

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
In Ingegneria per L'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

CAMBIAMENTI CLIMATICI: VALUTAZIONE DELLA VARIAZIONE DELLA QUALITÀ LOCALE E GLOBALE DELL'ARIA IN RELAZIONE ALL'AUMENTO DELLE TEMPERATURE



Relatori:

Prof.ssa Panepinto Deborah
Dott. Ing. Ravina Marco
Prof.ssa Zanetti Mariachiara

Candidato:

Andrea Filograno
s252741

a.a.2019-2020



***CAMBIAMENTI CLIMATICI: VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ
LOCALE E GLOBALE DELL'ARIA IN RELAZIONE ALL'AUMENTO DELLE TEMPERATURE***



*“È una follia odiare tutte le rose perché una spina ti ha punto,
abbandonare tutti i sogni perché uno di loro non si è realizzato,
rinunciare a tutti i tentativi perché uno è fallito.
È una follia condannare tutte le amicizie perché una ti ha tradito,
non credere in nessun amore solo perché uno di loro è stato infedele,
buttare via tutte le possibilità di essere felici solo perché qualcosa non è andato per il verso
giusto.
Ci sarà sempre un'altra opportunità, un'altra amicizia, un altro amore, una nuova forza.
Per ogni fine c'è un nuovo inizio”.*

- Il Piccolo Principe -



INDICE

INTRODUZIONE	11
OBIETTIVO DELLA TESI	13
CAPITOLO 1: INQUINAMENTO ATMOSFERICO	15
1.1. QUALITÀ DELL'ARIA E CONDIZIONI METEOROLOGICHE	16
1.2. EFFETTI LEGATI AI CAMBIAMENTI CLIMATICI	18
1.3. EFFETTI SULLA SALUTE UMANA	18
1.4. EFFETTI SUGLI ECOSISTEMI	20
CAPITOLO 2: INQUADRAMENTO NORMATIVO	22
2.1. NORMATIVA REGIONALE.....	23
CAPITOLO 3: LA RETE DI TELERISCALDAMENTO	24
3.1. TELERISCALDAMENTO IN EUROPA.....	25
3.2. TELERISCALDAMENTO IN ITALIA	26
3.3. VANTAGGI PER LA COMUNITA' E PER L'UTENTE	28
3.4. SVANTAGGI.....	29
CAPITOLO 4: INTRODUZIONE AL CONFRONTO DELLE CITTA'	30
4.1. DIFFERENZE PROGETTUALI DELLA RETE IREN ENERGIA	31
4.2. BILANCIO ENERGETICO.....	33
4.3. BILANCIO EMISSIVO	36
4.3.1. MONOSSIDO DI CARBONIO (CO).....	38
4.3.2. OSSIDI DI AZOTO (NO _x)	39
4.3.3. PARTICOLATO SOSPESO	40
4.3.4. ANIDRIDE CARBONICA (CO ₂)	42
4.4. DESCRIZIONE DEL MODELLO DIDEM	43
4.4.1. DELTA-CONCENTRAZIONI E COSTI SOCIALI	46
CAPITOLO 5: INDICE DI QUALITA' AMBIENTALE	19
5.1. COSTRUZIONE DI AQI.....	49
5.2. RISULTATI	52
5.3. CONSIDERAZIONI FINALI	53
CAPITOLO 6: SCENARI CLIMATICI FUTURI	55
6.1. ZONE CLIMATICHE E HDD SECONDO IL DPR 412-93.....	58
CAPITOLO 7: CONSUMI ENERGETICI E HDD: SCENARI FUTURI	61
7.1. I GRADI GIORNO DI RISCALDAMENTO	61
7.2. PROIEZIONI FUTURE CON IL PRIMO METODO	62
7.3. PROIEZIONI FUTURE CON IL SECONDO METODO.....	69



7.4. CONCLUSIONI.....	76
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	79
RINGRAZIAMENTI.....	82



INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1: DESCRIZIONE DELL'EFFETTO SERRA	11
FIGURA 2: STIME DEL NUMERO DI DECESSI NELLE VARIE PARTI DEL MONDO [14]	15
FIGURA 3: DETTAGLIO DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO SULL'ITALIA SETTENTRIONALE [FONTE:ICONACLIMA]	16
FIGURA 4: A SINISTRA CONDIZIONI NORMALI DELL'ATM, A DESTRA INVERSIONE TERMICA [FONTE: CENTROMETEOROLOGICO].....	17
FIGURA 5: SERIE DELLE ANOMALIE MEDIE IN ITALIA DELLA TEMPERATURA MEDIA RISPETTO AL VALORE NORMALE 1961-1990. [17]	18
FIGURA 6: CURVA DI ASSIMILAZIONE ACUTA (A), CURVA DI ASSIMILAZIONE CRONICA (B)	19
FIGURA 7: IMPATTI DELL'INQUINAMENTO SULLA SALUTE UMANA [21]	19
FIGURA 8: MODELLO A PIRAMIDE DELLA GRAVITÀ DEGLI EFFETTI CORRELATI ALLA POPOLAZIONE [20]	20
FIGURA 9: SUPERAMENTI DEL LIMITE GIORNALIERO DI PM10 NEL 2017 IN EUROPA [21]....	22
FIGURA 10: VARIAZIONE NAZIONALE DEI CONTAMINANTI IN RELAZIONE AL TARGET NEC DEL 2030 [22] [23].....	23
FIGURA 11: SCHEMATIZZAZIONE GENERALE DI UN SISTEMA DI TELERISCALDAMENTO [1]	24
FIGURA 12: DIFFUSIONE DEI SISTEMI DI TELERISCALDAMENTO IN EUROPA. [44]	25
FIGURA 13:DIFFUSIONE DEI SISTEMI DI TELERISCALDAMENTO E TELERAFFRESCAMENTO IN ITALIA [41].....	26
FIGURA 14: VOLUMETRIA RISCALDATA PER SETTORE [41].....	27
FIGURA 15: DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEI COMBUSTIBILI CHE ALIMENTANO LA RETE TLR IN ITALIA [41].....	28
FIGURA 16: DIFFERENZA TRA PRODUZIONE SEPARATA E PRODUZIONE IN COGENERAZIONE [43]	28
FIGURA 17: ESEMPIO DELL'APPLICAZIONE DEL MODELLO PROPOSTO DA PAES PER LA CITTÀ DI ASTI [11]	33
FIGURA 18: PARTI PRINCIPALI DELL'APPARATO RESPIRATORIO [27]	40
FIGURA 19: SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DEL MODELLO DIDEM [28]	44
FIGURA 20: MAPPA DI CONCENTRAZIONE DI NOX, MEDIA ANNUALE. CONTRIBUTO DEGLI IMPIANTI TERMICI CIVILI. [11]	45
FIGURA 21: MAPPA DI CONCENTRAZIONE DI NOX, MEDIA ANNUALE. DIFFERENZA TRA SCENARIO FUTURO (CON TLR), E SITUAZIONE ATTUALE (SENZA TLR) [11].	45
FIGURA 22: AREA COMUNALE DI ASTI. VALORI RELATIVI ALLE CONCENTRAZIONI DI NOX. SCENARIO "SENZA TLR".....	50
FIGURA 23: AREA COMUNALE DI ASTI. VALORI RAPPRESENTATIVI DELLE CONCENTRAZIONI DI NOX. SCENARIO "SENZA TLR".	50
FIGURA 24: ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA FINO AL 2018 [35].....	55
FIGURA 25: SCENARI FUTURI SUL RISCALDAMENTO GLOBALE IN RELAZIONE ALLE EMISSIONI DI CO ₂ FINO AL 2100 [35].....	56
FIGURA 26: SCENARI FUTURI A LIVELLO GLOBALE, RELATIVO ALLE TEMPERATURE E PRECIPITAZIONI [35]	57



FIGURA 27: SUDDIVISIONE DEL TERRITORIO NAZIONALE IN FASCE CLIMATICHE SECONDO I GRADI GIORNO [40]	58
FIGURA 28: CORRELAZIONE TRA CONSUMO ENERGETICO E TEMPERATURA ESTERNA [38]..	59
FIGURA 29: PREVISIONI PER IL 2030 DELLE ANOMALIE MENSILI DELL'INDICE HDD PER I MESI INVERNALI PER I DUE SCENARI CLIMATICI [39].....	60
FIGURA 30: PROIEZIONE FUTURA DI HDD SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	62
FIGURA 31: PROIEZIONE FUTURA DI HDD SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	63
FIGURA 32: PROIEZIONE FUTURA DEL CONSUMO DI GAS SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	63
FIGURA 33: PROIEZIONE FUTURA DEL CONSUMO DI GAS SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	64
FIGURA 34: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI NO _x SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	64
FIGURA 35: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI NO _x SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	65
FIGURA 36: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI PM SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	65
FIGURA 37: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI PM SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	65
FIGURA 38: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI CO SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	66
FIGURA 39: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI CO SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	66
FIGURA 40: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI CO ₂ SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	66
FIGURA 41: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI CO ₂ SVILUPPATO CON IL PRIMO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	67
FIGURA 42: GRAFICO DI DISPERSIONE CONSUMI DI GAS- HDD [37].....	69
FIGURA 43: GRAFICI SEMI-LOG DI DISPERSIONE CONSUMI DI GAS- HDD SCALATI PER CIASCUNA DELLE CITTÀ	70
FIGURA 44: PROIEZIONE FUTURA DEL CONSUMO DI GAS SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	71
FIGURA 45: PROIEZIONE FUTURA DEL CONSUMO DI GAS SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	71
FIGURA 46: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI NO _x SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	71
FIGURA 47: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI NO _x SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	72
FIGURA 48: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI CO SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	72



FIGURA 49: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI CO SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	72
FIGURA 50: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI PM SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	73
FIGURA 51: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI PM SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	73
FIGURA 52: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI CO ₂ SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP4.5.....	73
FIGURA 53: PROIEZIONE FUTURA DI EMISSIONI DI CO ₂ SVILUPPATO CON IL SECONDO METODO. SCENARIO RCP8.5.....	74



INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1: DIFFERENZE PROGETTUALI DELLA RETE TLR DI IREN PER OGNI CITTÀ	31
TABELLA 2: BILANCIO DELL'ENERGIA CONSUMATA A PARITÀ DI ENERGIA UTILE FORNITA PER LE SEI CITTÀ.....	35
TABELLA 3: FATTORI DI EMISSIONE CONSIDERATI [11]	36
TABELLA 4: BILANCIO EMISSIVO RELATIVO AL MONOSSIDO DI CARBONIO.....	38
TABELLA 5: BILANCIO EMISSIVO RELATIVO AGLI NO _x	39
TABELLA 6: BILANCIO EMISSIVO SUL PARTICOLATO ATMOSFERICO	41
TABELLA 7: BILANCIO EMISSIVO SULL'ANIDRIDE CARBONICA	42
TABELLA 8: RISULTATI FINALI RELATIVI ALLE DELTA-CONCENTRAZIONI E COSTI SOCIALI	46
TABELLA 9: VARIAZIONE DI INCIDENZA MEDIA CORRELATA AI COSTI SOCIALI	48
TABELLA 10: LIMITI NORMATIVI, DECRETO LEGISLATIVO N.155/2010.....	51
TABELLA 11: INDICE DI QUALITÀ AMBIENTALE RISPETTO ALLO SCENARIO "SENZA TLR"	52
TABELLA 12: INDICE DI QUALITÀ AMBIENTALE RISPETTO ALLO SCENARIO "CON TLR"	52
TABELLA 13: DIFFERENZA TRA I DUE SCENARI.....	53
TABELLA 14: VALORI DEGLI HDD RIFERITI A CIASCUNA CITTÀ.....	61
TABELLA 15: VARIAZIONI DELLE PROIEZIONI DEI GRADI GIORNO DI RISCALDAMENTO [37]....	62
TABELLA 16: FATTORI DI EMISSIONI DEI CONTAMINANTI	64
TABELLA 17: PROIEZIONI FUTURE DELLE EMISSIONI. PRIMO METODO. SCENARIO RCP4.5.	68
TABELLA 18: PROIEZIONI FUTURE DELLE EMISSIONI. PRIMO METODO. SCENARIO RCP8.5.	68
TABELLA 19: PROIEZIONI FUTURE DELLE EMISSIONI. SECONDO METODO. SCENARIO RCP4.5	75
TABELLA 20: PROIEZIONI FUTURE DELLE EMISSIONI. SECONDO METODO. SCENARIO RCP8.5	75
TABELLA 21: DIFFERENZE PERCENTUALI TRA I DUE METODI. SCENARIO RCP4.5	77
TABELLA 22 DIFFERENZE PERCENTUALI TRA I DUE METODI. SCENARIO RCP8.5	78



*CAMBIAMENTI CLIMATICI: VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ
LOCALE E GLOBALE DELL'ARIA IN RELAZIONE ALL'AUMENTO DELLE TEMPERATURE*

INTRODUZIONE

Il 2015 è stato un anno storico, in quanto durante la conferenza di Parigi (COP21), 196 Paesi hanno adottato il primo accordo universale e giuridicamente vincolante sul clima. L'accordo basa i suoi fondamentali su questa frase:

“Il cambiamento climatico rappresenta una minaccia urgente e potenzialmente irreversibile per uomo e pianeta. Richiede, pertanto, la massima cooperazione da parte di tutti i paesi con l'obiettivo di accelerare la riduzione delle emissioni dei gas effetto serra”. [1]

Con questa premessa durante la conferenza viene stabilito un piano d'azione globale, con l'obiettivo di evitare cambiamenti climatici pericolosi limitando il riscaldamento globale al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali. Questo comporta inevitabilmente la riduzione delle emissioni dei gas serra e lo sviluppo di una capacità di adattamento a futuri impatti negativi, favorendo così una resilienza climatica.

Per riuscire a capire i possibili scenari futuri del mutamento del clima è necessario comprendere dapprima il suo passato. Questo è stato possibile mediante l'analisi chimica di campioni (carote) di ghiaccio recuperate principalmente in Antartide. Durante la formazione del ghiaccio vengono intrappolate delle bollicine di aria le quali, analizzate, hanno permesso di scoprire la formazione dell'atmosfera nel passato. Da ciò è stato possibile dedurre che il clima terrestre si è sempre evoluto naturalmente. Infatti periodi glaciali ed interglaciali si sono succeduti a intervalli regolari a causa di piccole variazioni nell'orbita terrestre (Cicli di Milankovic). Con l'avvento dell'uomo e in particolare con le rivoluzioni industriali, la situazione è mutata soprattutto a causa dell'effetto serra, particolare fenomeno di regolazione della temperatura di un pianeta provvisto di atmosfera.

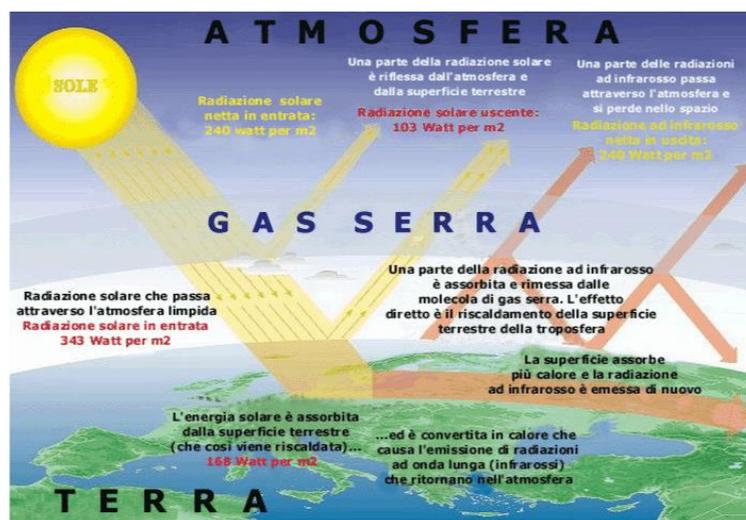


Figura 1: Descrzione dell'effetto serra

Sostanzialmente la radiazione solare raggiunge la superficie terrestre: una parte di essa viene riflessa mentre l'altra viene assorbita. Tutti i corpi con una temperatura maggiore dello zero assoluto emettono radiazione infrarossa ($\lambda \approx 700 \text{ nm} \div 1 \text{ mm}$), la quale viene assorbita dai gas serra (H_2O , CO_2 , O_3 , CH_4 , N_2O e CFCs) presenti naturalmente in atmosfera. Ciò comporta sia un aumento della temperatura della superficie terrestre e sia una riduzione di escursioni



termiche che si avrebbero in assenza dell'effetto serra, in quanto il calore assorbito viene ceduto più lentamente verso l'esterno. Pertanto l'effetto serra (figura 1) inteso come fenomeno naturale è essenziale per la vita sulla terra. Il problema principale però, si concretizza nel fatto che la concentrazione di alcuni di questi gas serra, come CO₂ e CH₄, è aumentata vertiginosamente a causa delle attività antropiche, provocando come conseguenza diretta l'aumento della temperatura globale, ulteriormente amplificata da processi di "retroazione" (Feedback) quali:

- Forcing radiativo diretto dei gas serra;
- Feedback legato al vapor d'acqua;
- Feedback legato all'albedo dei ghiacci;
- Feedback del ciclo del carbonio;
- Feedback legato alle nubi.

Se l'attività antropica ha compromesso la qualità dell'aria inequivocabilmente ha compromesso anche la salute stessa dell'uomo. Infatti l'inquinamento atmosferico causa impatti negativi sia sugli ecosistemi, ma soprattutto sulla salute umana, divenendo così un grave problema ambientale e sociale. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) stima che l'inquinamento atmosferico provochi circa 3 milioni di morti premature all'anno (WHO, 2016), e che il 92% della popolazione mondiale sia esposto a concentrazioni annuali oltre il limite consigliato. In Europa, circa il 10% della popolazione respira una concentrazione media annuale di PM_{2,5} superiore ai limiti di legge, che comporta una riduzione dell'aspettativa di vita media pari a 8,6 mesi (EEA, 2016). Tali effetti si traducono in un'ingente spesa sanitaria che grava sulla collettività (costi sociali esterni). L'Unione Europea stima che, ad oggi, i costi esterni annuali imputabili all'inquinamento siano pari a 15,8 miliardi di euro per i giorni di lavoro persi a causa di malattia, e pari a 4 miliardi di euro spesi per le cure sanitarie.

Ci troviamo quindi a vivere in un periodo in cui i cambiamenti non sono più lineari bensì epocali e dipendono esclusivamente dalle nostre scelte. Attualmente si sente parlare sempre con più frequenza di *adattamento* e *mitigazione*, due termini che sembrano in contraddizione tra di loro ma che, in realtà, sono complementari. Questo perché senza azioni efficaci di mitigazione pianificate in via preventiva, l'entità degli eventi e delle loro conseguenze richiederebbe sicuramente costi per l'adattamento più elevati. Per mitigazione si intende, infatti, un intervento tale da ridurre il contributo antropico sul sistema climatico. Per adattamento si intende la modifica dei sistemi naturali o antropici in risposta agli effetti climatici volta a limitare gli effetti dannosi

Questo tema assume un ruolo importante anche all'interno della normativa europea. Dal 2007 infatti sono stati definiti degli elementi di base sulle strategie dell'adattamento promosse proprio dall'EU.

Inoltre, nel 2012 è stata avviata la piattaforma CLIMATE-ADAPT, destinata a promuovere la raccolta e la condivisione di informazioni sull'adattamento, con lo scopo di assistere e trasmettere tali informazioni ai decisori politici nazionali e locali, al fine di contribuire ad un migliore coordinamento tra politiche settoriali e istituzioni.



OBIETTIVO DELLA TESI

L'inquinamento atmosferico interagisce in modo negativo sia sul clima sia sulla salute dell'uomo. Da qui ne discende l'obiettivo di questa tesi, ovvero valutare la qualità dell'aria in relazione ai cambiamenti climatici, in particolare all'aumento della temperatura. Tale valutazione è stata estesa per sei città: Asti, Novara, Parma, Piacenza, Parma, Torino e Reggio Emilia. Per il raggiungimento di tale obiettivo sostanzialmente il lavoro è stato suddiviso in due fasi:

- nella prima parte si pone attenzione all'inquinamento atmosferico e agli effetti che ha sull'uomo. In particolare ci si focalizza sull'analisi della qualità dell'aria nelle sei città in relazione alla modifica della gestione del riscaldamento. Infatti vengono analizzati due scenari: quello odierno e quello futuro caratterizzato dalla presenza del teleriscaldamento. Il confronto viene facilitato mediante la costruzione di un indice di aggregazione che permette di sintetizzare le varie informazioni;
- nella seconda fase, invece, l'attenzione si sposta sui cambiamenti climatici, in particolare sul riscaldamento globale. Infatti vengono analizzate le possibili variazioni future della domanda di riscaldamento e delle relative emissioni di contaminanti delle città in esame. Tali variazioni sono state valutate sulla base di due differenti scenari climatici (RCP4.5 e RCP8.5), studiando le anomalie dei gradi giorno di riscaldamento per i seguenti periodi temporali 2030, 2035, 2040, 2045 e 2050.

Questo studio, pertanto, vuole evidenziare le conseguenze dovute all'impatto dei cambiamenti climatici, in particolare l'influenza che si avrebbe dal riscaldamento globale dell'aria, e conferma la necessità di un piano di sviluppo più efficiente e sostenibile del riscaldamento del settore residenziale, il quale risulterebbe oltre che una misura di adattamento anche di mitigazione in quanto si avrebbero delle emissioni di inquinanti più contenute. A tal proposito la valutazione effettuata nella prima parte dimostra come un sistema di teleriscaldamento alimentato da centrali cogenerative rappresenti una scelta ambientale adatta per ridurre l'impatto. Date le seguenti premesse, la tesi è stata strutturata nel seguente modo:

- Capitolo 1: introduce il problema dell'inquinamento atmosferico, si analizzano gli effetti legati alla qualità dell'aria sull'uomo e sull'ambiente, in relazione anche alle condizioni meteorologiche;
- Capitolo 2: illustra brevemente un inquadramento normativo nazionale e regionale;
- Capitolo 3: viene rappresentata la diffusione del teleriscaldamento in Europa e in Italia, descrivendo vantaggi e svantaggi di questa tecnologia;
- Capitolo 4: introduce al confronto delle città in esame, descrivendo la metodologia generale e il modello DIDEM adottata nei report "*Studio degli impatti sulla qualità dell'aria del sistema di teleriscaldamento*" [11] da cui è stato possibile prelevare i dati successivamente utilizzati nello sviluppo della tesi;
- Capitolo 5: espone il vantaggio dell'utilizzo degli indici di aggregazione e i gli steps effettuati per la costruzione di questi.



- Capitolo 6: introduce il fenomeno del riscaldamento globale, vengono presentati i possibili scenari climatici futuri e viene introdotto il concetto di HDD;
- Capitolo 7: presenta le variazioni della domanda di riscaldamento e delle emissioni di contaminanti in atm rispetto a due scenari climatici con due metodi differenti.

Capitolo 1

INQUINAMENTO ATMOSFERICO

La definizione più recente di carattere generale è contenuta nella direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrata dell'inquinamento (GU n. 252 del 26/10/99) e recita (art.2 c2): *“Inquinamento, l'introduzione diretta o indiretta, a seguito di attività umana, di sostanze, vibrazioni, calore o rumore nell'aria, nell'acqua o nel suolo, che potrebbero nuocere alla salute umana o alla qualità dell'ambiente, causare il deterioramento dei beni materiali, oppure danni o perturbazioni a valori ricreativi dell'ambiente o ad altri suoi legittimi usi”*.

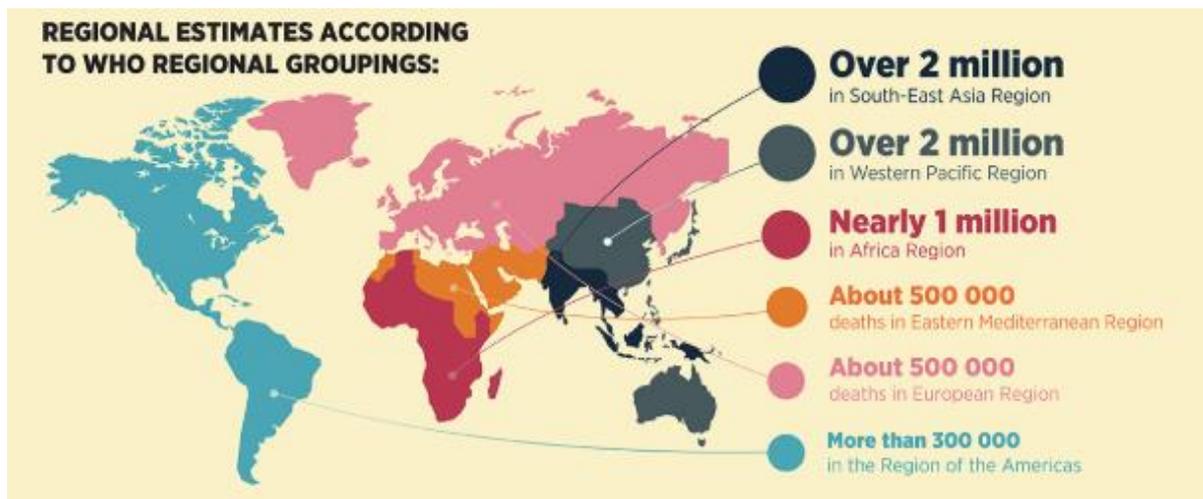


Figura 2: Stime del numero di decessi nelle varie parti del mondo [14]

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha stimato che circa il 90% degli abitanti della Terra, quindi 9 persone su 10, respira ogni giorno aria malsana (figura 2). I rapporti annuali, redatti dall'OMS, dichiarano che, in 4300 città analizzate, l'inquinamento atmosferico ha provocato il 24% di morti per attacco cardiaco, il 25% per ictus, il 29% per tumore ai polmoni e infine il 43% di morti per malattie polmonari ostruttive. Il 7% dei decessi è rappresentato dai bambini in quanto soggetti più vulnerabili [13]. In generale, i livelli di inquinamento sono rimasti pressoché costanti, in tutto il mondo. Si registra una diminuzione in alcune zone dell'Europa, mentre nelle regioni Sud-Est asiatico si hanno valori 5 volte maggiori dei limiti imposti dall'OMS [14].

