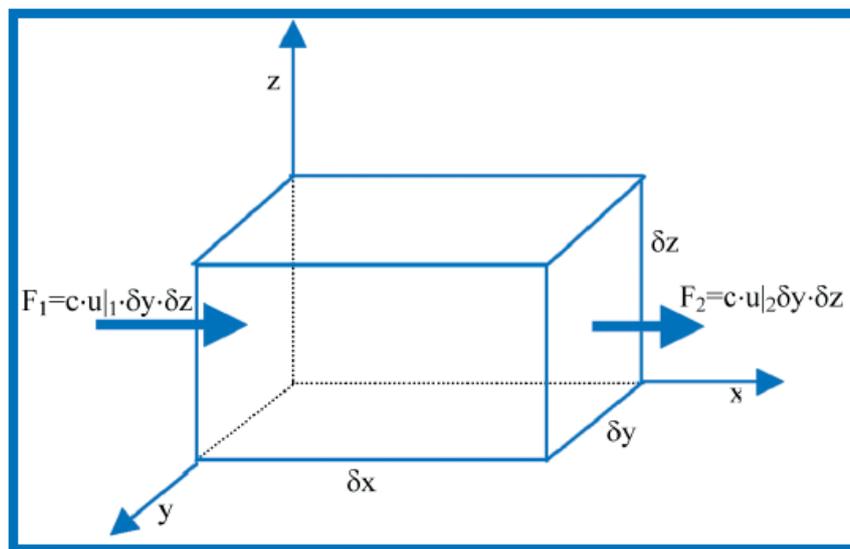


Figura 16 - Volume di controllo per il calcolo della conservazione della massa (Fonte: ARPA Lazio)

Si ottiene, considerando che la relazione deve valere per qualsiasi volume di controllo e quindi semplificando già il volumetto infinitesimo considerato $\delta x \delta y \delta z$:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial(c \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(c \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(c \cdot w)}{\partial z} \right\} = S + R + T \quad [3.1]$$

Che rappresenta l'equazione istantanea di bilancio di massa per un generico inquinante, dove S è il termine di sorgente, R è il termine di rimozione e T è il termine che tiene conto delle trasformazioni, chimiche e non solo. Si potrebbe generalizzare l'equazione per un numero N di inquinanti ma si tralascia questo passaggio a trattazioni più approfondite. In definitiva, si può affermare che la variazione euleriana nel tempo della concentrazione istantanea di un generico inquinante dipende:

- Dal trasporto istantaneo compiuto dal campo di vento istantaneo, con componenti cartesiane relative u , v e w ;
- Dalla diffusione molecolare, rappresentata dalla variazione spaziale di secondo ordine della concentrazione dell'inquinante moltiplicata per la sua diffusività molecolare;
- Dalla reattività chimica dell'inquinante rispetto alle altre sostanze presenti in aria;
- Dal termine relativo alle sorgenti S , che rappresenta la produzione o la distruzione in un punto generico in un determinato istante di tempo t dell'inquinante.

Sebbene dal punto di vista teorico l'equazione 3.1 sia consistente, dal punto di vista pratico risulta inapplicabile poiché tutte le variabili fisiche, sia meteorologiche che chimiche, variano nello spazio e nel tempo in maniera apparentemente casuale. Per ottenere un risultato di utilità pratica è necessario fare diverse assunzioni, quali l'ipotesi di Reynolds, e il trascurare alcune componenti; inoltre è indispensabile mediare le componenti istantanee al fine di ottenere dei parametri analizzabili in maniera distinta. Si omette la trattazione matematica di questo problema e si descrivono direttamente le considerazioni finali di esso. A valle di tutte le assunzioni fatte, si dirà che un inquinante rilasciato in un punto in maniera istantanea (detto puff come si vedrà in seguito) subisce due tipi di trasporto principali: Il trasporto dovuto alla velocità media del vento, ovvero "regolare"; e Il trasporto "irregolare" dovuto alla turbolenza e alle sue strutture. Se si volesse mediare il tutto, considerando i problemi e gli escamotage matematici utilizzati per riscrivere termini "problematici" quali quello diffusivo e quello relativo alle reazioni chimiche, si giunge alla seguente equazione:

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \left\{ \bar{u}_j \cdot \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x_j} \right\} = \sum_{j=1}^3 \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left[K_{jj} \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x_j} \right] \right\} + \bar{S}_c + R_i(\bar{c}_1, \dots, \bar{c}_N) \quad [3.2]$$

Quest'equazione è chiamata *equazione semiempirica della dispersione in atmosfera*, e rappresenta il punto di riferimento della teoria euleriana della dispersione di inquinanti in aria. A seconda di come viene risolta l'equazione differenziale avremo una tipologia di modello per ogni soluzione analitica. I modelli noti ottenuti sono i modelli a box, i modelli a griglia, i modelli gaussiani e i modelli a puff; per semplicità e per la scelta del modello utilizzato, successivamente verranno descritti solo i modelli gaussiani e i modelli a puff. Si nota che questo approccio risulta molto utile dal punto di vista pratico, sia perché la statistica euleriana risulta facilmente misurabile con i normali strumenti utilizzati in meteorologia sia perché il set di equazioni matematiche risultano direttamente applicabili anche in presenza di reazioni chimiche. Nonostante ciò, l'approccio Euleriano ha due diversi problemi: il primo è che il

modello matematico generato da questo approccio non consente soluzioni analitiche sufficientemente generali; il secondo è connesso invece al problema della chiusura che rende difficile la rappresentazione realistica della dispersione degli inquinanti nel PBL in caso di forte convezione. Infine, va considerato che un modello di tipo euleriano normalmente ha alla base un'equazione differenziale alle derivate parziali che richiede quindi una soluzione numerica e, come risaputo, possono condizionare fortemente i risultati finali [1][4][14].

Il secondo metodo invece si basa sulla *Teoria Lagrangiana*. Con questo approccio si descrivono i cambiamenti di concentrazione relativamente al moto del fluido, difatti si utilizza un sistema di riferimento mobile che segue gli spostamenti delle masse d'aria di cui si vuole simulare l'andamento. La peculiarità di questo approccio non è solo il diverso sistema di riferimento, ma il fatto che si accetta fin da subito che le particelle si muovono in modo casuale. Mentre nella teoria Euleriana si assume di essere in grado di descrivere i fenomeni fisici alla base del trasporto e della dispersione degli inquinanti, la teoria Lagrangiana parte dal presupposto che l'incertezza sul fenomeno fisico in questione sia così grande da dover utilizzare la statistica come strumento per descrivere il fenomeno stesso. Difatti, questo approccio cerca di descrivere la statistica delle concentrazioni in termini di proprietà statistiche degli spostamenti di gruppo di particelle rilasciate nel fluido. Si ipotizza infatti che la parte di Troposfera costituente il PBL sia rappresentata tramite un numero elevatissimo di particelle in movimento; descrivendo così questa porzione di atmosfera in maniera microscopica. In maniera descrittiva, si consideri una singola particella che al tempo iniziale t_0 si trovi nella posizione x_0 (all'interno del PBL). Il moto di questa particella è descritto dalla sua posizione negli istanti successivi al tempo iniziale, ovvero dalla sua traiettoria. Le posizioni della particella non sono deterministiche, per questo si utilizza la funzione densità di probabilità per calcolare, in maniera statistica, la probabilità che quella particella si trovi in quel determinato volume elementare in quel determinato istante di tempo. Passando da una singola particella ad un insieme di N particelle e trascurando gli accorgimenti matematici utilizzati, si può calcolare la concentrazione media di insieme in un punto x tramite la seguente equazione:

$$\langle c(\underline{x}, t) \rangle = \sum_{j=1}^m \Psi_j(\underline{x}, t) \quad [3.3]$$

Si omette l'esplicitazione della funzione densità di probabilità dalla quale si otterranno due termini; il primo rappresenta le particelle presenti all'istante iniziale, mentre il secondo rappresenta le particelle aggiunte al volume nell'intervallo di temporale considerato. In

definitiva, questa è la *relazione fondamentale dell'approccio lagrangiano* e descrive matematicamente l'evoluzione spazio-temporale delle sostanze inquinanti all'interno del PBL. I problemi legati a questa relazione sono principalmente due; il primo riguarda la sua validità, infatti essa risulta essere valida solo in assenza di reazioni chimiche; il secondo riguarda la necessità di conoscere dei parametri di input complessi ed incerti, e a volte anche non disponibili, quali le proprietà della turbolenza atmosferica nel dominio di interesse. In definitiva, sebbene la trattazione matematica di questo approccio risulta essere più facilmente risolvibile rispetto ai modelli euleriani, la sua applicabilità è limitata e inusuale, sia per la sua non validità in presenza di reazioni chimiche sia per la difficoltà di determinare in maniera accurata i termini statistici relativi alle particelle [1][4][14].

3.2 I modelli di dispersione Gaussiani

I modelli analitici di tipo Gaussiano sono in grado di esprimere l'andamento delle concentrazioni al suolo (sottovento) dovuti ad una sorgente continua puntiforme; ipotizzando appunto per la dispersione una legge di tipo gaussiano. Con il tempo hanno preso il favore delle varie normative nazionali poiché concettualmente e analiticamente vantaggiosi rispetto ad altri modelli. Inoltre, a scala locale (scala del caso studio oggetto della tesi) sono indicati i modelli di tipo euleriano gaussiano. Pertanto, partendo dall'equazione semiempirica della dispersione in atmosfera, essendo essa una relazione di natura differenziale necessita di ulteriori approssimazioni al fine di ottenere espressioni analitiche di uso più pratico. Da questa necessità sono nati diversi modelli entrati in uso nella pratica quotidiana della valutazione della qualità dell'aria; ogni modello ha diverse assunzioni iniziali e approssimazioni ma il punto di partenza comune è il comportamento di una tipologia di sorgente, idealizzata come un punto geometrico, ovvero una *sorgente puntuale*. Generalmente la sorgente puntuale rappresenta una ciminiera, ma possono essere schematizzate anche altri tipi di sorgenti puntiformi a patto di considerare il loro effetto a grande distanza dalle sorgenti e di calcolare il valore delle concentrazioni come sovrapposizione degli effetti delle varie sorgenti. Le ipotesi di base per un *modello gaussiano di diffusione* generico sono relative sia al termine che descrive il trasporto dell'inquinante, sia al flusso. Le ipotesi relative al flusso sono:

- Flusso idealmente uniforme con turbolenza omogenea;
- La direzione del vento deve avere una direzione media costante, assunta concorde con l'asse x;
- La velocità del vento deve essere maggiore della deviazione standard delle fluttuazioni di velocità della turbolenza (scala della turbolenza);

- L'inquinante è chimicamente inerte e, una volta immessa la sua quantità in aria, non varia (verranno quindi eliminati i termini di sorgente e di reattività chimica);

Le ipotesi invece relative al trasporto sono:

- In aria, la velocità e la temperatura non dipendono dalla distribuzione delle concentrazioni di inquinante;
- È assunta una lunghezza di miscelazione, definita come la lunghezza entro il quale si ha la formazione di vortici turbolenti;
- Atmosfera stabile, in modo da non creare la compressione del dominio di aria scelto;
- Chiusura di I° ordine; ovvero si approssima la variazione di concentrazione nel tempo dovuta al trasporto turbolento come un fenomeno diffusivo, detto appunto diffusività turbolenta;
- I coefficienti di diffusività sono considerati costanti nel tempo e omogenei nello spazio;
- Si trascura la diffusione molecolare e si considerano solo il fenomeno di diffusione turbolenta e il fenomeno di dispersione advettiva.

A valle di tutte queste considerazioni si ottiene l'equazione generale dei modelli gaussiani, ricordando che in essa sono considerate solo grandezze medie e mai istantanee:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad [3.4]$$

Questa è la relazione analitica gaussiana generale. Da quest'equazione si possono formulare due tipologie di trattazioni. La prima riguarda un'emissione puntuale istantanea discreta, detta formulazione gaussiana puff, la seconda riguarda un'emissione puntuale continua costante, detta formulazione gaussiana plume [1][4][14].

La *formulazione gaussiana puff* è il caso più semplice, analiticamente parlando, da poter studiare. Si pone una sorgente puntuale all'origine del sistema di riferimento e si considera un'emissione istantanea, detta puff, di quantità Q di inquinante al tempo iniziale $t = 0$. Considerando le assunzioni fatte precedentemente (ovvero campo di vento omogeneo e stazionario e con velocità u diretta lungo l'asse delle x) e stabilendo le condizioni al contorno (ovvero $c(x,y,z)$ nulla ovunque al tempo zero, e nulla quando il tempo tende ad infinito), l'equazione generale precedentemente descritta ammette la soluzione analitica seguentemente illustrata:

$$\bar{c}(x, y, z, t) = \frac{Q}{8(\pi t)^{3/2}(K_{xx}K_{yy}K_{zz})^{1/2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{4t} \left[\frac{(x - \bar{u}t)^2}{K_{xx}} + \frac{y^2}{K_{yy}} + \frac{z^2}{K_{zz}} \right] \right\} \quad [3.5]$$

Si nota come, tramite le proprietà della funzione esponenziale, il risultato ottenuto non è altro che il prodotto di tre distribuzioni gaussiane relative alle tre direzioni spaziali. Successivamente, questa formulazione sarà la base teorica per la descrizione dei modelli di dispersione di tipo puff; strumento utilizzato in questa tesi per le simulazioni inerenti al caso studio.

La *formulazione gaussiana plume* è un ulteriore caso facilmente trattabile dal punto di vista analitico, da dove sono stati ricavati la maggior parte dei modelli semiempirici utilizzati in ambito ingegneristico. Il caso generale è costituito da una sorgente puntuale, situata nell'origine del sistema di riferimento, che emette con un tasso di emissione costante pari a q ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$). Assunto il vento omogeneo e stazionario, con velocità u e direzione secondo l'asse x , si considera il plume come la sovrapposizione dei puff emessi ad ogni intervallo di tempo dt . Il punto di partenza per la soluzione di questo caso è l'integrazione nel tempo della [3.5]. La trattazione analitica dettagliata per arrivare alla soluzione non è semplice e necessita di molte piccole semplificazioni che sono omesse in questa tesi; per la trattazione completa si rimanda a in Seinfeld e Pandis (1998). Per tempi molto lunghi, la soluzione sarà:

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi(K_{yy}K_{zz})^{1/2} \cdot x} \cdot \exp \left\{ -\frac{\bar{u}}{4x} \left[\frac{y^2}{2K_{yy}} + \frac{z^2}{2K_{zz}} \right] \right\} \quad [3.6]$$

La rappresentazione di questa soluzione è una gaussiana. Scritta in questo modo, in pratica si impone che la concentrazione media sia costante nel tempo sul *piano* yz e uguale alla portata diluita rispetto alla media della velocità. Inoltre, tramite un'ulteriore approssimazione chiamata *slender plume approximation*, che serve a "legare" la visione euleriana con quella lagrangiana per ottenere la soluzione per una sorgente puntuale che emette in continuo (plume) in condizioni stazionarie. Ciò si traduce nell'utilizzo della varianza della gaussiana σ al posto del coefficiente di diffusività turbolenta K tramite le seguenti relazioni:

$$K_{yy} = \sigma_y^2 \cdot \frac{\bar{u}}{2x} \quad K_{zz} = \sigma_z^2 \cdot \frac{\bar{u}}{2x} \quad [3.7]$$

Infine, sostituendo le relazioni descritte nella [3.7] all'interno della [3.6] si ottiene:

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z \cdot \bar{u}} \cdot \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad [3.8]$$

La [3.8] esprime l'effetto stazionario di una sorgente che emette con continuità inquinante ad un tasso costante q . Essa esprime solo il risultato finale dei Modelli Gaussiani Stazionari a pennacchio (*plume*). È in assoluto il modello più utilizzato, e più semplice, per la simulazione della dispersione degli inquinanti in atmosfera, specialmente per calcoli approssimativi e ingegneristici. In realtà, la formulazione di questi strumenti prevede la “costruzione” di un modello semiempirico attraverso una serie di assunzioni e trattazioni analitiche volte alla ricerca del valore di diversi parametri, quali le sigma σ tramite le classi di stabilità di Pasquill, oppure l'effetto relativo al plume rise. Tuttavia in questo studio sono omesse, per una trattazione più approfondita si rimanda a Sozzi et al. (2003) [1][4]. La rappresentazione grafica della soluzione di questo modello è mostrata in Figura 17:

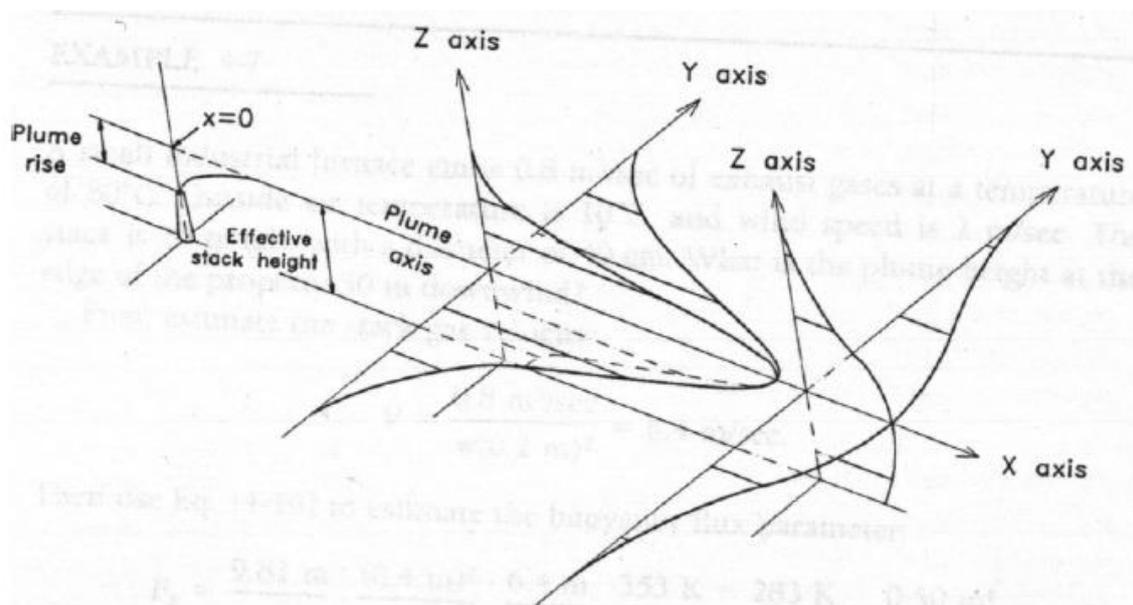


Figura 17 - Andamento del plume gaussiano in condizioni stazionarie (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)

Sebbene sia uno dei modelli più utilizzati, anche la formulazione gaussiana a pennacchio ha delle limitazioni. Infatti, il suo risultato non può essere considerato valido in territori con orografia complessa, con sorgenti che non hanno un'altezza di emissione sufficientemente elevata, con inquinanti reattivi e con condizioni meteorologiche e turbolente particolarmente variabili. Per queste principali limitazioni, nel corso dell'analisi del caso specifico trattato in questa tesi, si è deciso di utilizzare un modello di dispersione di tipo puff, descritto nel paragrafo successivo.

3.3 I modelli di dispersione di tipo puff

Il software scelto per la valutazione degli effetti meteorologici sulla dispersione degli inquinanti nella zona urbana di Torino è *CALPUFF*. Questo software è basato su un modello di dispersione gaussiana non stazionario di tipo puff. Il vantaggio principale di questa tipologia di modelli è che riescono a trattare casistiche in cui la stazionarietà ed omogeneità dei campi meteorologici e micrometeorologici viene meno, e in cui le emissioni delle sorgenti risultano variabili nel tempo. L'idea di base di questo modello non stazionario è la considerazione che qualsiasi inquinante emesso da una sorgente puntuale posta in un punto $P(x,y,z)$ nello spazio in un'istante t del tempo possa essere visto come l'emissione in successione di piccoli sbuffi di fumo (detti appunto *puff*) ciascuno indipendente dall'altro. Dal punto di vista concettuale, il puff rappresenta una particella di aria con all'interno la presenza di uno o più inquinanti. Esso è caratterizzato da:

- *Un baricentro*: che rappresenta il punto di riferimento di ogni sbuffo di gas, ovvero l'elemento preso in considerazione per l'evoluzione della traiettoria del puff nel tempo dovuta al campo medio di vento;
- *Una condizione iniziale di moto*: è la modalità con cui il puff viene emesso dalla sorgente. Essa si riduce alla definizione di un parametro, ovvero la velocità ascensionale, che è determinata dalla condizione di "galleggiamento" dovuta alla differenza di temperatura, e quindi di densità, posseduta dal puff appena emesso rispetto all'aria che si trova in ambiente.
- *Una caratteristica struttura dimensionale*: si stabilisce il puff come un'entità tridimensionale, non necessariamente definita con precisione geometrica, che presenta una concentrazione di inquinante distribuita secondo una gaussiana in tutte e tre le direzioni spaziali, e che si muove rispetto ad un sistema di assi cartesiani ortogonali centrati sul baricentro e con l'asse x lungo la direzione del vento medio.

Una volta definito l'elemento principale in questione, questa tipologia di modelli studia e segue l'evoluzione dei suddetti puff sia nello spazio sia nel tempo, il tutto nel dominio di interesse. Infatti, il puff è sottoposto a diverse forze agenti che ne determinano l'evoluzione e il destino. Esso, una volta emesso, incontra un campo di vento medio, variabile nello spazio e nel tempo, che ne determina il trasporto e quindi la traiettoria del puff (calcolata rispetto al baricentro). Inoltre, durante la sua evoluzione spazio-temporale esso incontrerà l'aria turbolenta presente all'interno del PBL. L'interazione con questi vortici determina sia un cambiamento della

traiettoria del puff, sia un aumento nella dimensione di esso tramite l'inglobamento (entrainment) di aria che porta inoltre ad una diminuzione delle concentrazioni presenti all'interno del puff. In Figura 18 sono mostrati i meccanismi di interazione appena descritti.

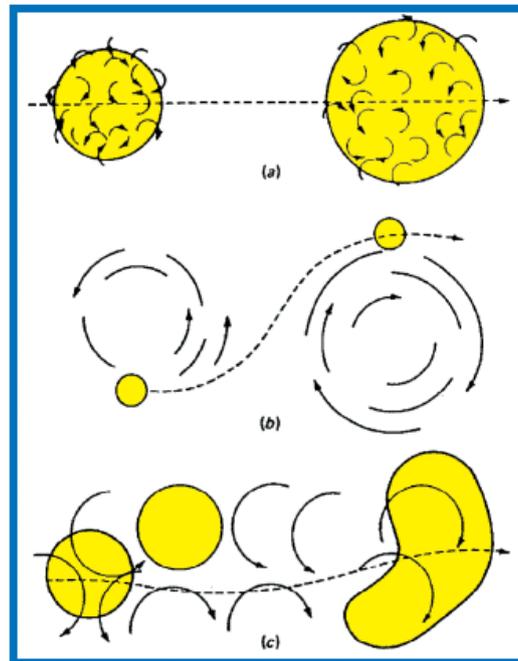


Figura 18 - Interazione di un puff generico con i vortici turbolenti di piccole (a), medie (c) e grandi (b) dimensioni (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)

Dal punto di vista dell'accuratezza, il modello a puff risulta migliore rispetto ai tradizionali modelli gaussiani a pennacchio; questo perché, come rappresentato in Figura 19, esso risulta utilizzabile sia in seguito a brusche variazioni di velocità del vento (calme di vento o raffiche), sia a variazioni della direzione del vento stesso. Quest'ultima caratteristica risulta essere un notevole vantaggio poiché permette al contaminante di variare assieme alla direzione del vento, cosa che con il plume comprometterebbe l'intera emissione [1][2].