L'inquinamento atmosferico è comunemente definito smog. Tuttavia è necessario distinguerne due tipi, in quanto presentano caratteristiche differenti [15]:

- Smog classico: si forma in condizioni di ristagno atmosferico. È caratterizzato da particelle solide e di anidride solforosa, derivanti da processi di combustione;
- Smog fotochimico: deriva da processi chimici, i quali avvengono per effetto della radiazione solare e coinvolgono sostanze come l'ozono, ossidi di azoto e di carbonio e altri composti volatili.

Nonostante le misure antismog adottate negli ultimi anni, le quali hanno contribuito a un miglioramento della qualità dell'aria, l'Italia risulta essere al primo posto tra i Paesi dell'Europa per morti dovuti all'inquinamento atmosferico.



Figura 3: Dettaglio dell'inquinamento atmosferico sull'Italia Settentrionale [Fonte:IconaClima]

Infatti, l'Italia Settentrionale risulta essere maggiormente colpita dall'inquinamento atmosferico (figura 3). Questo perché la zona è soggetta a un elevato addensamento sia di aree urbane e quindi al traffico veicolare, sia di industrie. A ciò, contribuisce anche l'impiego di caldaie che usano biomasse per il riscaldamento e l'agricoltura intensiva. In particolare, quest'ultima produce elevate quantità di ammoniaca che, interagendo con gli scarichi dei veicoli, formano le polveri sottili. Queste attività antropiche, inoltre, sono condizionate da fattori geomorfologici e meteorologici. Risulta, quindi, evidente che l'inquinamento atmosferico è un problema molto complesso perché interconnette più matrici non solo ambientale e sociali ma anche economiche.

1.1. QUALITÀ DELL'ARIA E CONDIZIONI METEOROLOGICHE

Come appena accennato nel paragrafo precedente, l'inquinamento atmosferico non dipende soltanto dal numero o dalla intensità delle sorgenti di inquinamento, bensì anche dalle condizioni meteorologiche. Infatti, i contaminanti, una volta emessi in atmosfera, sono soggetti a fenomeni di diffusione e dispersione dipendenti dai seguenti parametri:

- a scala locale: l'intensità del vento, la turbolenza (meccanica e termodinamica) dei bassi strati atmosferici ed effetti meteorologici particolari come le brezze (di mare o di monte);
- a scala globale: le variazioni del vento con la quota (shear del vento) e la turbolenza determinata dalle aree cicloniche e anticicloniche.

Un altro fenomeno da considerare nel trasporto e nella diffusione dei contaminanti è la stabilità atmosferica. Essa dipende dal gradiente termico verticale e in particolare dalla presenza dell'inversione termica. In generale la temperatura dell'aria tende a diminuire con l'aumentare della quota. In questo modo l'aria calda, avendo una densità minore, tende a salire in alto, venendo così sostituita da quella più fredda, che presenta una densità maggiore. Si ha così il rimescolamento delle masse d'aria. Tuttavia, in alcuni casi, la temperatura dell'aria ad una certa

quota tende ad aumentare per alcune decine o centinaia di metri, per poi cominciare a decrescere di nuovo. In questo modo si crea un vero e proprio strato di aria calda, che essendo più leggera, diventa un ostacolo per il miscelamento delle masse d'aria. In queste condizioni, pertanto, gli inquinanti prodotti al suolo restano confinati nel volume d'aria sottostante allo strato di inversione termica, incrementando così le loro concentrazioni nel tempo (figura 4).

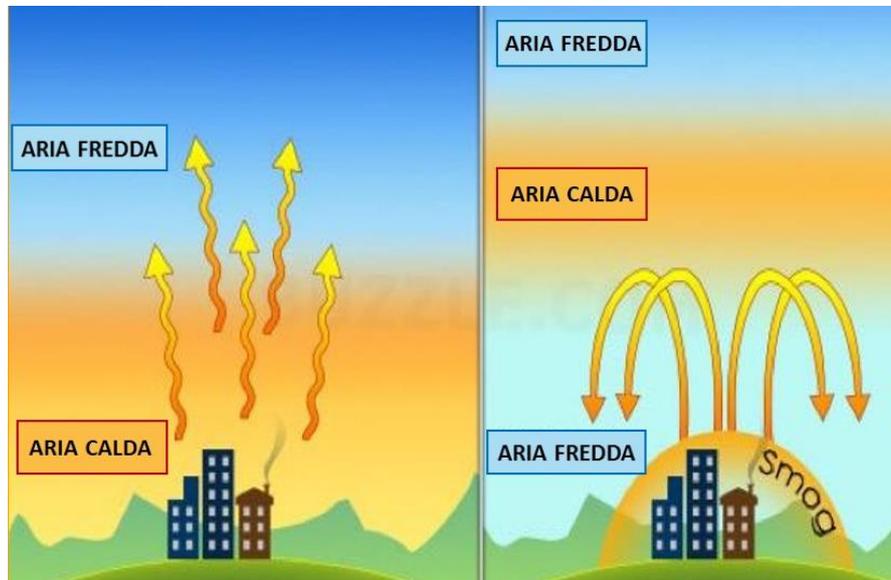


Figura 4: A sinistra condizioni normali dell'atm, a destra inversione termica [fonte: CentroMeteorologico]

In genere, l'inversione termica si verifica nei mesi autunnali-invernali. Le cause delle inversioni sono principalmente due:

- inversione da irraggiamento: tale tipo di inversione compare, evolve e si estingue nel corso della giornata, con il variare della temperatura oraria. Risulta quindi meno grave anche se crea alcune ore/giorno di effetti di punta nelle prime ore del mattino
- inversione di quota (subsidenza): comportamento legato a condizioni meteorologiche di mesoscala, associate a tempo stabile e gradevole con cielo limpido, poco vento e formazioni nebbiose invernali, tipiche dell'anticiclone. Durante la discesa questi venti si riscaldano in seguito alla compressione adiabatica e generano perciò inversioni di quota che possono perdurare per settimane. Al di sotto dello strato di inversione in quota rimane perciò intrappolata una massa d'aria che per settimane può accumulare tutti i contaminanti senza nessun ricambio d'aria.

È necessario evidenziare che il verificarsi di episodi critici non dipenda solo da questi aspetti, bensì bisogna considerare anche la conformazione geomorfologica della zona. Infatti, considerando la pianura Padana, essa è circondata da una grande catena montuosa che causa l'attenuazione dell'intensità dei venti, provocando così un accumulo dei contaminanti. Di conseguenza città, come Torino, che presentano livelli di emissioni simili ad altre città sviluppate in Europa, risultano più inquinate proprio a causa della morfologia del territorio che impedisce la dispersione degli inquinanti in atmosfera [16].

1.2. EFFETTI LEGATI AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Come già accennato nell'introduzione, i cambiamenti climatici sono una grave conseguenza dell'attività antropica. I loro effetti non sono omogenei in tutto il globo bensì sono osservabili in particolare su scala locale, come ad esempio per il riscaldamento globale che è più evidente in determinate zone del pianeta. Secondo gli studi dell'Agenzia Europea dell'Ambiente, il riscaldamento globale non ha effetti solo sull'innalzamento della temperatura (figura 5), bensì modifica anche la stabilità atmosferica, la velocità di alcune reazioni chimiche e di conseguenza la trasformazione di determinati contaminanti [17]. Questo a sua volta, si ripercuote sulla la qualità dell'aria, in quanto si favorisce l'incremento della concentrazione al suolo di inquinanti. Si evince, quindi, che il riscaldamento globale favorisca l'inquinamento atmosferico, in particolare nel sud dell'Europa, ponendo l'Italia a un grave rischio di peggioramento della qualità dell'aria [18].

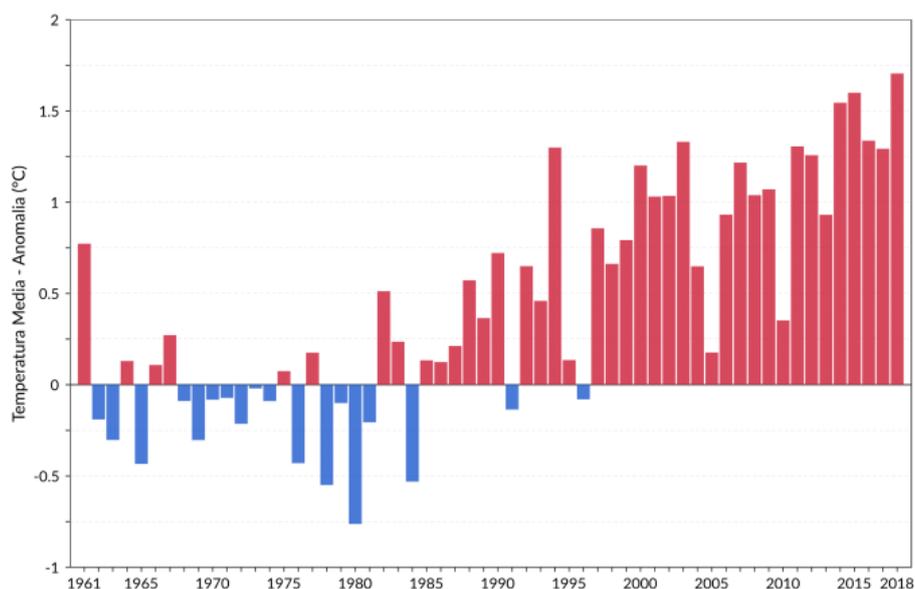


Figura 5: Serie delle anomalie medie in Italia della temperatura media rispetto al valore normale 1961-1990. [17]

1.3. EFFETTI SULLA SALUTE UMANA

Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute umana sono ormai ben noti. Molti studi hanno dimostrato una correlazione statistico-epidemiologica, cioè una consequenzialità causale, tra l'incremento dell'inquinamento e l'aumento di patologie.

In genere i composti xenobiotici, una volta immessi, possono interagire con un organismo mediante ingestione, inalazione e assorbimento. Il tipo di meccanismo di interazione, ovviamente, dipende dalle caratteristiche del contaminante. Quest'ultimo, una volta entrato nell'organismo, può collocarsi in quattro differenti siti:

- Siti di azione tossica, in cui contaminante interagisce con le macromolecole endogene o con le cellule, causando un effetto tossico che si ripercuote sull'intero organismo;
- Siti di metabolizzazione, in cui l'inquinante viene metabolizzato grazie all'aiuto di enzimi specifici. Spesso si ha una detossificazione;

- Siti di accumulo, in cui il composto xenobiotico si colloca in una forma di inerte causando gravi danni osservabili dopo lunghi periodi di tempo;
- Siti di escrezione, in cui appunto il composto viene trasformato ed eliminato.

A questo punto a seconda della dose assorbita e del tempo di esposizione (figura 6), si possono avere effetti acuti, che generalmente si traducono in un aumento della mortalità per cause respiratorie e cardiache, oppure cronici, riscontrabili in un aumento della mortalità per cause cancerogene se organi bersaglio.

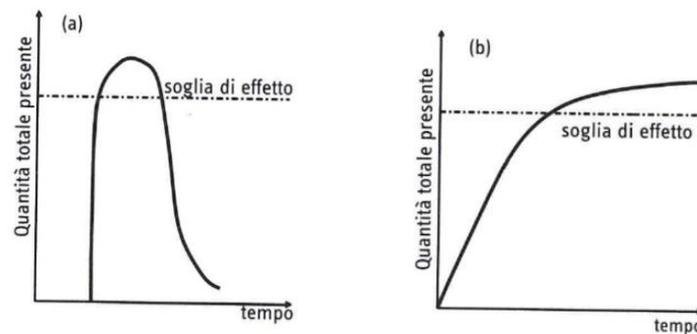


Figura 6: Curva di assimilazione acuta (a), curva di assimilazione cronica (b)

Pertanto a seconda del tipo di contaminante si avranno effetti differenti. Nella figura 7 sottostante sono riportati i principali danni sulla salute umana, correlati allo specifico inquinante [21].

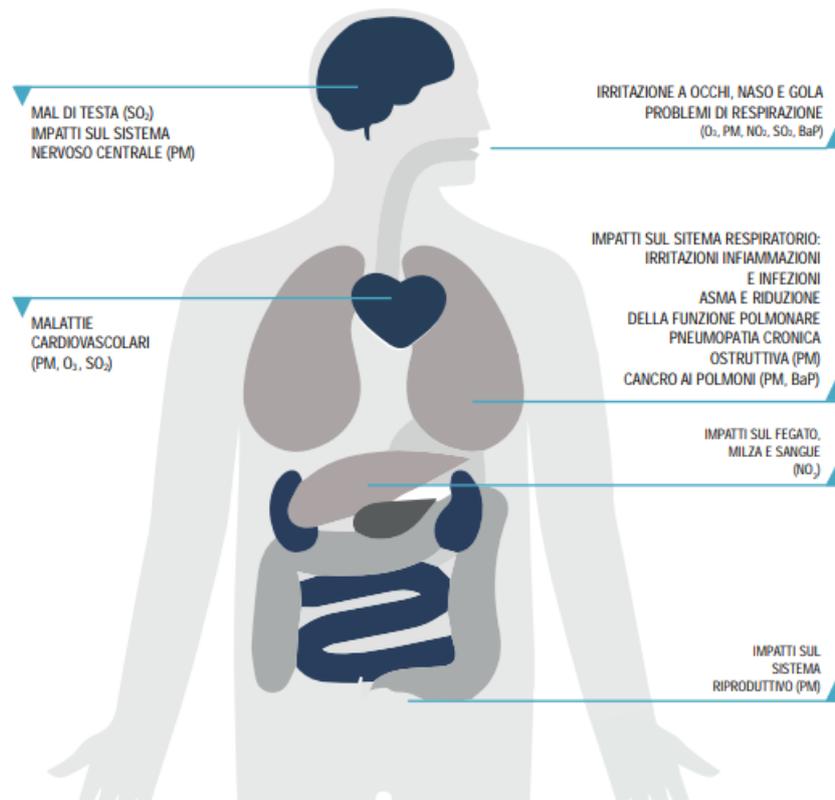


Figura 7: Impatti dell'inquinamento sulla salute umana [21]

Nonostante tali evidenze, gran parte dei Paesi Europei vive ancora in condizioni malsane. Questo perché l'inquinamento è sottostimato dalla popolazione. Infatti gli effetti più frequenti sono quelli meno gravi, definiti subclinici, in quanto non necessitano di ricovero ospedaliero o

intervento medico. Tali effetti, però, si verificano anche a concentrazioni basse, interessando così un vasto numero di individui della popolazione. A questo proposito, la WHO suggerisce un grafico a piramide nelle sue linee guida per l'Europa (figura 8). In ordinata è riportata la gravità degli effetti, mentre in ascissa il numero di persone colpite [20].

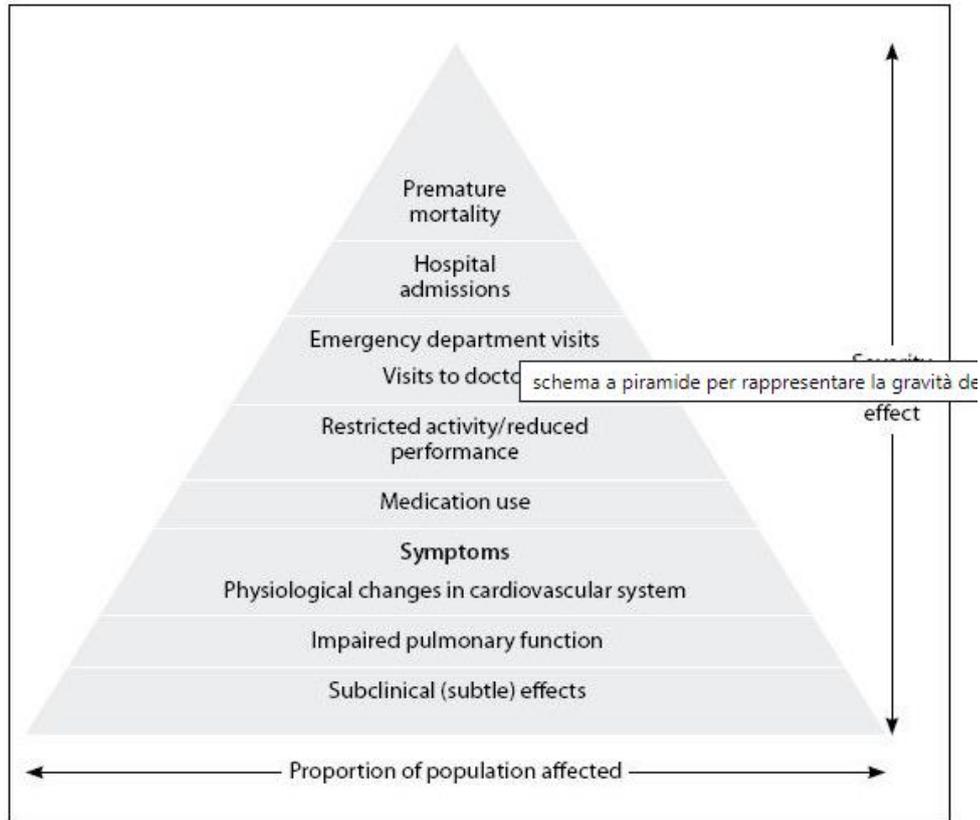


Figura 8: Modello a piramide della gravità degli effetti correlati alla popolazione [20]

Come si può notare l'ampiezza della piramide diminuisce spostandosi verso il vertice. Questo vuol dire che una grande quantità di individui è soggetta a effetti subclinici, mentre spostandoci verso l'alto si hanno effetti che riguardano via via una fetta di popolazione minore ma comunque soggetti a effetti più gravi che necessitano di ricovero ospedaliero. È bene specificare, inoltre, la presenza di sottogruppi maggiormente sensibili agli inquinanti, come i bambini e gli anziani, e di categorie di persone più a rischio a causa di un cattivo stile di vita (fumo, alcool, etc) [19].

1.4. EFFETTI SUGLI ECOSISTEMI

L'inquinamento atmosferico genera impatti negativi anche sugli ecosistemi, deteriorando direttamente la vegetazione, la qualità dell'acqua e del suolo. L'ozono, a livello della superficie terrestre, riduce il tasso di crescita della vegetazione. Altri inquinanti, come gli NO_x , NH_3 , SO_2 , favoriscono fenomeni di acidificazione del suolo o dei corpi idrici, oppure di eutrofizzazione. In entrambi i casi si ha un collasso del sistema che comporta la perdita di alcune biodiversità.



Capitolo 2

INQUADRAMENTO NORMATIVO

Da circa venti anni l'Italia è dotata di una abbondante normativa per la lotta contro l'inquinamento. Tutte le norme, o quasi, derivano da obblighi di Direttive UE. Inizialmente le norme erano solo settoriali, cioè normative specialistiche che il legislatore predilige e si rivolgono volta per volta a singoli comparti. Recentemente però ci si è resi conto che questa logica settoriale poteva anche portare a risultati contrastanti. Con le norme integrate si ha avuto una nuova logica. Il D.L. 04/08/99 n. 372, attuazione della direttiva 96/62/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrale dell'inquinamento, (IPPC, EU) integra le norme settoriali, che restano sempre valide, con l'obbligo di imposizione di nuovi principi, sicuramente onerosi dal punto di vista aziendale:

- deve essere garantito un elevato livello di protezione ambientale nel suo complesso, imponendo, oltre agli standard settoriali, anche uno standard di emissione totale (g/t prodotto);
- viene adottato il principio amministrativo dell'autorizzazione integrata ambientale, che include tutte le autorizzazioni settoriali;
- devono essere prese le opportune misure di prevenzione dell'inquinamento applicando in particolare le migliori tecnologie disponibili (BAT).

Il principio IPPC implica che non basta il rispetto dei singoli standard settoriali, ma che le autorità pubbliche pretendono in futuro il massimo sforzo aziendale, benché venga affermato anche il principio della compatibilità economica.

Il testo legislativo più importante della normativa ambientale è costituito dal cosiddetto Testo Unico Ambientale, D.Lgs 152 del 3 aprile 2006 modificato dal DL 16 gennaio 2008 N° 4 "Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale".

Pertanto la normativa sulla tutela dell'aria affronta tale tematica secondo due principi: controllare le emissioni degli inquinanti, mediante i limiti di emissione, e porre degli obiettivi per la tutela della salute umana mediante il monitoraggio e standard di qualità. Per quanto riguarda le emissioni in atmosfera, esse sono regolamentate da [24]:

- *D.Lgs. n° 171 del 21/05/2004, attuazione della Direttiva 2001/81/Ce del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23/10/2001, che prevede dei limiti massimi nazionali sul SO₂, Nox, COV, NH₃, in quanto sostanze acidificanti, eutrofizzanti e precursori dell'ozono.*
- *D.Lgs n° 152 del 3/4/2006 e ss. mm. ii. (D.Lgs. 128/2010), impone valori limite relativi a emissioni provenienti da determinate attività, impianti e combustibili;*
- *Direttiva 2010/75/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio del 24/11/2010, la quale riunisce più direttive sulle emissioni industriali nelle diverse matrici ambientali, ponendo disposizioni più restringenti e maggiore importanza alle BAT;*
- *D.Lgs. n° 30 del 13/3/2013, attuazione della Direttiva 2009/29/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio 23/4/2009, prevede l'estensione del sistema comunitario per lo scambio di quote di emissione di gas serra (Emission Trading).*

Il monitoraggio e gli standard di qualità, invece, sono regolamentati da [24]:

- *D.Lgs. n° 155 del 13/8/2010 e ss. mm. ii. (D.Lgs. n° 250/2012), attuazione sia della Direttiva 2008/50/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio del 21/5/2008,*



relativa alla qualità dell'aria in Europa, e sia della *Direttiva 2004/107/Ce del Parlamento europeo e del Consiglio del 15/12/2004* relativa alle soglie limite di alcuni composti quali: Arsenico, Cadmio, Mercurio, Nickel e idrocarburi policiclici aromatici. In particolare tale norma riporta la tabella dei limiti normativi dei composti in aria per una corretta gestione della qualità dell'aria. Inoltre sono indicati gli strumenti (reti di monitoraggio, tecniche modellistiche, inventario delle emissioni e scenari emissivi) per effettuare una valutazione della qualità dell'aria;

- *D.M. Ambiente 29 novembre 2012*, il quale prevede stazioni di misurazioni speciali sul territorio nazionale per gli inquinanti PM_{2.5}, PM₁₀, idrocarburi policiclici aromatici, metalli pesanti, ozono e suoi precursori.

Nonostante tutte le politiche messe in atto, l'Italia è in procedura di infrazione europea a causa del mancato rispetto dei limiti del PM₁₀ e NO₂. Purtroppo sul territorio nazionale vi sono aree particolarmente critiche come quella del bacino Padano, come si può notare dalla figura 9.