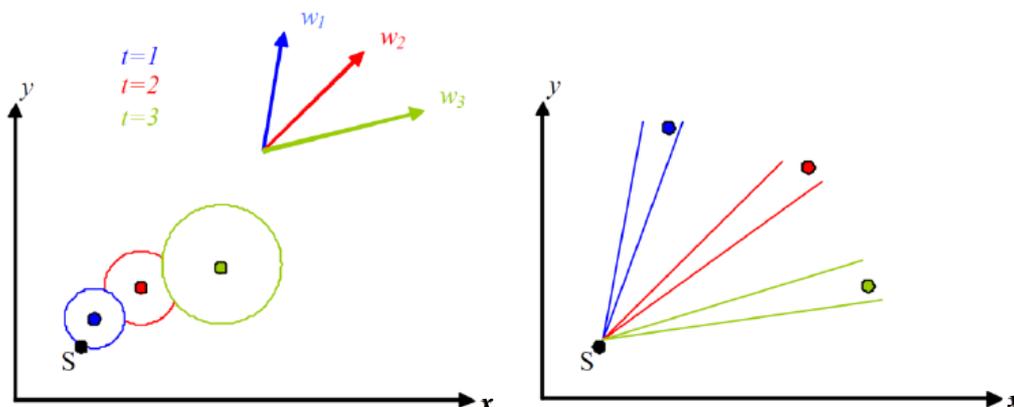


Figura 19 – Influenza della direzione del vento per un modello a puff (a sx) e per un modello a plume (a dx) (Fonte: Elena Negri, 2011)

Una volta comprese le generalità di questo modello è possibile studiare a fondo gli elementi che lo compongono. Dapprima, lo studio della dispersione degli inquinanti necessita di un dominio spaziale tridimensionale entro cui analizzare l'evoluzione dei vari puff emessi. In più, sebbene lo studio delle traiettorie non lo richiede, va disposta una griglia computazionale bidimensionale al fine di valutare l'andamento delle concentrazioni al suolo. Inoltre, va comunque detto che per il funzionamento di un qualsiasi modello puff è necessaria la conoscenza del campo di vento medio e del campo di turbolenza; ciò si traduce nell'utilizzo di un modello meteorologico di PBL che deve essere in grado di fornire ad ogni istante di tempo tutti i campi meteorologici e micrometeorologici. Le due principali operazioni del software riguardano il calcolo della traiettoria e della dispersione del puff [1][2].

Per il calcolo della *traiettoria* è necessario calcolare lo spostamento del baricentro di un generico puff in un determinato intervallo di tempo; ovvero passando da un'istante di tempo t con coordinate $x(t), y(t), z(t)$ ad un'istante di tempo $t_i = t + \Delta t$. Il calcolo andrebbe fatto tramite integrazione delle tre componenti spaziali nell'intervallo di tempo scelto ma, è impossibile calcolare in maniera esatta suddetti integrali (qui non riportati) per mancanza di elementi analitici e risulta necessario utilizzare un sistema numerico in sostituzione. Un buon compromesso è rappresentato da un algoritmo predictor-corrector che, utilizzando i vettori del vento noti in una griglia discreta e approssimando le equazioni in step successivi, permette il calcolo della posizione "definitiva" del baricentro del puff alla fine dell'intervallo di tempo. Le relazioni finali utilizzate per il calcolo sono:

$$\begin{aligned}
 x(t + \Delta t) &= x_1 + \bar{u}(t + \Delta t; x(t + \Delta t), y(t + \Delta t), z(t + \Delta t)) \cdot \Delta t \\
 y(t + \Delta t) &= y_1 + \bar{v}(t + \Delta t; x(t + \Delta t), y(t + \Delta t), z(t + \Delta t)) \cdot \Delta t \\
 z(t + \Delta t) &= z_1 + [\bar{w}(t + \Delta t; x(t + \Delta t), y(t + \Delta t), z(t + \Delta t)) + w_p] \cdot \Delta t
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Dove w_p rappresenta la somma della spinta di galleggiamento posseduta dal puff (ovvero la velocità di emissione), che verrà progressivamente persa andando avanti nel tempo, e dell'eventuale velocità di sedimentazione gravitazionale se si sta considerando dell'inquinante solido.

Oltre al trasporto dovuto al movimento delle masse d'aria, uno sbuffo di gas subisce, con l'avanzare del tempo, gli effetti causati dalla turbolenza. Questo fenomeno è detto *dispersione turbolenta*. Essa consiste nell'inglobamento progressivo di aria proveniente dai vortici turbolenti di piccole e medie dimensioni. Questo comporterà una diminuzione del valore di

concentrazione presente all'interno del puff e una modifica alla traiettoria del baricentro dello sbuffo, con conseguente trascinarsi al suolo. La schematizzazione di questo fenomeno è fatta ponendo un sistema di coordinate cartesiane con origine coincidente con il baricentro del puff, l'asse x diretto nella direzione locale del vento medio, l'asse y perpendicolare al piano xz e l'asse z uscente dalla superficie terrestre; si ipotizza che il processo di dispersione sia approssimabile ad una distribuzione di concentrazione gaussiana nelle tre direzioni spaziali, come mostrato in Figura 20. Gli elementi principali diventano quindi le deviazioni standard delle tre distribuzioni gaussiane σ_x , σ_y e σ_z , che saranno dipendenti principalmente dai fenomeni turbolenti all'interno del PBL, ma anche dalla geometria della sorgente emissiva, dalla spinta di galleggiamento (buoyancy) del puff al momento dell'emissione e quindi dal *plume rise*. Esso è definito come l'innalzamento del baricentro di un generico puff, dovuto alla quantità di moto ed al galleggiamento acquisito nel momento dell'emissione. Solitamente σ_x e σ_y sono considerate equivalenti, e quindi dispersione simmetrica lungo x e y , poiché la conoscenza odierna, e la trattazione dei processi turbolenti, non permette la diversa dispersione lungo i due assi coordinati orizzontali. Diventa quindi indispensabile calcolare il valore di questi parametri al fine di avere un risultato accurato; negli anni si sono susseguite svariate metodologie per il calcolo delle deviazioni standard che non verranno trattate in questo studio, ma verranno solo citate quelle di primaria importanza. È necessario dunque fare una premessa di base; in tutte le trattazioni si otterrà una proporzionalità diretta (come ci si aspettava) tra la dispersione turbolenta e la deviazione standard del vento. Inoltre, andranno comunque analizzati due differenti casi generici di stabilità atmosferica; il primo, in cui si ha una situazione convettiva o neutra, ovvero dove l'apporto della turbolenza convettiva (o anche meccanica) miscela fortemente l'atmosfera; il secondo, in cui si ha una situazione stabile, ovvero dove turbolenza meccanica e convettiva si equivalgono, oppure (possibile solo dal punto di vista teorico) non sono presenti. Purtroppo l'analisi della dispersione turbolenta è influenzata da molti parametri che ne complicano il calcolo; il *plume rise* e il tempo di volo del puff non sono sufficienti a descrivere la dispersione degli sbuffi di gas. Questo perché durante il suo percorso nel dominio spaziale (soprattutto se molto esteso), il puff generico attraversa diverse situazioni micrometeorologiche che influenzano la deviazione standard in maniera importante. Inoltre, con il passare del tempo, e con l'aumento della dispersione verticale e orizzontale, le dimensioni dei puff continuano a crescere a dismisura. Questa situazione risulta non compatibile con i campi di vento medi e con la turbolenza, soprattutto in domini spaziali molto disomogenei o con orografia molto marcata; per mantenere elevata l'accuratezza del calcolo si è pensato di implementare una funzione di *suddivisione (splitting)* del puff in modo da ridurre le dimensioni

e seguire le variazioni meteorologiche. Dato che molti modelli utilizzano la simmetria tra dispersione orizzontale e verticale, lo splitting di un puff porta inevitabilmente alla formazione di quattro puff “figli”, essi garantiranno una buona continuità nel calcolo sebbene siano maggiormente sensibili agli *shear* del vento. In maniera complementare, può capitare una situazione di venti molto deboli (calme di vento) che favoriscono un accumulo di puff con dimensioni piccole; in questo caso si modella una *fusione (merging)* dei puff vicini in un unico puff “rappresentativo” degli elementi accorpati [1][2].

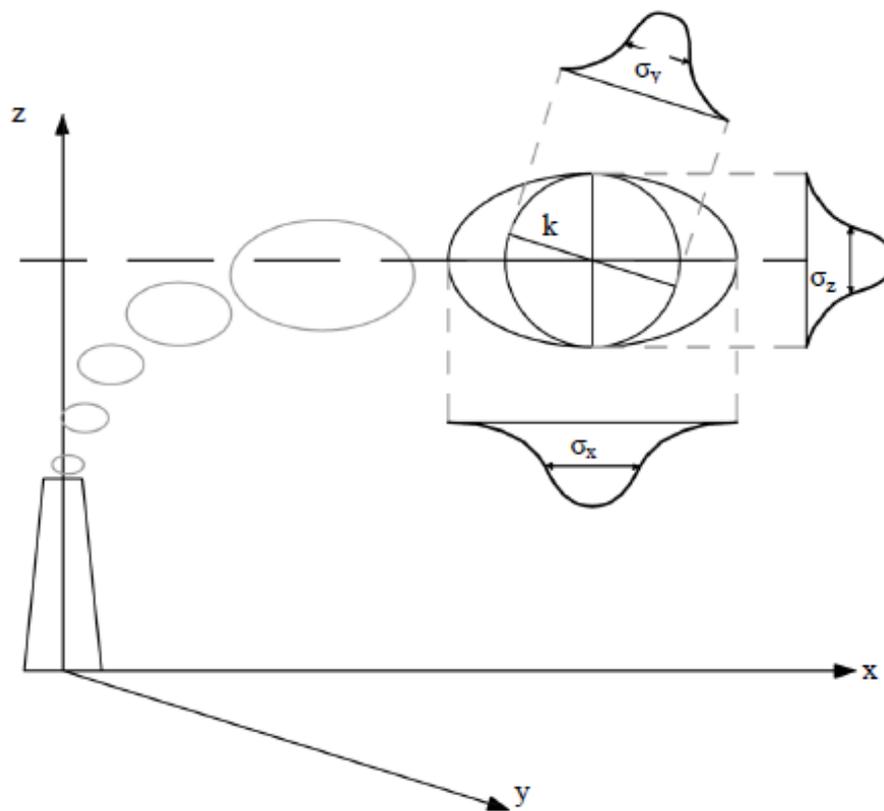


Figura 20 - Schema di un puff generico con indicazione dei coefficienti di dispersione gaussiana (Fonte: Elena Negri, 2011)

A valle di tutte queste considerazioni, il risultato più importante atteso dal modello è la stima della *concentrazione al suolo*. Essa risulta essere la concentrazione media di inquinante calcolata in ogni nodo della griglia e dovuta a tutti i puff emessi dalle varie sorgenti presenti all'interno del dominio. L'ossatura matematica di questo modello è data dall'integrazione in un generico punto al suolo $P(x,y,0)$ dell'equazione euleriana di tipo puff del trasporto e della diffusione degli inquinanti in aria espressa dalla [3.5]. Considerando un generico *puff* k , emesso all'interno del dominio, con il sistema di assi cartesiani collocato e orientato come

precedentemente descritto, la sua concentrazione istantanea in un generico nodo posto al suolo ($z = 0$) è descritta dalla seguente equazione:

$$C_k(x, y, z, t) = \frac{Q_k(t)}{2\pi \sigma_x \sigma_y} \cdot g_z \cdot \exp\left[-\frac{r_k^2}{2\sigma_x^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{r_k^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad [3.10]$$

dove:

$$g_z = \frac{2}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad [3.11]$$

In cui:

- $Q_k(t)$ = è la quantità di inquinante contenuta nel puff, che non necessariamente è equivalente all'intera massa del puff poiché dall'emissione in poi esso risulta impoverito da fenomeni come l'inglobamento di aria, la deposizione e le reazioni chimiche;
- r_k = è la distanza tra il nodo della griglia considerato ed il baricentro del puff; essa risulta essere uguale sia orizzontalmente sia trasversalmente avendo ipotizzato la dispersione simmetrica nelle due direzioni;
- h = è l'estensione verticale del PBL, nonché l'altezza di miscelazione;
- H_e = è la quota del baricentro del puff che varierà nel tempo a causa della spinta di galleggiamento ottenuta al momento dell'emissione e del trasporto;

Il termine g_z rappresenta la dispersione in senso verticale, essa è influenzata dalle interazioni multiple con la sommità del PBL e con il suolo. Il calcolo di questo termine risulta essere molto importante al fine di valutare correttamente il valore di concentrazione al suolo, per questo motivo bisogna scegliere in maniera corretta la relazione adeguata alla situazione orografica presente all'interno del dominio di studio. Esistono diverse relazioni molto complesse a seconda della morfologia del terreno che qui non saranno considerate. In definitiva, il generico puff considerato non sarà l'unico presente nel nodo della griglia considerato; durante l'intera simulazione contribuiranno al valore di concentrazione i diversi puff coinvolti nel calcolo di quel nodo. Il loro contributo sarà funzione della distanza tra il baricentro ed il nodo della griglia, dell'altezza del baricentro, del valore delle deviazioni standard e ovviamente della quantità di inquinante contenuto. Seguendo il principio di sovrapposizione degli effetti, il valore di concentrazione istantanea totale sarà definito da:

$$C_{tot}(x, y, z, t) = \sum_k C_k(x, y, z, t) \quad [3.12]$$

C'è da specificare che la [3.12] riguarda solo l'istantanea delle concentrazioni nei vari nodi della griglia nel tempo t prestabilito. Le simulazioni sono utilizzate per stimare la concentrazione media nei diversi nodi della griglia, in un intervallo di tempo T prefissato (solitamente un'ora). I modelli utilizzano formulazioni molto complesse per il calcolo della concentrazione media, quali integrazioni nel tempo (nell'intervallo definito T , ovvero un'ora) delle equazioni istantanee di concentrazione. Ciò che si ottiene sarà quindi un campo medio di concentrazioni, che per accuratezza e completezza andrebbero confrontate con distribuzioni statistiche in modo da ottenere il livello di concentrazione corrispondente al percentile di interesse [1][2][4].

Nel corso degli anni, i modelli a puff hanno avuto una serie di implementazioni semiempiriche necessarie per lo svolgimento delle simulazioni anche in condizioni molto complesse; l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente americana suggerisce l'utilizzo del software *CALPUFF*; strumento utilizzato anche per questo studio. Il sistema di modellazione è ideato in tre componenti principali, come mostrato in Figura 21, che costituiscono il pre-processore dei dati meteo, il calcolo vero e proprio tramite il modello di dispersione, e un post-processore. I componenti principali sono rispettivamente CALMET, CALPUFF e CALPOST, di cui saranno descritte brevemente le caratteristiche.

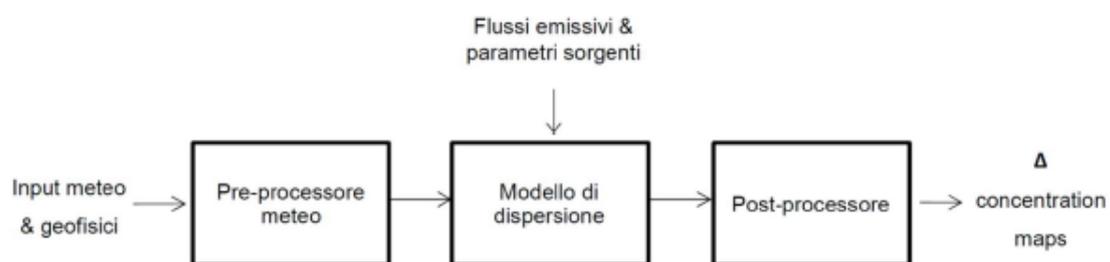


Figura 21 - Schema di funzionamento del software CALPUFF (Fonte: Zanetti, Panepinto and Ravina, 2017)

3.3.1 CALMET

Il modello meteorologico *CALMET* è un pre-processore meteo costituito da un modulo diagnostico del campo di vento e da moduli micrometeorologici per gli strati limite sopra le superfici acquose e la superficie terrestre. Il modulo diagnostico dei campi di vento utilizza un approccio in due fasi per il calcolo dei campi di vento come illustrato nella Figura 22. Nella prima fase, viene ipotizzato un campo di vento iniziale regolato dagli effetti cinematici dovuti all'orografia, ai flussi di pendenza e agli effetti di blocco del terreno. La seconda fase consiste in una procedura di analisi oggettiva per introdurre i dati osservati dalle stazioni meteo, nel

campo di vento iniziale ipotizzato, in modo da produrre un campo di vento finale. I dati di input saranno quindi i dati meteo al suolo ed in quota (quali, velocità del vento, temperatura e pressione), dati geofisici per ogni cella della griglia di calcolo (altimetria e uso del suolo) e dati al di sopra delle superfici acquose (quali differenze di temperatura e pressione e incidenza del vento). In output si otterrà un campo di vento medio tridimensionale e i suoi parametri meteorologici quali l'altezza di rimescolamento, la classe di stabilità atmosferica, le precipitazioni, il flusso di calore incidente, la lunghezza di Monin-Obukhov ecc., per ogni cella del dominio di calcolo scelto. Il processo così descritto è basato su un modello diagnostico, tuttavia è possibile produrre dei campi di vento tramite modelli meteorologici di tipo prognostico. Inoltre, quando si utilizzano domini di grandi dimensioni, l'utente ha la possibilità di regolare i venti in ingresso ad un sistema di coordinate Lambert Conformal Projection per tenere conto della curvatura della Terra [2][16].

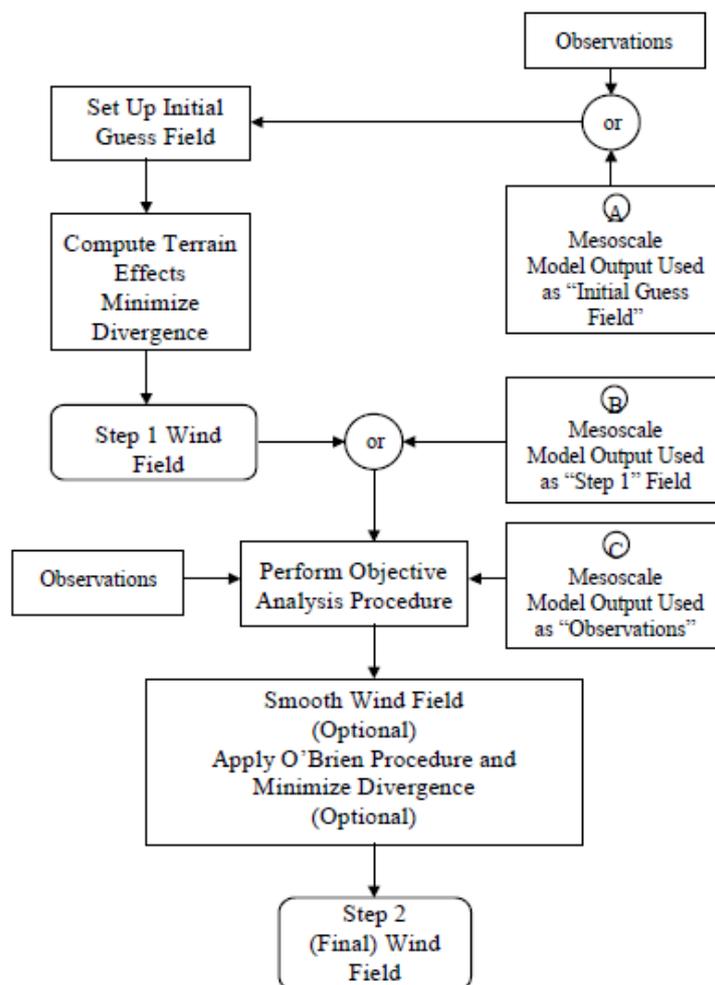


Figura 22 - Diagramma di flusso del modello meteorologico CALMET (Fonte: Calpuff User Instructions)

3.3.2 CALPUFF

CALPUFF è il modello di dispersione di inquinanti, a sbuffo multistrato, multi specie e non stazionario, in grado di simulare gli effetti delle condizioni meteorologiche variabili nel tempo e nello spazio sul trasporto, la trasformazione e la rimozione degli inquinanti, fornendo come output l'andamento spazio-temporale delle concentrazioni al suolo. È uno dei modelli a puff più conosciuti ed utilizzati, che con il passare del tempo ha avuto implementazioni e aggiunte che hanno reso questo strumento estremamente versatile, seppur complicandone l'uso. Può essere applicato su scala di decine o centinaia di chilometri e comprende algoritmi per tenere conto di effetti come l'impatto con il terreno, la rimozione degli inquinanti dovuti a deposizione secca e umida e a trasformazioni chimiche. Il modello solitamente utilizza i campi meteorologici tridimensionali sviluppati dal modello CALMET, o in alternativa, i semplici dati meteo registrati dalle stazioni di monitoraggio in un formato coerente con i file meteorologici utilizzati per guidare i modelli gaussiani allo stato stazionario ISCST3, AUSPLUME, CTDMPLUS o AERMOD. Il procedimento generale, e la trattazione analitica di esso, utilizzato dal software per il calcolo della traiettoria e del trasporto, e successivamente della concentrazione al suolo dell'inquinante, è stato illustrato già precedentemente nel capitolo in questione. In definitiva, il software ha la capacità di trattare diversi tipi di sorgenti, puntuali, lineari, areali e volumetriche, con caratteristiche emissive variabili nel tempo. In aggiunta, esso contiene algoritmi per la valutazione di situazioni variabili e complesse, quali gli effetti ottenuti nelle immediate vicinanze della sorgente (*near-source effects*), il *downwash* degli edifici, l'innalzamento transitorio del pennacchio, la penetrazione parziale del pennacchio, le interazioni del terreno su scala locale e gli effetti a più lungo raggio come la rimozione degli inquinanti (lavaggio a umido e deposizione a secco), la trasformazione chimica, lo *shear* verticale del vento, il trasporto superficiale marino e gli effetti di interazione costiera. Inoltre, la maggior parte degli algoritmi descritti contengono opzioni per trattare i processi fisici a diversi livelli di dettaglio a seconda dell'applicazione del modello [2][16].

3.3.3 CALPOST

Il programma *CALPOST* è un post-processore progettato per calcolare la media e riportare i risultati della concentrazione di inquinante o del flusso di deposizione (umido o secco) in corrispondenza dei ricettori, basandosi sui dati contenuti nel file di output *CALPUFF*, il tutto entro un intervallo di tempo prestabilito. Si può selezionare una gamma di tempi di media e i risultati possono essere riportati in una serie di formati diversi (ad esempio, tabelle di rango e

grafici; tabelle di superamento e grafici). Quindi, la funzione principale di questo software è quella di processare i dati di output di CALPUFF in modo da estrarre i risultati desiderati e schematizzarli nel formato idoneo ad una visualizzazione consistente. Si ottengono così matrici che riportano i valori di concentrazione al suolo calcolati per ogni nodo della griglia definita, relativi alle sorgenti emissive presenti nel dominio. Tali risultati, al fine di ottenere una visualizzazione delle simulazioni su cartografia e quindi ottenere una corrispondenza georeferenziata della dispersione, possono essere ulteriormente elaborati attraverso un qualsiasi software di visualizzazione grafica. In Figura 23 è mostrato quanto appena descritto; inoltre, per questo studio è stato utilizzato *SURFER* come software di visualizzazione grafica [2][16].

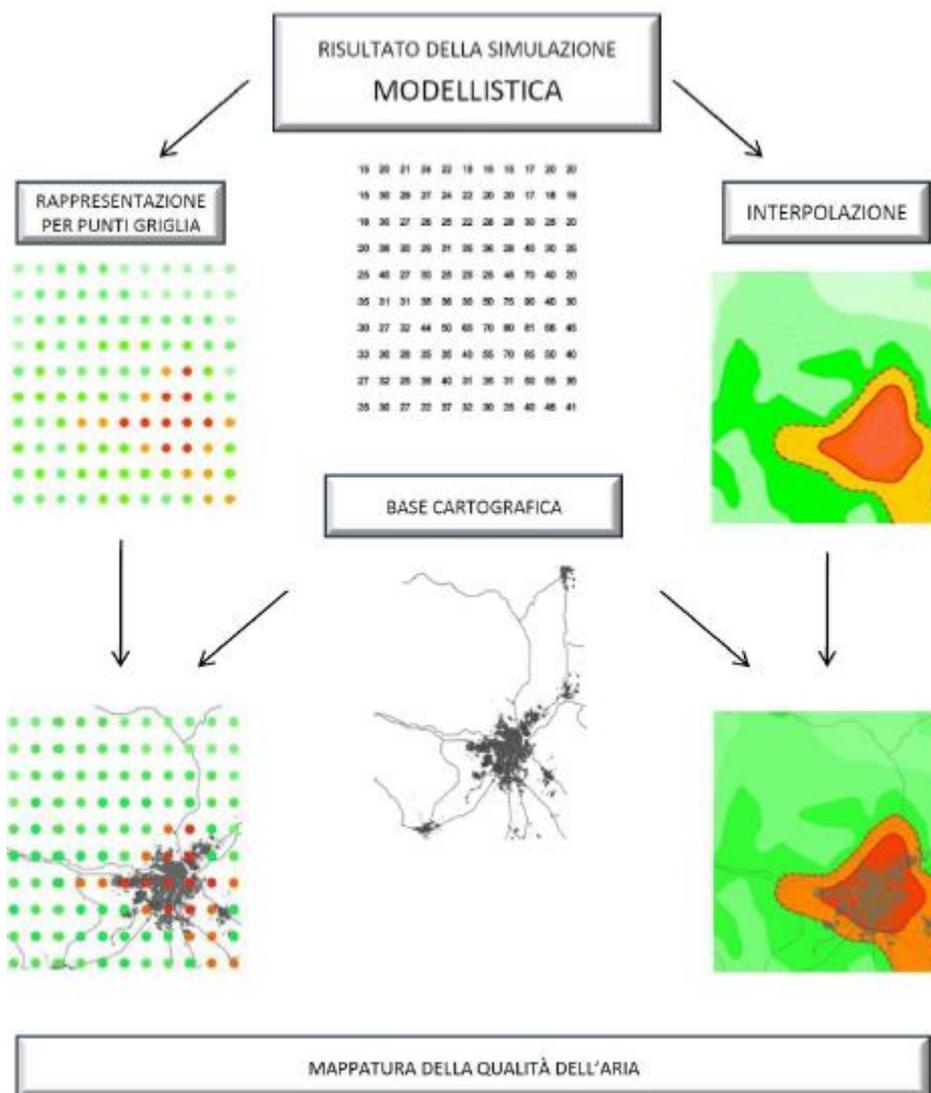


Figura 23 - Generica rappresentazione grafica delle mappe di concentrazione al suolo (Fonte: Elena Negri, 2011)

4. Il caso studio nell'area urbana di Torino

Oggetto di studio di questo lavoro di tesi è la valutazione della dispersione degli ossidi di azoto nella zona urbana di Torino, l'influenza della micrometeorologia e dell'orografia su di essa e il loro valore di concentrazione al suolo. La metodologia per la valutazione delle conseguenze, in termini di qualità dell'aria, dei flussi emessi dagli impianti energetici (sia centrali termoelettriche sia domestici) operanti sull'area metropolitana di Torino si articola in diversi step. Dapprima è stato definito il dominio spaziale di calcolo, sono stati analizzati i dati geomorfologici e meteorologici e calcolati i flussi emissivi a seconda dei diversi scenari descritti in seguito, successivamente è stata simulata la dispersione degli inquinanti e infine, come risultato, sono state rappresentate e analizzate le mappe di concentrazione al suolo.

4.1 Dominio di interesse

L'area di interesse scelta per il lavoro di tesi è la zona urbana di Torino. Come visto in precedenza e come mostrato in Figura 24, essa ricade all'interno della pianura delimitata dallo Stura di Lanzo, dal Sangone e dal Po; è situata allo sbocco della Val di Susa, tra il Colle della Maddalena e la Catena Alpina Occidentale. L'orografia circostante è molto eterogenea, con quote che variano da pochi metri sul livello del mare, aumentano notevolmente nella zona collinare torinese, fino ad arrivare ai 4000 metri del Massiccio del Gran Paradiso. Questa diversa morfologia della superficie terrestre influenza notevolmente la zona dal punto di vista meteorologico sia per le precipitazioni sia per i venti favorendo condizioni di stabilità atmosferica, nel successivo paragrafo verranno descritte in maniera dettagliata.

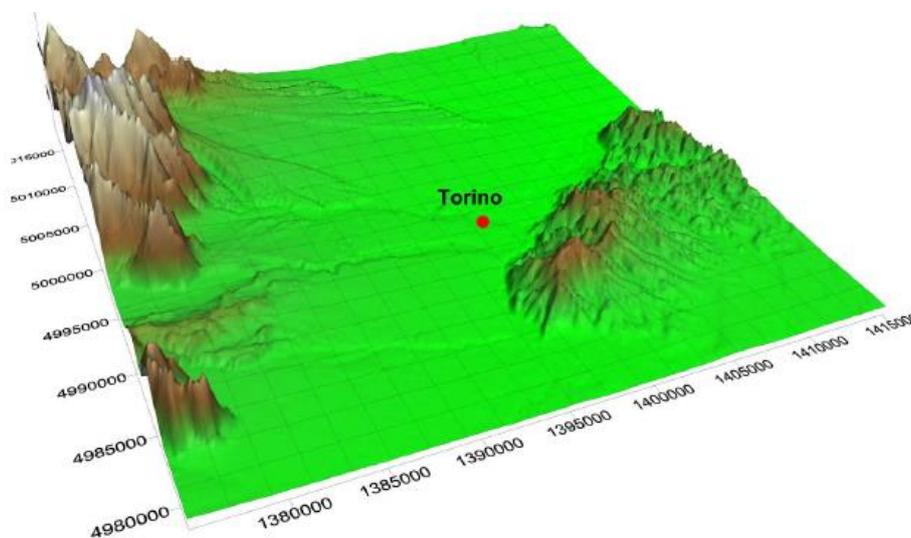


Figura 24 - Rappresentazione del dominio di calcolo per l'analisi degli impatti ambientali locali

L'estensione del dominio di calcolo è stata scelta in modo da far ricadere al suo interno i principali rilievi orografici presenti nelle zone limitrofe al centro urbano di Torino, ovvero la collina torinese e l'imbocco delle valli alpine. Questa considerazione è stata fatta in modo da valutare in maniera corretta la dispersione degli inquinanti e la loro interferenza con la particolare orografia della zona. La griglia di calcolo scelta è costituita da 71 celle x 71 celle avente risoluzione spaziale di 0.5 km. Sebbene il calcolo interessi l'intero dominio spaziale, i risultati, ovvero le concentrazioni al suolo, verranno rappresentati solamente nell'area urbana di Torino; l'area in questione va da Moncalieri fino a Torino Nord, e circonda tutto il centro di Torino con anche i quartieri limitrofi. In Figura 25 è mostrata la zona di interesse.



Figura 25 - Carta Tecnica Regionale della zona urbana di Torino (Fonte: ARPA Piemonte)

4.2 Analisi dei dati meteo

La caratterizzazione meteorologica risulta essere parte fondamentale di questo studio. I parametri meteorologici sono considerati come principali cause della dispersione locale degli inquinanti in atmosfera. L'analisi è stata effettuata sui parametri principali, quali: la velocità del vento nelle tre direzioni spaziali, la direzione del vento, la temperatura potenziale, la pressione barometrica, le precipitazioni, la velocità di attrito, la lunghezza di rimescolamento, la lunghezza di Monin-Obukhov e la stabilità atmosferica. Gli intervalli di tempo scelti per le

diverse simulazioni sono *Gennaio del 2010* e *Gennaio del 2015*; questo poiché, essendo Gennaio in generale il mese con più richiesta termica ed essendo stati il 2010 e il 2015 due anni completamente diversi dal punto di vista delle temperature, il primo particolarmente freddo ed il secondo esageratamente caldo, risultano essere validi per una valida osservazione delle differenze meteorologiche presenti. Le serie di dati raccolte, su base oraria, sono prese dal Sistema Regionale di Rilevamento della Qualità dell'Aria della Regione Piemonte gestito da ARPA Piemonte.

4.2.1 Gennaio 2010

Il clima del 2010 è stato molto vario durante l'intero anno solare, con caratteristiche diverse a seconda dei vari trimestri. Il primo trimestre, oggetto di studio, è stato caratterizzato da precipitazioni lievemente al di sopra della norma e da temperature prevalentemente sotto la media. In dettaglio l'anomalia di temperatura è stata rilevante per i mesi di Gennaio, mese di interesse, e di Febbraio. Nei due mesi appena citati si è avuta un'anomalia di temperatura negativa molto marcata, come mostrato in Figura 26, specialmente nella giornata del 4 Gennaio e durante i giorni che vanno dal 21 al 25 Gennaio. Per quel che riguarda le precipitazioni, esse hanno interessato prevalentemente il mese di Febbraio, mentre per i mesi di Gennaio e di Marzo si sono avuti periodi più asciutti con scarsa intensità e frequenza soprattutto nel primo mese dell'anno, come mostrato in Figura 27. Tutti i dati in questione sono stati raccolti da una stazione rappresentativa della zona urbana di Torino, ovvero Rebaudengo.

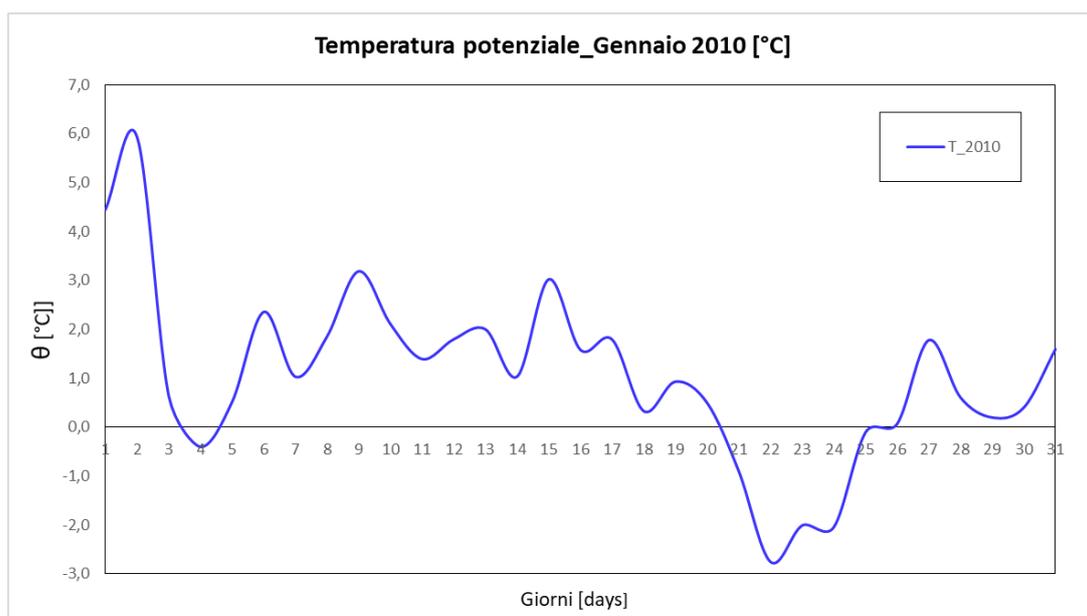


Figura 26 - Temperatura potenziale durante il mese di Gennaio del 2010

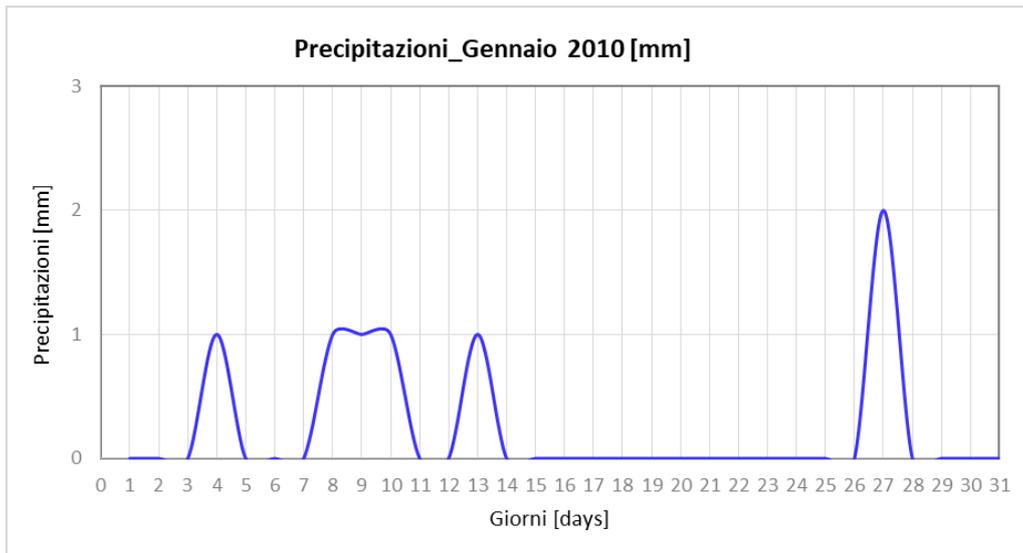


Figura 27 - Precipitazioni nel mese di Gennaio 2010

Nel complesso i primi mesi hanno avuto un andamento freddo e abbastanza piovoso. Questo fenomeno è dovuto principalmente ad una pressione in quota, rappresentata dall'*altezza del geopotenziale*, che si è mantenuta al di sotto della media in tutta l'Europa sudoccidentale a causa delle varie depressioni scaturite dalle masse d'aria polari ed atlantiche che hanno spinto l'Anticiclone delle Azzorre a latitudini meridionali, e le stesse masse d'aria, fredde artiche e umide marittimo-oceaniche, hanno investito l'Italia. L'anomalia negativa di pressione (che va dal verde al blu - viola), come si evince dalla Figura 28, si trova principalmente nelle latitudini più meridionali dell'Atlantico; essa ha influenzato fortemente il nordovest italiano consentendo agli impulsi perturbati, umidi e carichi di precipitazioni, di entrare nella Penisola e condizionare la stabilità atmosferica [17][18].

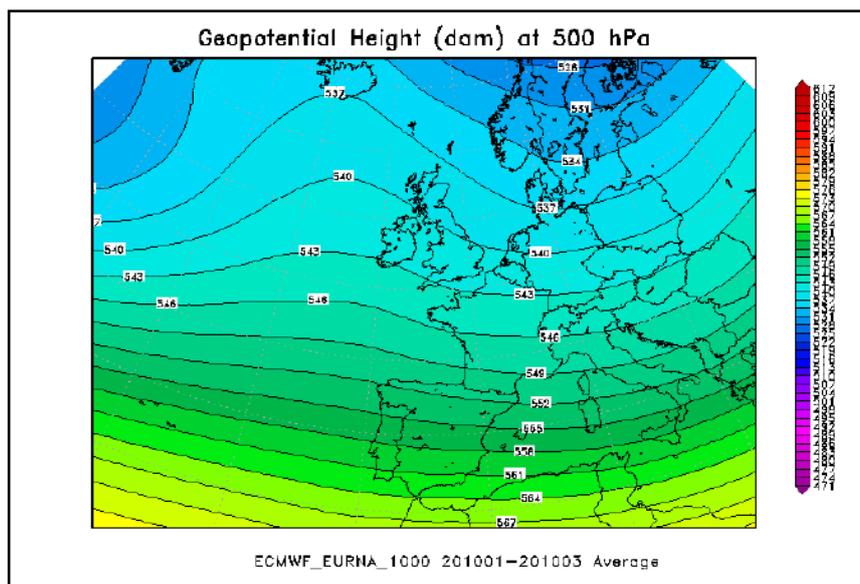


Figura 28 - Altezza del geopotenziale nel primo trimestre del 2010 (Fonte: ARPA Piemonte)

Conseguenza delle variazioni di temperatura e pressione sono i venti che spirano nel dominio di interesse. Sono stati calcolati e raffigurati i dati di intensità del vento (in Figura 29) e le direzioni (in Figura 30) in cui spirava prevalentemente il vento. Per il calcolo delle tre componenti del vettore vento, e quindi *modulo di intensità* vento stesso, si consideri che il sistema di riferimento cartesiano, abbia l'asse x orientato nella direzione *Est-Ovest* (positivo verso Est); l'asse y orientato nella direzione *Nord-Sud* (positivo verso Nord) e l'asse z orientato nella direzione *Alto-Basso* (positivo verso l'alto). Il modulo di intensità del vettore vento è stato calcolato tramite la seguente equazione:

$$U = \sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)} \cong \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad [4.1]$$

In prossimità del suolo risulta normale approssimare la velocità del vento al secondo termine della [4.1] poiché la componente verticale del vento solitamente risulta molto inferiore rispetto alle componenti orizzontali. In Figura 29 si nota come, secondo la scala di Beaufort vista nel capitolo 2, nel dominio di interesse durante il mese di Gennaio del 2010 siano presenti, praticamente sempre, calme o bave di vento.

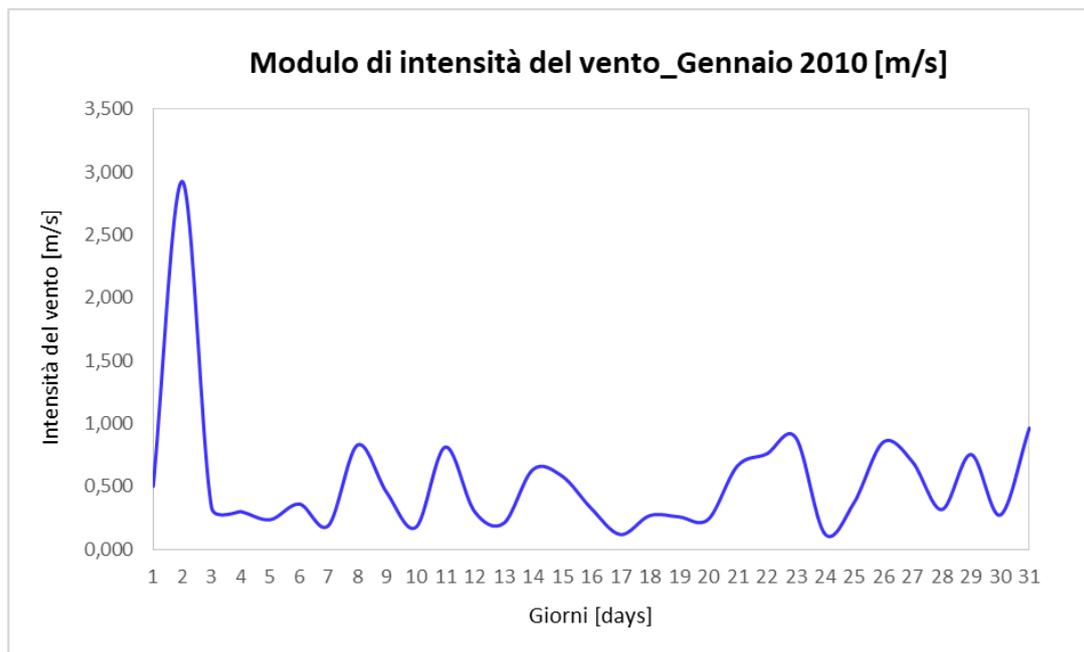


Figura 29 - Andamento del modulo di intensità del vento nel mese di Gennaio 2010

La *direzione del vento*, convenzionalmente definita come la direzione da cui proviene il vento, è misurata a partire dall'angolo 0° sessagesimale, che indica il Nord, passando per gli angoli di 90° , 180° e 270° che indicano rispettivamente Est, Sud e Ovest, ovvero i principali punti cardinali. Il calcolo di questo parametro è stato fatto attraverso la seguente espressione:

$$D = 90^\circ - \frac{360^\circ}{2\pi} \tan^{-1}[v/u] + \alpha_0 \quad \text{con} \quad \alpha_0 = \begin{cases} 0^\circ & \text{se } u < 0 \\ 180^\circ & \text{altrimenti} \end{cases} \quad [4.2]$$

Le direzioni considerate in questo studio sono 8, e sono in ordine Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ovest, Ovest e Nord-Ovest. La rappresentazione della frequenza delle direzioni del vento è stata fatta attraverso la *rosa dei venti*, mostrata in Figura 30.

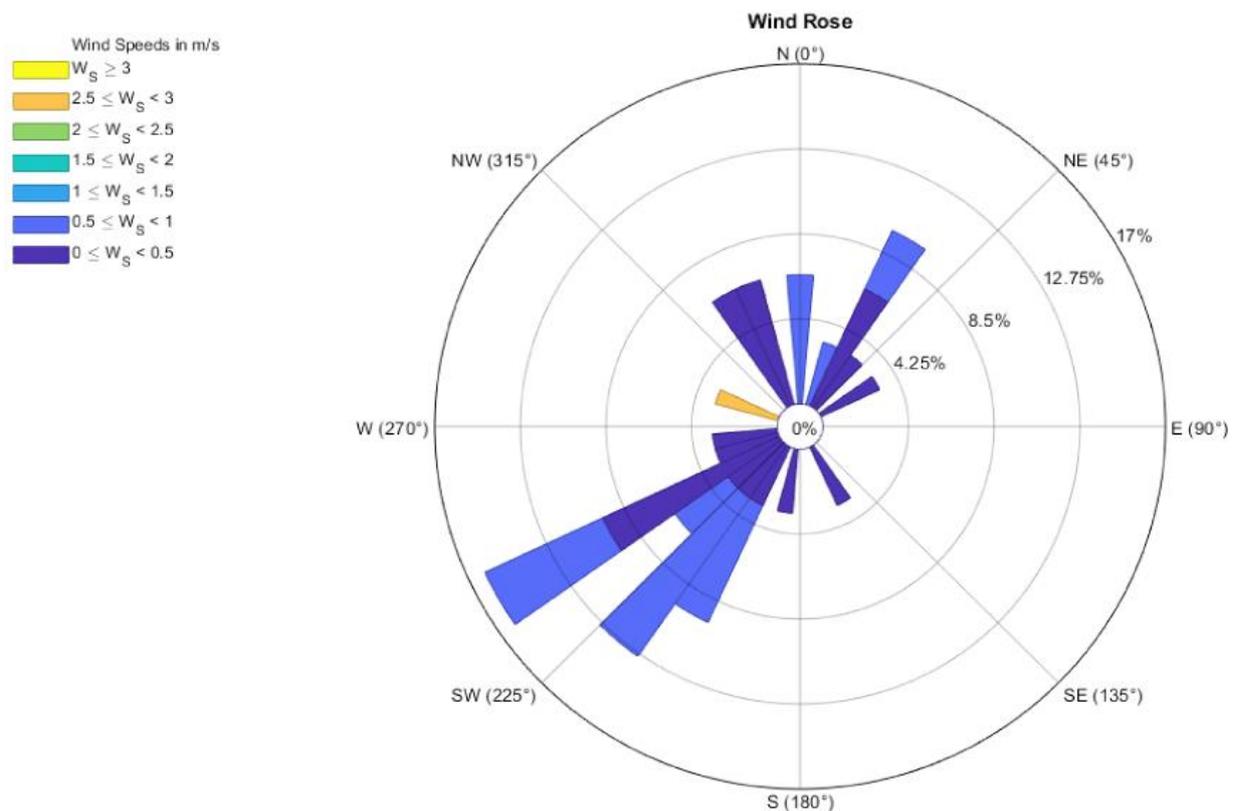


Figura 30 - Direzioni, velocità e frequenze dei venti nella zona urbana di Torino a Gennaio 2010

Sebbene la rosa dei venti non sia interpretabile in modo esattamente fisico, essa fornisce una prima rappresentazione immediata delle condizioni generali del vento. Nella figura sopra riportata si può notare come il regime anemologico per il mese di Gennaio del 2010 nella zona urbana di Torino sia un *regime bimodale*. Esso è tale quando si hanno due direzioni dominanti del vento rispetto alle altre; nel caso in esame si hanno Sud-Ovest e Nord-Est. Difatti, la zona oggetto di studio ha queste direzioni dominanti poiché causate dalla “canalizzazione di valle” del vento, legate principalmente all’orografia dell’intero arco alpino occidentale [12].

Tutta la serie di parametri meteorologici descritti serve inoltre a definire il livello di stabilità atmosferica che si è avuto nel periodo di interesse. La *stabilità atmosferica* è una caratteristica dell’atmosfera da cui dipendono i movimenti delle masse d’aria, e quindi la dispersione degli

inquinanti, all'interno di essa. Si utilizzano diversi parametri, quali il modulo di velocità del vento, l'intensità della radiazione solare e la copertura nuvolosa, come mostrato in Tabella 5, per definire le classi di stabilità atmosferica, ideate da Frank Pasquill nel 1961. Esistono 6 classi di stabilità atmosferica, indicate con le lettere dell'alfabeto latino, che vanno da condizioni estremamente instabili (lettera A) a condizioni moderatamente stabili (lettera F).

Tabella 5 - Condizioni meteorologiche che definiscono le classi di stabilità di Pasquill (Fonte: Seinfeld and Pandis, 2006)

Velocità del vento in superficie	Intensità della radiazione solare			Copertura nuvolosa notturna	
	m/s	Forte	Moderata	Leggera	> 50%
< 2	A	A - B	B	E	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Dall'analisi dei dati ARPA Piemonte, comprensivi di altezza del geopotenziale (Figura 28), intensità del vento (Figura 29) e dati sperimentali (Figura 31), si evince che durante il mese di Gennaio 2010 si sono verificate condizioni moderatamente stabili per l'atmosfera. Si nota come, sebbene sia prevalente la bassa pressione, si hanno comunque condizioni stabili per la maggior parte del mese, alternate da condizioni moderatamente instabili dovute principalmente all'alternanza del giorno e della notte [17][18].