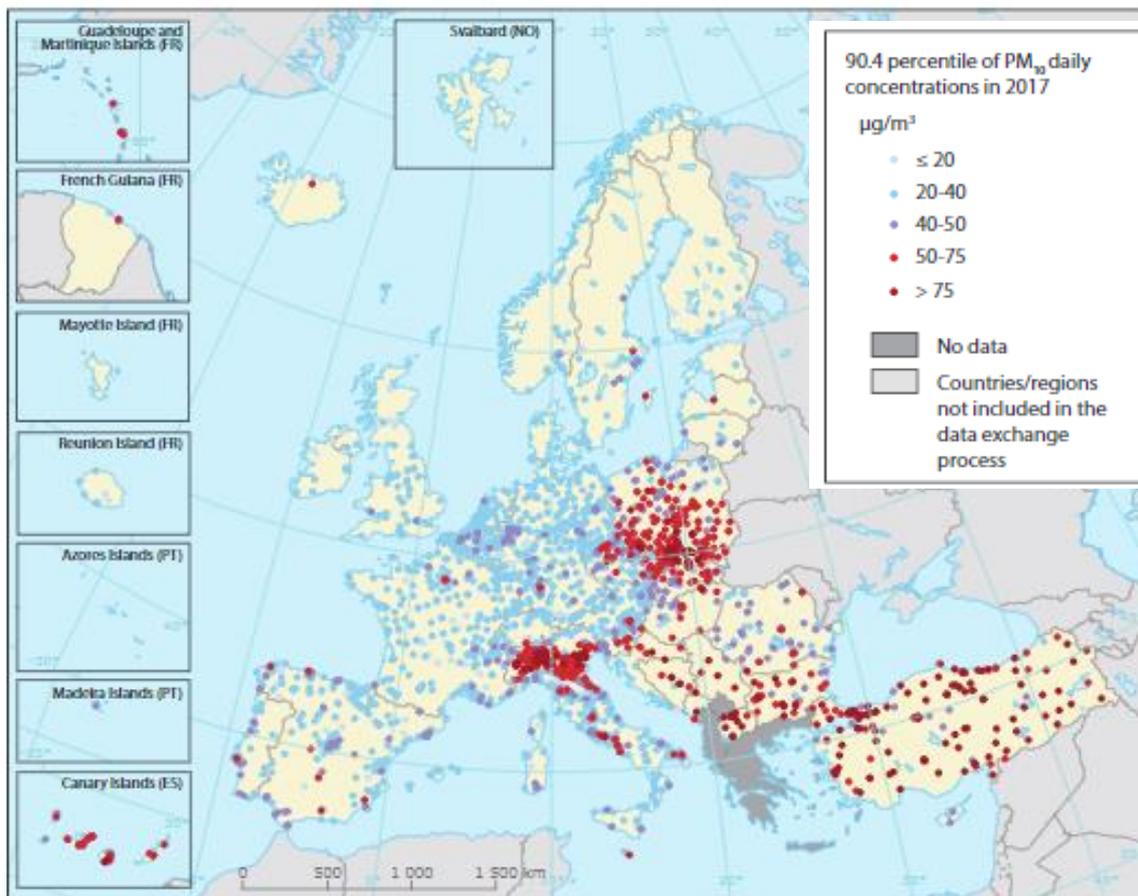


Figura 9: Superamenti del limite giornaliero di PM₁₀ nel 2017 in Europa [21]

Inoltre, l'Italia risulta non in linea con i nuovi target di riduzione europei per il 2030 stabiliti dalla Direttiva NEC in vigore dal 31/12/2016 per i seguenti composti, PM_{2.5}, NO_x, SO_x, COVNM e NH₃ [22]. Infatti dagli scenari sviluppati da ISPRA e ENEA (figura 10) si evince un'effettiva riduzione per gli inquinanti soggetti a tale norma ma comunque non preponderante per il raggiungimento di tali obiettivi, con la sola eccezione degli NO_x. Caso particolarmente drammatico è rappresentato dal PM_{2.5} che risulta sotto del 10%. [18]

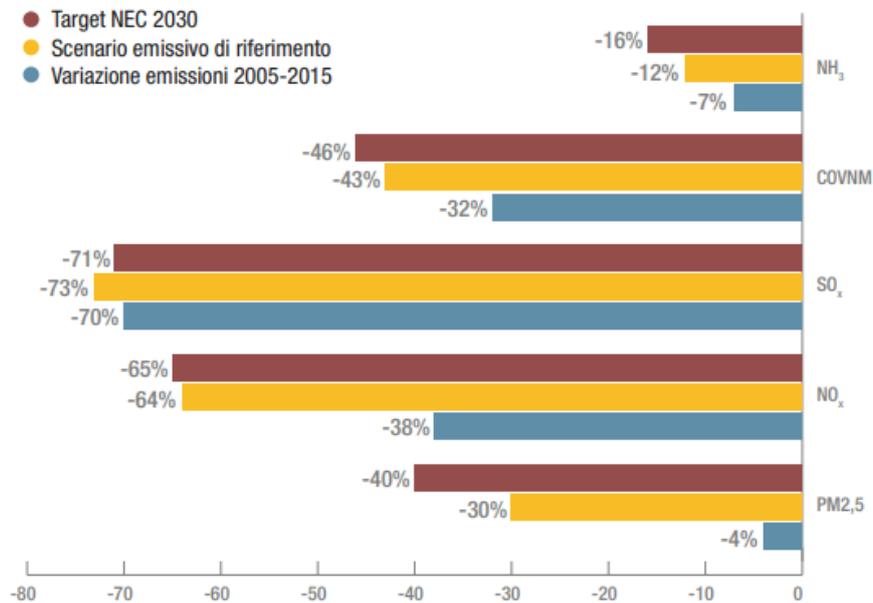


Figura 10: Variazione nazionale dei contaminanti in relazione al target NEC del 2030 [22] [23]

2.1. NORMATIVA REGIONALE

Le regioni del Piemonte e dell'Emilia Romagna hanno sviluppato parallelamente una propria linea giuridica che affianca e attua quella nazionale. Entrambe le regioni hanno affidato alle rispettive *Agenzie Regionale per la Protezione Ambientale* (ARPA) il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico, la revisione della rete di rilevamento e una nuova suddivisione del territorio sul quale eseguire e valutare le misure gestionali. Con tale aiuto tecnico, le Regioni possono, quindi, redigere ogni anno dei report, a livello comunicativo e nazionale, che descrivono la qualità dell'aria.

Di fondamentale importanza è l'“*Accordo tra le Regioni Emilia Romagna, Lombardia, Piemonte, Veneto, le Regioni autonome Friuli-Venezia Giulia e Valle d'Aosta, le Provincie autonome di Trento e Bolzano e la Repubblica e Cantone Ticino per la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento atmosferico*” firmato il 7/02/2007. Tale accordo pone come obiettivo una collaborazione tra i seguenti territori col fine di rendere “*omogenee e sinergiche*” le azioni per la tutela dell'aria, quali le misure sulla circolazione veicolare, l'uso di biomasse o altri combustibili e approfondimenti delle tecniche di monitoraggio. Purtroppo le caratteristiche geomorfologiche e climatiche del bacino Padano non aiutano a rispettare i target normativi. Questo ha previsto un ulteriore “*Nuovo Accordo di Programma per l'adozione congiunta di misure per il miglioramento della qualità dell'Aria nel bacino padano*”

tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e le regioni interessate. Con tale accordo si prevede dei nuovi livelli di criticità e disposizioni più restrittive in particolare sulla circolazione veicolare nei comuni con più di 30000 abitanti. [24] [25]

Capitolo 3

LA RETE DI TELERISCALDAMENTO

L'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas definisce il teleriscaldamento come: *“il sistema di riscaldamento a distanza di un quartiere o di una città che utilizza il calore prodotto da una centrale termica, da un impianto di cogenerazione o da una sorgente geotermica. In un sistema di teleriscaldamento il calore viene distribuito agli edifici tramite una rete di tubazioni in cui fluisce l'acqua calda o il vapore”*. Dunque le componenti principali di tale sistema sono (figura 11):

- la centrale, la quale produce energia termica grazie all'ausilio di acqua calda (105°C), che verrà distribuita alle utenze del centro abitativo. L'impianto è costituito da cogeneratori a combustione interna alimentati mediante gas naturale (CH₄) e da caldaie a gas di integrazione;
- il sistema a rete, progettato in modo da ridurre eventuali infiltrazioni e dispersioni di calore, e realizzato con materiali che garantiscono massima affidabilità, sicurezza e durata nel tempo. Il sistema può essere diretto, un unico circuito idraulico che collega la centrale di produzione con la sottostazione, oppure indiretto se sono presenti due circuiti separati ma mantenuti in contatto mediante uno scambiatore di calore [2].
- le sottostazioni, ovvero gli scambiatori di calore presenti nelle utenze abitative, che prelevano il calore direttamente dalla rete. Sono muniti sia di termovalvole, le quali permettono di regolare la temperatura degli ambienti interni, sia di contabilizzatori, i quali misurano effettivamente il calore consumato per la fatturazione.



Figura 11: Schematizzazione generale di un sistema di teleriscaldamento [1]

Al contempo tale sistema produce anche energia elettrica, la quale viene immessa direttamente nella rete di distribuzione nazionale.

3.1. TELERISCALDAMENTO IN EUROPA

Il teleriscaldamento è una risposta concreta verso un mondo più sostenibile. Ad oggi, tale sistema di gestione del riscaldamento fornisce in Europa circa il 9% nel settore residenziale, il 10% nel settore servizi e l'8% nel settore industriale del calore richiesto [44]. Si contano più di 1000 reti operative e circa 70 milioni di abitanti che fruiscono di tale servizio, come si evince dalla figura 12 sottostante, maggiormente diffuse nel Nord Europa, dato il clima più freddo e rigido.

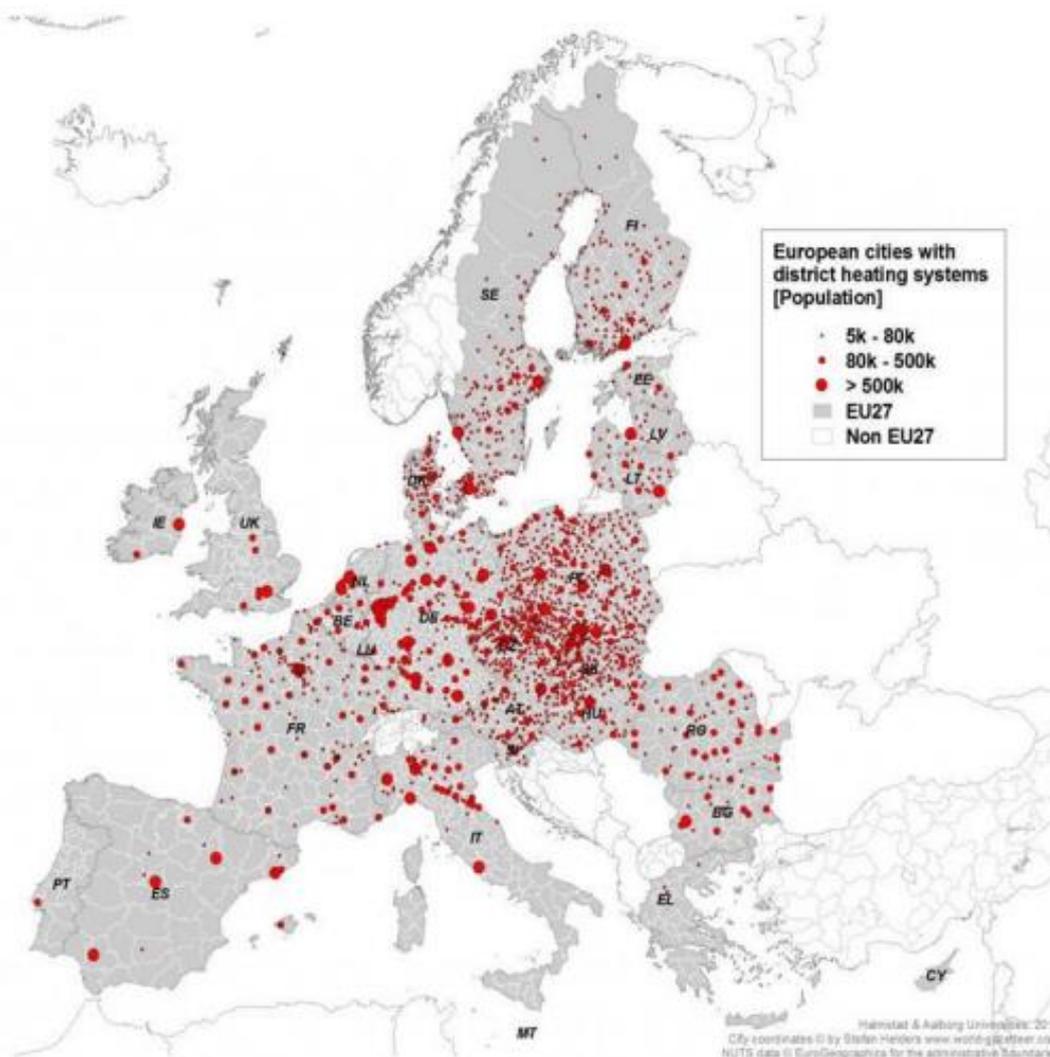


Figura 12: Diffusione dei sistemi di teleriscaldamento in Europa. [44]

Dal 2009 la Commissione Europea premia le città più verdi per il raggiungimento di determinati obiettivi ambientali che contribuiscono alla mitigazione dei cambiamenti climatici. Copenhagen è stata premiata “Green City” proprio grazie alla sua rete di teleriscaldamento, alimentata circa per il 30% da rifiuti e biomassa, e la quale copre circa il 98% della domanda di calore. Stoccolma, anche essa premiata, ha ridotto del 25%, rispetto ai livelli del 1990, le emissioni di CO₂ grazie all’espansione del TLR coprendo così circa l’80% della domanda di calore dei cittadini. Ad oggi è la città meno inquinata al mondo. [45]



Questi sono esempi di come un'adeguata ed efficiente gestione del riscaldamento può comportare un miglioramento della qualità dell'aria non solo a livello locale ma anche su scala globale grazie alla riduzione delle emissioni di CO₂.

3.2. TELERISCALDAMENTO IN ITALIA

In Italia il teleriscaldamento riveste un ruolo relativamente marginale nel mercato del calore, in quanto solo il 5% dei cittadini, contro una media europea del 12,4%, ne usufruisce [42]. Nonostante tali evidenze, la diffusione di questo sistema di riscaldamento è caratterizzata da un andamento positivo, principalmente circoscritto all'Italia centrosettentrionale (figura 13). Con il decreto legislativo 4 luglio 2014 n.102, recepito dalla Direttiva europea 2012/27/UE, si intende promuovere lo sviluppo del teleriscaldamento e teleraffrescamento e della concorrenza, anche nelle altre regioni italiane.

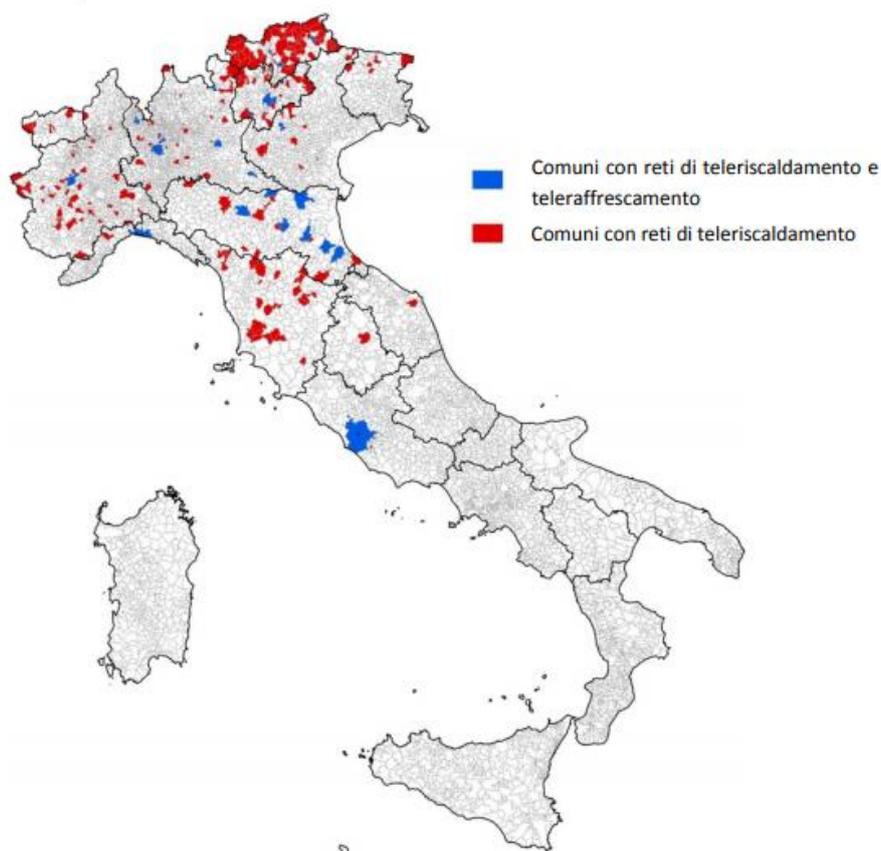


Figura 13: Diffusione dei sistemi di teleriscaldamento e teleraffrescamento in Italia [41]

In tutto le reti presenti sul territorio italiano sono circa 300. I fattori che maggiormente influenzano lo sviluppo delle reti sono:

- caratteristiche territoriali;
- condizioni climatiche;
- dimensione demografica;
- densità abitativa.

La provincia di Bolzano, ad esempio, è fortemente caratterizzata dallo sviluppo di questa tecnologia, declinata in numerose reti prevalentemente di piccola dimensione e alimentate da biomassa solida [41].



Nella figura 14 è possibile osservare la volumetria riscaldata per settore, per le 295 reti di teleriscaldamento attive sul territorio. In generale il 64% di tale volumetria complessiva riscaldata è associata a utenze residenziali, il 33% terziario, il restante 3% a utenze industriali. In particolare il 43% circa della volumetria riscaldata complessiva si trova in Lombardia (147 milioni di m³); seguono Piemonte (92 milioni di m³, 27% del totale), Emilia Romagna (43 milioni di m³, 12% del totale) e la provincia di Bolzano (23 milioni di m³, 7% del totale) [41].

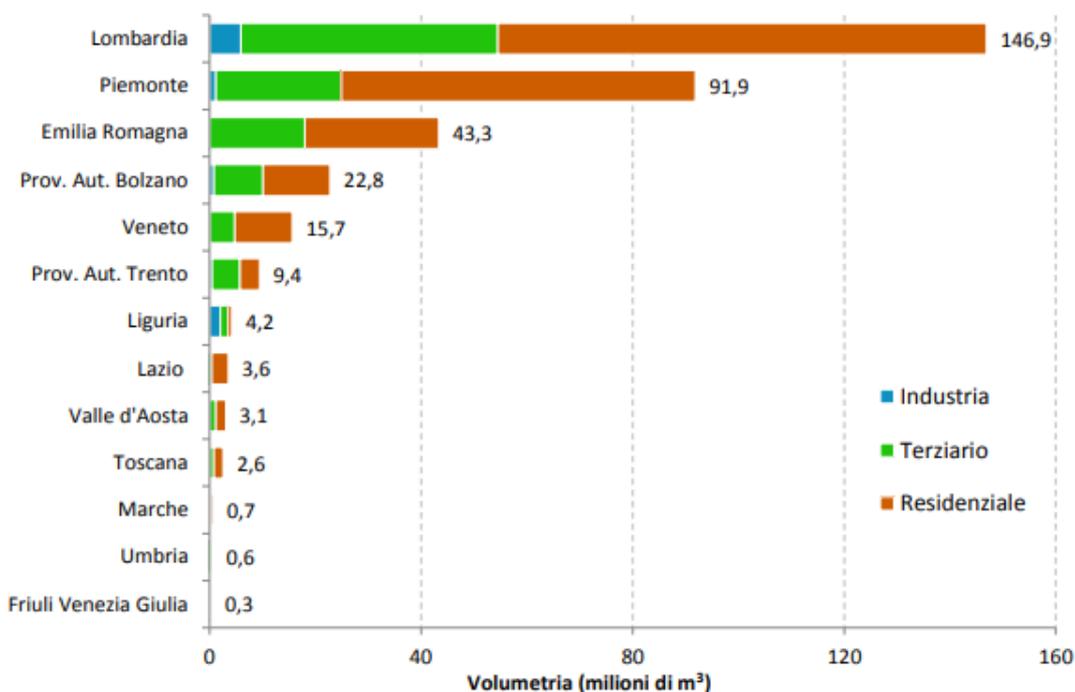


Figura 14: Volumetria riscaldata per settore [41]

Il calore che riscalda l'acqua del teleriscaldamento può essere prodotto da svariati tipi di fonti energetiche, soprattutto verdi. Infatti qualsiasi tipo di combustibile è adatto per alimentare una centrale TLR. In generale la scelta della fonte energetica dipende da alcuni fattori, quali la sua disponibilità in loco, il suo costo e il suo impatto ambientale. Fra questi si possono annoverare: [46]

- Gas naturale: garantisce i maggiori vantaggi, sia in termini di approvvigionamento, sia in termini di impatto ambientale, specialmente sull'emissione di particolato;
- Carbone: ancora oggi molto usato, principalmente per il fatto che il suo prezzo sul mercato internazionale è piuttosto stabile, nonostante le penalizzazioni introdotte dalla L. 448/98, istitutiva della "carbon tax", a causa delle alte emissioni di CO₂ prodotte in fase di combustione;
- Combustibile derivato da rifiuti solidi urbani: la Direttiva Europea 2000/76/CE definisce i limiti di emissione e i sistemi di controllo per i cosiddetti "co-inceneritori", mentre il Dlgs 387/2003 include i rifiuti tra le fonti energetiche ammesse a beneficiare del trattamento riservato alle fonti rinnovabili.
- Biomassa: tipo di combustibile molto usato in impianti ubicati in zone montane poiché l'approvvigionamento risulta essere costoso;
- Geotermia: risulta scarsamente utilizzata a causa della distanza tra fonte e zone di utilizzo;



- Calore refluo industriale: risulta essere una soluzione economica poiché molte attività industriali producono calore come scarto di processo, permettendone così un suo riutilizzo;

In Italia, le fossili (specialmente gas naturale) alimentano complessivamente l'84% della potenza installata, mentre la restante parte è suddivisa tra fonti rinnovabili, rifiuti e calore di recupero (figura 15). [41]

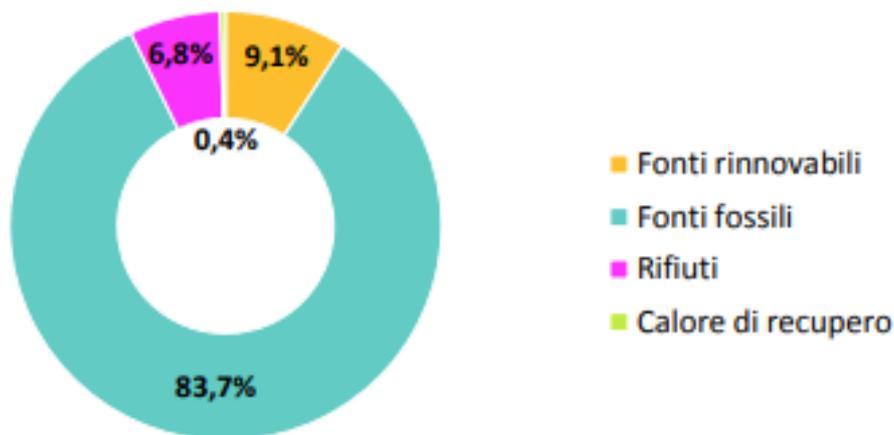


Figura 15: Distribuzione percentuale dei combustibili che alimentano la rete TLR in Italia [41]

3.3. VANTAGGI PER LA COMUNITA' E PER L'UTENTE

Il sistema di teleriscaldamento ad oggi riscontra molteplici consensi poiché contribuisce:

- risparmio di energia primaria di origine fossile;
- notevole riduzione dell'impatto ambientale relativo alla produzione di energia termica ed elettrica.

In particolare, la cogenerazione migliora in maniera significativa l'efficienza energetica in modo da ridurre le emissioni. Tale processo prevede il recupero del calore di scarto della produzione di energia e lo riutilizza nei sistemi TLR [43]



Figura 16: Differenza tra produzione separata e produzione in cogenerazione [43]



Dalla figura 16 riportata, appare evidente come a fronte del medesimo risultato (45 energia termica e 38 energia elettrica), l'energia primaria impiegata sia nettamente inferiore quando si utilizza un ciclo con un impianto a cogenerazione (100) rispetto a cicli di produzione elettrica e termica separati ($53+95 = 148$). Risulta, quindi, evidente, come l'uso della cogenerazione sia sinonimo di un impiego più razionale del combustibile primario recuperando in modo efficiente anche il contenuto dei fumi di scarico del motore [43].

Infine, ma non di meno importanza, sono da considerare i vantaggi per l'utente. In particolare, si prevede la sostituzione della classica caldaia con sistemi più innovativi, quali scambiatori di calore, tubazioni e valvole. Uno, fra gli aspetti più rilevanti, è quello relativo alla sicurezza, in quanto vengono quasi totalmente eliminati i rischi come intossicazione ed esplosioni. Inoltre l'assenza della caldaia fa sì che, problematiche legate alla manutenzione o di vario genere, siano a carico del distributore di energia termica e non più dell'utente. Il consumatore ha, pertanto, benefici dal punto di vista economico, in quanto viene contabilizzata l'energia effettivamente consumata [47].

3.4. SVANTAGGI

Il teleriscaldamento presenta alcuni svantaggi che non coinvolgono direttamente il fruitore, bensì riguardano la centrale di produzione poiché fonte di inquinamento atmosferico e acustico. Per tale motivo è di estrema importanza l'ubicazione degli impianti. [47]

Generalmente è necessario considerare i seguenti aspetti:

- minimizzare l'impatto ambientale (emissioni) per gli abitanti;
- minimizzare dispersioni termiche;
- minimizzare i costi di approvvigionamento a fonti secondarie dell'input energetico.

Un ulteriore svantaggio riguarda il lato economico causate dalle dispersioni di calore e di conseguenza è essenziale cercare di ottimizzare l'isolamento e l'uso di termovettori a bassa temperatura.