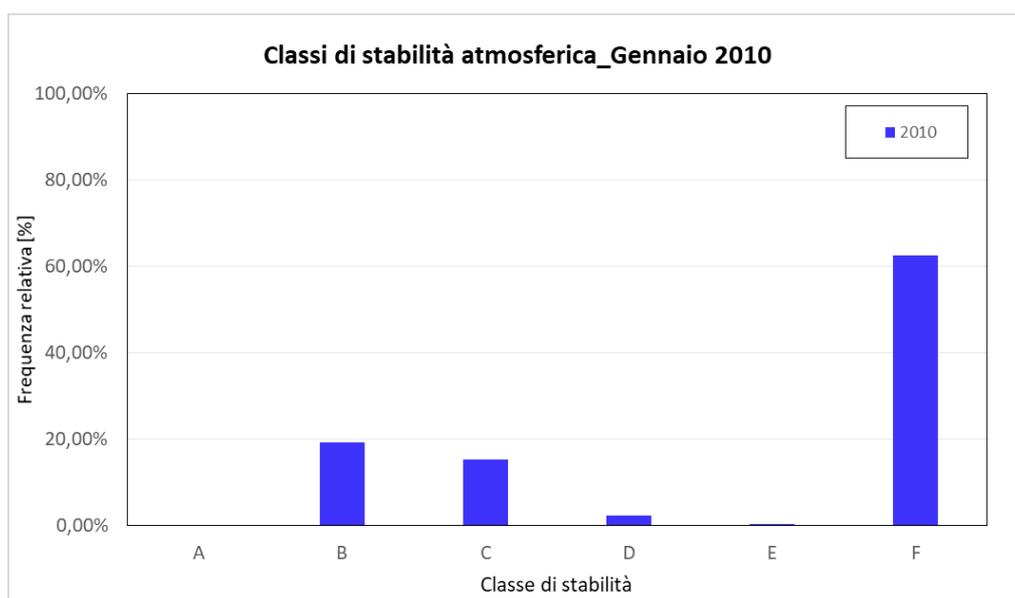


Figura 31 - Frequenza delle classi di stabilità atmosferica nel mese di Gennaio 2010

Altro parametro fondamentale per l'analisi della dispersione degli inquinanti è la *Lunghezza di Monin-Obukhov*. Essa è definita algebricamente come:

$$L = -\frac{u_*^3 \bar{\theta}_v}{kg(w'\theta'_v)} \quad [4.3]$$

Dove u_* è la velocità d'attrito, $\bar{\theta}_v$ è la temperatura media potenziale virtuale, k è la costante di Von Karman, g è l'accelerazione di gravità e la parentesi al denominatore rappresenta il flusso di temperatura potenziale superficiale. Dal punto di vista concettuale, essa rappresenta la quota alla quale si ha l'equilibrio tra la turbolenza meccanica e la turbolenza termica; tale valore è importante poiché risulta essere dello stesso ordine dell'estensione verticale del *Surface Layer*. Difatti, l'equazione mette in relazione la velocità d'attrito, rappresentativa della turbolenza meccanica, con la media della temperatura potenziale, che rappresenta la turbolenza termica. Dall'equazione si evince che, se L assume un valore negativo, allora si avrà una situazione convettiva prevalente, ovvero staticamente instabile; se L assume invece un valore positivo, si avrà una situazione staticamente stabile prevalente. Assunto ciò, si nota che, come mostrato in Figura 32, si è avuta una lunghezza di Monin-Obukhov tendenzialmente nulla, con qualche variazione sia in positivo che in negativo in determinati giorni in cui sono avvenute anche brusche variazioni termiche. L'andamento di questo parametro trova conferma anche nella frequenza delle classi di stabilità; infatti la maggior parte dei valori sono positivi, sinonimo di stabilità atmosferica, con qualche picco negativo confermato dalla presenza di alcune situazioni di instabilità durante il mese.

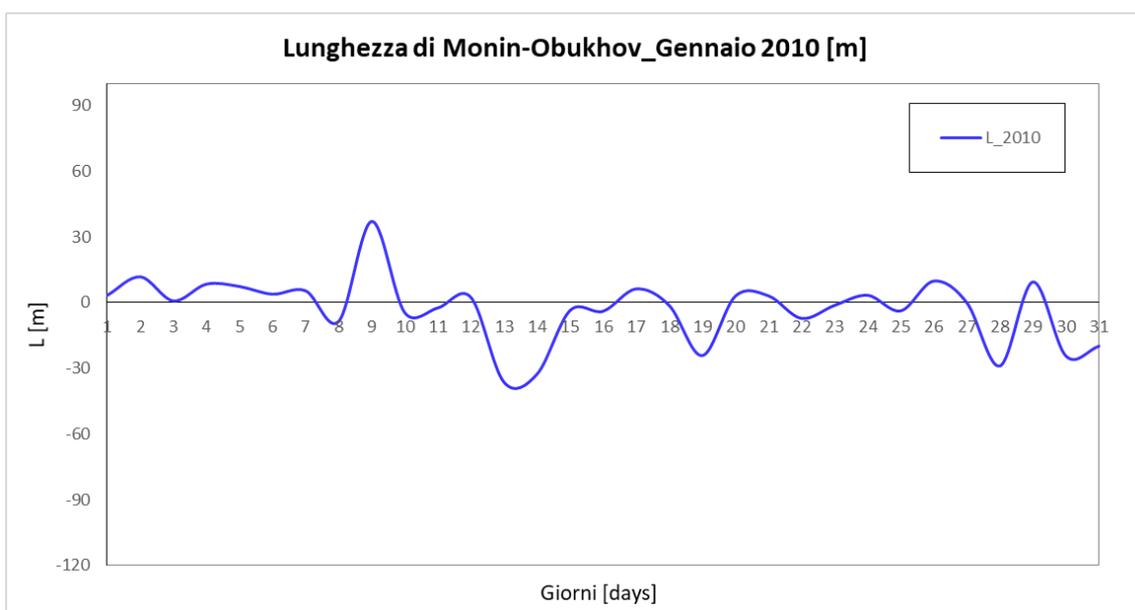
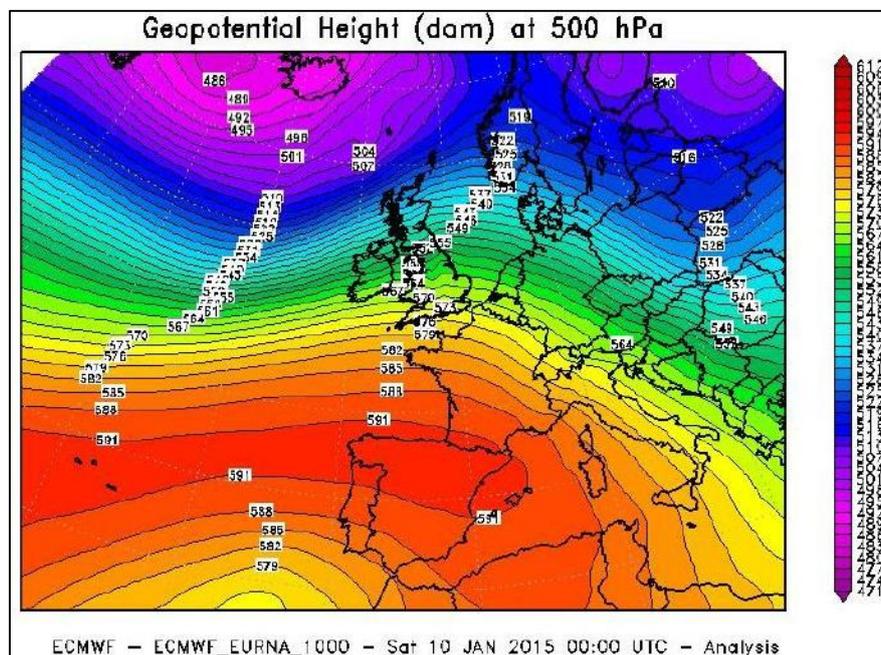


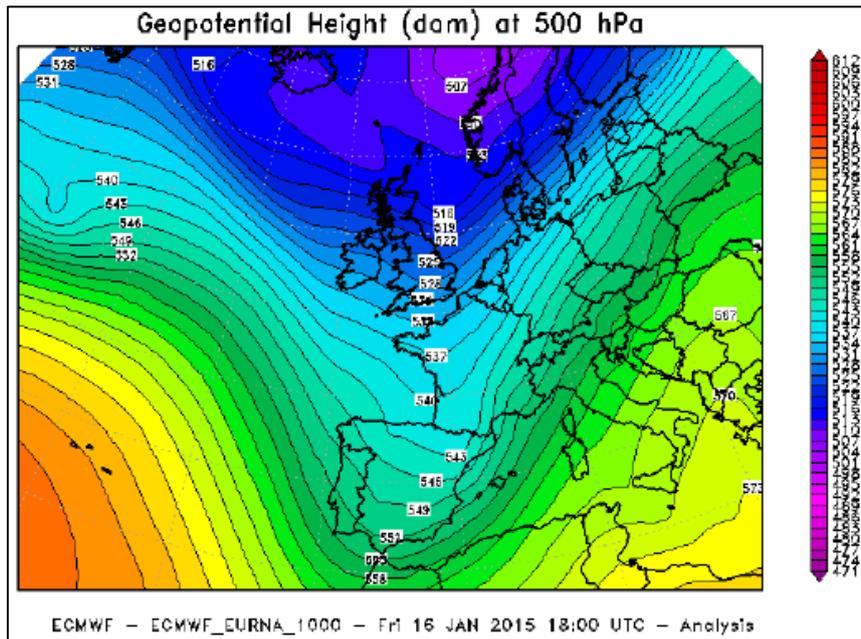
Figura 32 – Lunghezza di Monin-Obukhov per il mese di Gennaio del 2010

4.2.2 Gennaio 2015

In Piemonte, il mese di Gennaio 2015 è risultato essere il 6° più caldo degli ultimi 58 anni, con un'anomalia termica media di circa 2.6°C rispetto agli ultimi 30 anni del XX secolo. Dal punto di vista pluviometrico invece, sono caduti, in percentuale, il 22% in meno di millimetri di pioggia rispetto alla media di Gennaio nello stesso periodo sopracitato. In questo particolare mese si sono verificate due configurazioni metereologiche ben distinte. La prima, mostrata in Figura 33, è caratterizzata da una fase piuttosto estesa di stabilità dovuta all'espansione dell'anticiclone delle Azzorre con un promontorio di alta pressione che si estende nel bacino occidentale del Mediterraneo fino al Piemonte. Questo fenomeno ha causato forte inversione termica temperature superiori alla media per tutte le prime due settimane del mese oggetto di studio; tale considerazione si può confermare tramite la rappresentazione della temperatura media mostrata in Figura 35. Inoltre, durante i giorni 8, 9 e 10 Gennaio, il Foehn si è manifestato con raffiche superiori a 120 km/h creando condizioni di instabilità e innalzamento delle temperature nella zona urbana di Torino. Si sono registrate temperature superiori anche di 11°C rispetto alla media giornaliera dei mesi di Gennaio della seconda parte del secolo scorso [19][20].



rispetto alla prima parte del mese, ma nonostante questo si è registrato un valore superiore alla media.



Per quanto riguarda le precipitazioni, nel mese in questione sono caduti circa 47 mm di pioggia, circa il 20% in meno rispetto al periodo di riferimento. Esse hanno insistito principalmente su zone montane e pedemontane, mentre in città si è avuta un'intensità di pioggia inferiore. Inoltre esse si sono concentrate prevalentemente nella seconda parte del mese, come raffigurato anche in Figura 36 [19][20].

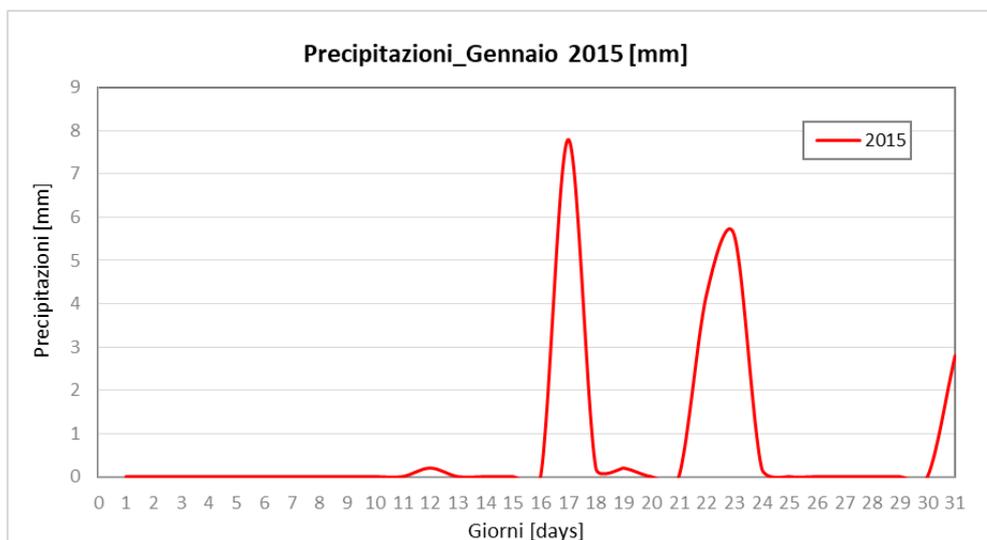


Figura 36 – Precipitazioni nel mese di Gennaio 2015

Come detto in precedenza, frutto delle variazioni termiche e bariche sono gli spostamenti delle masse d'aria che generano appunto i venti. Dal punto di vista del modulo di intensità del vento, calcolato come descritto nel paragrafo precedente, anche il 2015 ha presentato molte calme di vento, seppur con una variabilità dell'intensità maggiore rispetto al 2010. L'andamento della media giornaliera dell'intensità del vento è mostra in Figura 37.

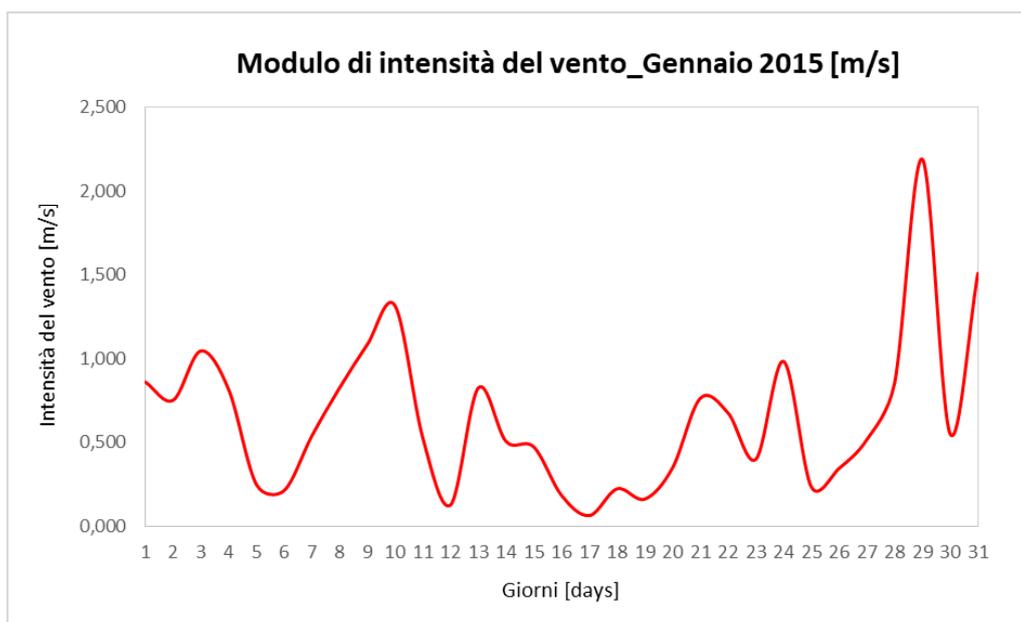


Figura 37 - Andamento del modulo di intensità del vento nel mese di Gennaio 2015

Anche per Gennaio del 2015 è stata analizzata la frequenza e la provenienza dei venti. In Figura 38 è mostrata la frequenza dei venti provenienti dalle diverse direzioni, e la loro diversa intensità. Si può affermare che la variabilità delle diverse direzioni dei venti è causata principalmente dai diversi eventi e dalle diverse configurazioni meteorologiche avutesi nel mese in questione. Infatti, si nota che la provenienza principale dei venti è a Sud-Ovest, ma non mancano frequenze elevate anche a Sud; questo è causato principalmente dalla presenza, nella prima parte del mese, dell'anticiclone delle Azzorre e dalla "canalizzazione del vento" nella valle torinese. Inoltre, si notano anche venti provenienti da Nord-Ovest e da Ovest; questi sono dati principalmente dalla saccatura atlantica che si è presentata durante la seconda parte del mese e agli episodi di Foehn. Sebbene si abbia questa variabilità, anche in questa situazione possiamo affermare di avere un regime anemologico bimodale, con direzioni prevalenti Sud-Ovest e Sud.

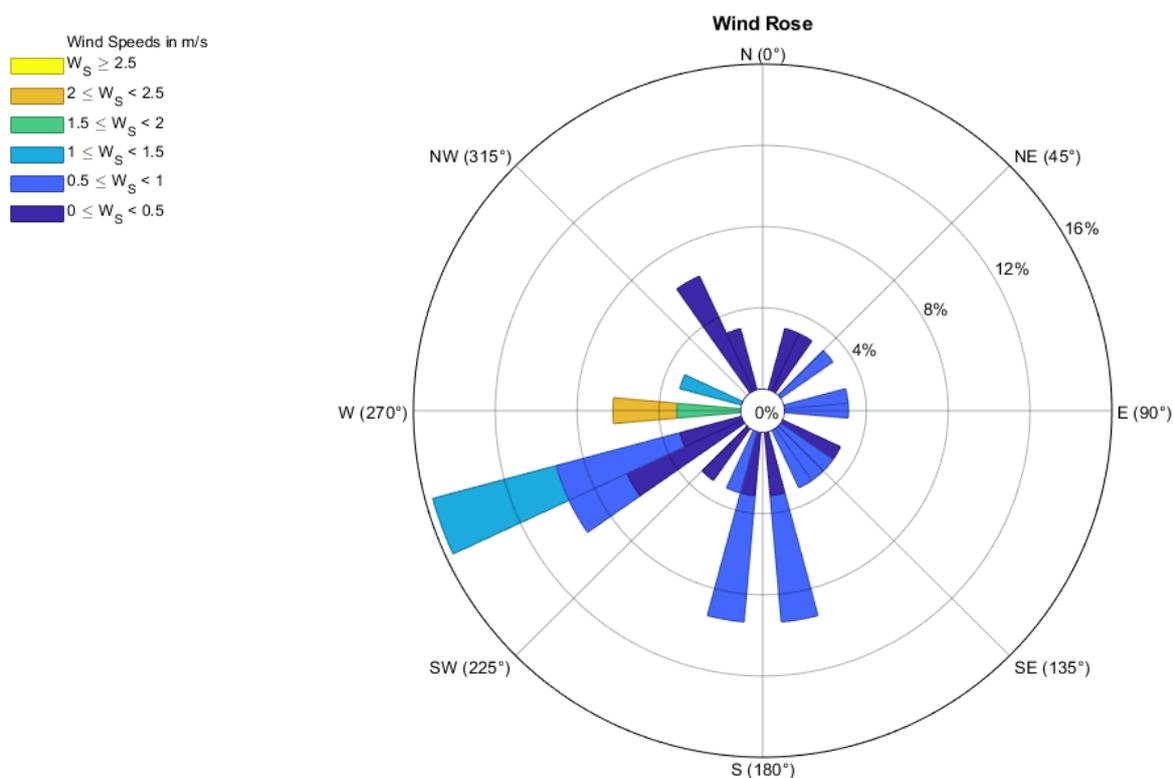


Figura 38 - Direzioni, velocità e frequenze dei venti nella zona urbana di Torino a Gennaio 2015

Dal punto di vista della stabilità atmosferica invece, si è avuta una forte variabilità delle classi dal punto di vista orario e giornaliero; nonostante ciò, valutando il mese complessivamente, si sono alternati, in maniera quasi equa, condizioni di stabilità e condizioni neutre tendenti alla leggera instabilità. La stabilità è conseguenza dell'inversione termica causata dall'anticiclone delle Azzorre; mentre la neutralità/instabilità leggera è stata causata da eventi sporadici quali il

Foehn e i venti provenienti dalla saccatura atlantica. Si mostra in Figura 39 la frequenza delle classi di stabilità, che conferma quanto detto.

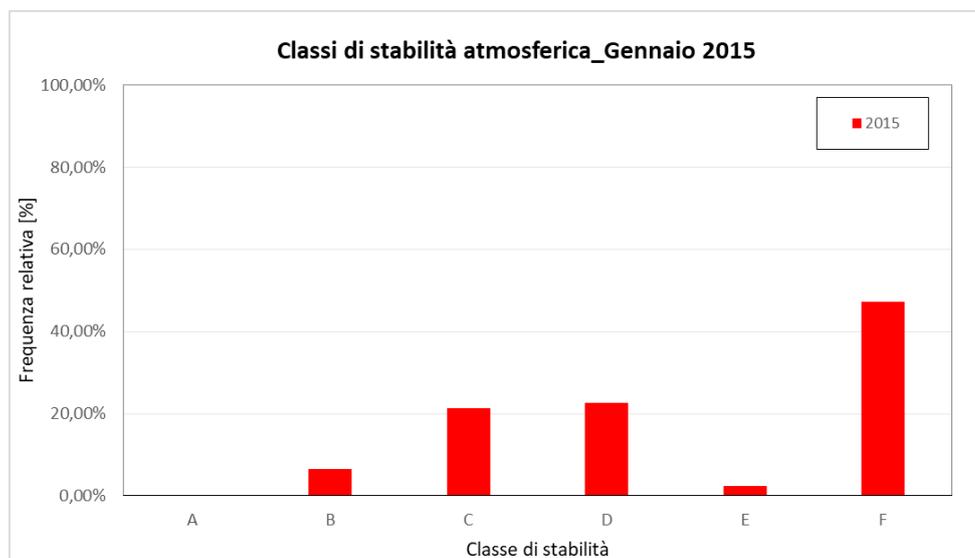


Figura 39 - Frequenza delle classi di stabilità atmosferica nel mese di Gennaio 2015

Infine, anche per questo mese è stata analizzata la lunghezza di Monin-Obukhov. Nel 2015, diversamente da quanto visto nel Gennaio del 2010, si sono avuti diversi picchi sia negativi che positivi. In Figura 40, si nota come per molti giorni del mese si è avuta una situazione tendenzialmente neutra, ma ci sono stati quattro picchi negativi dovuti principalmente alle temperature record registrate nel mese in questione, e due picchi positivi causati dalla presenza di episodi ventosi e conseguente innalzamento della velocità di attrito. Tutto ciò si traduce, come confermato dalla stabilità atmosferica, in una stabilità atmosferica tendenzialmente neutra con repentine variazioni volte sia ad instabilità sia a stabilità statica.

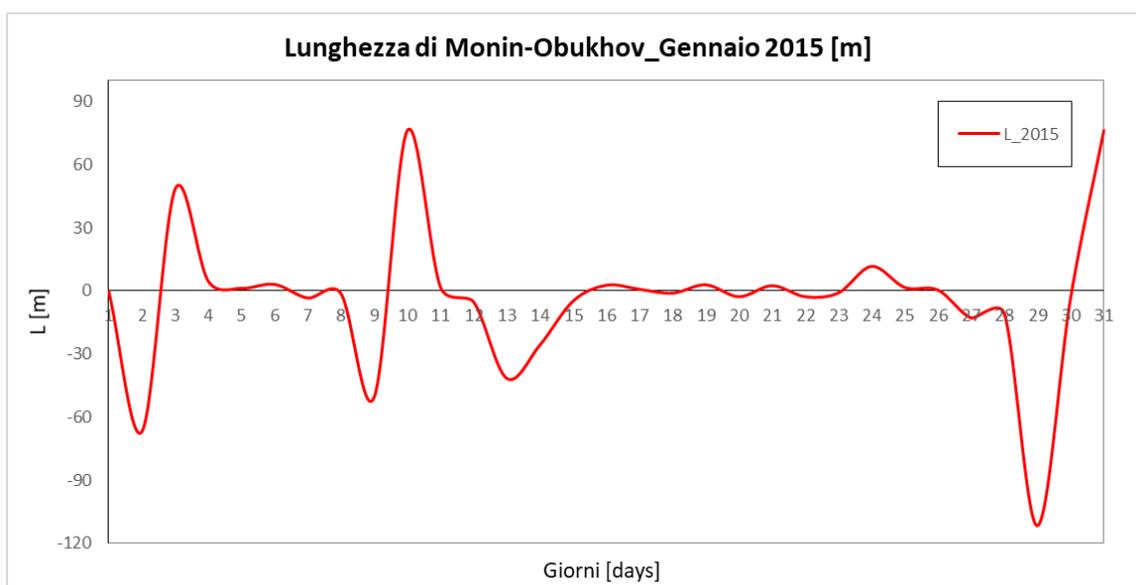


Figura 40 - Lunghezza di Monin-Obukhov per il mese di Gennaio del 2015

4.3 Scenari emissivi

Dal punto di vista operativo, al fine di valutare in maniera corretta l'influenza dei parametri meteorologici sulla dispersione degli ossidi di azoto nella zona urbana di Torino, si è scelto di impostare, nel mese di Gennaio dei due diversi anni 2010 e 2015, due ipotetici scenari emissivi:

- *Emissioni da centrali termoelettriche*: è lo scenario in cui vengono considerate solo le emissioni da sorgenti puntuali, ovvero gli impianti di produzione di energia elettrica e termica presenti all'interno della zona urbana di Torino;
- *Emissioni da impianti termici residenziali*: è lo scenario in cui vengono considerate solo le emissioni da impianti domestici, suddivisi in zone e schematizzati come sorgenti areali, ipotizzando che debbano coprire l'intero fabbisogno termico (comprensivo del contributo delle centrali termoelettriche) della zona urbana di Torino.