Capitolo 4

INTRODUZIONE AL CONFRONTO DELLE CITTÀ'

Dal momento che la rete di teleriscaldamento risulta essere una scelta energetica che aiuta nel miglioramento della qualità dell'aria, il Gruppo Iren, secondo il Piano Industriale al 2021, ha previsto l'ampliamento e lo sviluppo della rete TLR nelle seguenti città: [10]

- Torino: il progetto consentirà di coprire più del 60% della città realizzando solo un nuovo e innovativo impianto di produzione a energia solare termica, connesso alla rete TLR;
- Parma: l'ampliamento della rete consentirà di riscaldare un nuovo quartiere denominato BF13;
- Piacenza: progetto che prevede la realizzazione di un anello di rete lungo viale Dante Alighieri con un possibile collegamento al termovalorizzatore Tecnoborgo;
- Reggio Emilia: progetto di potenziamento del servizio nell'area nord della città.

Lo stesso piano ha anche ipotizzato una nuova costruzione nelle città di Asti e Novara.

A tal proposito i report *“Studio degli impatti sulla qualità dell'aria del sistema di teleriscaldamento”* elaborati per i seguenti comuni italiani definiscono gli effetti ambientali per due scenari distinti uno attuale (senza TLR) e uno futuro (con TLR).

Nella presente tesi tali risultati sono stati direttamente utilizzati per confrontare gli scenari delle città in esame. In particolare verranno analizzati:

- differenze progettuali dell'ampliamento/nuova costruzione della rete IREN;
- bilancio energetico;
- bilancio emissivo;
- descrizione del modello DIDEM, utilizzato nei report sopracitati;
- delta-concentrazioni e costi sociali.

La principale comparazione riguarda l'aspetto economico, cioè la quantificazione della variazione dei costi sociali esterni collegata alla variazione di concentrazione di ossidi di azoto, particolato sospeso e monossido di carbonio.

Nei paragrafi successivi vengono richiamati i principali aspetti metodologici con riferimento ai vari report delle città [11], nonché i risultati ottenuti da essi.



4.1. DIFFERENZE PROGETTUALI DELLA RETE IREN ENERGIA

La tabella 2, riporta in dettaglio l'ampliamento/nuova costruzione della rete TLR per ogni città considerata [11], in relazione alla volumetria servita, popolazione esposta, sito, tipo di impianto con rispettiva potenza ed energia termica fornita.

Tabella 1: Differenze progettuali della Rete TLR di Iren per ogni città

Rete di Teleriscaldamento IREN ENERGIA: differenze progettuali						
Città	Volumetria servita (Mm ³)	Popolazione esposta	Sito	Impianto	Potenza/ Capacità	Energia termica (MWh)
ASTI	3,481	100.000	Rilate	Motori endotermici cogenerativi	2 x 9,7 MWt	52.380
			Via Maggiore	Caldaia di integrazione	20 MWt	27.126
				n°2 caldaie di integrazione	2 x 20 MWt	54.253
				Solare termico	370 kWt	350
			Solare fotovoltaico	30 kWe		
NOVARA	5,0035	160.000	Novel Sud Ovest	ciclo combinato alimentato a gas naturale n° 3 caldaie ad acqua calda alimentate a gas naturale	139 MWt 3 x 30 MWt	515.915 (produzione totale 2015) + 55.990 che verranno ceduti al TLR 127.720
PIACENZA	1,780	120.000	Centrale Via Diete di Roncaglia	n° 6 caldaie a gas naturale	4 x 3,26 MW + 2 x 14 MW	22.904
PARMA	5,99895	216.500	Centrale Via Lazio	n° 5 caldaie a gas naturale	4x 15.3 MW + 14MW	7.331
			Centrale Str. Santa Margherita	n° 6 caldaie a gas naturale + n° 4 sistemi di accumulo calore	2 x 22 MW + 500 m3	2.855



			Centrale Campus PAIP	n° 1 caldaia a gas naturale caldaie integrazione/riserva	1.6 MW 40MW	4.137 49.906
TORINO	11.03	2.000.000	Centrale termoelettrica di cogenerazione di Moncalieri	n° 2 Ciclo combinato + n° 3 caldaie di riserva	1439 MWt	1156.417
			Centrale termoelettrica di cogenerazione Torino Nord	Ciclo combinato + n° 3 caldaie di integrazione e riserva	739 MWt	1030.891
			Centrale di integrazione e riserva del BIT	n° 3 caldaia a gas naturale	3 x 85 MWt	11.125
			Centrale di Integrazione e riserva Politecnico	n° 3 caldaia a gas naturale	3 x 85 MWt	5.327
REGGIO EMILIA	13.273	200.000	Polo Energetico	ciclo combinato (cogenerazione) + n° 1 caldaia (cogenerazione) + n° 4 caldaie (tutto alimentato a gas naturale) + n°. 4 sistemi di accumulo calore	52 MWt + 2x38.1 MWt + 24.5 MWt + 2x18.9 MWt + 6.2 MWt +1600m3	398.733
			Centrale Via Sardegna	n° 4 caldaie a gas naturale	4 x 16 MWt	1.783
			Centrale Rete 1	n° 5 caldaie a gas naturale	2 x 8.14 MWt + 5.06 MWt + 2x1.67 MWt	2.936
			Centrale Pappagnocca	n° 3 caldaie a gas naturale	3 x 14 MWt	9.835



4.2. BILANCIO ENERGETICO

Il bilancio energetico è la differenza dell'energia primaria consumata, a parità di energia utile fornita, tra l'ipotetico scenario in cui è presente un sistema di teleriscaldamento alimentato da centrali cogenerative e lo scenario senza TLR. Per definire l'energia primaria consumata, per i distinti scenari, sono state considerate le quote relative alle [11]:

- Centrali di produzione, i cui dati sono stati forniti direttamente da Iren S.p.A.;
- UtENZE residenziali, ottenute considerando i parametri geometrici (superficie riscaldata, altezza) che definiscono il consumo specifico di energia termica, e il periodo di costruzione degli edifici che dà indicazioni sulla dispersione termica dell'involucro (informazioni contenute nei database regionali).

È bene specificare che il fabbisogno annuale di energia delle utenze residenziali è stato calcolato mediante il modello proposto dal Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile (PAES) della Provincia di Torino [12]. Questo modello è stato adottato per tutte le città (solo nel caso di Reggio Emilia si è preferito utilizzare direttamente i dati del progetto GeoSmartCity) in quanto appartenenti alla stessa fascia climatica E. In generale il modello si articola sui seguenti steps:

1. Estrazione dei dati geometrici degli edifici ricompresi nell'area di copertura del TLR;
2. Calcolo del rapporto S/V e della distribuzione media pesata del periodo di costruzione;
3. Adattamento del modello PAES alla distribuzione media pesata del periodo di costruzione
4. Calcolo del fabbisogno di energia primaria per riscaldamento per ciascun edificio compreso nell'area di copertura del TLR, in funzione del rapporto S/V e della media pesata del periodo di costruzione.

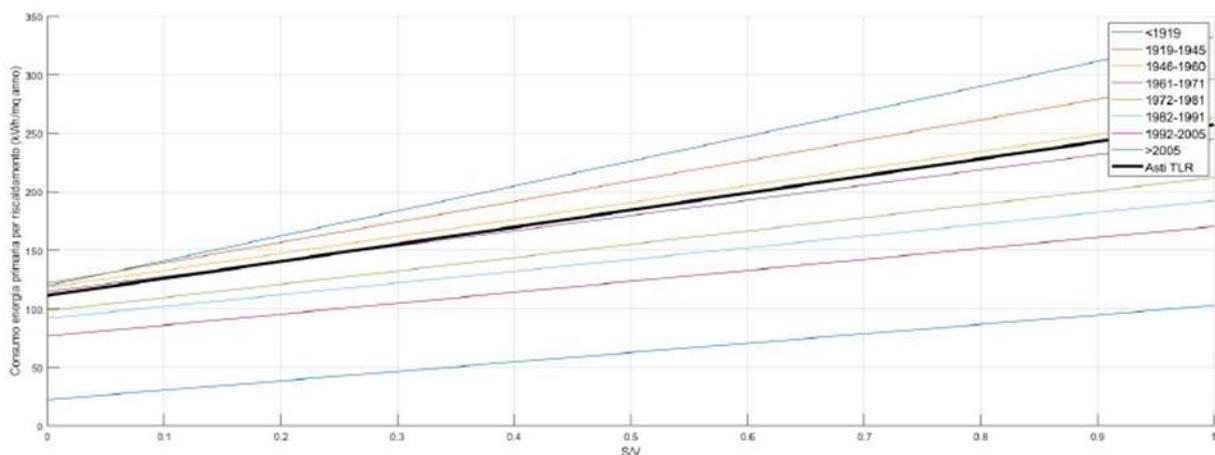


Figura 17: Esempio dell'applicazione del modello proposto da PAES per la città di Asti [11]

In figura 12 è possibile osservare una applicazione del modello per la città di Asti. Tale risultato è stato successivamente corretto per tenere conto degli interventi di riqualificazione edilizia. È stato ipotizzato che tali interventi possano essere stati effettuati a partire dall'anno 2007, per due motivi:

1. Anno dal quale gli sgravi fiscali sugli interventi di riqualificazione hanno iniziato ad avere una certa diffusione;
2. Per tenere conto della riduzione dei consumi dovuti alla crisi economica.



Per quantificare la possibile riduzione dei consumi dati dagli interventi di miglioramento sono stati analizzati i seguenti studi:

- Rapporto ENEA sulle detrazioni fiscali del 65% per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente (2018)
- Rapporto CTI sull'attuazione della certificazione energetica degli edifici in Italia (2014)

In tabella 3 viene riportato il confronto del bilancio energetico per le varie città e per entrambi gli scenari. È possibile osservare che per alcune di queste vi sono più casi distinti, a seconda delle condizioni che si sono presentate. Nella città di Novara, infatti, è presente la centrale di cogenerazione appartenente alla società esterna Novel S.p.A., già operativa dal 2007. Attualmente l'energia termica prodotta viene ceduta all'azienda Radici Chimica S.p.A. e di conseguenza sono stati analizzati due casi differenti:

1. considerare il calore proveniente dalla centrale Novel come un sotto-prodotto di un'attività principale esistente, e pertanto non tenerne conto nel calcolo del bilancio energetico e nella dispersione degli inquinanti;
2. considerare l'attività della centrale Novel nel calcolo del bilancio energetico complessivo e nella simulazione della dispersione degli inquinanti.

Per la città di Piacenza, invece, data già la presenza del termovalorizzatore Tecnoborgo e della centrale a gas naturale A2A, i casi proposti sono i seguenti:

1. Massimo utilizzo del calore di scarto: la rete TLR è alimentata principalmente dal calore di scarto dell'impianto Tecnoborgo e dalla centrale A2A. La centrale di Diете di Roncaglia di Iren S.p.A. entra in esercizio solamente per coprire i picchi di richiesta;
2. Nessun utilizzo del calore di scarto: la rete TLR è alimentata solamente dalla centrale di Diете di Roncaglia e non prevede l'utilizzo del calore di scarto dagli impianti Tecnoborgo ed A2A.

È bene evidenziare, inoltre, che per lo scenario senza TLR, il fabbisogno di energia termica è stato calcolato sia secondo il PAES della regione Piemonte e sia secondo il PAES del comune di Piacenza. Infine per la città di Torino i casi presi in esame sono i:

1. Confronto tra scenario con sistema di cogenerazione e teleriscaldamento all'attuale livello di sviluppo (anno 2016) rispetto ad uno scenario pregresso caratterizzato dall'assenza di TLR;
2. Confronto tra scenario attuale (anno 2016) rispetto ad uno scenario futuro (anno 2022) caratterizzato da un'estensione della rete di teleriscaldamento.



Tabella 2: Bilancio dell'energia consumata a parità di energia utile fornita per le sei città

CITTA'	Energia primaria consumata a parità di energia utile fornita (GWh)				Differenza	
	Scenario					
	TLR		NO TLR			
ASTI	221.93		296.17		- 74.24 (25%)	
NOVARA	1.	679.58		685.64		- 6.06 (0.4%)
	2.	137.48		217.04		- 79.56 (36%)
PARMA	75.14		277.95		- 202.81 (73%)	
PIACENZA	1.	18.93	PAES PC	PAES PIEM	PAES PC	PAES PIEM
			76.77	85.35	- 57.84 (75%)	- 66.42 (77%)
TORINO	2.	76	76.77	85.35	- 0.77 (1 %)	- 9.35 (10 %)
	1.	9992		14451		- 4.459 (30%)
REGGIO EMILIA	2.	Futuro	Attuale	-		- 409 (3.5%)
		10973	11.392			
REGGIO EMILIA	902.02		1329.37		- 427.35 (32%)	

Come si evince dalla tabella 2, il trend generale sulla riduzione del consumo è positiva. Tra i risultati ottenuti, le città di Parma e Piacenza, presentano una marcata diminuzione (più del 70%). Questo è dovuto al fatto che il calore proveniente dal termovalorizzatore è stato considerato come un sotto-prodotto di altre attività esistenti (tipo lo smaltimento dei rifiuti) e quindi non è stato considerato nel calcolo del bilancio energetico.



4.3. BILANCIO EMISSIVO

Il bilancio energetico assieme a quello emissivo, rappresentano uno strumento che fornisce un quadro sintetico tra l'impresa e l'ambiente naturale. Infatti il bilancio ambientale viene sostanzialmente utilizzato per:

- evidenziare le principali pressioni esercitate dall'attività sull'ambiente;
- descrivere lo stato delle risorse ambientali nel territorio;
- valutare, attraverso il confronto con obiettivi prefissati, l'efficacia delle politiche ambientali adottate dall'impresa per migliorare le proprie prestazioni ambientali.

I dati del bilancio emissivo [11] sono stati ottenuti su base temporale di un anno, confrontando sempre i due scenari a parità di energia utile (termica ed elettrica) fornita alle utenze. Quindi, anche in questo caso sono state calcolate le quote relative a:

- Centrali di produzione Iren Energia: il flusso massico di CO e NO_x è direttamente definito dal sistema di monitoraggio in continuo (SME) dell'impianto, ed è quindi un dato che è stato direttamente acquisito ed utilizzato. Nel caso del PM, per il quale non erano disponibili dati orari, il flusso emissivo è stato invece ottenuto moltiplicando l'energia prodotta per il fattore di emissione medio. È necessario evidenziare che, per le centrali di cogenerazione, il flusso emissivo fornito comprende sia la quota dovuta alla produzione di energia elettrica che quella dovuta alla produzione di energia termica in quanto non è possibile disgregarli;
- Utenze residenziali: il flusso orario di inquinanti è stato calcolato applicando un fattore di emissione al flusso energetico (g di sostanza per MWh prodotto). Secondo i dati del censimento degli edifici fornito da Iren Energia, pressoché la totalità degli edifici che verranno allacciati alla rete TLR sono attualmente alimentati a gas naturale. Per cui i fattori di emissione selezionati sono quelli associati a tale combustibile [11] e derivano da tre fonti, visibili in tabella 3:

Tabella 3: Fattori di emissione considerati [11]

Opzione	Fattore di emissione	NO _x	CO	TS P	Fonte
1	Regione Piemonte - adeguamento (g/MWh)	80	90	10	D.G.R. Piemonte 4 agosto 2009, n. 46- 11968, Allegato 1, Paragrafo 1.5. Valore di riferimento per generatori di calore di nuova installazione e valore di adeguamento per generatori esistenti (Regione Piemonte 2009).
2	Studio di approfondimento Polito	123,8	97,6	3,5	8 diverse fonti provenienti da prove di laboratorio (Stazione sperimentale dei combustibili, Innovhub), database di riferimento (EMEP/EEA, ISPRA, INEMAR) e normativa (Regione Piemonte, Regione Emilia Romagna)
3	Regione Emilia Romagna	135 – 273 194*	90 – 182 129*	4,5 - 9,1 6,5 *	D.G.R. Emilia Romagna n° 1769 del 22/11/2010. Il valore dipende da assunzioni sulla combustione negli impianti (eccesso d'aria e PCI del combustibile). * dato preso come riferimento per il calcolo del bilancio emissivo, considerando un eccesso d'aria di combustione del 20% e un PCI del gas naturale di 9,6 kWh/m ³



L'opzione 1 è stata scelta come caso base, in quanto risulta maggiormente cautelativa, mentre quella 2 è stata considerata rappresentativa ed infine per le città dell'Emilia Romagna è stata considerata anche l'opzione 3. È bene specificare che per il calcolo del bilancio emissivo del PM è stato esaminato solo il fattore emissivo relativo all'opzione 2 e 3, in quanto quello relativo a 1 risulta non in linea con la media dei valori riportati in letteratura.

Nei paragrafi che seguono vengono riportati i risultati del bilancio emissivo relativo ai seguenti contaminanti quali CO, NO_x, PM e infine CO₂ correlati ai possibili effetti che possono provocare sulla salute umana o sull'ambiente.



4.3.1. MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)

Il Monossido di Carbonio è un tipo di inquinante delle aree urbane derivante principalmente dai gas di scarico degli autoveicoli e dagli impianti di riscaldamento. Si presenta come un gas incolore, inodore, insapore, infiammabile e molto tossico. Quest'ultima caratteristica deriva dalla sua affinità con l'emoglobina (200-300 volte maggiore rispetto a O₂) la quale gli permette di creare legami ostacolando così l'ossigenazione dei tessuti, dei muscoli e del cervello, con conseguenti effetti acuti (senso di affaticamento, sonnolenza, mal di testa) che possono portare alla morte o ad effetti cronici (diminuzione delle prestazioni fisiche ed intellettuali, aumento di cardiopatie e di disturbi circolatori). La tabella 4 riporta i risultati del bilancio emissivo di CO. In generale si evince un generale miglioramento in quanto i valori negativi in verde rappresentano le tonnellate annue evitate in atm.

Tabella 4: Bilancio emissivo relativo al Monossido di Carbonio

CITTA'	Fattore di emissione CO (kg/GWh)		CO emesso (t/y)				Differenza	
			Scenario					
			TLR		NO TLR			
ASTI	90		9.52		22.96		- 13.44 (58%)	
	97.5				24.11		-14.59 (60%)	
NOVARA	1.	90	18.7		29.53		-10.83 (36%)	
		97.5			31.16		-12.46 (40%)	
	2.	90	8.19		19.53		- 11.34 (58%)	
		97.5			21.16		- 12.97 (61%)	
PARMA	90		0.824		25.01		- 24.19 (96%)	
	97.5				27.10		- 26.28 (97%)	
	129				35.86		- 35.04 (98%)	
PIACENZA	1.	90	0.032		PAES PC	PAES PIEM	PAES PC	PAES PIEM
					6.91	7.68	-6.88 (99%)	- 7.65 (99%)
					7.49	8.32	- 7.46 (99%)	- 8.29 (99%)
	2.	80	0.128		9.9	11.01	- 9.87 (99%)	- 10.98 (99%)
					6.91	7.68	- 6.78 (98 %)	-7.55 (98 %)
					7.49	8.32	- 7.36 (98%)	- 8.19 (98 %)
					9.9	11.01	- 9.98 (98 %)	- 10.88 (98 %)
					123.8			
194								
TORINO	1.	90	121.1		1021.1		- 900 (88%)	
		2.	90	Futuro	Attuale	-		- 75.2 (33%)
	152.7			227.9				
REGGIO EMILIA	90		9.66		105.12		- 95.46 (90%)	
	97.5				110.97		-101.31 (91%)	
	129				135.16		- 125.5 (92%)	



4.3.2. OSSIDI DI AZOTO (NO_x)

Le specie chimiche di ossidi di azoto che riguardano l'inquinamento atmosferico sono: NO e NO₂. Tali composti derivano principalmente dalla combustione dei combustibili fossili usati sia nelle centrali termoelettriche sia nei riscaldamenti domestici ma anche in autoveicoli a combustione interna. Dato che gli NO_x sono dei gas, la sola via di esposizione è rappresentata dall'inalazione. Per cui l'esposizione continua a questi gas può provocare irritazione delle vie aeree, bronchiti, edema polmonare ed enfisema. In tabella 5 si riportano i risultati del bilancio emissivo per tale composto.

Tabella 5: Bilancio emissivo relativo agli NO_x

CITTA'	Fattore di emissione NO _x (kg/GWh)		NO _x emesso (t/y)				Differenza	
			Scenario					
			TLR		NO TLR			
ASTI	80		9.52		30.24		-20.72 (68%)	
	123.8				36.98		-27.46 (74%)	
NOVARA	1.	80	100.6		105.36		-4.76 (4.5%)	
		123.8			114.87		-14.27 (12%)	
	2.	80	8.19		17.36		- 9.17 (52%)	
		123.8			26.87		- 18.68 (70%)	
PARMA	80		5.010		22.23		- 17.22 (77%)	
	123.8				34.41		- 29.40 (85%)	
	194				53.92		- 48.91 (90%)	
PIACENZA	1.	80	2.394		PAES PC	PAES PIEM	PAES PC	PAES PIEM
		123.8			6.14	6.14	-3.75 (61%)	- 4.43 (65%)
		194			9.50	9.50	- 7.11 (75%)	- 8.17 (77%)
	2.	80	9.613		14.89	14.89	- 12.50 (84%)	- 14.17 (85%)
		123.8			6.14	6.83	+ 3.47 (36 %)	+ 2.78 (29 %)
		194			9.50	10.56	+ 0.11 (1 %)	- 0.95 (9 %)
	TORINO	1.	80	327.7		1650.3		- 1322.7 (80%)
			120			1798.5		- 1470.8 (82%)
183.6			2034.1			- 1706.4 (83%)		
2.			Futuro	Attuale	-		-60.8 (13%)	
		80	410.6	471.4				
		120		498.7				
		183.6		542.2				



REGGIO	80	38.1	132.06	- 93.96 (71%)
EMILIA	123.8		165.81	-127.7 (77%)
	194		219.90	- 181.8 (82%)

Anche in questo caso il teleriscaldamento comporta un miglioramento della qualità dell'aria in termini di tonnellate annue di NO_x evitate. Caso particolare è però rappresentato da Piacenza. Infatti per lo scenario 2, ovvero nel caso limite in cui la rete venga alimentata esclusivamente dalle caldaie di Via Diete di Roncaglia, il bilancio emissivo risulta sfavorevole per NO_x ma decisamente favorevole per PM, CO e CO₂.

4.3.3. PARTICOLATO SOSPESO

Il particolato atmosferico [26] è costituito da microscopiche particelle e goccioline di origine organica e inorganica in sospensione dell'aria. Esso può avere sia un'origine naturale (attività vulcanica, alterazione della roccia e terreno in funzione del vento, etc) sia antropica. Quest'ultima ha un'impronta maggiore dovuto soprattutto ai motori diesel, allo sfregamento di pneumatici sull'asfalto e dagli impianti termici. Ne discende che in base all'origine, il particolato presenta una composizione molto varia in quanto può contenere metalli (Pb, Cd, Zn, Ni, Cu), fibre di amianto, sabbie, ceneri, solfati, nitrati, idrocarburi policiclici, polveri di carbone e di cemento.

Oggi il particolato atmosferico è ritenuto l'inquinante con il maggior impatto sulla salute umana: studi epidemiologici hanno evidenziato associazioni tra le concentrazioni del PM10 e un incremento di mortalità e ricoveri ospedalieri. Questo è dovuto non solo per la loro concentrazione e composizione chimica, ma anche dalla dimensione delle particelle stesse. Infatti le particelle di dimensioni inferiori costituiscono un pericolo maggiore per la salute umana, in quanto possono penetrare in profondità nell'apparato respiratorio (figura 18).

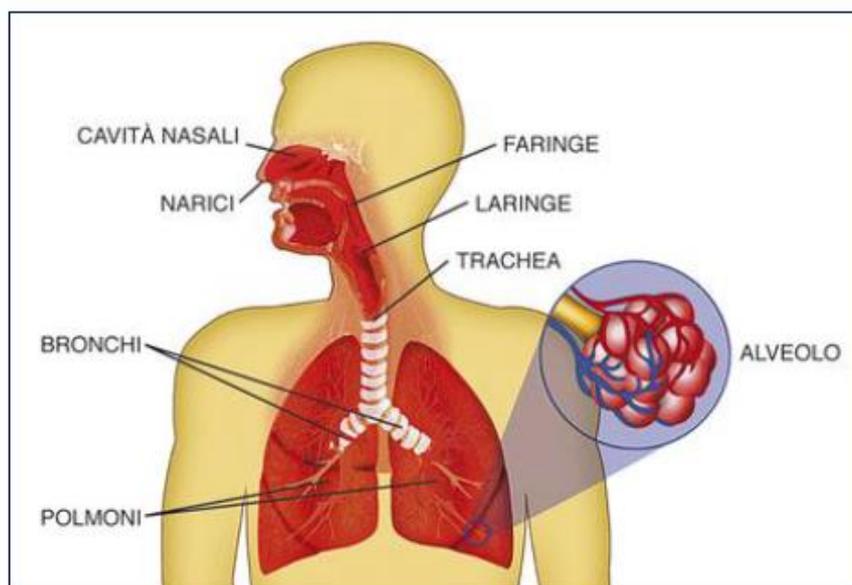


Figura 18: Parti principali dell'apparato respiratorio [27]

In via generale le particelle con: [26]

- diametro > ai 10 µm si fermano nelle prime vie respiratorie (bocca, narici, faringe e laringe) provocando faringite, laringite e secchezza delle mucose;



- diametro tra i 2.5 e i 10 µm raggiungono la trachea e i bronchi causando laringite, tracheite, bronchite, fibrosi polmonare, diminuzione della funzionalità respiratoria e tumori;
- diametro < ai 2.5 µm possono raggiungere gli alveoli polmonari provocando sempre una diminuzione della funzionalità respiratoria, broncospasmo, danno cellulare e tumori.

Infine il particolato è stato anche inserito dall’Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) tra i cancerogeni di gruppo 1 (agenti sicuramente cancerogeni per l’uomo).

Come si evince dal trend positivo (tabella 6) del bilancio emissivo, il teleriscaldamento comporterebbe un grande vantaggio sul miglioramento della qualità dell’aria e quindi, in questo specifico caso, soprattutto sulla salute dell’uomo.

Tabella 6: Bilancio emissivo sul particolato atmosferico

CITTA'	Fattore di emissione PM (kg/GWh)		PM TOT emesso (t/y)				Differenza	
			Scenario					
			TLR		NO TLR			
ASTI	3.5		0.36		1.54		- 1.18 (76%)	
	10				2.54		- 2.54 (85%)	
NOVARA	1.	3.5	4.07		4.28		- 0.21 (4.9%)	
		10			5.69		- 1.62 (28%)	
	2.	3.5	0.37		0.76		- 0.39 (51%)	
		10			2.17		- 1.8 (83%)	
PARMA	10		0.017		2.78		- 2.76 (99%)	
	3.5				0.98		0.96 (98%)	
	6.5				1.81		- 1.79 (99%)	
PIACENZA	1.		0.008		PAES PC	PAES PIEM	PAES PC	PAES PIEM
		10			0.77	0.85	- 0.76 (99%)	- 0.84 (99%)
		3.5			0.27	0.29	- 0.26 (97%)	- 0.28 (99%)
		6.5	0.5	0.55	- 0.49 (98%)	- 0.54 (98%)		
	2.	10	0.032		0.77	0.85	- 0.74 (95%)	- 0.82 (96%)
		3.5			0.27	0.29	- 0.24 (88%)	- 0.26 (89%)
		6.5			0.5	0.55	- 0.47 (94%)	- 0.52 (94%)
	TORINO	1.	4.4	16.3		91.5		- 75.2 (82%)
2.			4.4	Futuro	Attuale	-		- 3.8 (15%)
	20.4	24.2						
REGGIO EMILIA	10		0.52		11.62		- 11.1 (95%)	
	3.5				6.61		- 6.09 (92%)	
	6.5				8.91		- 8.39 (94%)	



4.3.4. ANIDRIDE CARBONICA (CO₂)

L'anidride carbonica è il tipico prodotto che si ottiene dalla combustione dei composti organici. In natura è presente in forma di gas, ma a temperature inferiori a -78°C si trova anche in forma solida (ghiaccio secco) oppure sotto elevate pressioni può essere liquefatto. Tale composto è innocuo per l'uomo. Infatti la funzione respiratoria è indipendente dai livelli di CO₂, in ambiente aperti. Al contrario, l'accumulo in ambiente chiusi prova fenomeni di soffocamento e se presente in concentrazioni maggiori del 6% causa danni acuti. Il danno principale che provoca questo composto è sull'ambiente. Infatti l'anidride carbonica è uno dei fondamentali gas effetto serra [33]. Da anni, ormai, la sua concentrazione in atm è tenuta in costante controllo, in quanto è stato dimostrato che al suo generale incremento corrisponda un aumento della temperatura globale. Questo fenomeno è causato dalla capacità del gas di assorbire i raggi infrarossi. Nel bilancio emissivo, effettuato nel seguente studio, sono stati considerati anche i vantaggi che il teleriscaldamento avrebbe sull'ambiente in termini di tonnellate annue di CO₂ evitate. Come si può osservare dai risultati (tabella 7) il trend in generale è molto positivo.

Tabella 7: Bilancio emissivo sull'anidride carbonica

CITTA'	Fattore di emissione PM (kg/MWh)		CO ₂ emessa (kt/y)				Differenza	
			Scenario					
			TLR		NO TLR			
ASTI	198		43.94		58.64		- 14.7 (25%)	
NOVARA	1.	198	332.55		333.75		- 1.2 (0.4%)	
	2.	198	27.22		42.97		- 15.75 (36%)	
PARMA	198		14.88		55.03		- 40.15 (73%)	
PIACENZA	1.	198	3.75		PAES PC	PAES PIEM	PAES PC	PAES PIEM
					15.20	16.90	- 11.45 (75%)	- 13.15 (77%)
TORINO	2.	198	15.05		15.20	16.90	- 0.15 (1%)	- 1.85 (10%)
	1.	198	1.978		2.861		- 0.883 (31%)	
REGGIO EMILIA	2.	198	Futuro	Attuale	-		- 0.081 (3.6%)	
			2.172	2.253				
REGGIO EMILIA	198		178.60		263.22		- 84.62 (32%)	



4.4. DESCRIZIONE DEL MODELLO DIDEM

I risultati del bilancio ambientale, fino adesso ottenuti, non rappresentano un vero e proprio indice della qualità dell'aria, in quanto come già spiegato nel capitolo 1, i flussi dei contaminanti emessi in atm sono soggetti a una serie di fenomeni. Pertanto, è indispensabile tenere conto di ciò per riuscire a calcolare l'effettiva concentrazione al suolo degli inquinanti. I delta-concentrazioni e delta-costi esterni associati ai rispettivi scenari, sono stati calcolati dallo "Studio degli impatti sulla qualità dell'aria del sistema di teleriscaldamento" mediante un modello integrato di calcolo in codice MATLAB®, denominato DIATI Dispersion and Externalities Model (DIDEM) [28]. Il modello DIDEM definisce gli impatti ambientali ed i costi esterni sulla salute mediante una metodologia del "sentiero di impatto", che si articola nel seguente modo:

- 1 fase: si individuano le caratteristiche tecnologiche principali del ciclo produttivo, i flussi emessi, le concentrazioni delle sostanze inquinanti e le caratteristiche del camino (numero, altezza e diametro).
- 2 fase: consiste del calcolo della concentrazione media annua delle sostanze inquinanti al suolo sulla base di modelli atmosferici di dispersione; tale modellistica ha la necessità di tenere conto non solo del trasporto fisico delle sostanze inquinanti dovuto ai venti ma anche della trasformazione chimica delle stesse.
- 3 fase: individua i soggetti esposti alle sostanze inquinanti nella zona considerata e le caratteristiche corrispondenti (il numero, la distribuzione e la classe di età delle popolazioni interessate, il tipo e la distribuzione dei raccolti, etc.). Nella stessa fase sono applicate opportune funzioni concentrazione-risposta al fine di determinare gli effetti sui vari ricevitori (questi effetti sono misurati in casi annui aggiuntivi di bronchite cronica o di attacchi di asma per la salute umana, in perdita di raccolto nel caso dei danni sull'agricoltura, ecc.). Le funzioni concentrazione-risposta nel caso della salute umana derivano sia da studi epidemiologici osservazionali sia da studi di laboratorio. Nei report [11] tale funzione è stata definita tramite un valore di rischio relativo (RR), che indica l'incremento di probabilità di incidenza associata ad un determinato aumento di concentrazione. La pendenza della suddetta funzione è stata ricavata con la seguente formula:

$$s_{CR} = \frac{n(RR - 1)}{p_{tot}}$$

Dove:

- n è il numero medio di casi riscontrati in un anno. I dati di incidenza annui sono stati estratti dal Morbidity Database e dal Mortality Database del WHO, consultabili online;
 - p_{tot} è la popolazione soggetta ad un tipo particolare di effetto, anche essa consultabile sul database generale WHO;
 - RR il valore di rischio relativo, fornito dal documento del progetto HRAPIE [29].
- 4 fase: monetizza gli impatti fisici calcolati sulla base delle tecniche indirette descritte. I costi esterni sono stati ottenuti sulla base del progetto ExternE (1998), progressivamente integrato e aggiornato da numerosi studi internazionali e da modelli



di nuova applicazione. L'equazione generale utilizzata per determinare i costi esterni è la seguente:

$$C = \sum_r \sum_i (\Delta C_r p_r) s_{CRi} m_i$$

In cui:

- C è il danno (costo aggiuntivo o evitato) espresso in €/anno dovuto alla somma di tutti gli i -esimi effetti sulla salute (ad esempio bronchite cronica, asma ecc.), su tutte le r celle di calcolo del dominio;
- ΔC_r è la differenza di concentrazione media al suolo dell'inquinante nella r -esima cella del dominio di calcolo, così come calcolata al punto precedente;
- p_r è la popolazione esposta a ciascun tipo di effetto sulla salute;
- s_{CRi} è la pendenza della funzione concentrazione-risposta per ciascun effetto i -esimo;
- m_i è la monetizzazione di ciascun specifico effetto sulla salute (€/caso o €/anni di vita persi).

Quindi tale formula viene risolta per ciascuno effetto e per ciascuna cella del dominio di calcolo. Dunque il modello DIDEM (figura 19) organizza i dati di emissione orari delle varie sorgenti in un formato compatibile al modello di dispersione (SPRAY o CALPUFF), ed esegue la simulazione. Una volta terminata, il codice estrae e ri-formatta le griglie di concentrazione in uscita, e calcola le differenze di concentrazione. Queste ultime sono successivamente trasferite al modulo finale che calcola il delta-costi esterni, il quale rappresenta il nucleo del modello.

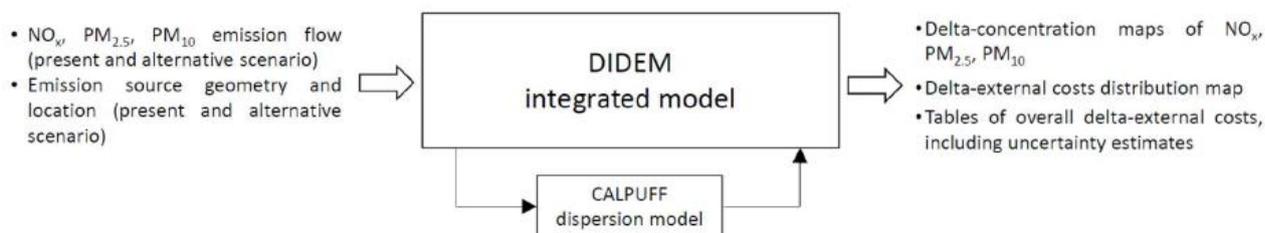


Figura 19: Schema di funzionamento del modello DIDEM [28]

Il programma quindi, genererà i seguenti output:

- mappe di differenza di concentrazione di NO_x, CO e TSP sul dominio di calcolo considerato;
- mappe di distribuzione dei delta-costi esterni sul modello di calcolo considerato;
- tabelle riportanti la variazione totale di costi esterni associati agli scenari considerati.

Di seguito vengono riportate, a titolo esemplificativo, due mappe relative al caso studio di Asti [11], in cui è possibile osservare la dispersione del contaminante NO_x (figura 20) e successivamente (figura 21) la differenza tra scenario futuro (con TLR) e situazione attuale (senza TLR).

Nel paragrafo successivo verranno presentati i delta-concentrazioni e delta-costi esterni relativi alle sei città.

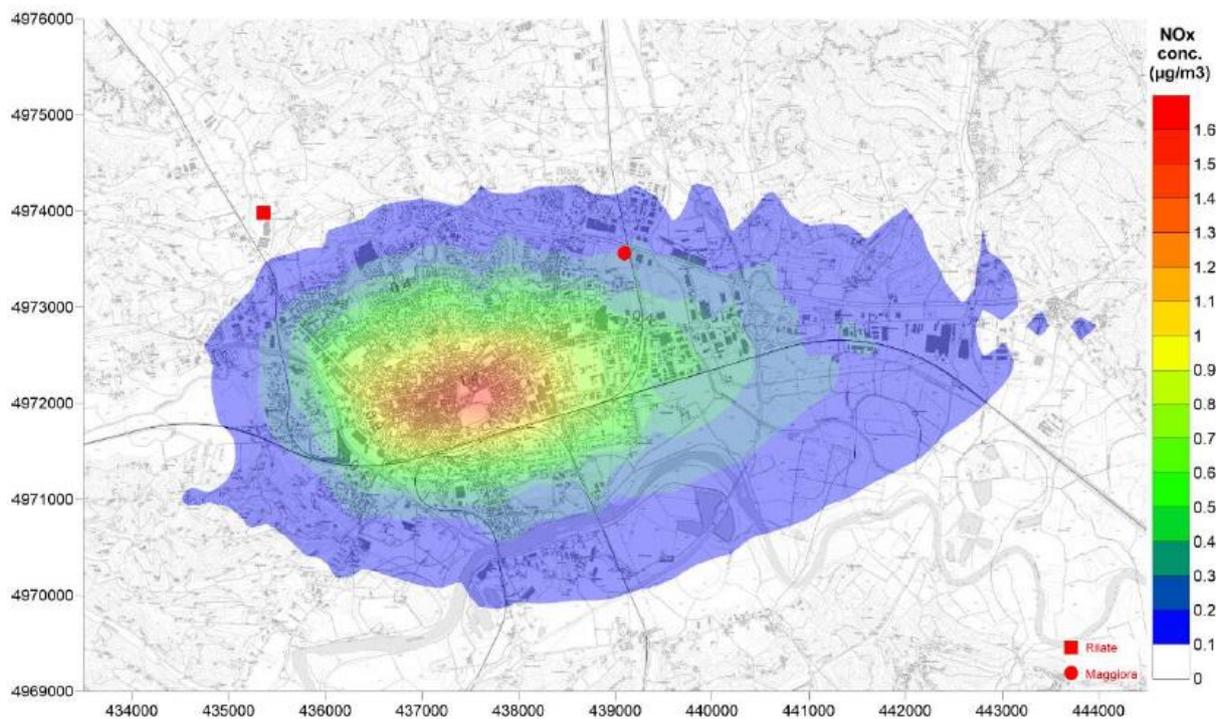


Figura 20: Mappa di concentrazione di NO_x, media annuale. Contributo degli impianti termici civili. [11]

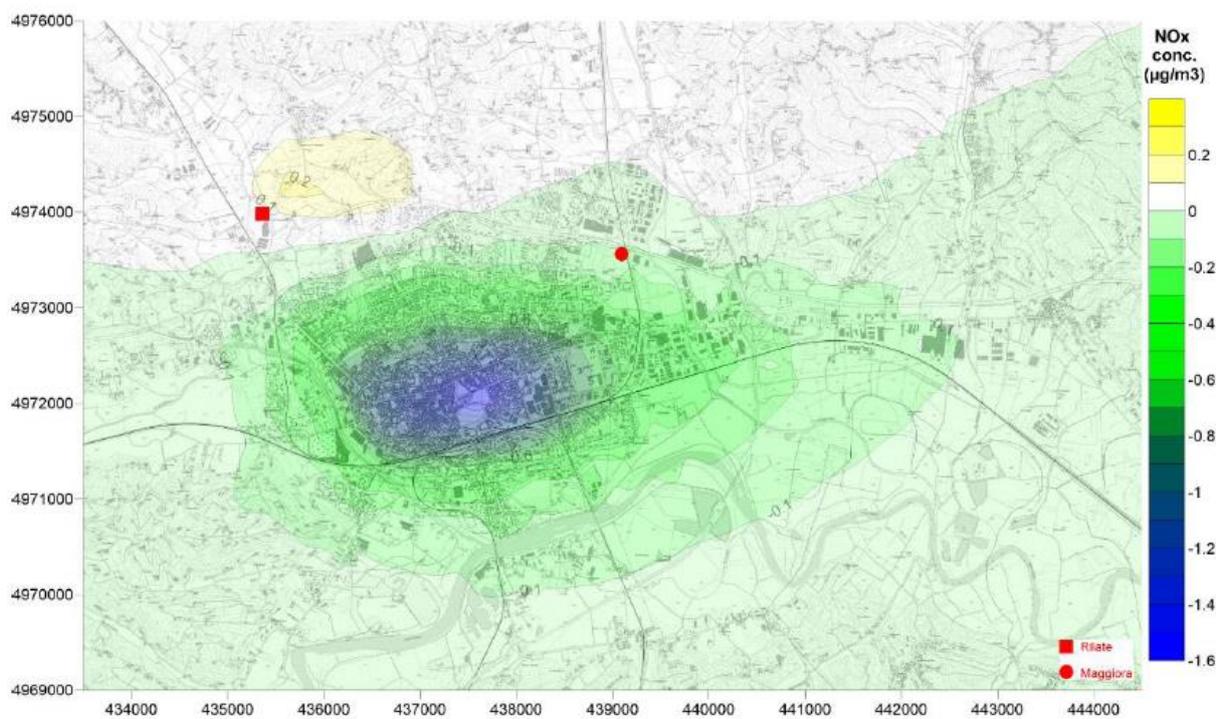


Figura 21: Mappa di concentrazione di NO_x, media annuale. Differenza tra scenario futuro (con TLR), e situazione attuale (senza TLR) [11].



4.4.1. DELTA-CONCENTRAZIONI E COSTI SOCIALI

La dispersione degli inquinanti NO_x, PM e CO è stata simulata con il modello SPRAY o CALPUFF sull'intero anno, come appunto accennato nel paragrafo precedente. Nella tabella 8 vengono riportati gli intervalli delle delta concentrazioni per ogni contaminante, analizzando per ciascuna città le differenze relative sia ai diversi fattori di emissioni sia ai diversi scenari che si sono presentati. È bene evidenziare che per quanto riguarda le emissioni prodotte dalle centrali di cogenerazione, non potendo effettuare una disaggregazione dei dati, sono stati considerati i flussi totali di inquinanti, generati sia dalla produzione di energia elettrica che dalla produzione di energia termica. Invece, per la simulazione delle emissioni prodotte dagli impianti termici civili è stata considerata solo la quota dovuta alla produzione di energia termica per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria.

Tabella 8: Risultati finali relativi alle delta-concentrazioni e costi sociali

CITTA'	Fattore di emissione PM (kg/MWh)	ΔC NO _x (ug/m ³)	ΔC PM (ug/m ³)	ΔC CO (ug/m ³)	COSTI SOCIALI (€/y) (GRUPPO A)
ASTI	Opzione 1	-1,5 ÷ +0,2	-0,07 ÷ +0,008	-1,7 ÷ +0,04	-42.000 ÷ -133.000
	Opzione 2	-2,3 ÷ +0,2			-68.000 ÷ -202.000
NOVARA	1. Opzione 1	-0,3 ÷ -1,4	-0,01 ÷ -0,06	-0,3 ÷ -1,5	-116.000 ÷ -168.000
	2. Opzione 2	-0,6 ÷ -2,2			-19.100 ÷ -273.000
PARMA	Opzione 2	-0,3 ÷ -2,1	-0,01 ÷ -0,06	-0,1 ÷ -1,7	-62.000 ÷ -88.000
	Opzione 3	-0,2 ÷ -3	-0,01 ÷ -0,12	-0,2 ÷ -2,2	-103.000 ÷ -148.000
PIACENZA	1.	Opzione 2	-0,02	-0,6	-19.400 ÷ -27.700
		Opzione 3	-0,04	-0,8	-32.200 ÷ -45.900
	2.	Opzione 2	-0,02 ÷ +0,4	-0,6	-11.700 ÷ -16.800
		Opzione 3	-0,04 ÷ +0,1	-0,8	-26.600 ÷ -31.100
TORINO	1.	Opzione 1	-0,1 ÷ -0,3	-1 ÷ -7,5	-2.490.000 ÷ -12.245.000
		Opzione 2			-2,5 ÷ -8
	2.	Opzione 1	-0,08	-0,3 ÷ -2	-288.400 ÷ -1.567.000
		Opzione 2			-0,5 ÷ -2,5
REGGIO EMILIA	Opzione 1	-0,6 ÷ -4	-0,003 ÷ -0,18	-1 ÷ -5	-46.900 ÷ -148.400
	Opzione 2	-1 ÷ -6			-72.500 ÷ -212.612



In linea generale il sistema di teleriscaldamento comporta una riduzione delle concentrazioni al suolo dei contaminanti in esame sull'intera area urbana, migliorando così la qualità dell'aria. È possibile osservare che per la città di [11]:

- Asti: viene riscontrata una riduzione media di concentrazione, in particolare nella zona centrale. Viene rilevato solo un leggero aumento di concentrazione media su un'area nord del centro abitato dovuto dalle emissioni della centrale di Rilate. Tale aumento però riguarda solo un'area molto limitata e scarsamente popolata;
- Novara: l'intera area urbana presenta una riduzione media di concentrazione, in particolare nella zona centrale per entrambe le simulazioni. Una leggera differenza di riduzione si è ottenuta a seconda dei fattori di emissioni utilizzati. In particolare con l'opzione 2 (Studio di approfondimento Polito) si ha una riduzione maggiore;
- Parma: si ha una riduzione media di concentrazione nella zona a nord-nord-est del centro della città. Tale diminuzione risulta comunque contenuta, per via del fatto che entrambi i sistemi sono alimentati a gas naturale, combustibile avente un basso impatto emissivo di particolato;
- Piacenza: anche in questo caso la riduzione di concentrazione risulta contenuta, per via dei sistemi alimentati a gas naturale. Il caso migliore è rappresentato dallo scenario 1 in cui si ha un recupero termico dalle centrali A2A e Tecnoborgo;
- Torino: i massimi valori di riduzione di concentrazione sono localizzati nell'area ai piedi dei rilievi collinari situati ad est del centro abitato;
- Reggio Emilia: si ha una diminuzione media di concentrazione sull'intera area urbana con picchi di riduzione localizzati nella parte centrale.

Per quanto riguarda i costi sociali, come già descritto in precedenza, sono stati calcolati mediante la metodologia ExternE, la quale applica l'integrazione tra l'analisi indiretta a valle del metodo diretto. Tale unione è dovuta principalmente al fatto che entrambi i metodi, indiretti e diretti, se usati singolarmente, rischiano di effettuare valutazioni parziali dell'intero processo. Infatti:

- i metodi indiretti, sono basati sulla percezione del danno che la gente pensa di ricevere a causa dell'inquinamento atmosferico; conseguentemente, questa tecnica osserva i comportamenti reali della gente che riceve il danno ed ottiene da questi comportamenti una valutazione puramente economica. Il principio fondante nella valutazione monetaria è l'ottenimento della disponibilità a pagare al fine di evitare un effetto negativo o a essere pagati per accettarlo. Le tecniche principali di tali metodi sono: la valutazione edonistica, il metodo del costo di viaggio e la valutazione contingente;
- i metodi diretti, differentemente, non effettuano valutazioni economiche ma un'analisi tecnica prodotta, basata sulla modellistica atmosferica della dispersione e su funzioni tossicologiche di dose-risposta, valutando, in termini statistici, la probabilità di determinati eventi negativi.

Ne discende che dall'integrazione di queste due analisi si ottiene il meglio della multidisciplinarietà dell'approccio. Nella tabella 9, quindi, vengono riportati i costi sociali correlati ai vari scenari e delta concentrazione. Tali valori fanno riferimento ad associazioni tra inquinante ed effetto appartenenti alla categoria del gruppo A, cioè quelle associazioni per le quali esistono sufficienti dati da assicurare una stima affidabile degli effetti (livello di



confidenza alto). Il contributo innovativo di tale metodologia, è rappresentato dal fatto che le esternalità, appena calcolate, possono essere espresse anche in termini di riduzione di casi di mortalità o incidenza di patologie di diverso tipo [11]. In Tabella 9 è riportata la diminuzione del numero di decessi e di ricoveri ospedalieri collegata alla riduzione di concentrazione, considerando le associazioni effetto/risposta appartenenti sia al gruppo A sia al B (associazioni per le quali esiste una maggiore incertezza sulla precisione dei dati utilizzati per la stima degli effetti, livello di confidenza medio).

Tabella 9: Variazione di incidenza media correlata ai costi sociali

Città	Costi Sociali (Gruppo A+B)	Diminuzione numero di morti (numero di casi/anno)	Diminuzione di ricoveri ospedalieri (numero di casi/anno)	Diminuzione di casi o sintomi di asma e bronchite nei bambini	Diminuzione di giorni di lavoro persi per malattia
Asti	-853.000	6	2	12	114
Novara	-1.352.000	7	2	14	178
Torino	-39.329.000	295	89	637	8695
Reggio Emilia	-800.800	6	2	12	112

Se si considera una valutazione monetaria media in Europa per i giorni di lavoro persi pari a 156 €/giorno [30] si avrebbe un risparmio economico, in termini di costi esterni, pari a 17.784 €/anno per Asti, 27.768 €/anno per Novara, 1.365.420 €/anno. per Torino e 17.472 €/anno per Reggio Emilia.