Sono stati scelti questi due scenari per poter analizzare effettivamente come: la tipologia di sorgente, la quota, la posizione e l'emissione siano influenzati dai diversi eventi meteorologici.

4.3.1 Emissioni da centrali termoelettriche

Il primo scenario rappresenta la situazione in cui il fabbisogno termico richiesto dalla zona urbana di Torino sia interamente coperto dalla produzione termica delle centrali termoelettriche. La gestione e distribuzione del riscaldamento nella città metropolitana di Torino è gestita dal Gruppo IREN attraverso una delle più grandi reti di teleriscaldamento d'Italia. Come mostrato in Figura 41, la rete di teleriscaldamento copre i comuni di Torino, Moncalieri e Nichelino, ed è attualmente in espansione nelle zone limitrofe. Al 2016, la volumetria abitativa servita dichiarata era pari a 59.765.339 m³. La rete è servita da una serie di centrali di cogenerazione; la centrale termoelettrica di cogenerazione di Moncalieri, la centrale termoelettrica di cogenerazione di Torino Nord, la centrale di integrazione e riserva del Bit, la centrale di integrazione e riserva del Politecnico e gli accumuli del Martinetto. Dal punto di vista emissivo, nel presente studio sono stati considerati come *sorgenti puntuali di emissione* i camini dei gruppi termici (2 per la centrale di Moncalieri e 1 per la centrale di Torino Nord) e i camini, accorpati per ciascuna centrale, relativi alle caldaie di integrazione (1 per le caldaie della centrale di Moncalieri, 1 per le caldaie della centrale di Torino Nord, 1 per la centrale del Bit e 1 per la centrale del Politecnico). Essendo il Martinetto un accumulo, è stato trascurato il suo contributo emissivo puntuale. In Tabella 6 sono state raggruppate tutte le specifiche tecniche e le coordinate geografiche (in coordinate UTM) delle sorgenti emissive corrispondenti ai camini delle centrali termoelettriche oggetto di studio.

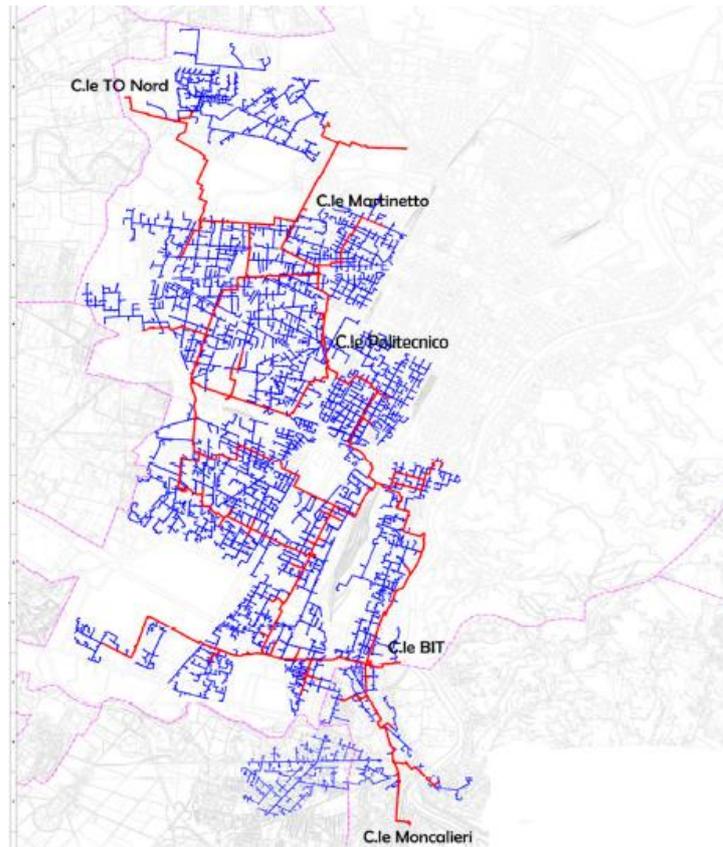


Figura 41 - Estensione attuale della rete di teleriscaldamento nell'area urbana di Torino (Fonte: IREN Energia S.p.A.)

In Figura 42 è stata rappresentata l'ubicazione di tutte le sorgenti puntuali, considerate per le simulazioni, all'interno del dominio di interesse.

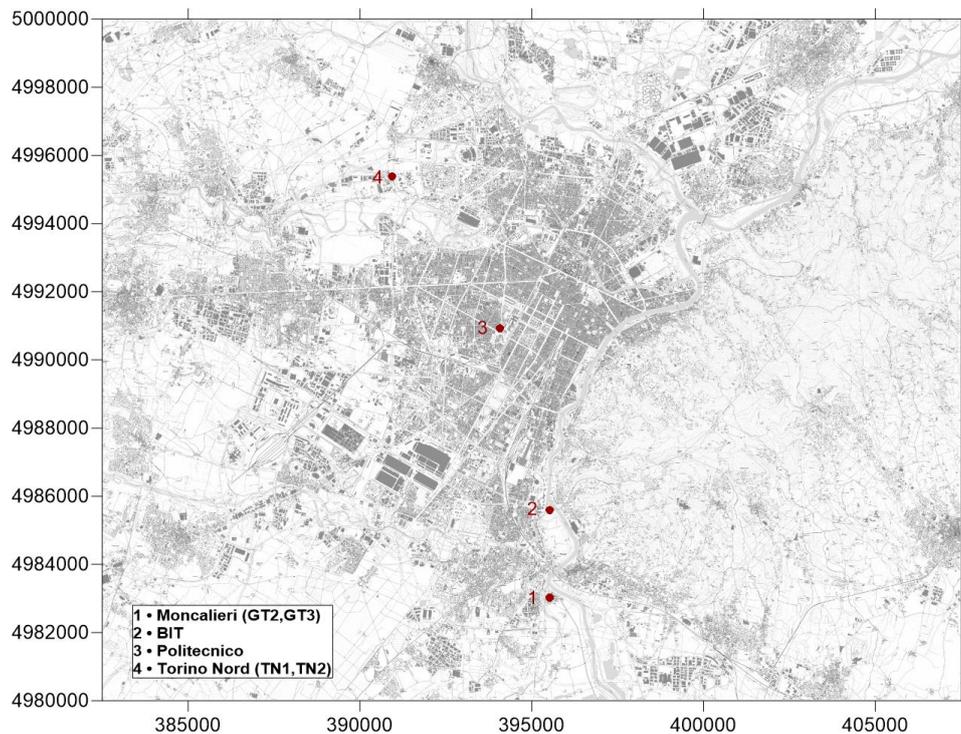


Figura 42 - Ubicazione delle centrali termoelettriche nella zona urbana di Torino

Tabella 6 - Caratteristiche geometriche e delle coordinate geografiche delle sorgenti emissive puntuali considerate (Fonte: IREN Energia S.p.A.)

Rete di Teleriscaldamento Torino: Centrali termoelettriche/termiche e sistemi di accumulo IREN ENERGIA S.p.A.						
Sito	Impianto	Potenza	Punto emissione (camino)			
			Altezza	Diametro	Coordinate UTM	
			[m]	[m]	Latitudine	Longitudine
Centrale termoelettrica di cogenerazione di Moncalieri	Ciclo combinato RPW 2°GT (turbina a gas)	395 MWe	60,00	7,50	395652,72	4983228,57
		260 MWt				
	Ciclo combinato 3°GT (turbina a gas)	383 MWe	60,00	7,00	395736,12	4983266,35
		260 MWt				
Centrale termoelettrica di cogenerazione Torino Nord	Ciclo combinato (turbina a gas)	400 MWe	60,00	6,00	390950,42	4995655,77
		220 MWt				
	Caldaie di integrazione e riserva + caldaia ausiliaria	113 MWt (ciascuna) + 12,8 MWt (ausiliaria)	60,00	1,80	390975,80	4995571,70
Centrale di integrazione e riserva del Bit	Caldaie di integrazione e riserva	85 MWt (ciascuna)	43,00	1,80	395378,47	4985746,22
Centrale di Integrazione e riserva Politecnico	Caldaie di integrazione e riserva	85 MWt (ciascuna)	50,00	1,80	394275,49	4990844,94

I dati operativi ed emissivi delle centrali termoelettriche sono stati presi dai dati ufficiali di IREN Energia. È stata utilizzata la serie di dati dell'anno 2015, sia per le simulazioni di Gennaio 2010, sia per le simulazioni di Gennaio 2015, in modo da poter valutare l'effettiva influenza dei parametri meteorologici a parità di emissioni. I dati utilizzati comprendono:

- I valori totali di produzione di energia elettrica e termica, consumo di combustibile (gas naturale per tutte le centrali), ed emissioni di determinati inquinanti per ciascuna centrale;
- I dati orari dei sistemi di monitoraggio emissioni in continui (SME) delle centrali termoelettriche, che comprendono: flusso di CO emesso (kg/h), flusso di NO_x emesso (kg/h), flusso di NH₃ emesso (kg/h), flusso di TSP emesso (kg/h), flusso di CO₂ emesso (kg/h), umidità nei fumi (%V), temperatura dei fumi (°C), pressione dei fumi (hPa), portata dei fumi (kNm³/h), consumo di gas naturale (Sm³), potenza netta turbogas

(MW), potenza termica ceduta al teleriscaldamento (MWt) e infine la potenza elettrica netta totale (MWe).

Una volta modellati i dati meteorologici, quali i campi di vento, e il dominio spaziale in termini orografici, è necessario modellare le sorgenti emissive. Al fine di simulare in maniera corretta lo scenario emissivo in questione, il software CALPUFF richiede la costruzione di un “file sorgenti”, puntuali in questo caso (PTEMARB.DAT), in cui siano presenti le caratteristiche geometriche, fisiche e quantitative delle sorgenti emissive. La redazione del file sopracitato va fatta in maniera accurata, rispettando gli spazi e l’ordine dei diversi parametri, in modo da fornire un documento “leggibile” dal software. In Figura 43 è mostrata l’impostazione dei parametri iniziali delle sorgenti, essi sono, in ordine: titolo descrittivo del file; tipologia di coordinate geografiche utilizzate (UTM); zona in cui ricade il dominio spaziale (32N); modello di coordinate geografiche geodetico utilizzato (WGS-84), unità di misura del dominio spaziale (km), tempo coordinato universale in cui ricade il dominio spaziale (UTC+0100); data di inizio e fine della simulazione (il mese di Gennaio 2010 in questo caso); numero delle sorgenti emissive (6); numero delle specie inquinanti (1); specie inquinante (NOx); peso molecolare della specie inquinante (46); descrizione delle sorgenti con sigla, coordinata x, coordinata y, altezza geometrica, larghezza del diametro, elevazione sul livello del mare, building downwash, fattore del momento verticale e una variabile nulla di completamento.

```

Emissioni puntuali centrali termoelettriche di Torino_Gennaio 2010_g/s
UTM
  32N
WGS-84  26-11-2019
  KM
UTC+0100
2010  1  1  0000  2010  31  23  0000
  6  1
'NOX'
  46.000
'GT2'  395.65272 4983.22857 60.000  7.500  226.00  0.00  1.00  0.00
'GT3'  395.73612 4983.26635 60.000  7.000  226.00  0.00  1.00  0.00
'TN1'  390.95042 4995.65577 60.000  6.000  270.00  0.00  1.00  0.00
'TN2'  390.97580 4995.57170 60.000  1.800  270.00  0.00  1.00  0.00
'BIT'  395.37847 4985.74622 43.000  1.800  226.00  0.00  1.00  0.00
'POLI' 394.27549 4990.84494 50.000  1.800  250.00  0.00  1.00  0.00

```

Figura 43 – Impostazione generale dei dati di input per il file "sorgenti puntuali" (PTEMARB.DAT)

Successivamente, sono state fornite le informazioni relative alle emissioni su scala oraria per ciascuna sorgente puntuale. Per poter far questo è stato necessario dapprima impostare una riga in cui sono descritte anno, giorno, ora e secondi di inizio e fine (essendo le informazioni orarie la riga in questione cambierà di volta in volta per tutte le ore del mese di Gennaio); poi

convertire la temperatura dei fumi da gradi Celsius a gradi Kelvin; successivamente calcolare la velocità di emissione su scala oraria per ogni sorgente, impostando come velocità minima 5 m/s per le caldaie e 10 m/s per i cicli combinati e correggendo questo valore laddove necessario; impostare σ_y (nullo) e σ_z (calcolato, come consigliato dall'EPA, come l'altezza della sorgente divisa per 2,15); e infine impostare il valore di portata oraria emessa (in grammi al secondo 'g/s') da ciascuna sorgente. In Figura 44 è mostrato il procedimento appena descritto, elencato in precedenza in modo da rispettare l'ordine corretto per il funzionamento del software. Va specificato che in Figura 44 è rappresentato solamente il primo "slot" relativo alla prima ora di simulazione; per questo lavoro di tesi, le simulazioni sono state impostate per tutto il mese di Gennaio (744 ore) sia per il 2010, sia per il 2015. Va inoltre precisato che, per le centrali di Torino Nord e di Moncalieri, il flusso emissivo fornito dagli SME è aggregato, ovvero comprensivo sia della quota dovuta alla produzione di energia elettrica sia della quota dovuta alla produzione di energia termica. Tale dato è stato utilizzato tal quale, poiché impossibile da disaggregare.

	2010	1	0	0	2010	1	0	3600
'GT2'	357.184000	10.0000000	0.0000000	0.0000000	27.9069767	1.7182940		
'GT3'	361.087000	10.0000000	0.0000000	0.0000000	27.9069767	6.3879321		
'TN1'	344.756000	18.6771273	0.0000000	0.0000000	27.9069767	3.1805256		
'TN2'	349.200000	9.0657188	0.0000000	0.0000000	27.9069767	0.0130338		
'BIT'	285.312000	5.0000000	0.0000000	0.0000000	20.0000000	0.0044788		
'POLI'	365.279000	5.0000000	0.0000000	0.0000000	23.2558140	0.0000184		

Figura 44 - "Pacchetto" delle emissioni su base oraria in cui sono descritti temperatura, velocità, σ_y , σ_z e portata per ciascuna sorgente emissiva puntuale.

Una volta impostato il "file sorgenti", si è passati al *file di controllo degli input* (CALPUFF.INP). In questo file sono presenti 18 gruppi di input necessari al software per capire come calcolare e gestire l'andamento dei diversi puff lungo tutta la durata della simulazione, ed elaborare i valori di concentrazione per ogni cella del dominio spaziale. Brevemente, i 18 gruppi racchiudono:

- Gruppo 0 – Nome del run;
- Gruppo 1 – File di Input e Output;
- Gruppo 2 – Opzioni tecniche;
- Gruppo 3 – Lista delle specie;
- Gruppo 4 – Parametri di controllo della griglia;
- Gruppo 5 – Opzioni di output;
- Gruppo 6 – Input per la sotto griglia di terreno complesso;

- Gruppo 7 – Parametri deposizione secca dei gas;
- Gruppo 8 – Parametri deposizione secca delle particelle;
- Gruppo 9 – Parametri deposizione secca aggiuntivi;
- Gruppo 10 – Parametri deposizione umida;
- Gruppo 11 – Parametri chimici;
- Gruppo 12 – Parametri di dispersione e computazionali;
- Gruppo 13 – Parametri sorgenti puntuali;
- Gruppo 14 – Parametri sorgenti areali;
- Gruppo 15 – Parametri sorgenti lineari;
- Gruppo 16 – Parametri sorgenti volumetriche;
- Gruppo 17 – Informazioni su ricettori discreti posti nel dominio spaziale.

Per impossibilità di trattare tutti i parametri presenti all'interno dei vari gruppi sopracitati, si è deciso di descrivere brevemente solo i fattori più importanti, ovvero quelli che determinano in maniera drastica il risultato finale.

Una volta scelto il titolo della simulazione, sono stati impostati i file di input generali necessari all'avvio della stessa, ovvero il file dei dati meteo (CALMET.DAT) e il file sorgenti visto precedentemente (PTEMARB.DAT). Successivamente sono stati impostati i parametri relativi alla durata, al modello di geoidi utilizzato e al tempo coordinato universale. Molto importante è stata la definizione dei parametri tecnici, quali il modello di dispersione dei puff (Gaussiano), il modello di calcolo del plume rise (Briggs), il metodo di calcolo dei parametri rappresentativi della turbolenza atmosferica, lo stack tip downwash, e il metodo di aggiustamento del terreno (MCTADJ=3). Quest'ultimo parametro risulta fondamentale per la determinazione dell'andamento della dispersione degli inquinanti in quanto stabilisce il metodo di "correzione" dell'interazione tra i puff e le pendenze del terreno. In un dominio spaziale con orografia complessa, come quello utilizzato nel presente studio, è opportuno utilizzare il corretto valore di questo parametro al fine di non commettere errori di valutazione; esso è stato scelto facendo riferimento ad articoli scientifici e procedure "verificate" consigliati dalle agenzie nazionali di protezione dell'ambiente [21]. Inoltre, per semplicità di calcolo e per la poca rilevanza che hanno rispetto alla dispersione degli ossidi di azoto sono state trascurate le deposizioni umide e secche. Sono state trascurate anche le trasformazioni chimiche che, seppur importanti, avrebbero complicato il calcolo e l'interpretazione dei risultati, nonché fatto perdere di vista l'obiettivo principale di questo studio. Successivamente, è stata modellata la specie chimica oggetto di studio (NO_x) attraverso i suoi parametri chimico-fisici, ed è stato impostato il

dominio spaziale e la griglia computazionale (definiti come precedentemente descritto nel paragrafo 4.1). Infine sono stati impostati i parametri relativi alle sorgenti emissive puntuali, quali numero, file di riferimento e unità di misura. Per poter ottenere un'elaborazione corretta della simulazione sono stati seguiti i metodi indicati dall'EPA e dall'NSW e i relativi consigli per la tipologia di simulazione in esame [22][23][24].

L'output ottenuto della simulazione è un file (CALPUFF.CON) contenente i valori di concentrazione dei diversi puff nelle diverse zone del dominio di interesse. Per poter leggere questi valori è necessario l'utilizzo del post-processore CALPOST che, come visto nel paragrafo 3.3.3, è in grado di calcolare la media e riportare i risultati della concentrazione di inquinante in corrispondenza dei ricettori. L'utilizzo del post-processore passa, anche qui, attraverso la redazione di un file di controllo degli input (CALPOST.INP). Esso è molto semplice e non merita l'analisi in dettaglio dei diversi parametri dato che essi riprendono gli stessi valori utilizzati nel file di controllo degli input precedentemente utilizzato (CALPUFF.INP). Va sottolineata, invece, l'attenzione con cui questi parametri vengono riportati poiché, se non congruenti tra loro (soprattutto nelle unità di misura dei valori di concentrazione), possono portare ad un errore nel risultato oppure, in maniera peggiore, ad una lettura sbagliata dei risultati ottenuti.

Gli output del post processore non sono altro che le *"time-series"* dei valori di concentrazione. L'intervallo di tempo per le time-series è scelto nel file di controllo degli input del post-processore; nello studio in questione sono stati scelti i valori orari e i valori giornalieri. Questi file di testo racchiudono tutti i valori di concentrazione al suolo dell'inquinante simulato per ogni ricettore (in questo caso ogni cella di tutta la griglia del dominio di calcolo). Per poter effettivamente visualizzare i valori di concentrazione si necessita di un file griglia (.GRD) e di un software in grado di leggerlo e rappresentarlo. In questo studio è stato utilizzato il software *SURFER 9* che ha permesso sia la conversione dei file di testo in "file griglia", sia la visualizzazione dei risultati. Tra le diverse funzionalità di SURFER 9, esistono strumenti in grado di variare la scala dei colori e strumenti che permettono l'inserimento di carte tecniche regionali (CTR). Difatti, per una corretta visualizzazione ed interpretazione dei risultati è necessaria una corretta rappresentazione di essi. In particolare, è importante georeferenziare le mappe di concentrazione e rendere chiaro l'andamento della dispersione e la differenza dei valori di concentrazione.

L'iter procedurale appena descritto è stato eseguito sia per il mese di Gennaio 2010 sia per il mese di Gennaio 2015, il tutto mantenendo invariate le sorgenti emissive e il loro contributo. Inoltre, escludendo deposizione secca e umida e trasformazioni chimiche, i valori di concentrazione al suolo saranno influenzati solamente dalla turbolenza atmosferica, ovvero sia quella meccanica (dipendente dall'andamento del vento) sia quella convettiva (dipendente dall'irraggiamento e dalla temperatura). La scelta di queste impostazioni è stata fatta, essendo sia Gennaio il mese con più richiesta termica, sia la differenza tra il 2010 e il 2015 marcata in termini meteorologici, in modo da evidenziare le differenze sulla dispersione degli NOx causate dalle diversità meteorologiche dei due mesi.

In Figura 45 e Figura 46 sono rappresentate le mappe di concentrazione degli NOx per il mese di Gennaio 2010. Si può notare come la dispersione degli NOx sia congruente con i risultati dell'analisi meteorologica effettuata nel paragrafo 4.2.1; difatti l'elevata stabilità atmosferica presente per la maggior parte del mese e i dati registrati per le diverse direzioni e frequenze dei venti, fanno sì che l'inquinante si ammassi principalmente sia nelle zone circostanti ai camini delle centrali termoelettriche sia sul versante della collina torinese. Dalla mappa 3D si nota in dettaglio come i puff non riescano a superare la "barriera" creata dal promontorio collinare.

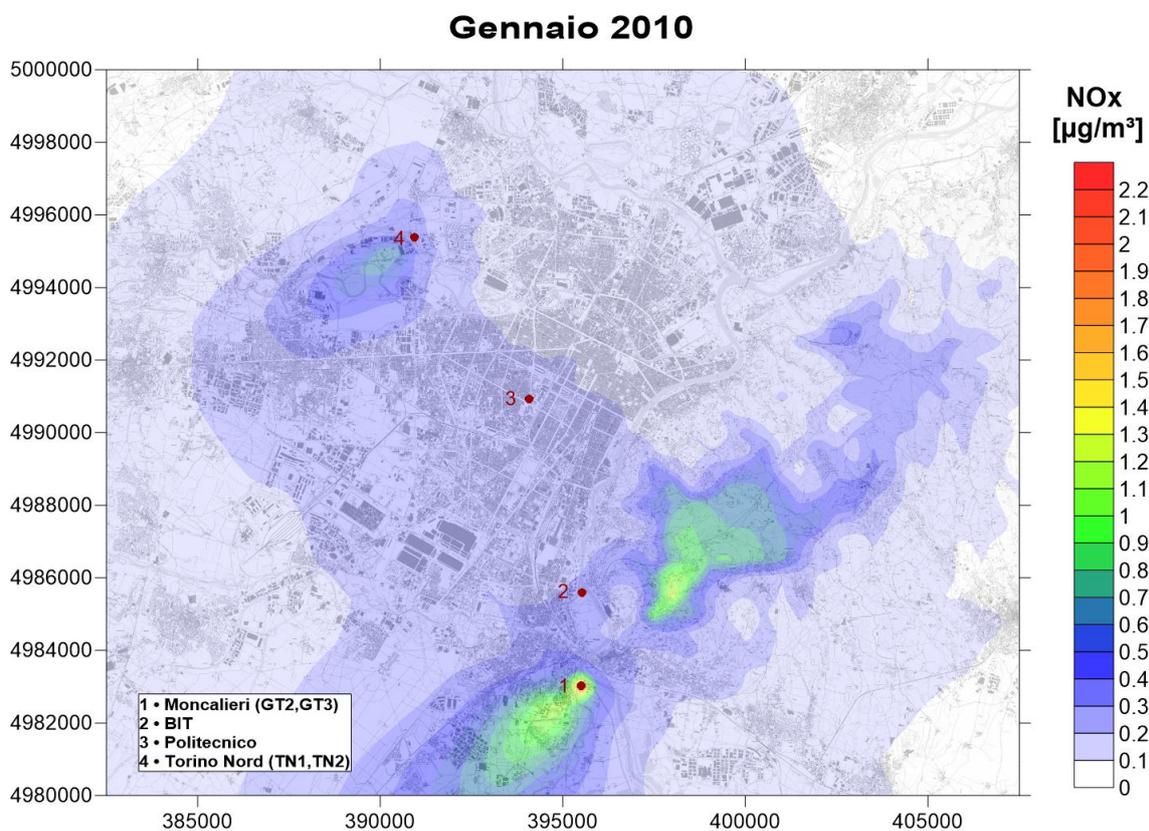


Figura 45 - Mappa di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2010. **Scenario:** Contributo delle centrali di produzione termoelettrica che alimentano la rete di teleriscaldamento.

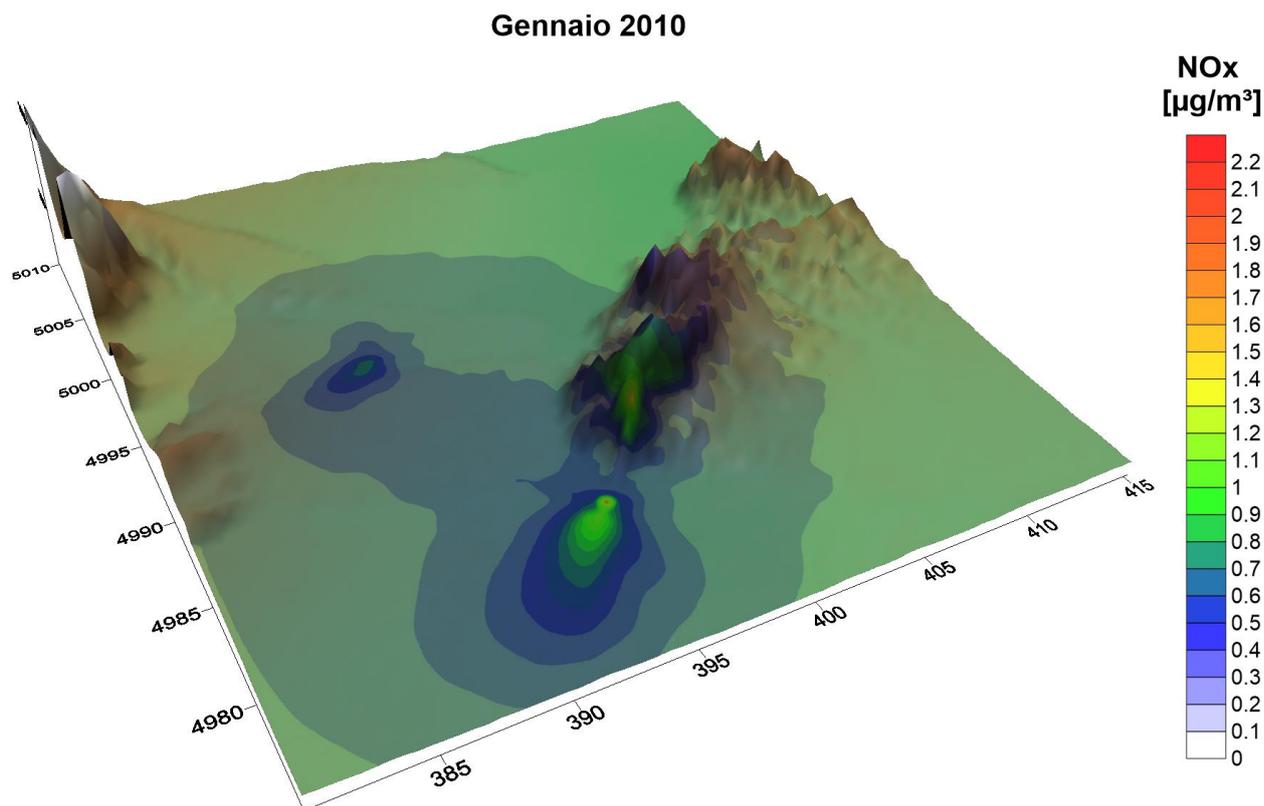


Figura 46 - Mappa 3D di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2010. Scenario: Contributo delle centrali di produzione termoelettrica che alimentano la rete di teleriscaldamento.

Invece, in Figura 47 e Figura 48 sono rappresentate le mappe di concentrazione degli NOx per il mese di Gennaio 2015. Differentemente dalla precedente situazione meteorologica dell'anno oggetto di studio, nel 2015 si sono avute diverse configurazioni meteorologiche che hanno portato ad instabilità e variazioni delle direzioni del vento. Infatti, come spiegato nel paragrafo 4.2.2, si sono presentati eventi meteorologici come l'anticiclone delle Azzorre e l'incursione di aria polare che hanno influenzato in maniera importante sia la temperatura sia le frequenze dei venti. Ciò ha portato ad una maggiore dispersione nelle zone vicino alle centrali termoelettriche, ma ad un forte accumulo nella zona del versante collinare con aumento anche del valore massimo di concentrazione. Dalla mappa 3D si può apprezzare come il valore massimo di concentrazione si abbia in prossimità del versante collinare e come, rispetto al Gennaio 2010, la dispersione sulla collina sia ben più estesa.

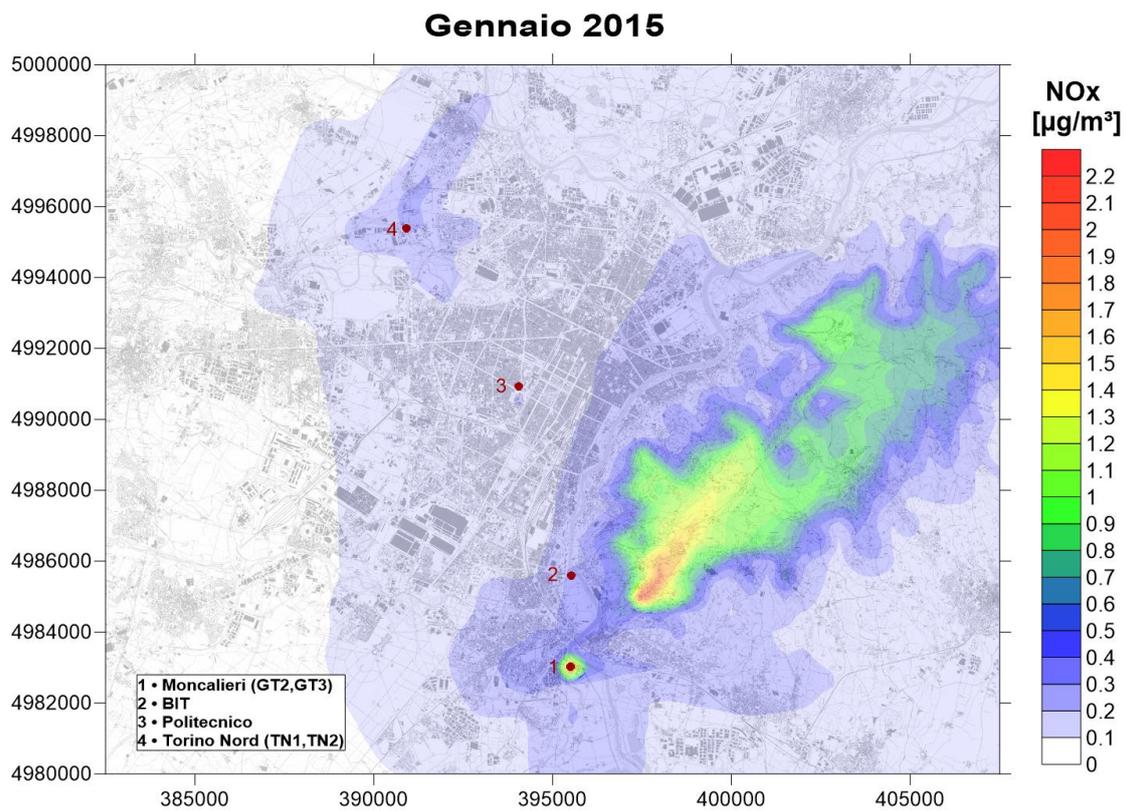


Figura 47 - Mappa di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2015. *Scenario:* Contributo delle centrali di produzione termoelettrica che alimentano la rete di teleriscaldamento.

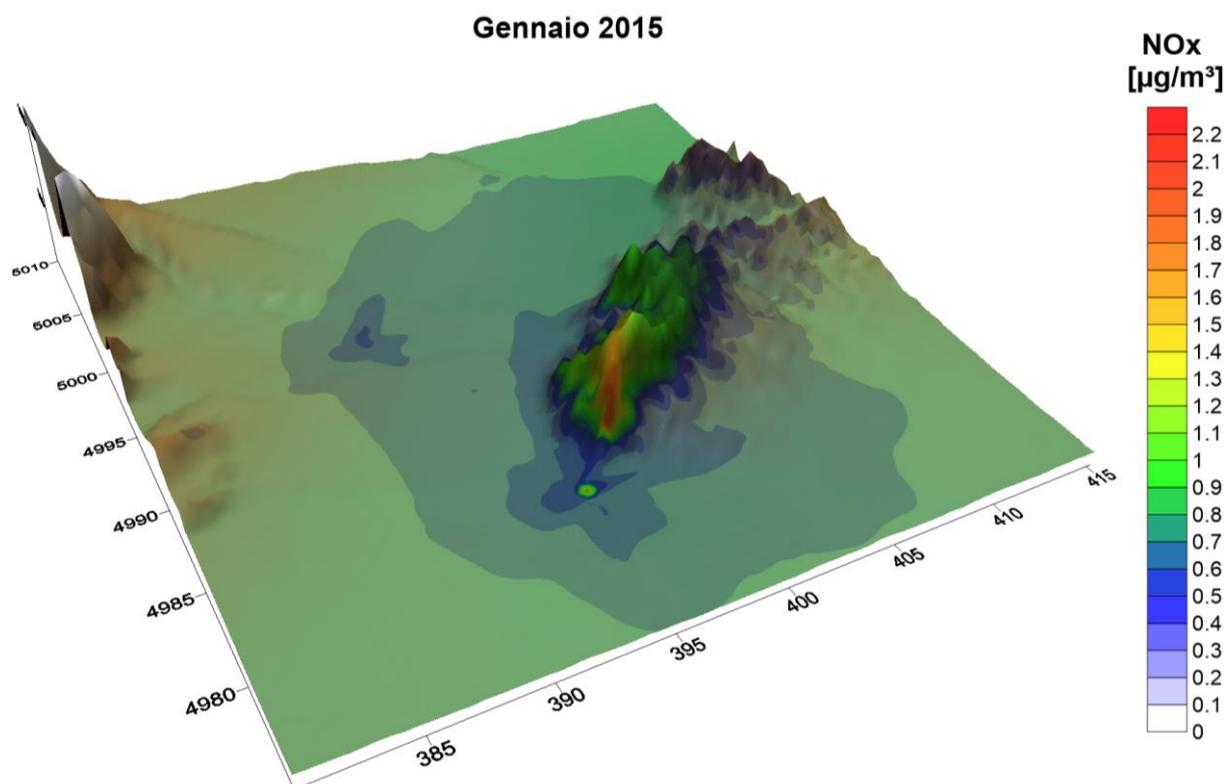


Figura 48 - Mappa 3D di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2015. *Scenario:* Contributo delle centrali di produzione termoelettrica che alimentano la rete di teleriscaldamento.

4.3.2 Emissioni da impianti termici residenziali

Il secondo scenario rappresenta la situazione in cui il fabbisogno termico richiesto dalla zona urbana di Torino sia interamente coperto dagli impianti termici residenziali. In questo scenario ipotetico il contributo termico fornito in realtà dalle centrali termoelettriche è stato incorporato come “emissione residenziale”, in modo da accentuare i valori di concentrazione in zona urbana ed evidenziare l’influenza che i parametri meteorologici possono avere su di essa.

Diversamente da quanto fatto prima, per ottenere i valori dei contributi emissivi residenziali, è stato necessario suddividere l’area urbana di Torino in 14 diverse zone. Le zone sono state suddivise basandosi sull’estensione della rete del teleriscaldamento di Torino (Figura 41); la ripartizione finale è mostrata in Figura 49.

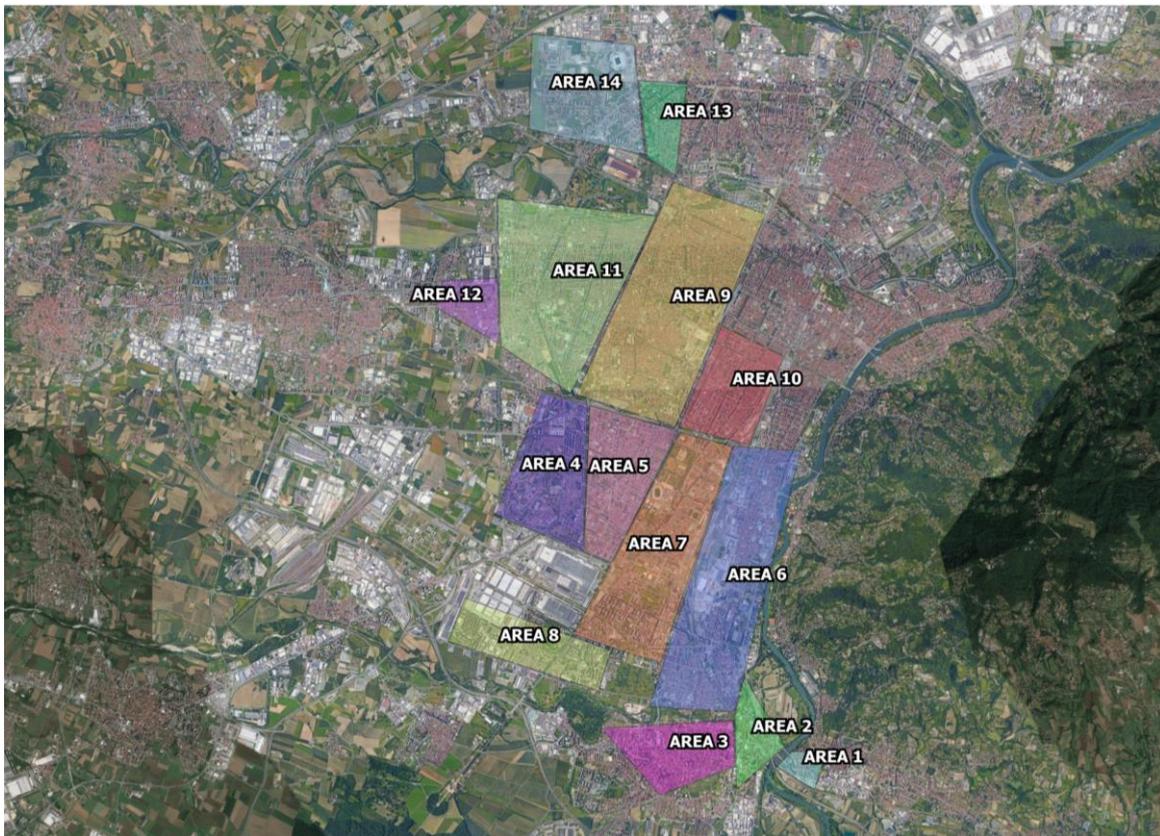


Figura 49 - Suddivisione delle zone utilizzate come sorgenti areali nel secondo scenario

Le caratteristiche delle sorgenti areali, quali le coordinate geografiche in UTM e le caratteristiche geometriche emissive, nonché il coefficiente di ripartizione emissiva per ogni zona, sono sintetizzati in Tabella 7 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Tabella 7 - Caratteristiche geometriche e geografiche e ripartizione delle emissioni per le diverse zone

Area	X	Y	Quota [m.s.l.m]	Altezza [m]	Ripartizione emissioni totali [%]
1 Moncalieri centro	395936,4118	4983907,392	237	25	0,80%
	396532,9566	4983881,389			
	396295,082	4983229,46			
	395681,8117	4983662,222			
2 Moncalieri Nord	394910,5778	4984521,484	227	25	1,98%
	395109,5925	4985225,795			
	395814,3002	4984003,033			
	395060,6545	4983451,976			
3 Nichelino	395012,8333	4983705,21	228	25	5,65%
	393628,4013	4983171,556			
	392607,2277	4984257,368			
	394868,1649	4984821,468			
4 Mirafiori Nord / Gerbido	391704,1037	4990190,89	256	25	4,77%
	392472,9075	4989959,754			
	392347,8987	4987479,729			
	390864,2933	4988171,882			
5 Santa Rita	392341,6483	4987473,482	252	25	7,39%
	392469,8892	4989963,369			
	394018,3837	4989491,845			
	392814,7442	4987206,837			
6 Lingotto / Nizza	395265,1889	4989181,699	233	25	11,97%
	396189,1641	4989148,352			
	394901,2115	4984420,478			
	393440,0708	4984841,723			
7 Borgo Filadelfia	395015,1883	4989020,937	241	25	10,05%
	393715,7018	4985503,62			
	392161,0781	4985991,573			
	394363,152	4989466,1			
8 Mirafiori Sud	392441,8416	4985044,366	247	25	5,30%
	389929,4629	4985902,693			
	390367,6573	4986702,974			
	392767,9742	4985808,137			
9 San Donato / Cenisia / Borgo San Paolo	393959,9678	4993762,894	253	25	20,78%
	395622,1512	4993206,686			
	393701,3658	4989714,064			
	392251,9236	4990350,69			
10 Crocetta / Poli	393723,5938	4989647,77	246	25	8,12%
	394649,102	4991385,306			
	395869,3225	4990759,701			
	395161,8164	4989260,837			
11 Parella	390975,476	4993434,786	267	25	14,96%
	393690,3573	4993214,605			
	392225,8394	4990368,855			
	390982,4085	4991248,159			
12 Pozzo Strada	390975,476	4992148,739	277	25	1,71%
	390982,4085	4991100,348			
	390029,6959	4991741,663			
	390255,5568	4992146,284			
13 Madonna di Campagna	394024,1779	4994047,827	253	25	1,91%
	393596,0679	4994262,477			
	393514,7298	4995623,307			
	394214,9591	4995527,7			
14 Torino Nord / Continassa	393427,7823	4996245,239	262	25	4,62%
	393612,9464	4994275,777			
	391586,9652	4994843,746			
	391660,1002	4996448,722			

Successivamente, per poter ripartire l'emissione sulle diverse aree è stato necessario calcolare il valore totale emissivo annuale nella zona urbana di Torino. Il risultato è stato ottenuto utilizzando la seguente equazione:

$$E_{TOT} = V_{TLR} \cdot f_{termico} \cdot f_{NOx} \quad [4.4]$$

dove i simboli e i valori utilizzati sono scritti in Tabella 8:

Tabella 8 - Dati per il calcolo delle emissioni totali del 2010 nella zona urbana di Torino

Dati_2010	u.d.m	Simbolo	Descrizione	Fonte
59765339	m ³	V _{TLR}	Volumetria totale allacciata TLR	Iren
186	kWh/m ³	f _{termico}	Fabbisogno termico anno 2010	Modello "Fracastoro, Mutani, Verda"
80	g/MWh	f _{NOx}	Fattore di emissione NOx	D.G.R. Piemonte 4 Agosto, n. 46-11968, Allegato 1

La [4.4] descrive il calcolo dell'emissione totale annuale (in questo caso il 2010) considerando il prodotto tra: la volumetria allacciata del TLR (scelta congrua con le ipotesi fatte per lo scenario "Emissioni da impianti termici residenziali"), il fabbisogno termico richiesto per metro cubo (facendo riferimento alle analisi fatte nello studio "Analisi del fabbisogno di energia per gli edifici residenziali e della potenzialità di risparmio energetico e delle fonti rinnovabili in ambito urbano") e il fattore di emissione degli NOx (rifacendosi al D.G.R. Piemonte 4 Agosto n. 46-11968) [25][26].

Come detto, il calcolo qui riportato è relativo all'anno 2010, poiché per il 2015 si è avuto un approccio diverso che verrà riportato successivamente. Inoltre, una volta ottenuto il valore delle emissioni totali e moltiplicato tale valore per la percentuale di ripartizione per zona, è stato suddiviso ulteriormente il contributo emissivo per zona (che possiamo etichettare come "emissione areale") in mensile, giornaliero e orario. Ciò è stato fatto tenendo conto della diversa richiesta relativa appunto alla stagione, alla tipologia di giornata (calda o fredda) e all'ora del giorno. La ripartizione appena descritta è stata eseguita tramite i valori percentuale riportati in Tabella 9. Ovviamente la ripartizione, dal punto di vista mensile, ha tenuto in considerazione solamente Gennaio, essendo l'unico mese oggetto di studio.

Tabella 9 – Ripartizione mensile, giornaliera e oraria delle “emissioni areali”

Mese		Giorno		Ora	
Gennaio	9,62%	Lunedì	15,62%	1	3,45%
				2	3,31%
Febbraio	9,16%	Martedì	15,62%	3	3,26%
				4	3,25%
Marzo	8,57%	Mercoledì	15,62%	5	3,27%
				6	3,39%
Aprile	7,87%	Giovedì	15,62%	7	3,90%
				8	4,55%
Maggio	7,55%	Venerdì	15,62%	9	4,72%
				10	4,72%
Giugno	7,29%	Sabato	10,94%	11	4,71%
				12	4,62%
Luglio	7,23%	Domenica	10,94%	13	4,52%
				14	4,60%
Agosto	7,38%	Lunedì	15,62%	15	4,62%
				16	4,64%
Settembre	7,95%	Martedì	15,62%	17	4,64%
				18	4,60%
Ottobre	8,67%	Mercoledì	15,62%	19	4,57%
				20	4,48%
Novembre	9,13%	Giovedì	15,62%	21	4,37%
				22	4,18%
Dicembre	9,58%	Venerdì	15,62%	23	3,98%
				24	3,65%

Per il 2015 si è proceduto diversamente, basandosi sui dati sui consumi energetici forniti dall’ISPRA. Inizialmente, non si avevano dati validi per il fabbisogno termico al metro cubo del 2015, per questo motivo si è deciso di utilizzare la guida ISPRA sui *Gradi Giorno di riscaldamento (HDD – Heating Degree Days)*. I gradi-giorno di riscaldamento sono un’indicatore che identifica la richiesta energetica termica per il riscaldamento delle abitazioni in una determinata zona ed in un determinato periodo. Essi si calcolano, come esplicitato nella [4.5], sommando cumulativamente la sola differenza positiva tra la temperatura interna di base (T_{rif}) e la temperatura media esterna (T_m).

$$HDD = \sum (T_{rif} - T_m) \quad [4.5]$$

Il territorio nazionale italiano è suddiviso in sei zone climatiche in funzione dei gradi-giorno, ma per semplicità di calcolo esse sono state accorpate in solo tre zone, B, D ed E. La suddivisione in queste tre zone è necessaria per poter comprendere i diversi valori dei gradi-giorno per zona e quindi la diversa richiesta termica in tutta la penisola. Il dominio spaziale

oggetto di studio, ovvero il comune di Torino, tra le zone stilate da ISPRA rientra nella zona E [27].

Al fine di calcolare il fabbisogno termico del 2015 sono stati, dapprima, calcolati gli HDD sia per il 2010 sia per il 2015. La variazione degli HDD mostrata in Figura 50 denota come, sia per il 2010 che per il 2015, essi siano strettamente collegati alla temperatura esterna e quindi alla richiesta che ogni utente fa per il riscaldamento della propria abitazione; difatti a temperature esterne basse, si alza il valore degli HDD poiché c'è maggiore richiesta di calore per il riscaldamento, a temperature alte invece succede praticamente l'opposto.