Capitolo 5

INDICE DI QUALITÀ AMBIENTALE

Dopo un primo confronto effettuato mediante i risultati forniti dai report “*Studio degli impatti sulla qualità dell’aria del sistema di teleriscaldamento*” per le sei città [11] e vista la grande quantità di informazioni, si è deciso di sintetizzare il tutto calcolando un indice di qualità ambientale, cioè “*una grandezza adimensionale che rappresenta sinteticamente lo stato complessivo dell’inquinamento atmosferico*” [31]. Questo indice viene ottenuto dalla somma delle variabili d’inquinamento, ovvero “*quantità fisica, chimica o biologica che serve come misura dell’inquinamento ambientale*” [31]. Queste variabili indicano i livelli di contaminazione nell’ambiente e pertanto rappresentano dei veri e propri subindici. Il numero di subindici, utilizzati contemporaneamente nella costruzione dell’indice di qualità ambientale, permette di ottenere un quadro generale sulla condizione dell’ambiente in quell’istante definendo così un *profilo di qualità ambientale* [31].

L’uso di questi indici di aggregazione è essenziale nella comunicazione, in quanto in un contesto eterogeneo come quello ambientale dove le informazioni aumentano ogni giorno, a volte si può incorrere in fraintendimenti. Questi indici, pertanto, aiutano sia l’opinione pubblica nella comprensione sui vari fattori che influenzano la qualità dell’ambiente indicando il grado di fragilità (predisposizione a essere danneggiato) o di elasticità (capacità di recupero) degli elementi di una determinata area, ma possano essere utilizzati anche dal tecnico o dal ricercatore, il cui lavoro è trovare delle soluzioni adeguate di miglioramento del sistema ambientale.

5.1. COSTRUZIONE DI AQI

Il seguente lavoro di tesi pone come obiettivo la costruzione di un indice di qualità ambientale, la cui conoscenza è essenziale sia per la pianificazione di sistemi futuri che per un’ottimizzazione di quelli esistenti, in quanto si basa su dati reali del teleriscaldamento. Dai risultati ottenuti dai report “*Studio degli impatti sulla qualità dell’aria del sistema di teleriscaldamento*” [11] e seguendo le indicazioni dell’Arpa dell’Emilia Romagna [32] si è deciso di definire due indici, uno per lo scenario “senza TLR” e uno per quello “con TLR”, così da poter apprezzare l’effettiva riduzione di inquinamento che si avrebbe a seguito del teleriscaldamento.

La costruzione di AQI ha previsto due fasi ben distinte:

- nella prima, sono stati prelevati i valori di concentrazione annuale per le città in esame. In particolare, dai risultati forniti dal modello DIDEM [11], è stato possibile mediante l’utilizzo del software QGIS estrarre esattamente i valori di concentrazione riferiti all’area comunale delle città, ottenendo così dei valori rappresentativi per ciascuna. Tale procedimento è stato ripetuto per i seguenti contaminanti NO_x, CO e PM e per entrambi gli scenari.

Di seguito vengono riportate due figure 22 e 23 rappresentanti l’area comunale di Asti, precedentemente e successivamente al prelievo dei valori rappresentativi.

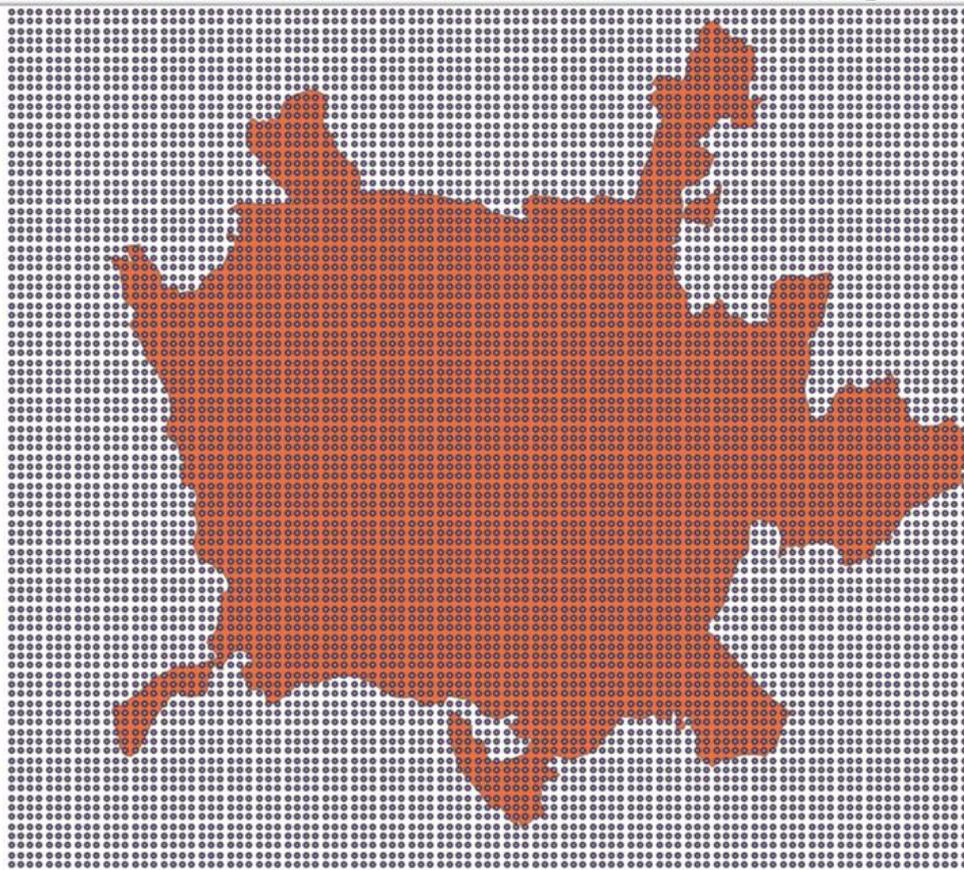


Figura 22: Area comunale di Asti. Valori relativi alle concentrazioni di Nox. Scenario “senza TLR”.

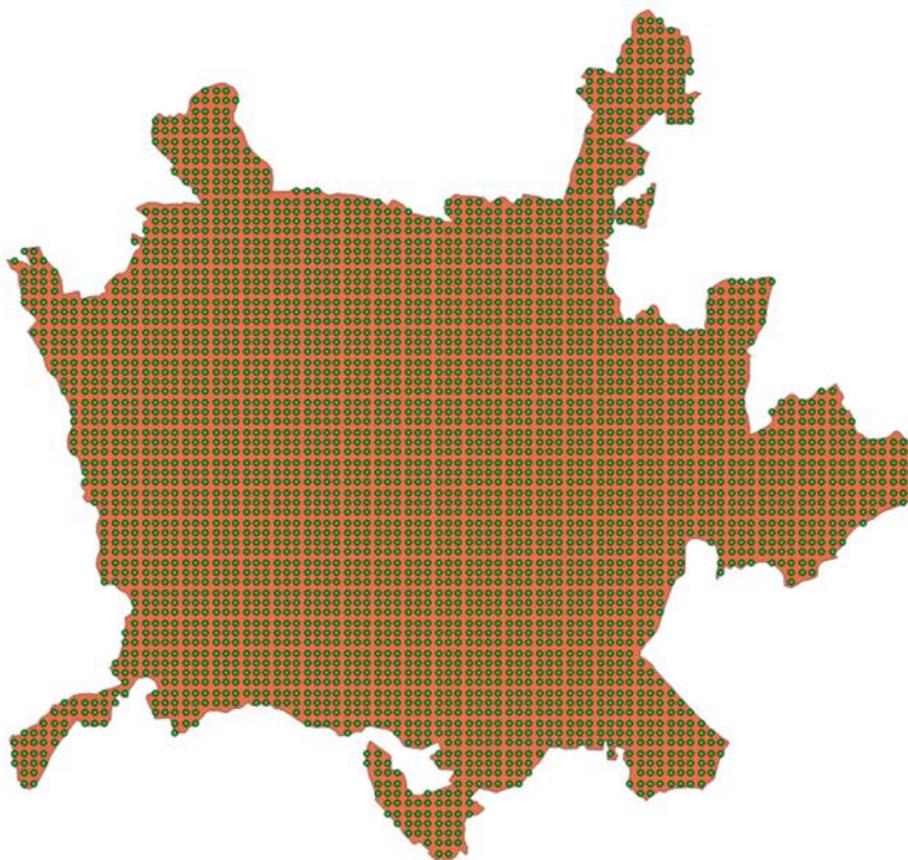


Figura 23: Area comunale di Asti. Valori rappresentativi delle concentrazioni di Nox. Scenario “senza TLR”.



- Dopo aver calcolato il valore medio annuale delle concentrazioni \bar{u} , è stato determinato un intervallo di confidenza per ciascun inquinante con la formula sottostante:

$$Estremo_{inf,sup} = \bar{u} \pm Z_{\alpha/2} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

dove:

- \bar{u} è media
- σ è deviazione standard
- n indica la numerosità del campione
- $Z_{\alpha/2}$ è il coefficiente di confidenza, determinato mediante la tavola della Distribuzione Normale Standardizzata, ipotizzando un grado di confidenza α pari al 95%;

A questo punto, è stato possibile procedere con la seconda fase, cioè quella riferita alla costruzione dell'indice [32]:

- si è scelto quali inquinanti includere all'interno dell'indice. In linea generale la scelta ricade su contaminanti che presentano un effetto sulla salute di tipo acuto così da poter dare indicazioni alla popolazione per evitare eventuali effetti a breve termine (cardiovascolare e respiratorio). Nel seguente lavoro, l'indice includerà i contaminanti NO_x, CO e PM;
- si è costruito un subindice, cioè una scala adimensionale, per ogni inquinante. Questa fase può essere ulteriormente suddivisa in tre steps:
 - scelta della modalità di aggregazione temporale: l'approccio generalmente utilizzato è quello di considerare per ogni inquinante l'indicatore temporale rispetto al quale è definito il limite di legge. Nel seguente studio, dato che i valori di concentrazioni sono annuali, sono stati presi in considerazione i limiti di legge della stessa fascia temporale (tabella 11)

Tabella 10: Limiti normativi, Decreto Legislativo n.155/2010.

limite legge	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Nox	30
PM	40
CO	10

- scelta della modalità di aggregazione spaziale, cioè la scelta dell'area da sottoporre al controllo. Nel seguente studio si prendono in considerazione le aree comunali delle città di Asti, Novara, Parma, Piacenza, Torino e Reggio Emilia.
- determinazione del subindice I_p : tale parametro è stato ottenuto mediante il rapporto tra la concentrazione C_p e il valore riferito al limite di legge C_0 , il tutto moltiplicato per cento:

$$I_p = \frac{C_p}{C_0} 100$$

dove il parametro C_p assume valori diversi in base ai seguenti casi, ossia:

- nel calcolo $I_{p\text{ medio}}$, $C_p = \bar{u}$;
- nel calcolo $I_{p\text{ inf}}$, $C_p = Estremo_{inf}$;



- nel calcolo $I_{p\ sup}, C_p = Estremo_{sup}$.

- L'ultimo step prevede l'aggregazione dei subindici in un unico indice. In generale tale operazione è stata eseguita mediante il "criterio del massimo assoluto":

$$AQI = \max(I_{NOx}, I_{CO}, I_{PM})$$

Dato che sono stati calcolati tre subindici per ogni contaminante, ossia inferiore, medio e superiore, per ognuno di essi è stato calcolato l'indice sintetico. Infatti, presi ad esempio, i subindici medi relativi ai tre contaminanti, AQI coinciderà con il massimo fra questi. Tale procedimento è stato ripetuto per i restanti due subindici, ottenendo così un $AQI_{inf}, AQI_{medio}, AQI_{sup}$.

5.2. RISULTATI

I risultati ottenuti dal lavoro di tesi sono rappresentati nelle tabelle 11 e 12. È bene evidenziare che questi indici indicano un livello di inquinamento dovuto alla sola frazione del riscaldamento in due scenari ben differenti. Pertanto dal confronto di tali risultati è possibile evidenziare la riduzione media annuale di concentrazione al suolo (tabella 13) che si otterrebbe mediante l'installazione del teleriscaldamento.

Tabella 11: Indice di Qualità Ambientale rispetto allo scenario "Senza TLR"

CITTA'	SCENARIO "SENZA TLR"		
	AQI inf	AQI MEDIO	AQI sup
ASTI	0,847	0,908	0,970
NOVARA	1,952	2,063	2,174
PARMA	1,241	1,299	1,356
PIACENZA	0,594	0,631	0,669
TORINO	9,216	10,632	12,047
REGGIO EMILIA	3,717	3,884	4,051

Tabella 12: Indice di Qualità Ambientale rispetto allo scenario "Con TLR"

CITTA'	SCENARIO "CON TLR"		
	AQI inf	AQI MEDIO	AQI sup
ASTI	0,230	0,240	0,250
NOVARA	0,446	0,459	0,473
PARMA	0,059	0,061	0,064
PIACENZA	0,028	0,029	0,031
TORINO	0,717	0,794	0,871
REGGIO EMILIA	0,166	0,170	0,174



5.3. CONSIDERAZIONI FINALI

La metodologia elaborata nei report “*Studio degli impatti sulla qualità dell’aria del sistema di teleriscaldamento*” [11] risulta essere molto importante dal punto di vista scientifico, in quanto permette, sulla base dell’elaborazione dei dati misurati sul sito (o ottenuti dagli operatori), di acquisire informazioni rilevanti per fornire importanti informazioni sugli effetti sulla qualità dell’aria risultanti dalla modifica della gestione energetica di un’area o insediamento.

Infatti, dopo una prima parte introduttiva riguardante tale metodologia, il lavoro svolto in questa parte di tesi ha posto come obiettivo il confronto di due scenari (“senza TLR”, “con TLR”) in sei città differenti. Data la grande mole di dati, per facilitare la comprensione e il confronto, si è deciso di costruire due indici di aggregazione ciascuno specifico per il proprio scenario. Dalla differenza dei due indici di qualità ambientale è stato possibile ricavare (tabella 14) la riduzione di inquinamento che si otterrebbe mediante l’installazione/ampliamento del sistema TLR in termini di concentrazione media annua al suolo (tabella 13).

Tabella 13: Differenza tra i due scenari

CITTA'	DIFFERENZA TRA I DUE SCENARI		
	AQI inf	AQI MEDIO	AQI sup
ASTI	-0,616	-0,668	-0,721
NOVARA	-1,506	-1,603	-1,701
PARMA	-1,181	-1,237	-1,293
PIACENZA	-0,566	-0,602	-0,638
TORINO	-8,499	-9,838	-11,176
REGGIO EMILIA	-3,551	-3,714	-3,878

Dai suddetti risultati si evince una riduzione media pari a circa:

- per Asti del 0,67% a cui corrispondono $0,057 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x , $0,003 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM e $0,067 \mu\text{g}/\text{m}^3$ CO evitate;
- per Novara del 1,6% a cui corrispondono $0,143 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x , $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM e $0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ CO evitate.
- per Parma del 1,24% a cui corrispondono $0,146 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x , $0,005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM e $0,126 \mu\text{g}/\text{m}^3$ CO evitate;
- per Piacenza del 0,6% a cui corrispondono $0,071 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x , $0,002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM e $0,063 \mu\text{g}/\text{m}^3$ CO evitate;
- per Torino del 9,84% a cui corrispondono $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x , $0,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM e $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ CO evitate;
- per Reggio Emilia del 3,7% a cui corrispondono $0,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_x , $0,013 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM e $0,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ CO evitate.

I risultati mostrano che il collegamento dei sistemi di riscaldamento residenziale alla rete TLR produce un miglioramento della qualità dell’aria in termini di concentrazione di contaminanti a livello del suolo. Come è possibile osservare dalla tabella 14 la riduzione risulta elevata per le città di Torino e Reggio Emilia. Questo perché solo queste due città presentano una dimensione dell’impianto molto elevata rispetto alle altre (tabella 1). Questo significa che il numero di caldaie sostituite è maggiore. Infatti in un impianto ben progettato, il camino della centrale di teleriscaldamento ha un impatto inferiore a quello prodotto dai camini delle singole



caldaie delle abitazioni, le quali risultano poco efficienti da un punto di vista energetico e ad alto impatto ambientale. Ne discende che i risultati delle singole città differiscono a seconda delle caratteristiche dell'impianto (dimensione, tabella 1), del tipo di combustibile (i sistemi alimentati a gas naturale hanno un basso impatto emissivo di particolato), delle tecnologie di conversione e infine delle perdite di rete. Tali considerazioni sono validate anche da altri casi studi, come ad esempio quello di Brattebø e Reenaas [48], condotto su un impianto di cogenerazione alimentato da rifiuti, il quale illustra un aumento delle emissioni di NO_x rispetto a uno scenario alternativo per la gestione dei suddetti, nonché la necessità di tecnologie avanzate di abbattimento, oppure quello di Torchio [49], in cui mediante un confronto ambientale ed economico di tre diverse opzioni di riscaldamento (teleriscaldamento, generazione distribuita e produzione separata di calore ed energia) dimostra come i sistemi guidati da microturbine e tecnologie delle celle a combustibile comportano una riduzione delle emissioni di NO_x, a differenza dei motori a combustione interna che non denotano nessun miglioramento.

Inoltre è bene evidenziare che i valori degli indici dello scenario "con TLR" risultano comunque minori nonostante sia presente oltre alla quota delle emissioni della produzione di energia termica anche quella elettrica delle centrali di cogenerazione.

Ulteriori considerazioni sulla variazione dei risultati possono riguardare anche:

- una maggiore altezza di emissione delle centrali di cogenerazione ed integrazione rispetto ai camini residenziali, che favorisce una maggiore dispersione degli inquinanti;
- la posizione decentrata delle centrali di produzione rispetto al centro urbano;
- una minore emissione complessiva delle centrali TLR rispetto al totale degli impianti residenziali,

In linea generale, quindi, a uguali incrementi delle concentrazioni dell'inquinante corrispondono uguali aumenti dell'indice e ciò è giustificabile anche da un punto di vista epidemiologico, in quanto ai contaminanti sono spesso attribuiti effetti sanitari che crescono con un andamento lineare [32].

In conclusione, questa prima analisi, effettuata in termini comparativi, cioè confrontando, a parità di energia utile fornita, due scenari di gestione di riscaldamento differenti, e sintetizzata dall'uso degli indici di qualità ambientale, permette di osservare con chiarezza e semplicità il miglioramento della qualità dell'aria che si otterrebbe con il teleriscaldamento. Ovviamente una riduzione di concentrazioni di contaminanti al suolo si tradurrebbe anche in una diminuzione dei costi sociali legati agli effetti negativi sulla salute dell'uomo (tabella 8). Inoltre a scala globale il sistema di teleriscaldamento comporterebbe anche una riduzione di CO₂, uno dei maggiori gas responsabili dei cambiamenti climatici (tabella 7).

Capitolo 6

SCENARI CLIMATICI FUTURI

La comunità scientifica oggi ritiene che il riscaldamento globale è inequivocabile [36] e che molto probabilmente (95%) sia dovuto all'aumento delle concentrazioni di gas serra di origine antropica. Il grafico, presente in figura 24, rappresenta l'andamento della temperatura superficiale dal 1850 fino al 2018. Si osserva come nel corso di 100 anni la temperatura globale sia aumentata di 1.1°C. Si evidenzia, quindi, un grafico caratterizzato da una serie di oscillazioni e periodi in cui si hanno incrementi e abbassamenti della temperatura. Tale fenomeno è dovuto sostanzialmente al fatto che la terra ha una sua variabilità naturale, provocata da tutti quei processi (idrosfera, criosfera etc) interconnessi tra loro. Quindi un anno può essere relativamente caldo rispetto a un altro e viceversa. Proprio per questo motivo quando si parla di clima è necessario riferirsi ad andamenti a lungo termine, così da avere una stima più accurata sui risultati.

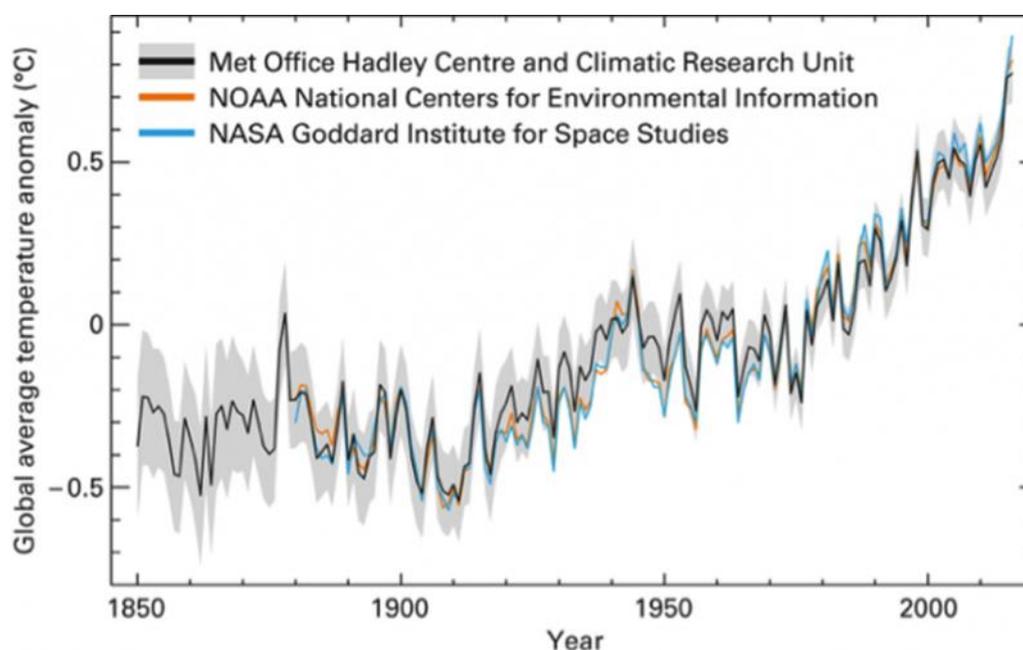


Figura 24: Andamento della temperatura fino al 2018 [35]

Le evidenze, però, che ci permettono di affermare che il clima sta mutando, si possono riassumere in questo modo:

- tutti i ghiacciai alpini sono in fase di recessione;
- si ha una riduzione dei ghiacci artici, con particolare preoccupazione sullo scioglimento dei ghiacci perenni e si ipotizza che nel giro 20-30 anni non ci sarà più ghiaccio nell'artico;
- un innalzamento del livello del mare, dovuto a causa dello scioglimento dei ghiacciai continentali e dell'espansione termica degli oceani. Da un punto di vista globale il livello è salito di 26 cm;
- la temperatura dell'oceano è in veloce aumento;
- si ha un riscaldamento della troposfera.

Fondamentali sono, quindi, i modelli climatici, in quanto ci permettono di prevedere degli scenari futuri, ovviamente dipendenti dalle nostre scelte. Tali previsioni sono note come RCP (Representative Concentration Pathways, Percorsi Rappresentativi di Concentrazione) e sono



espressi in termini di concentrazioni di gas serra. A ciascun RCP è associato un numero, il quale indica il Forzante Radiativo (Radiative Forcing – RF W/m²) che rappresenta la forza dei cambiamenti climatici antropogenici entro il 2100 rispetto al periodo preindustriale.

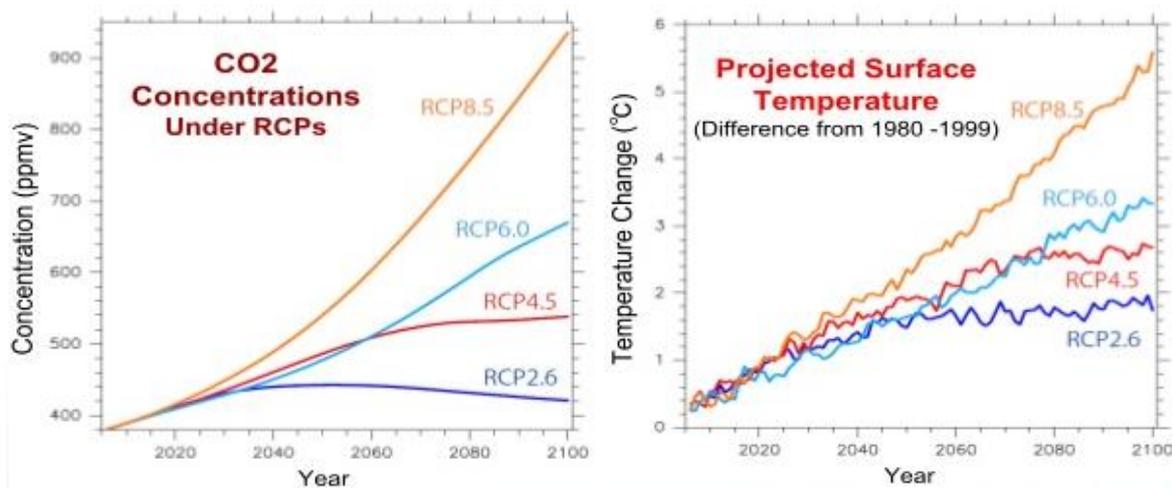


Figura 25: Scenari futuri sul riscaldamento globale in relazione alle emissioni di CO₂ fino al 2100 [35]

Infatti sono stati sviluppati quattro scenari, rappresentati nella figura 25: [37]

- RCP8.5 (“*Business-as-usual*”): prevede una crescita delle emissioni ai ritmi attuali. In particolare stima concentrazioni atmosferiche di CO₂ triplicate o quadruplicate entro il 2100 con un conseguente aumento della temperatura di 2,6–4,8°C;
- RCP6.0 (“*Poca mitigazione*”): prevede solo alcune azioni di mitigazione il controllo delle emissioni. In particolare la concentrazione della CO₂ continua a crescere fino al 2080 per poi stabilizzarsi. Si stima un incremento della temperatura pari a 1,4–3,1°C;
- RCP4.5 (“*Forte mitigazione*”): si ipotizzano numerose azioni di mitigazioni, atte a diminuire le emissioni di CO₂ al di sotto dei livelli attuali entro il 2070. Si prevede un incremento della temperatura di 1,1–2,6°C;
- RCP2.6 (“*Mitigazione aggressiva*”): si assumono strategie di mitigazione “aggressive” atte a diminuire le emissioni di gas serra dopo circa un decennio per poi tendere a zero in 60 anni a partire da oggi. Con il seguente scenario è improbabile che si superino i 2°C di aumento della temperatura media globale rispetto ai livelli preindustriali (quindi 1°C rispetto alle temperature attuali).