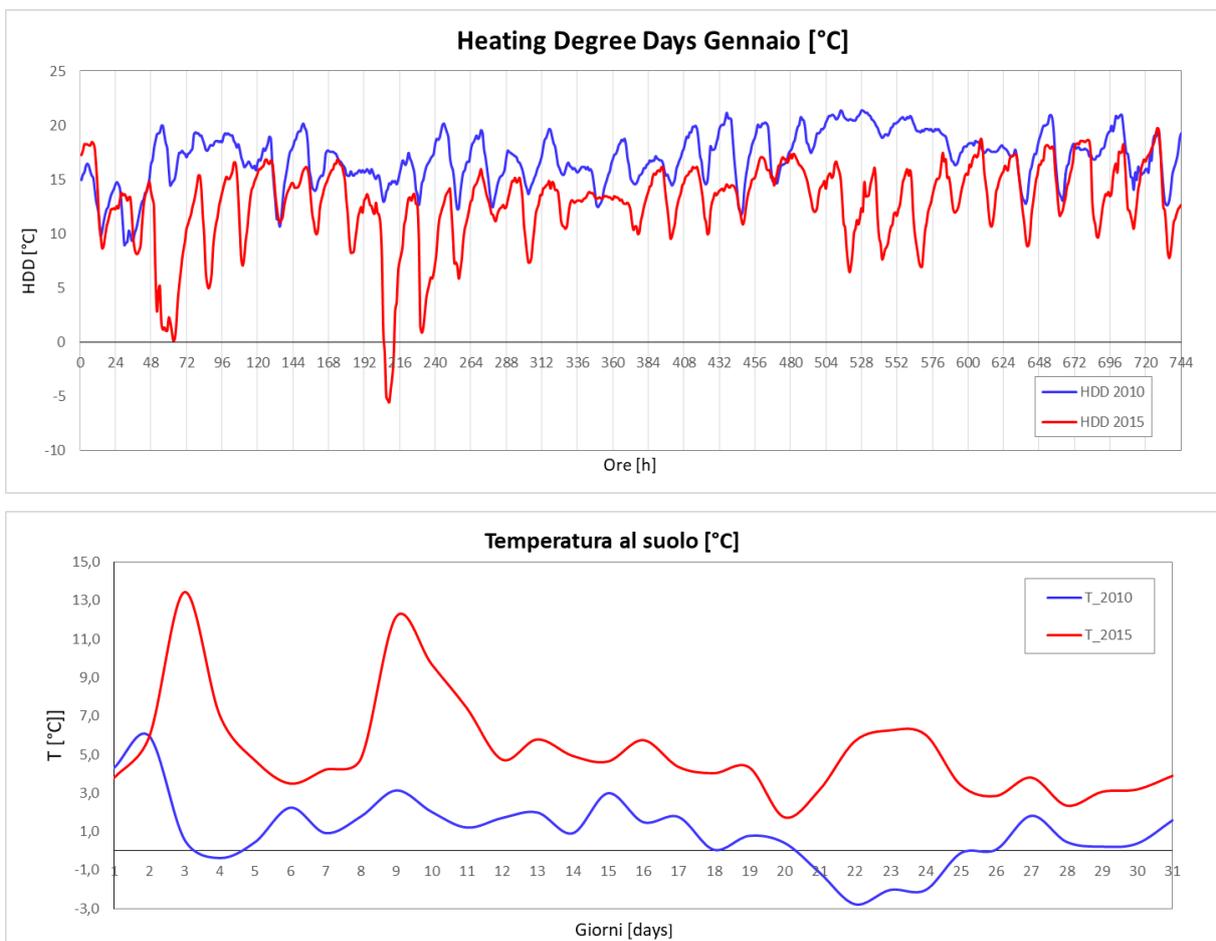


Figura 50 - HDD nella zona urbana di Torino per il mese di Gennaio (sia 2010 che 2015) relazionati al valore di temperatura esterna

La differenza in termini di HDD per i due mesi è molto evidente, essendo i due anni particolarmente diversi dal punto di vista delle temperature. Questa differenza, in termini percentuali, risulta essere del 10,36% se si considera il paragone annuale, invece è del 32,71% se si valuta solo il paragone tra i due mesi di Gennaio. Per ottenere un valore più accurato, è stata scelta come differenza percentuale quella relativa alla comparazione annuale.

Partendo dal valore sopracitato, essendo esso appunto collegato al fabbisogno termico, si è ridotto il valore della richiesta termica al metro cubo, avuto nel 2010, esattamente della differenza percentuale calcolata annualmente tra i gradi-giorno del 2010 e i gradi-giorno del 2015. Si è così ottenuto un valore pari a circa 167 kWh/m³. Successivamente si è utilizzato questo valore per poter calcolare il contributo emissivo totale con la stessa relazione utilizzata precedentemente, ovvero la [4.4]. In Tabella 10 sono sintetizzati i parametri utilizzati per il calcolo del contributo emissivo totale annuale del 2015.

Tabella 10 - Dati per il calcolo delle emissioni totali del 2015 nella zona urbana di Torino

Dati_2015	Simbolo	u.d.m	Descrizione	Fonte
59765339	V _{TLR}	m ³	Volumetria totale allacciata	Iren
166,72	f _{termico}	kWh/m ³	fabbisogno energetico anno 2015	Valore ottenuto con la differenza percentuale tra gli HDD
80	f _{NOx}	g/MWh	fattore di emissione NOx	D.G.R. Piemonte 4 Agosto, n. 46-11968, Allegato 1

Una volta ottenuto il contributo emissivo totale, è stata nuovamente calcolata l'“emissione areale”, come precedentemente definita, seguendo lo stesso identico iter e utilizzando gli stessi coefficienti di ripartizione mensile, giornaliera e oraria, mostrati in Tabella 9.

Una volta ottenuti i contributi emissivi areali per i mesi di Gennaio 2010 e Gennaio 2015 è stato ripetuto l'iter procedurale spiegato per lo scenario precedente. Esso comprende la costruzione degli stessi identici file necessari per lo scenario precedente, ovvero un file sorgente, un file di controllo degli input di CALPUFF, un file di controllo degli input di CALPOST ed un'elaborazione delle time-series ottenute in modo da poter visualizzare su una mappa le concentrazioni al suolo; con l'unica differenza che consiste nel file sorgenti iniziale. Difatti, in questo nuovo scenario, si è scelto di impostare le sorgenti come se fossero aree emissive. Questa impostazione di CALPUFF è utile per simulare un'emissione comprensiva di tutti gli impianti termici residenziali delle zone considerate, essendo impossibile schematizzare e simulare l'emissione da ogni singolo impianto termico.

Per modellare le *sorgenti areali*, anche nel file *BAEMARB.DAT*, come per il file *PTEMARB.DAT*, è necessario impostare in ordine le caratteristiche generali. In Figura 51 è mostrata l'impostazione dei parametri iniziali delle sorgenti, essi sono in ordine: titolo descrittivo del file; tipologia di coordinate geografiche utilizzate (UTM); zona in cui ricade il

dominio spaziale (32N); modello di coordinate geografiche geodetico utilizzato (WGS-84), unità di misura del dominio spaziale (km), tempo coordinato universale in cui ricade il dominio spaziale (UTC+0100); data di inizio e fine della simulazione (il mese di Gennaio 2010 in questo caso); numero delle sorgenti emissive areali (14); numero delle specie inquinanti (1); specie inquinante (NOx); peso molecolare della specie inquinante (46); descrizione delle sorgenti con sigla, unità di misura delle emissioni (g/s) e due variabile nulle di completamento.

BAEMARB.DAT	2.1	Comments
2		
Prepared by Corrado		
Sorgenti areali run_Gennaio_2010_g/s		
UTM		
32N		
WGS-84	01-02-2020	
KM		
UTC+0100		
2010	1 1 0000	2010 31 22 0000
14	1	
'NOX'		
.....	46.0000	
'Area 1'	'g/s'	0.0 0.0
'Area 2'	'g/s'	0.0 0.0
'Area 3'	'g/s'	0.0 0.0
'Area 4'	'g/s'	0.0 0.0
'Area 5'	'g/s'	0.0 0.0
'Area 6'	'g/s'	0.0 0.0
'Area 7'	'g/s'	0.0 0.0
'Area 8'	'g/s'	0.0 0.0
'Area 9'	'g/s'	0.0 0.0
'Area10'	'g/s'	0.0 0.0
'Area11'	'g/s'	0.0 0.0
'Area12'	'g/s'	0.0 0.0
'Area13'	'g/s'	0.0 0.0
'Area14'	'g/s'	0.0 0.0

Figura 51 - Impostazione generale dei dati di input per il file "sorgenti areali" (BAEMARB.DAT)

Successivamente, sono state fornite le informazioni relative alle emissioni su scala oraria per ciascuna sorgente areale. Per poter far questo è stato necessario dapprima impostare una riga in cui sono descritte anno, giorno, ora e secondi di inizio e fine (essendo le informazioni orarie la riga in questione cambierà di volta in volta per tutte le ore del mese di Gennaio); diversamente da quanto fatto per il file di sorgenti puntuali, nel caso areale la geolocalizzazione è fatta con 4 punti, quindi con coordinate x e y (in UTM) per ogni punto, poi si è passati alla conversione della temperatura dei fumi da gradi Celsius a gradi Kelvin; successivamente è stata impostata una velocità di emissione su scala oraria per gli impianti termici residenziali pari a 5 m/s, impostare una temperatura dei fumi di emissione pari a 80°C; inoltre è stato calcolato σ_z (come consigliato dall'EPA, come l'altezza della sorgente divisa per 2,15) ed è stato necessario

impostare un “raggio effettivo” utile per il calcolo del plume rise di ogni puff emesso dalla sorgente areale (in questo caso pari a 20m). Il calcolo di questo valore è stato fatto seguendo le indicazioni fornite da diversi articoli scientifici [24][28]. Infine è stato impostato il valore di portata oraria emessa (in grammi al secondo ‘g/s’) da ciascuna sorgente areale. In Figura 52 è mostrato il procedimento appena descritto, elencato in precedenza in modo da rispettare l’ordine corretto per il funzionamento del software. Va specificato che in Figura 52 è rappresentato solamente il primo “slot” relativo alla prima ora di simulazione e solo alla prima sorgente areale (Area 1) ; per questo lavoro di tesi, le simulazioni sono state impostate, anche in questo scenario, per tutte le 14 sorgenti areali, per tutto il mese di Gennaio (744 ore) sia per il 2010, sia per il 2015.

2010	1	1	0	2010	1	1	3600
'Area 1'	395.93641	396.53296	396.29508	395.68181			
	4983.90739	4983.88139	4983.22946	4983.66222	25.00000		
	237.00000	353.00000	5.00000	20.00000	11.62791		
	1.01722						

Figura 52 - "Pacchetto" delle emissioni su base oraria in cui sono descritti coordinate geografiche, altezza, elevazione, temperatura, velocità, diametro, σz e portata per ciascuna sorgente emissiva areale.

Successivamente, anche per questo secondo scenario sono stati impostati i file fondamentali per l’avvio di CALPUFF e di CALPOST, in modo da ottenere le time-series delle concentrazioni. Dai valori di concentrazione si è passato poi al plotting tramite SURFER 9 e quindi alla visualizzazione delle mappe di concentrazione al suolo. L’iter procedurale appena descritto è stato eseguito sia per il mese di Gennaio 2010 sia per il mese di Gennaio 2015, il tutto considerando che tra i due anni sono cambiati i contributi emissivi delle sorgenti areali. Inoltre, anche per questo secondo scenario, sono stati escluse la deposizione secca e umida e le trasformazioni chimiche; per questo motivo i valori di concentrazione al suolo saranno influenzati solamente dalla turbolenza atmosferica, ovvero sia quella meccanica (dipendente dall’andamento del vento) sia quella convettiva (dipendente dall’irraggiamento e dalla temperatura). La scelta di queste impostazioni è stata fatta seguendo gli stessi criteri utilizzati per il precedente scenario.

In Figura 53 e Figura 54 e sono rappresentate le mappe di concentrazione degli NOx per il mese di Gennaio 2010. Anche per questo scenario, si nota come la dispersione degli NOx sia congruente con i risultati dell’analisi meteorologica effettuata nel paragrafo 4.2.1; difatti l’elevata stabilità atmosferica presente per la maggior parte del mese e i dati registrati per le diverse direzioni e frequenze dei venti, fanno sì che l’inquinante si ammassi principalmente

nelle zone circostanti alle sorgenti areali, ciò spiega il perché la concentrazione sia elevata nel centro residenziale di Torino. Inoltre, diversamente da quanto detto per le centrali termoelettriche, l'ubicazione e la quota delle emissioni areali fa sì che il contaminante non riesca a raggiungere venti a quote alte in modo da essere disperso in maniera più efficace. Questo comporta appunto una veloce ricaduta degli ossidi di azoto al suolo ed un poco accumulo nella zona del versante collinare torinese. Dalla mappa 3D si nota in dettaglio come la stabilità atmosferica e la "barriera" creata dal promontorio collinare influenzino notevolmente l'accumulo di contaminante sul centro urbano di Torino, quasi a formare una "cappa" su di esso.

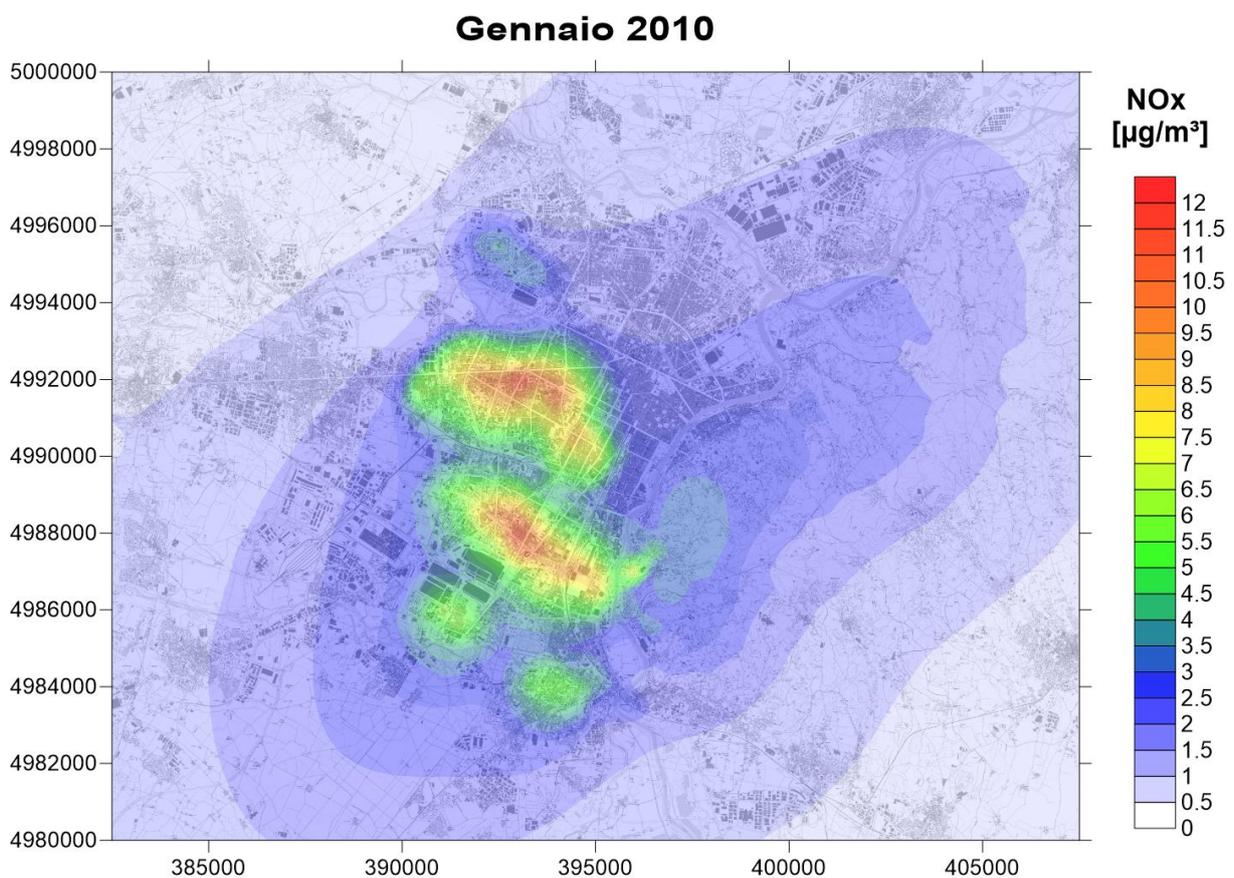


Figura 53 - Mappa di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2010. **Scenario:** Contributo degli impianti termici residenziali.

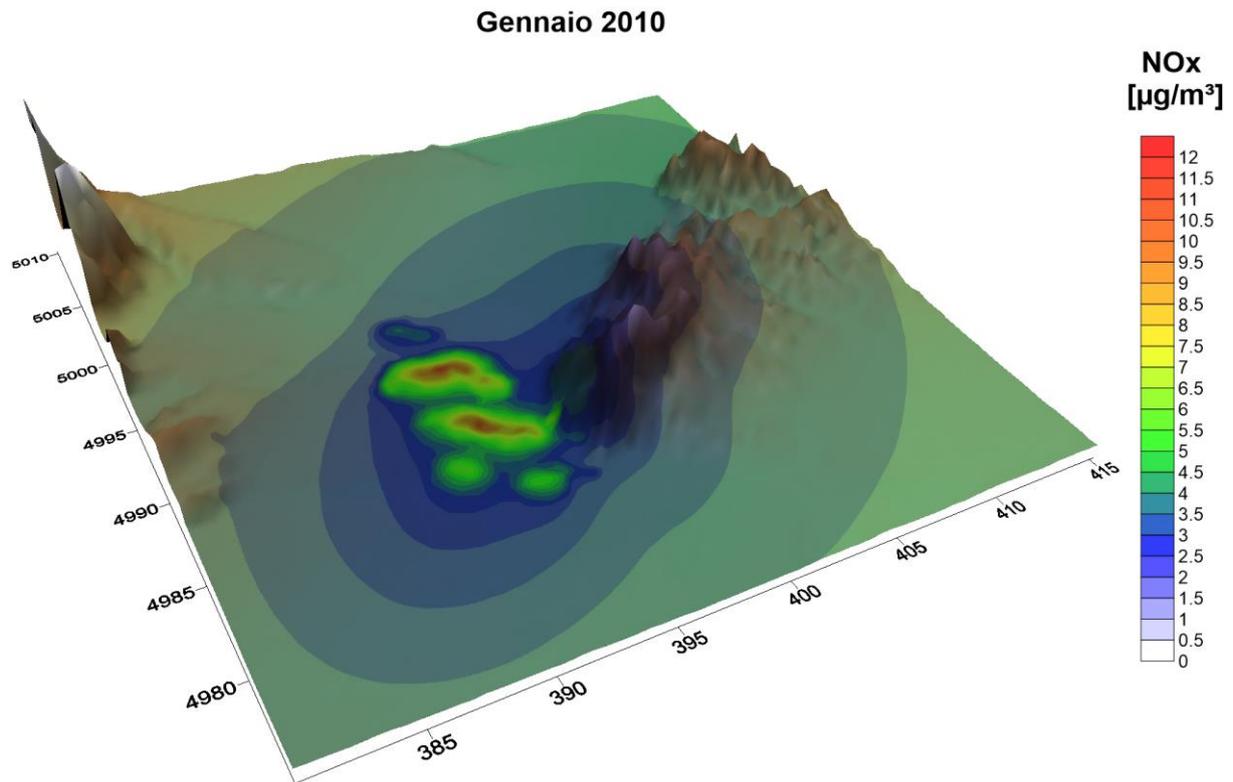


Figura 54 - Mappa 3D di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2010. Scenario: Contributo degli impianti termici residenziali.

Per quanto riguarda il mese di Gennaio 2015, in Figura 55 e Figura 56 sono rappresentate le mappe di concentrazione degli NOx ottenute come risultato. Come illustrato nel paragrafo 4.2.2, si sono avute diverse configurazioni meteorologiche che hanno portato ad instabilità e variazioni delle direzioni del vento. Difatti, si sono verificati eventi meteorologici, come già illustrato in precedenza, come l'anticiclone delle Azzorre e l'incursione di aria polare che hanno influenzato in maniera importante sia la temperatura sia le frequenze dei venti. Ciò ha fortemente influenzato le emissioni provenienti dalle sorgenti areali, provocando da un certo punto di vista un miglioramento alla situazione presente sul centro urbano di Torino, poiché la presenza di frequenti venti provenienti da Ovest ha disperso maggiormente l'inquinante sui versanti collinari, allungando il plume e abbassando i valori di concentrazione al suolo. Dalla mappa 3D si può apprezzare come, seppur il valore massimo di concentrazione resti in prossimità del centro urbano, esso sia più basso di circa $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ rispetto al Gennaio 2010. Inoltre è evidente come la dispersione sulla collina sia ben più estesa e tenda ad andare verso Nord-Est, concorde con la direzione e la frequenza dei venti.

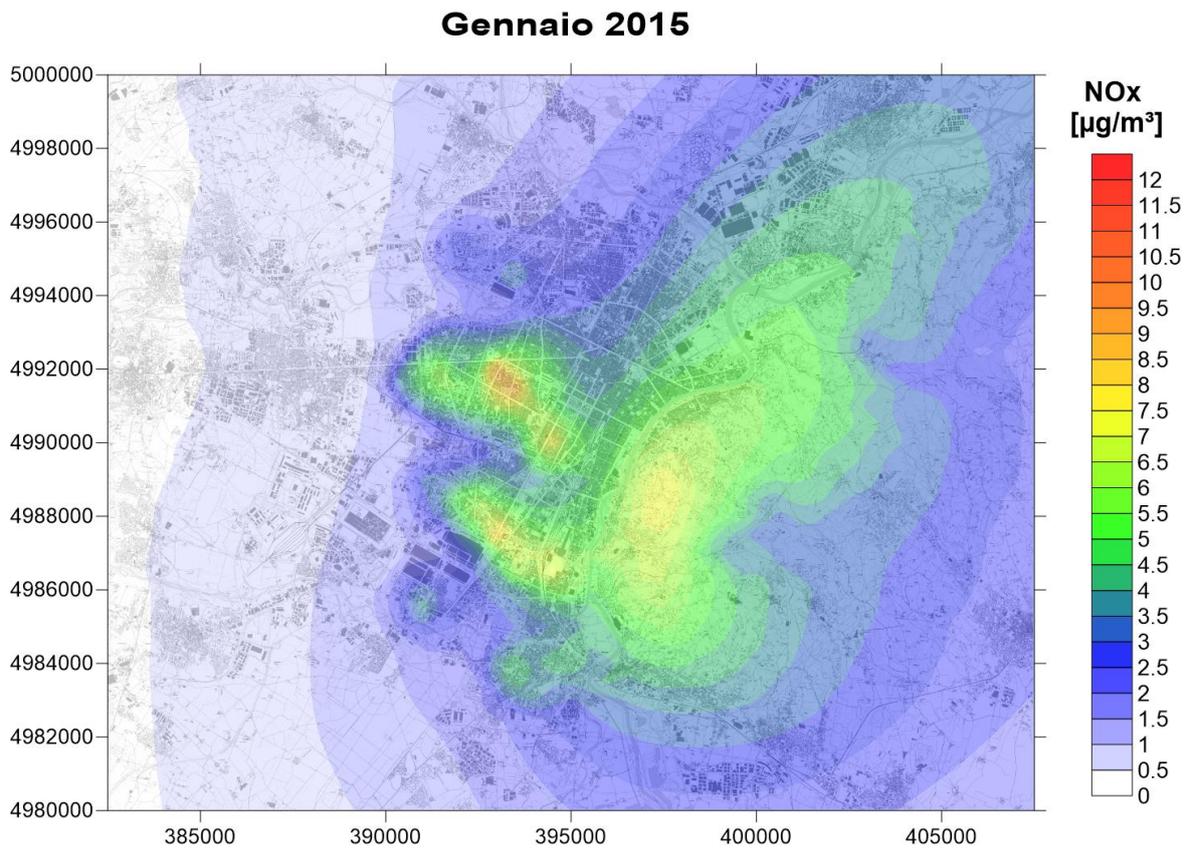


Figura 55 - Mappa di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2015. Scenario: Contributo degli impianti termici residenziali.