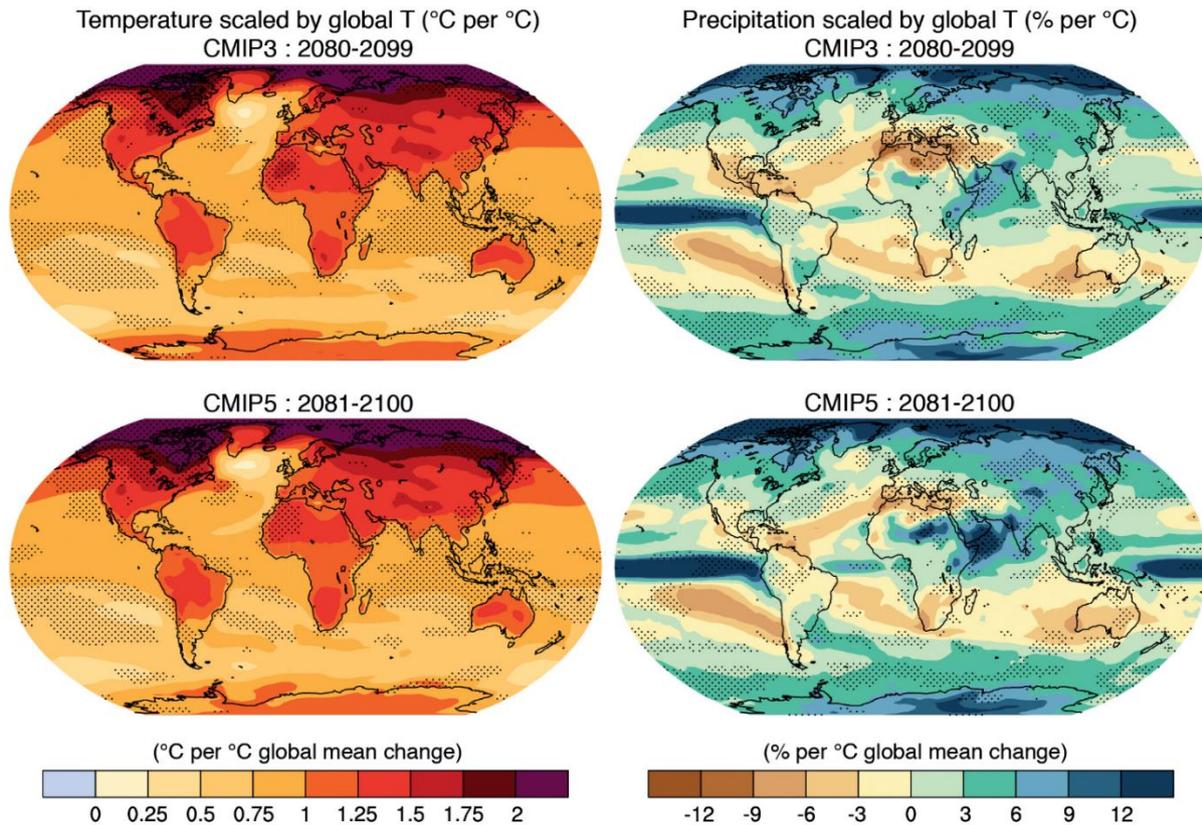


Figura 26: Scenari futuri a livello globale, relativo alle temperature e precipitazioni [35]

Il riscaldamento del globo non avviene dappertutto allo stesso modo. Infatti, possiamo notare dalla figura 26, che la zona più calda per eccellenza sarà l'artico a causa del feedback del ghiaccio (maggiore assorbimento infrarosso e solare). Un altro hotspot principale sarà il mediterraneo causato principalmente dalle scarse precipitazioni (in primavera e estate 20-30% in meno). Questo andamento viene definito: *“i ricchi saranno sempre più ricchi e i poveri sempre più poveri”* [34], in quanto le zone che oggi sono caratterizzate da abbondanti precipitazioni in futuro ne avranno ancora di più mentre quelle che oggi hanno meno pioggia in futuro ne avranno ancora meno. Per cui, si evince, come i cambiamenti climatici non saranno sentiti da tutti in egual misura e quindi si rispecchieranno in uno stress socio-economico che causerà un aumento delle cosiddette migrazioni di massa. Ulteriori danni possibili possono essere [36]:

- alterazioni del regime idro-geologico che potrebbero aumentare il rischio di dissesti e alluvioni lampo. Infatti un atm più calda avrà a disposizione maggiore energia, che associata a una grande quantità di acqua, provocherà eventi alluvionali estremi. Successivamente a tale evento, seguiranno dei lunghi periodi secchi in quanto l'atmosfera avrà bisogno di più tempo per ricaricarsi. In sintesi si avranno eventi alluvionali estremi seguiti da lunghi di periodi di siccità;
- intrusione dell'acqua marina nel suolo con conseguente depauperamento delle risorse;
- estinzione/comparsa delle biodiversità o paleo-batteri.

Per arginare il riscaldamento globale bisogna stabilizzare le temperature e di conseguenza le concentrazioni dei gas serra e ciò vuol dire ridurre le emissioni. Il cuore del dibattito dell'accordo di Parigi, non è centrato tanto su come gestire i cambiamenti climatici, che inevitabilmente avverranno, ma come stabilizzare livelli di gas serra al di sotto della soglia di

pericolo, cioè quella soglia al di sopra della quale il costo degli impatti è molto più elevato di quello della mitigazione. Se i costi di mitigazione sono minori rispetto ai danni conviene investire in questo strumento. Ad oggi la soglia di pericolo è legata allo scenario RCP2.6, cioè 2 gradi rispetto a livello preindustriale, con un picco di emissioni entro il 2020, una riduzione, rispetto ai valori attuali, del 75-80% entro il 2050, fino a raggiungere la neutralità carbonica entro la fine del secolo.

6.1. ZONE CLIMATICHE E HDD SECONDO IL DPR 412-93

Il DPR n° 412 del 26/08/1993 (*Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione e la manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4 della legge 9 gennaio 1991, n.10.*) suddivide l'Italia in zone climatiche denominate con le lettere da A a F, in base al valore del grado giorno di riscaldamento (HDD - *Heating Degree Days*) della singola provincia (figura 27).

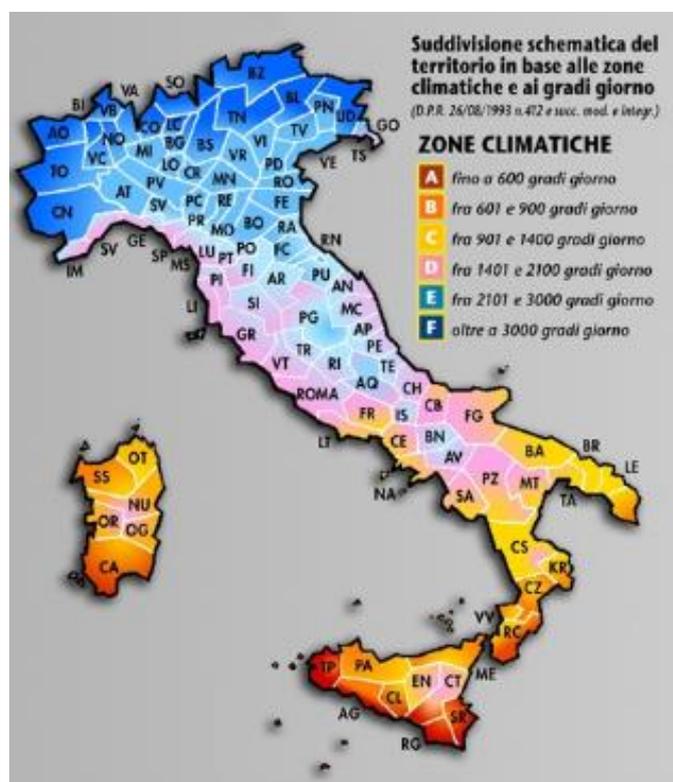


Figura 27: Suddivisione del territorio nazionale in fasce climatiche secondo i gradi giorno [40]

I gradi giorno sono un parametro che quantifica il fabbisogno termico per il riscaldamento necessario per mantenere un clima confortevole all'interno delle abitazioni di una data località durante l'anno.

È possibile definirli, quindi, come degli indicatori indiretti riguardanti il riscaldamento globale, in quanto uno degli impatti rilevanti dei cambiamenti climatici sull'ambiente urbano riguarda proprio la modifica del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento. Quest'ultimo, infatti, oltre che dipendere dalle specifiche costruttive e dal grado di isolamento dell'edificio, è fortemente correlato al clima del territorio, in particolar modo dalla temperatura dell'aria. Nel nostro Paese i picchi di fabbisogno energetico si verificano:

- nel periodo invernale in concomitanza alle feste natalizie e alle temperature più basse (tipicamente in gennaio);
- nel periodo estivo, in cui l'innalzamento termico si traduce in un incremento del consumo elettrico, dovuto all'uso del condizionamento, specie in quelle aree urbane soggette al fenomeno "isola di calore".

I due periodi, però, sono intervallati dalle stagioni di transizione, durante le quali il consumo di energia rimane pressoché uniforme.

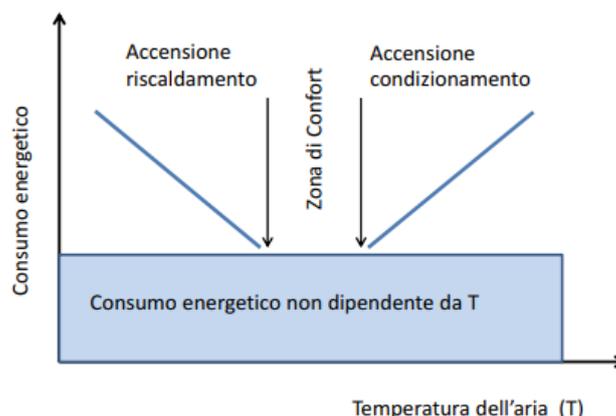


Figura 28: Correlazione tra consumo energetico e temperatura esterna [38]

Durante questi periodi, pertanto non è necessario attivare nessun tipo di sistema di riscaldamento o raffreddamento per avere una condizione di confort. Di conseguenza il consumo in quei mesi sarà minimo, mentre sarà massimo in estate e in inverno (figura 28). La relazione tra la domanda energetica e la temperatura è complessa in quanto non è lineare [38]. Inoltre questo discorso è fondamentale anche in termini di emissioni dovute alla combustione di combustibili fossili. Risulta, dunque, prioritario elaborare un piano di sviluppo in una strategia di decarbonizzazione tale da rendere più efficiente e sostenibile il riscaldamento e il raffreddamento del settore residenziale, basato anche su scenari futuri così da poter osservare il rispetto o meno degli impegni presi con l'Accordo di Parigi.

Sulla base di quanto appena detto, il Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti climatici, CMCC, ha sviluppato un report "*Anomalia climatica mensile per indicatori HDD e CDD*" [39] nel quale, mediante il modello climatico COSMO-CLIM, sono state elaborate delle mappe rappresentanti le anomalie mensili al fine di ottenere un quadro climatico generale delle possibili variazioni future in termini di gradi giorno, rispetto allo scenario RCP4.5 e RCP8.5. A titolo esemplificativo vengono riportate due mappe delle anomalie mensili dell'indice HDD per i mesi invernali dell'anno 2030, rispetto al periodo di riferimento 1986-2015 (figura 29). Queste previsioni fanno riferimento a due scenari climatici che sostanzialmente differiscono sull'aumento della temperatura globale: RCP4.5 corrisponde a un incremento di 1,1–2,6°C, mentre RCP8.5 di 2,6–4,8°C.

Come è possibile osservare, è evidente una riduzione globale dell'indice su tutto il territorio nazionale, ad esclusione del mese di Febbraio in cui si denota un andamento opposto, per entrambi gli scenari. Ciò significa che probabilmente solo questo mese sarà caratterizzato dalla necessità di ricorrere a un sistema di riscaldamento, mentre gli altri saranno contraddistinti da temperature elevate.



In particolare per lo scenario RCP8.5 si denota una maggiore riduzione dell'indice HDD che si traduce, quindi, in un maggiore incremento della temperatura dell'aria. Tuttavia questo comportamento risulta particolarmente più evidente per i periodi futuri più lontani (2050) rispetto al periodo di riferimento. Pertanto da queste proiezioni si evince l'elevato impatto che si avrà a causa del riscaldamento globale, che necessariamente comporterà un cambiamento in termini sociali, ambientali ed economici.

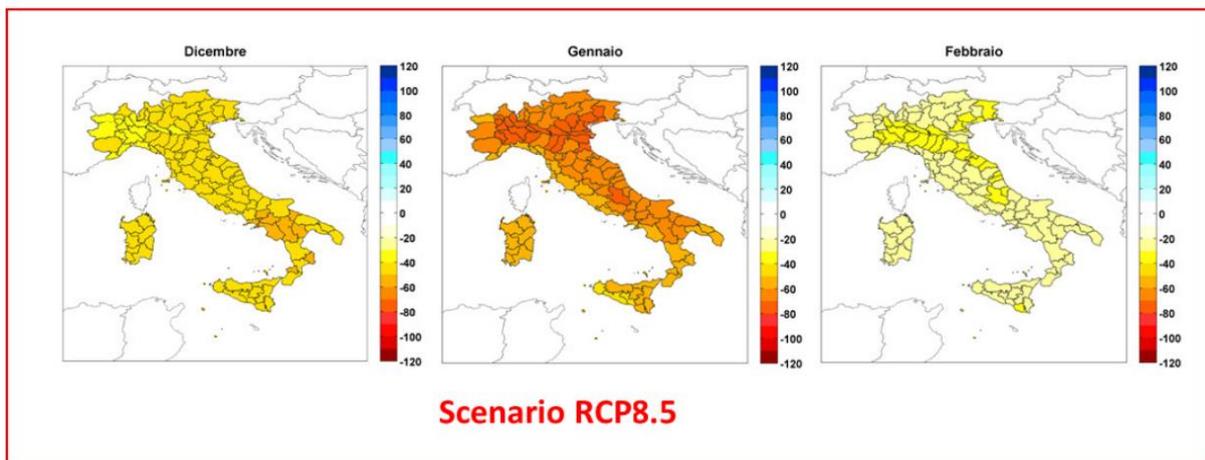
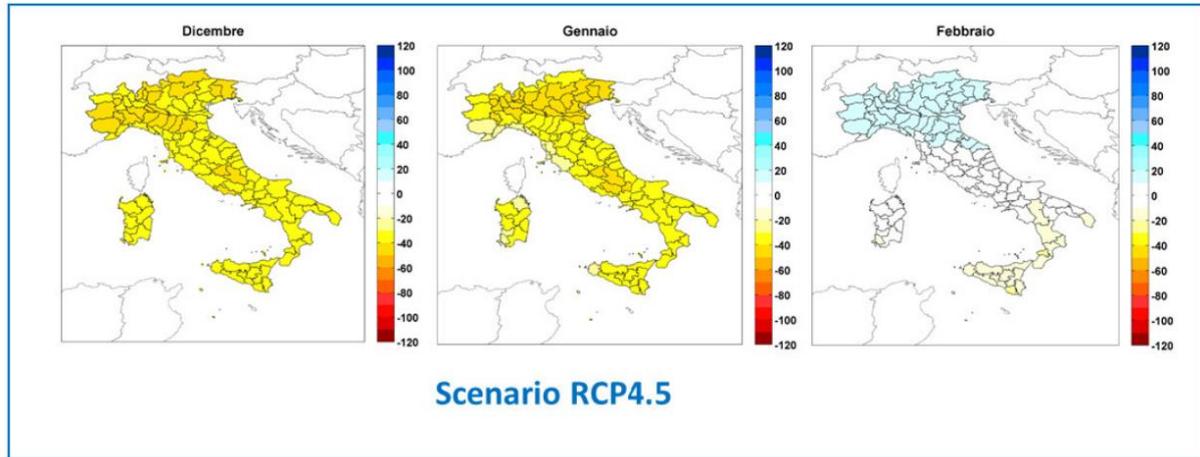


Figura 29: Previsioni per il 2030 delle anomalie mensili dell'indice HDD per i mesi invernali per i due scenari climatici [39]



Capitolo 7

CONSUMI ENERGETICI E HDD: SCENARI FUTURI

La seconda parte del seguente lavoro pone come obiettivo l'individuazione delle possibili variazioni future della domanda di riscaldamento per le sei città analizzate. Tali variazioni sono state valutate, sulla base di due differenti scenari climatici (RCP4.5 e RCP8.5), studiando le anomalie dei gradi giorno di riscaldamento per i seguenti periodi temporali 2030, 2035, 2040, 2045 e 2050.

Nello specifico, sono state utilizzate due metodologie differenti per lo sviluppo delle variazioni future:

- primo metodo: prevede l'applicazione diretta delle variazioni percentuali delle proiezioni degli HDD per entrambi gli scenari RCP considerati [37];
- secondo metodo: prevede di scalare i dati di consumo del gas naturale [37], forniti da SNAM e riferiti al periodo temporale 2003-2015, rispetto ai consumi di energia primaria degli edifici sostituiti dal sistema TLR delle sei città [11].

È bene evidenziare che entrambe le metodologie sono basate solo sui dati riferiti alla fascia climatica E, in quanto le città considerate sono tutte appartenente alla medesima zona.

7.1. I GRADI GIORNO DI RISCALDAMENTO

Per procedere con una delle due metodologie è necessario dapprima calcolare i gradi giorno di riscaldamento. Sono stati considerati, quindi, i dati relativi alle temperature rispettive per le sei città, scaricate direttamente dai siti dell'ARPA Piemonte e dell'Emilia Romagna. Successivamente, i gradi giorno di riscaldamento (HDD) sono stati ottenuti dalla sommatoria della differenza tra la temperatura di riferimento interna (temperatura di confort) e la temperatura media giornaliera esterna, estesa a tutto il periodo di riscaldamento.

$$HDD = \sum T_{rif} - T_m$$

La temperatura di confort è stata stabilita a 18°C sulla base della metodologia adottata dal JRC (Joint Research Centre) in quanto consente l'allineamento con le statistiche a livello europeo.

$$HDD = 18 - T_m$$

$$T_m = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Di seguito, nella tabella 11, vengono riportati i valori dei gradi giorno di riscaldamento calcolati per ciascuna delle sei città in esame.

Tabella 14: Valori degli HDD riferiti a ciascuna città

CITTA'	HDD
ASTI	2228,65
NOVARA	1907,55
PARMA	1983,50
PIACENZA	1934,00
TORINO	1890,95
REGGIO EMILIA	1985,00

7.2. PROIEZIONI FUTURE CON IL PRIMO METODO

Le previsioni future relative alle sei città sono state ottenute mediante l'utilizzo dei risultati ricavati dal report "Consumi energetici e heating degree days (HDD) a confronto. Proiezioni al 2050 degli HDD in differenti scenari climatici", sviluppato da ISPRA. Tale studio, assieme a quello del CMCC, ha permesso di dedurre delle variazioni percentuali delle proiezioni degli HDD mediante questo metodo [37]:

- elaborazione delle medie mensili a livello provinciale degli HDD al periodo 2001-2015, considerando solo il periodo di riscaldamento;
- aggregazione delle anomalie climatiche mensili dei gradi giorno di riscaldamento nelle tre zone climatiche di riferimento C, D, ed E;
- media dei valori provinciali degli HDD a livello di zona climatica sul periodo 2001-2015 (media di riferimento);
- calcolo delle variazioni percentuali delle proiezioni degli HDD rispetto al corrispettivo valore medio calcolato sui 15 anni di interesse per ciascuna delle tre zone e per entrambi gli scenari RCP considerati.

In tabella 15 vengono riportati i suddetti risultati.

Tabella 15: Variazioni delle proiezioni dei gradi giorno di riscaldamento [37]

	RCP 4.5	RCP 8.5
2030	-6%	-11%
2035	-7%	-12%
2040	-8%	-15%
2045	-11%	-16%
2050	-13%	-18%

A questo punto, il lavoro di tesi, prevede che ai rispettivi gradi giorno di riscaldamento delle sei città, calcolati in precedenza (tabella 15), vengano sottratti direttamente le seguenti percentuali ricavando così le previsioni future. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti rispettivamente per lo scenario climatico RCP4.5 e RCP8.5.

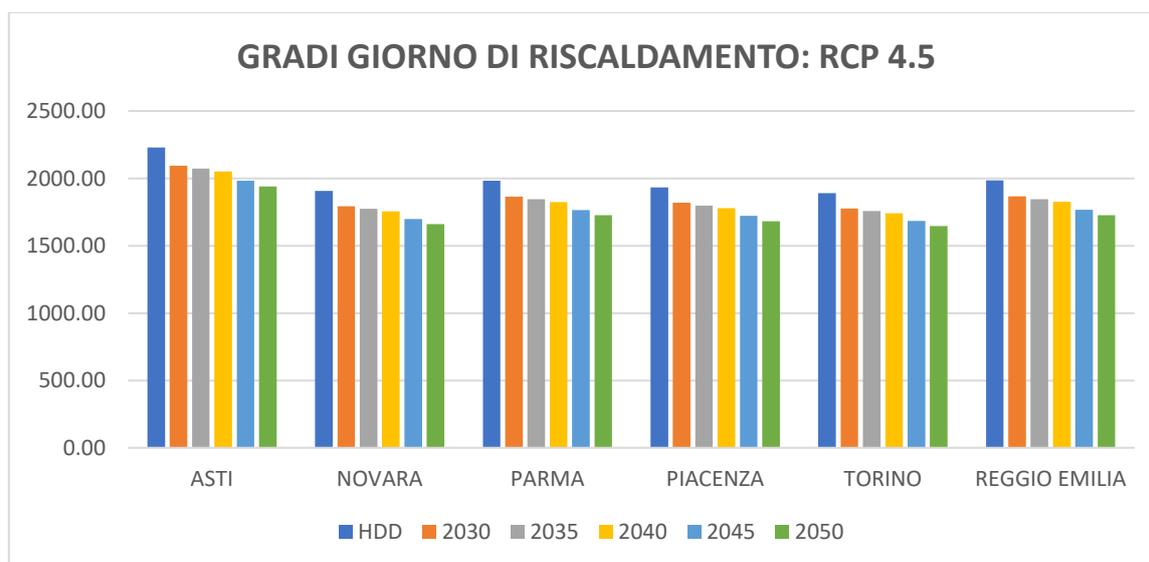


Figura 30: Proiezione futura di HDD sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP4.5.

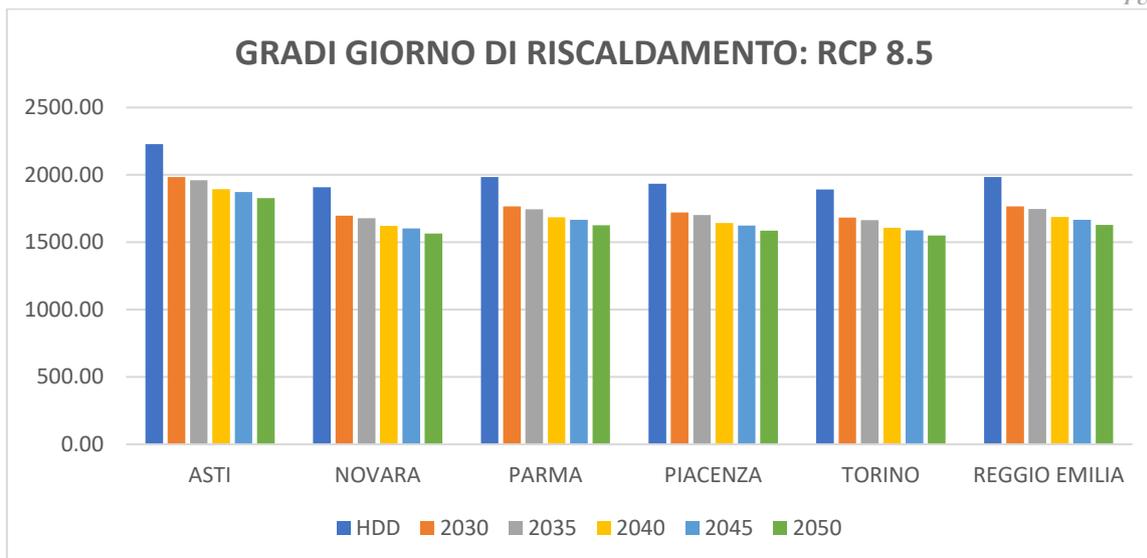


Figura 31: Proiezione futura di HDD sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP8.5.