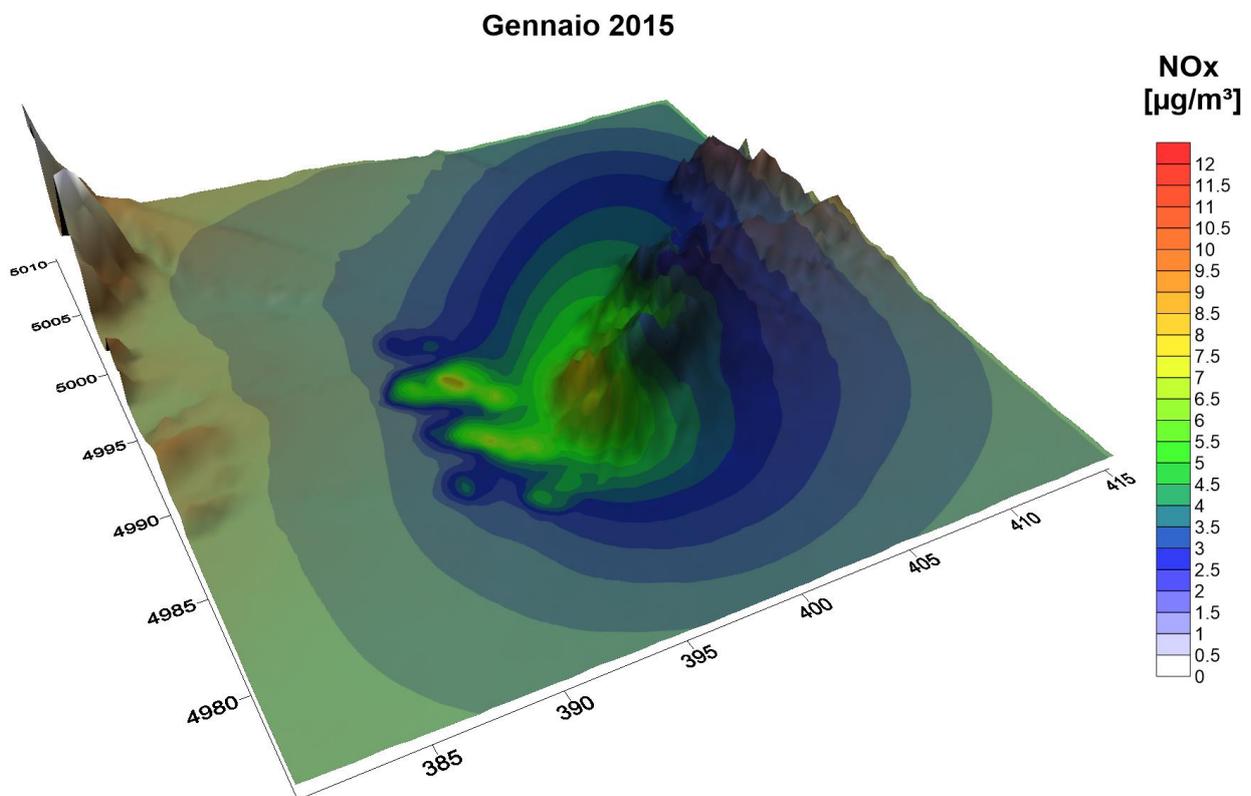


Figura 56 - Mappa 3D di concentrazione degli NOx, media delle medie orarie di Gennaio 2015. Scenario: Contributo degli impianti termici residenziali.

4.4 Presentazione dei risultati

Per poter completare il discorso relativo all'obiettivo del lavoro di tesi è necessario racchiudere in un paragrafo finale l'analisi e il confronto dei risultati ottenuti. Le simulazioni condotte hanno richiesto diverse applicazioni e preparazione di file necessari alla modellazione degli scenari prefissati come obiettivo finale. I risultati ottenuti sono, come visto nei precedenti paragrafi, delle mappe che permettono di visualizzare l'andamento spaziale delle concentrazioni, mediato sul tempo di durata della simulazioni, e tracciare le isoplete. Inoltre, le diverse configurazioni climatiche e la modellazione dei due diversi tipi di scenari oggetto di studio hanno permesso di analizzare e confrontare i risultati ottenuti sotto diversi punti di vista, al fine di capire in maniera più approfondita quali parametri ne influenzano maggiormente l'andamento.

Per poter valutare correttamente l'influenza dei parametri meteorologici e la variazione conseguenza della diversa tipologia di sorgenti è stato necessario affiancare le mappe di concentrazione ottenute per i due diversi scenari. In 4.2 Figura 57 e Figura 58 è mostrato rispettivamente l'andamento per lo scenario "Emissioni da centrali termoelettriche" e l'andamento per lo scenario "Emissioni da impianti termici residenziali". Si nota come i risultati ottenuti siano diversi sotto molti aspetti. Dapprima, il valore massimo di concentrazione risulta essere di diversi ordini di grandezza superiore nel secondo scenario. Questa enorme differenza è data principalmente dall'ubicazione geografica e dalla quota di emissione delle sorgenti; difatti le centrali termoelettriche sono poste in zone distanti dal centro e questo permette una maggiore esposizione ai venti che in zone rurali "sentono" meno l'effetto dell'Urban Boundary Layer. Inoltre la quota di emissione delle centrali, pari a 60 m dal piano campagna, rispetto alla quota di emissione degli impianti termici residenziali, pari a 25 m, permette una maggiore esposizione ai venti a quote maggiori che permettono un'elevata dispersione in atmosfera evitando la ricaduta veloce al suolo degli ossidi di azoto, cosa che invece capita per gli impianti termici residenziali. In aggiunta a queste considerazioni, si devono valutare, come fatto nel paragrafo 4.2, l'andamento dei parametri meteorologici. Difatti, oltre alla frequenza, la direzione e la velocità dei venti, oltre alla configurazione meteorologica, ci sono da chiarire le differenze relative alla turbolenza, che in questo caso risulta essere il principale attore nella dispersione degli NOx. Si nota come, paragonando la differenza tra la lunghezza di Monin-Obukhov per i due anni, e la relativa differenza di temperatura, nel 2010 non si ha praticamente una situazione poco turbolenta, in cui turbolenza meccanica e convettiva si eguagliano al suolo creando una situazione tendenzialmente stabile. Nel 2015, complice il "bel tempo" portato

dall'anticiclone delle Azzorre con conseguente maggior esposizione e quindi maggior irraggiamento, la temperatura dell'aria si è alzata di molti gradi Celsius, producendo turbolenza convettiva. Infatti per l'anno in questione, turbolenza termica e convettiva non si equivalgono spesso, anzi si alternano con “picchi” marcati; questo provoca quindi una forte miscelazione sia dal punto di vista verticale sia dal punto di vista orizzontale che si può assoggettare alla turbolenza convettiva, portata dai valori elevati di temperatura, e alla turbolenza meccanica, portata dai venti. Altro fattore importantissimo da considerare è la posizione della collina rispetto alle sorgenti emissive. Infatti per le centrali termoelettriche si nota che il promontorio collinare ha una maggiore influenza sulle centrali termoelettriche di Torino Nord e di Moncalieri (rispettivamente n°4 e n°1 nelle mappe), essendo esse rilevanti in termini di contributi emissivi rispetto al totale. In particolare, la centrale di Torino Nord è posta tra le colline del Po a Sud-Est e le Alpi a Nord-Ovest, ciò provoca una notevole stabilità nella valle e, come si può notare, una minore dispersione. Discorso diverso va fatto per la centrale di Moncalieri che, essendo fuori dalla valle, risulta maggiormente in balia dei venti, creando una forte dispersione orizzontale. Seppur maggiormente disperso, il contaminante però si accumula sui versanti collinari poiché la centrale è posizionata proprio a ridosso del Colle della Maddalena. Per quanto riguarda gli impianti termici residenziali invece, essendo posizionati anch'essi nella valle, seguono le stesse influenze che i parametri hanno sulla centrale di Torino Nord. È evidente che il numero e la posizione delle tante sorgenti emissive areali faccia sì che poche di esse ricadano nella stessa zona della centrale di Moncalieri; ma ciò influenza di poco il risultato. Questa posizione della collina rispetto alle sorgenti areali comporta un maggiore accumulo in prossimità dei punti emissivi e, solo nel 2015, un forte accumulo in prossimità del versante che si affaccia sul centro di Torino; il tutto causa della forte dispersione causata dalla meteorologia.

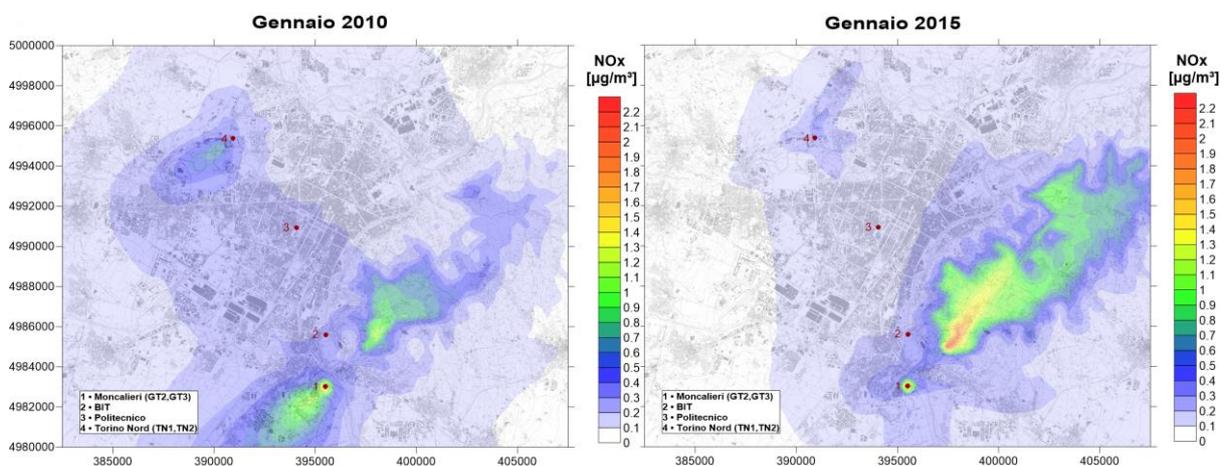


Figura 57 - Rappresentazione delle mappe di concentrazione ottenute per lo scenario “Emissioni da centrali termoelettriche”

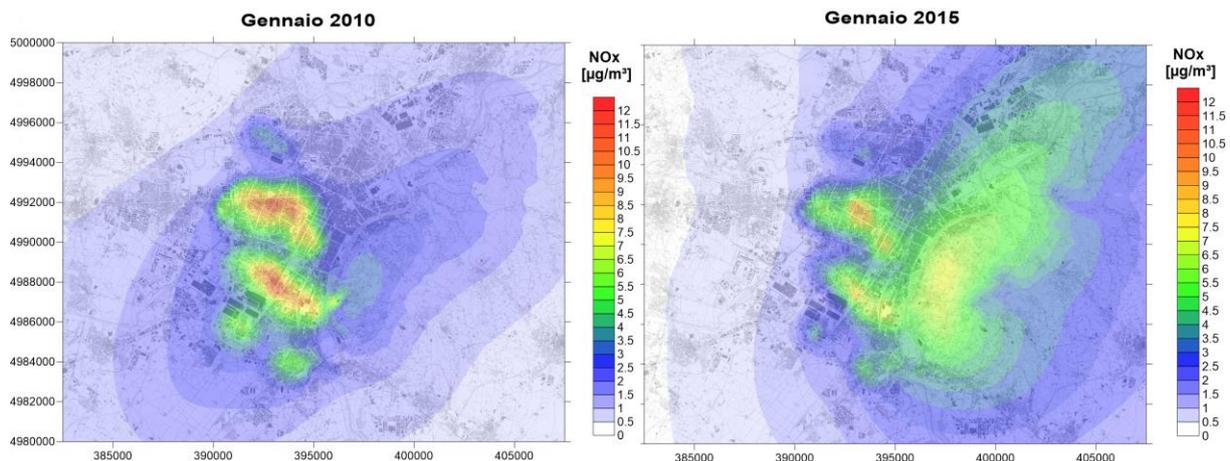


Figura 58 - Rappresentazione delle mappe di concentrazione ottenute per lo scenario “Emissioni da impianti termici residenziali”

Infine, al fine di permettere una maggiore comprensione di quanto descritto, sono mostrati su scala tridimensionale i risultati ottenuti. In figura e in figura sono rappresentati rispettivamente l’andamento per lo scenario “Emissioni da centrali termoelettriche” e l’andamento per lo scenario “Emissioni da impianti termici residenziali”.

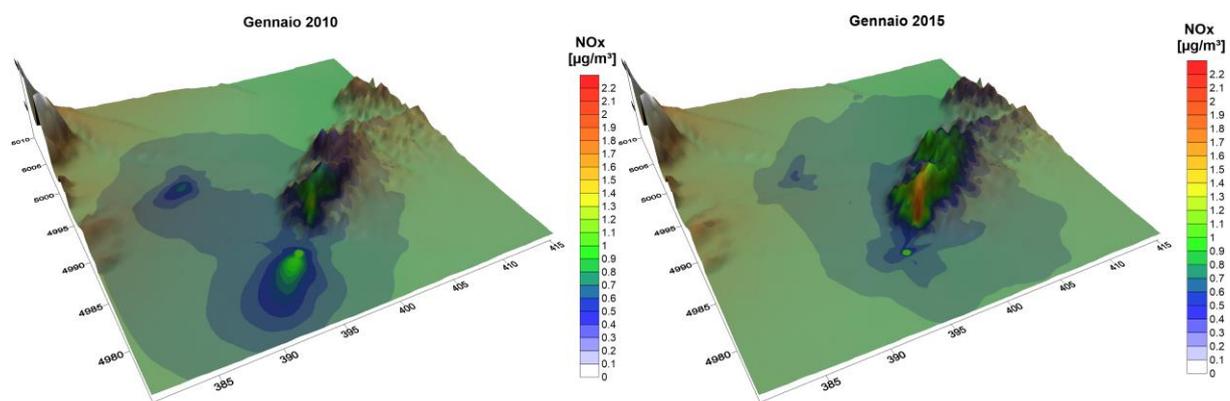


Figura 59 - Rappresentazione 3D delle mappe di concentrazione ottenute per lo scenario “Emissioni da centrali termoelettriche”

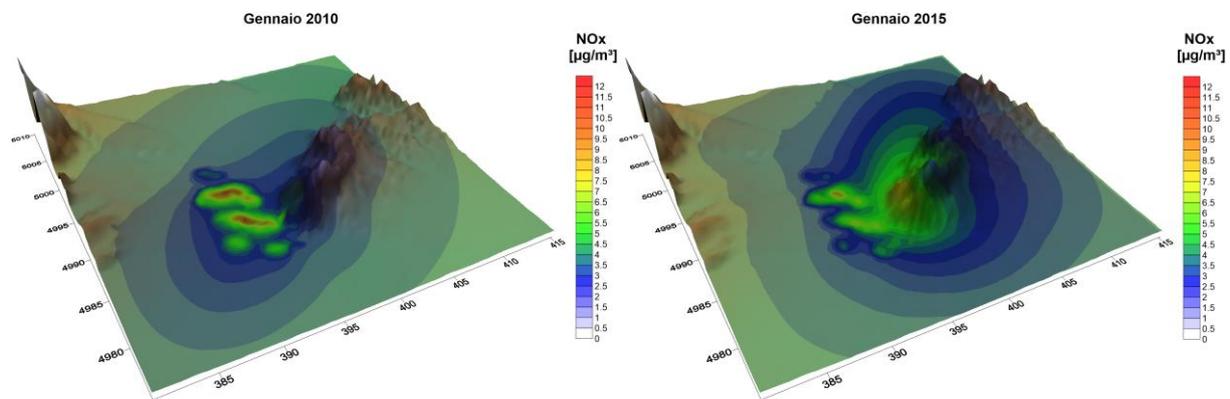


Figura 60 - Rappresentazione 3D delle mappe di concentrazione ottenute per lo scenario “Emissioni da impianti termici residenziali”

5. Conclusioni

L'obiettivo principale perseguito nel presente elaborato è stato quello di comprendere, in maniera analitica e descrittiva, come la variazione di diversi parametri meteorologici possa influenzare la dispersione degli inquinanti in atmosfera. In particolare è stato scelto, come caso studio, la situazione climatica ed emissiva della zona urbana di Torino; diversificata per anno di simulazione e scenario emissivo. Per il raggiungimento di tale obiettivo è stato utilizzato il modello di dispersione a sbuffo chiamato "CALPUFF". Questo software risulta molto utile per la sua capacità di gestire e i dati meteorologici e di lavorare in maniera corretta anche in presenza di calme di vento o di venti di debole intensità. Questa caratteristica, unita ad altre peculiarità del modello, quali la possibilità di modellare le diverse tipologie di fonti, di trattare sorgenti emissive non stazionarie e di calcolare dei campi di vento che tengano conto di orografie complesse, lo rendono uno strumento accurato per l'analisi dell'area torinese dominio di studio, caratterizzata da una variabilità orografica non trascurabile. Dai dati ottenuti con le simulazioni si è ricavato l'andamento spaziale delle medie annue di concentrazione all'interno della griglia di calcolo. I risultati ottenuti mostrano come i valori di concentrazione e la loro dispersione sono principalmente influenzati dalla posizione geografica, dalla direzione e velocità del vento e dal tasso di emissione. Altri parametri meteorologici come la stabilità atmosferica, la radiazione solare, la temperatura e l'altezza di miscelazione influenzano la dispersione, ma in misura minore rispetto ai parametri sopra citati. In definitiva, lo studio ha ottenuto dei risultati coerenti con i dati misurati dalle stazioni meteorologiche. Inoltre, tramite le mappe di concentrazione realizzate, è possibile visualizzare le differenze principali tra i due scenari ed analizzare come la diversa tipologia di sorgenti impatta sul centro urbano di Torino. Il risultato principale di questo lavoro di tesi è dato appunto da queste differenze. Si nota principalmente che la posizione delle centrali termoelettriche, rispetto agli impianti termici residenziali, fa sì che le emissioni, avvenendo a quote più elevate, risultino maggiormente disperse evitando quindi accumuli nel centro urbano. Questo denota come un sistema di teleriscaldamento possa idealmente ridurre in maniera importante i valori degli ossidi di azoto, e del particolato, in città. A questo si aggiunge che, la variazione della dispersione dell'inquinante ottenuta è stata anche conseguenza delle situazioni meteorologiche presenti, con forte influenza del fattore "vento" e modesta dipendenza dalla variazione di temperatura. C'è da aggiungere che, durante il processo di simulazione dei diversi scenari, si sono riscontrate parecchie difficoltà dovute all'impostazione del parametro "terrain adjustment method" e dell'"effective radius". Il primo parametro è relativo all'interazione dei puff con le diverse pendenze

che, essendo presenti in maniera decisa nella zona in questione, influenzano di molto il risultato finale; il secondo parametro è relativo al raggio da cui è emesso un generico puff che, nel caso delle centrali termoelettriche risulta essere il raggio del camino di emissione, mentre nel caso dell'emissione da impianti termici industriali ha portato notevoli difficoltà. Infatti, essendo questo parametro necessario per il calcolo del plume rise, la scelta nel caso di sorgenti areali con estensione ed emissioni diverse non è avvenuta in maniera deterministica; è stata necessaria un'analisi di sensitività svolta in maniera iterativa e determinata da qualche incertezza. In definitiva, per eventuali sviluppi futuri successivi a questo lavoro di tesi a queste simulazioni e scenari di base, si suggerisce l'approfondimento di tali parametri presenti all'interno del modello utilizzato, sviluppando anche un'analisi di sensitività, non solo descrittiva ma anche statistica, per gli stessi. Inoltre, per ottenere valori di concentrazione e traiettorie di dispersione degli ossidi di azoto, o di diversi inquinanti, si consiglia di approfondire l'influenza dei parametri e delle trasformazioni chimico-fisiche delle specie oggetto di studio, quali deposizioni e reazioni, in modo da poter analizzare e confrontare, in maniera integrata, i valori ottenuti con i valori registrati. Infine, per avere una controprova dell'andamento delle simulazioni modellistiche si consiglia anche l'utilizzo di modelli più avanzati rispetto a quello utilizzato, come ad esempio modelli di dispersione langrangiani, che risultano essere adatti per la simulazione di contaminanti particellari come il particolato prodotto dagli NOx.

Bibliografia

- [1] R. Sozzi *et al.*, *LA MICROMETEOROLOGIA E LA DISPERSIONE DEGLI INQUINANTI IN ARIA*. Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici, 2003.
- [2] E. Negri, G. Antonioni, and P. Morra, “Utilizzo del modello CALPUFF per la valutazione della Qualità dell’Aria da emissioni di un impianto di processo,” 2010.
- [3] M. Zanetti, D. Panepinto, and M. Ravina, “Studio degli impatti sulla qualità dell’aria del sistema di teleriscaldamento di Torino,” 2017.
- [4] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, *ATMOSPHERIC From Air Pollution to Climate Change SECOND EDITION*. 2006.
- [5] R. Hood, “Global Warming,” *A Companion to Appl. Ethics*, pp. 674–684, 2007,
- [6] D.lgs. 152/2006, “Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 ‘Norme in materia ambientale’, Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n. 96,” *Gazz. Uff.*, p. 172, 2006,
- [7] D.lgs. 155/2010, I. L. Presidente, and D. Repubblica, “Attuazione della direttiva 2008 / 50 / CE relativa alla qualità dell ’ aria ambiente e per un ’ aria più pulita in Europa .,” vol. 1, no. c, 2010.
- [8] World Health Organization (WHO), “Air quality guidelines,” *Rev. Epidemiol. Sante Publique*, vol. 51, no. 6, pp. 565–573, 2005.
- [9] F. Hugony, “Emissioni di NOx dai processi di combustione,” *Riv. dei Combust.*, vol. 63, no. 3, pp. 25–29, 2009.
- [10] S. Fuzzi *et al.*, “Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 15, no. 14, pp. 8217–8299, 2015, doi: 10.5194/acp-15-8217-2015.
- [11] S. Squizzato, P. B. Pavoni, and P. G. Rampazzo, “Polveri Sottili E Particolato Secondario Inorganico : Distribuzione Origine Nell ’ Area Veneziana,” 2011.
- [12] S. Fratianni, B. Cagnazzi, and R. Cremonini, *Il vento in Piemonte*. 2007.
- [13] Arpa Piemonte, “LO STATO DELL’AMBIENTE IN PIEMONTE,” 2013.
- [14] M. Sinesi, “I Modelli Di Riferimento Per La Diffusione in Atmosfera Degli Inquinanti : Cenni Teorici E Applicazioni Pratiche,” *Ispra*, 2004.
- [15] R. B. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [16] GHK and Bio Intelligence Service, “A Study to Examine the Costs and Benefits of the

- ELV Directive - Final Report,” no. May 2006, p. 190, 2006.
- [17] Arpa Piemonte, “Uno sguardo all’aria 2010,” 2011.
- [18] Arpa Piemonte, “Caratteristiche meteorologiche dell’anno 2010,” pp. 1–10, 2011.
- [19] Arpa Piemonte, “Caratteristiche meteorologiche del mese di Gennaio 2015,” 2016.
- [20] Arpa Piemonte, “Uno sguardo all’aria 2015,” 2016.
- [21] M. Rzeszutek, “Parameterization and evaluation of the CALMET/CALPUFF model system in near-field and complex terrain - Terrain data, grid resolution and terrain adjustment method,” *Sci. Total Environ.*, vol. 689, pp. 31–46, 2019,
- [22] “CALPUFF_Version6_UserInstructions,” .
- [23] J. Barclay and J. Scire, “Generic Guidance and Optimum Model Settings for the CALPUFF Modeling System for Inclusion into the ‘Approved Methods for the Modeling and Assessments of Air Pollutants in NSW, Australia,’” p. 69, 2011.
- [24] R. Macdonald, “Modelling Air Emissions for Compliance MME 474A Wind Engineering December 2003 THEORY AND OBJECTIVES OF AIR DISPERSION MODELLING,” *Model. Air Emiss. Compliance*, no. December, pp. 1–27, 2003.
- [25] G. V. Fracastoro, G. Mutani, and V. Verda, “Analisi del fabbisogno di energia per gli edifici residenziali e della potenzialità di risparmio energetico e delle fonti rinnovabili in ambito urbano,” 2013.
- [26] G. Regionale, “Aggiornamento del Piano regionale per il risanamento e la tutela della qualità dell ’ aria DISPOSIZIONI ATTUATIVE DELLA LEGGE REGIONALE 28 MAGGIO 2007 N . 13 (DISPOSIZIONI IN MATERIA DI RENDIMENTO ENERGETICO NELL ’ EDILIZIA) Articolo 21 , lettere a),” vol. 13, 2009.
- [27] ISPRA, “Consumi energetici e heating degree days (HDD) a confronto. Proiezioni al 2050 degli HDD in differenti scenari climatici,” 2017.
- [28] M. M. Carriere, “Appendix D,” *Know Nothings Louisiana*, pp. 162–163, 2018.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare i miei relatori, la Prof.ssa Mariachiara Zanetti, la Prof.ssa Deborah Panepinto e l'Ing. Marco Ravina per il contributo e la disponibilità offerta durante lo svolgimento di questo lavoro di tesi.

I ringraziamenti più importanti vanno ai miei genitori, a mia sorella, mio fratello e a tutta la mia famiglia; che, grazie al loro sostegno, al loro affetto e ai loro sacrifici, hanno reso possibile il raggiungimento di questo traguardo.

Un grazie di cuore va a tutti miei amici appartenenti al gruppo “WeLove”, persone indispensabili e insostituibili nella mia vita.

Un ringraziamento speciale va a Marta, per ciò che rappresenta per me e per avermi mostrato il mondo con una sensibilità fuori dal comune.

Un grazie particolare va a Roberto, compagno fondamentale in questi anni fatti di crescita e di nuove esperienze, e alle mie coinquiline Michela e Jessica, per aver rallegrato questi mesi di convivenza e condivisione.

Un grazie speciale al gruppo universitario, amici, prima che compagni di corso, con cui ho condiviso questo percorso, impreziosito da viaggi, cene e risate.

Infine ringrazio Eleonora, Pingo, Angelica e Irene per aver reso unica la mia esperienza Erasmus in Portogallo.