Come si può intuire, a un abbassamento dei gradi giorno di riscaldamento (figura 30 e 31) corrisponde un incremento della temperatura esterna. Questo a sua volta si traduce in una riduzione di energia primaria utilizzata per il riscaldamento stesso. Di conseguenza tali variazioni percentuali sono state adottate anche per prevedere la riduzione del consumo di energia primaria degli edifici sostituiti dal sistema TLR. Mediante i dati forniti dai report “Studio degli impatti sulla qualità dell’aria del sistema di teleriscaldamento” per le sei città [11] è stato possibile sviluppare tali proiezioni per gli anni futuri rispettivamente per i due scenari climatici RCP4.5 e RCP8.5. Nelle figure 32 e 33, che seguono, vengono illustrati i suddetti risultati.

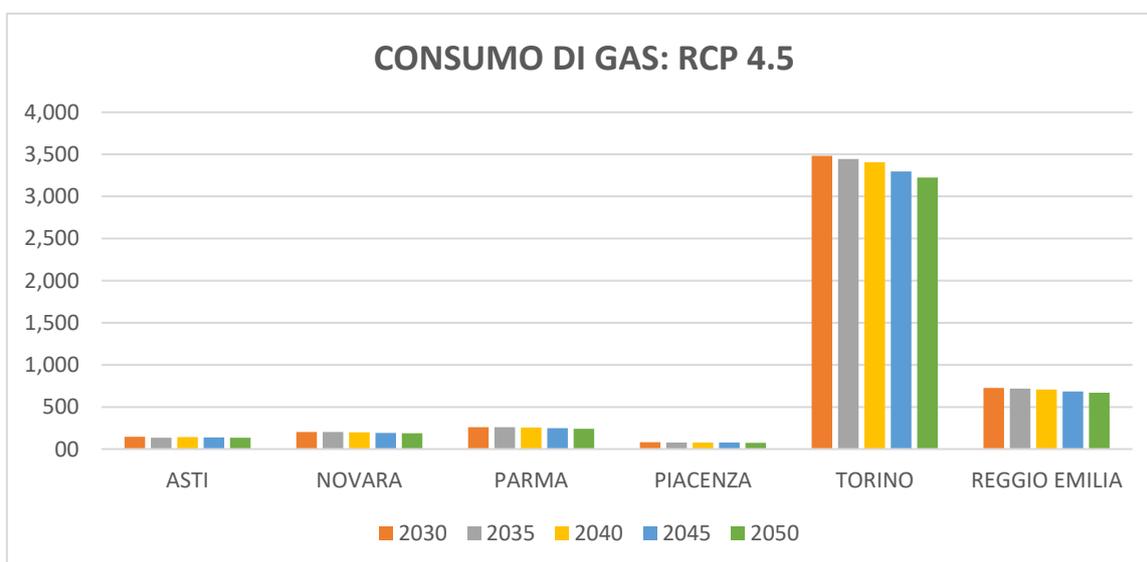


Figura 32: Proiezione futura del consumo di gas sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP4.5.

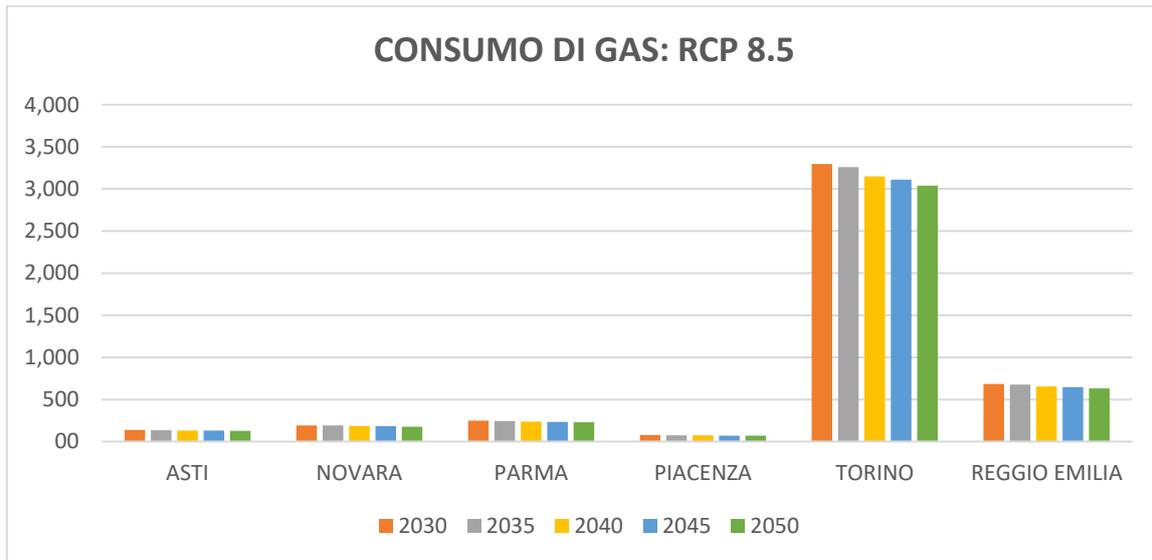


Figura 33: Proiezione futura del consumo di gas sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP8.5.

La riduzione dell'energia primaria necessariamente si traduce in un decremento di emissioni di contaminanti in atmosfera. Per stimare tale diminuzione si è proceduto moltiplicando i risultati relativi al consumo energetico (figure 32 e 33) per il fattore di emissione dei contaminanti in esame (tabella 16)

Tabella 16: Fattori di Emissioni dei contaminanti

	FE [kg/GWh]
NO _x	123,8
CO	97,6
PM	3,5
CO ₂	198

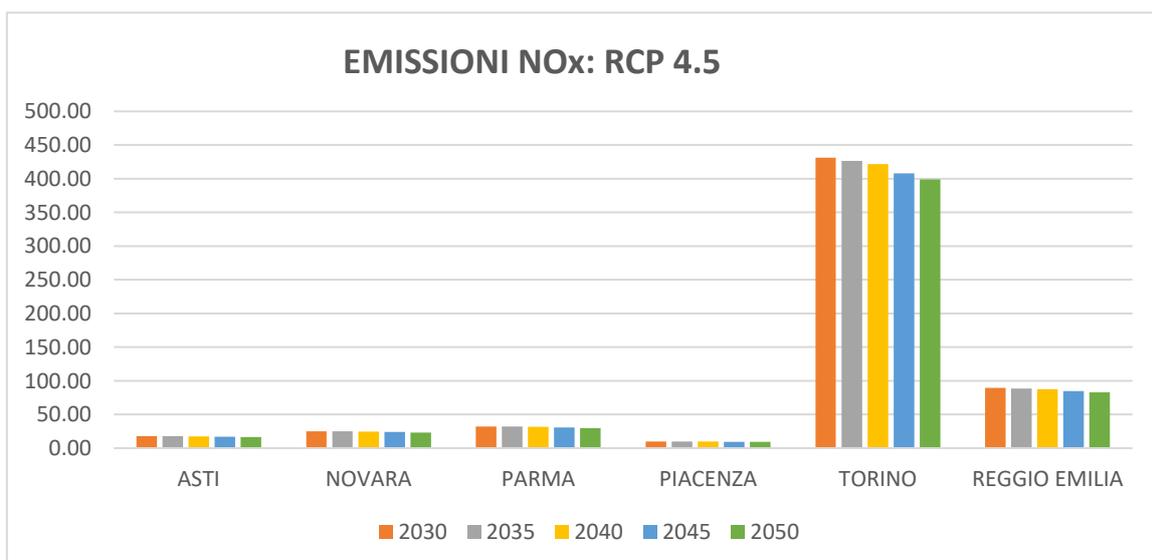


Figura 34: Proiezione futura di emissioni di NO_x sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP4.5.

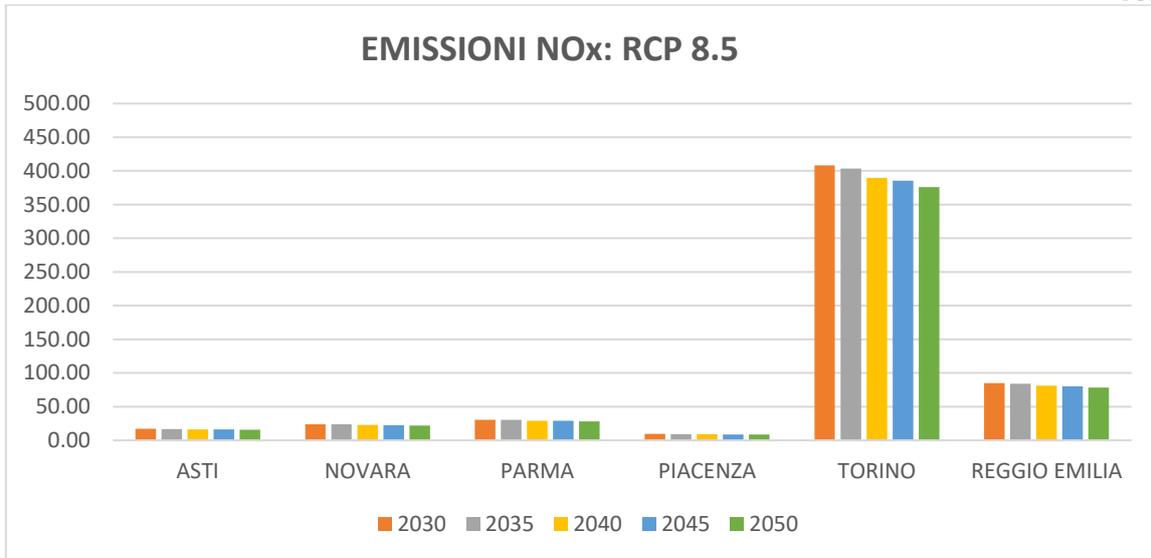


Figura 35: Proiezione futura di emissioni di NOx sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP8.5.

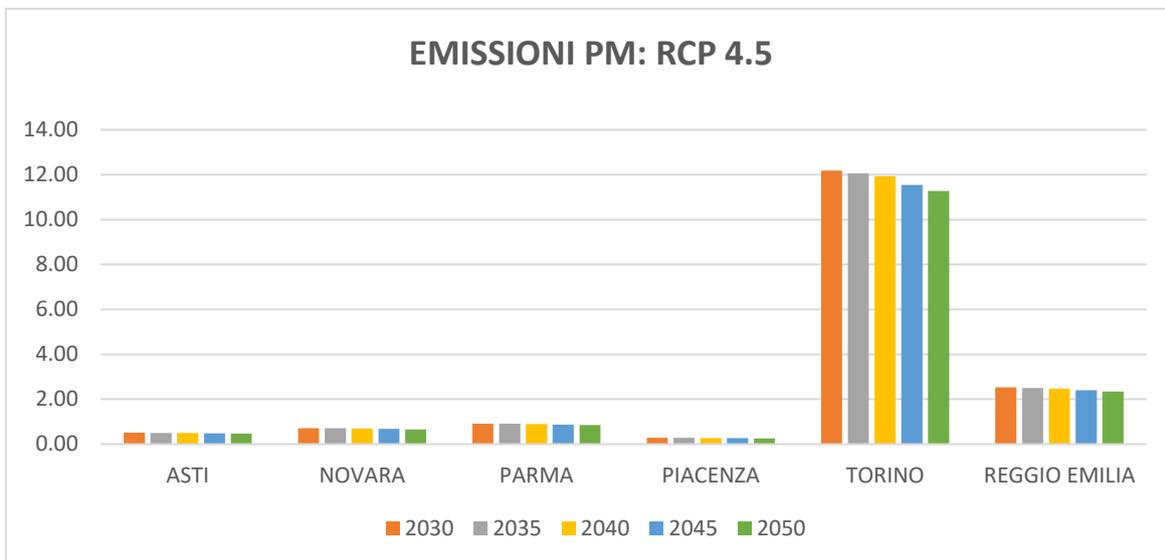


Figura 36: Proiezione futura di emissioni di PM sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP4.5.

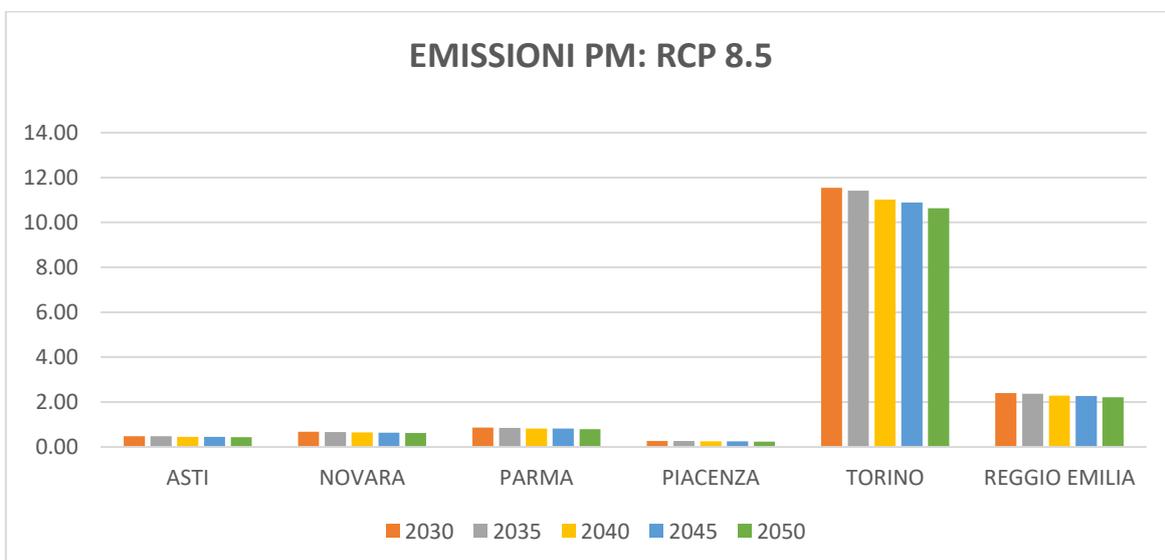


Figura 37: Proiezione futura di emissioni di PM sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP8.5.

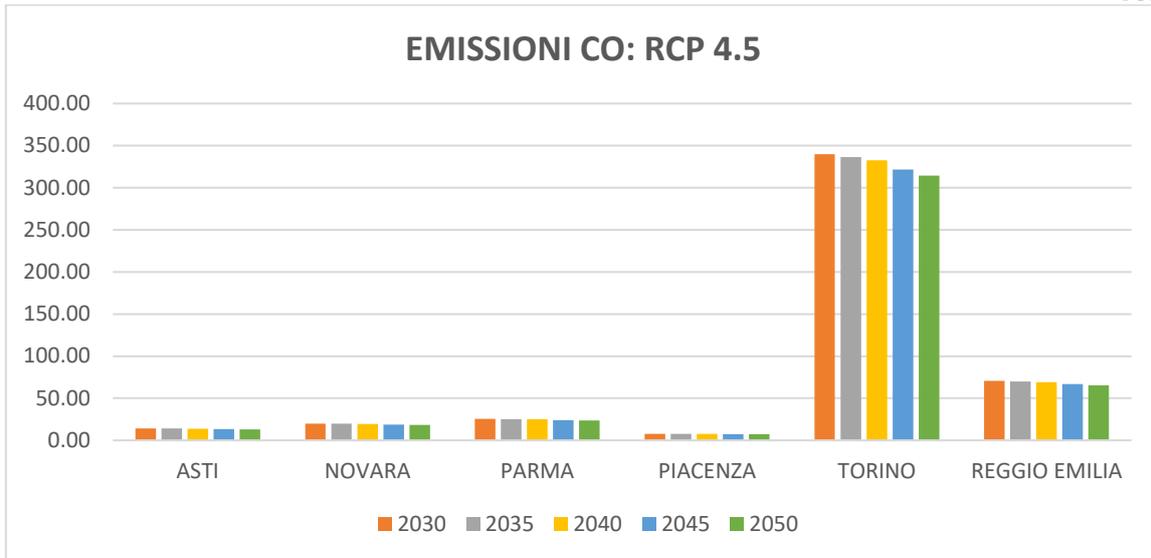


Figura 38: Proiezione futura di emissioni di CO sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP4.5.

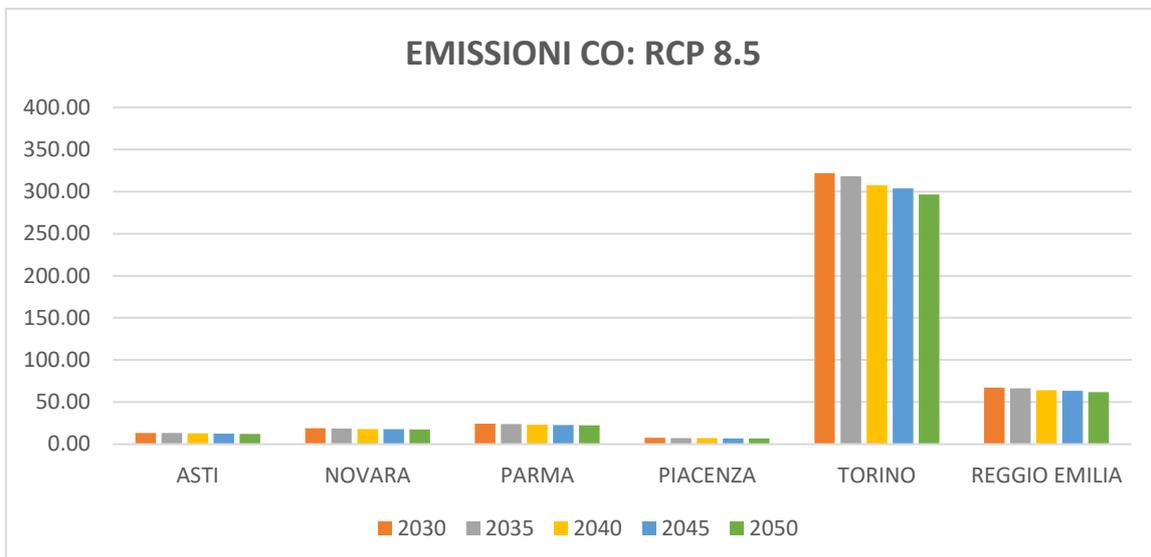


Figura 39: Proiezione futura di emissioni di CO sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP8.5.

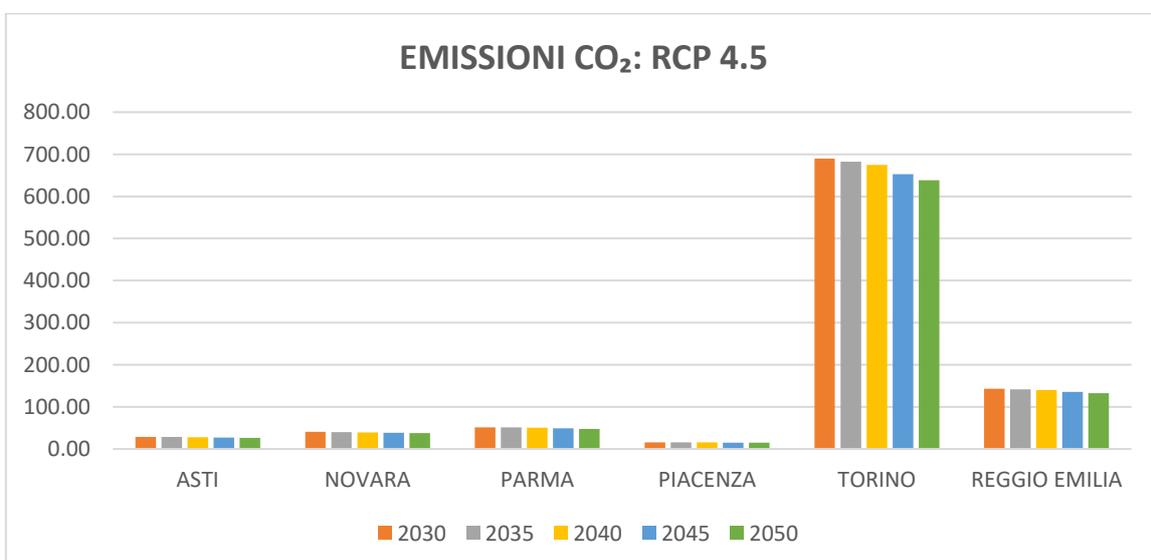


Figura 40: Proiezione futura di emissioni di CO₂ sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP4.5.

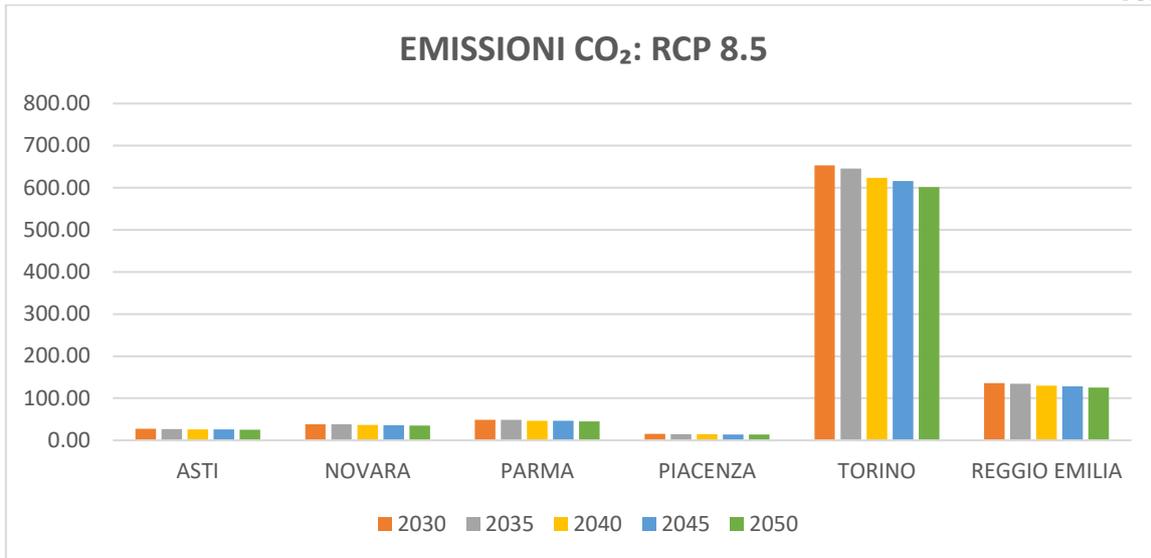


Figura 41: Proiezione futura di emissioni di CO₂ sviluppato con il primo metodo. Scenario RCP8.5.



Tabella 17: Proiezioni future delle emissioni. Primo metodo. Scenario RCP4.5

		METODO 1: RCP4.5					
		ASTI	NOVARA	PARMA	PIACENZA	TORINO	REGGIO EMILIA
Nox [t/y]	2030	17,91	25,26	32,35	9,93	431,16	89,67
	2035	17,72	24,99	32	9,83	426,57	88,71
	2040	17,53	24,72	31,66	9,7	421,98	87,76
	2045	16,96	23,91	30,63	9,4	408,22	84,9
	2050	16,58	23,28	29,94	9,19	399,05	82,99
CO [t/y]	2030	14,12	19,91	25,5	7,83	339,91	70,69
	2035	13,97	19,7	25,23	7,75	336,3	69,94
	2040	13,82	19,49	24,96	7,66	332,68	69,19
	2045	13,37	18,85	24,14	7,41	321,83	66,93
	2050	13,07	18,43	23,6	7,25	314,6	65,43
PM [t/y]	2030	0,506	0,714	0,914	0,281	12,19	2,53
	2035	0,501	0,706	0,905	0,278	12,1	2,508
	2040	0,496	0,699	0,895	0,275	11,93	2,48
	2045	0,479	0,676	0,866	0,266	11,54	2,4
	2050	0,469	0,661	0,846	0,26	11,28	2,34
CO ₂ [t/y]	2030	28,64	40,4	51,73	15,89	689,57	143,41
	2035	28,34	39,97	51,18	15,72	682,24	141,88
	2040	28,03	39,54	50,63	15,55	674,9	140,36
	2045	27,12	28,25	48,98	15,04	625,9	135,78
	2050	26,51	37,39	47,88	14,7	638,22	132,73

Tabella 18: Proiezioni future delle emissioni. Primo metodo. Scenario RCP8.5

		METODO 1: RCP8.5					
		ASTI	NOVARA	PARMA	PIACENZA	TORINO	REGGIO EMILIA
Nox [t/y]	2030	16,96	23,91	30,63	9,4	408,22	84,9
	2035	16,77	23,65	30,28	9,3	403,64	83,94
	2040	16,19	22,84	29,25	8,98	389,88	81,08
	2045	16	22,57	28,9	8,88	385,29	80,13
	2050	15,62	22,03	28,22	8,66	376,12	78,22
CO [t/y]	2030	13,37	18,85	24,14	7,41	321,83	66,93
	2035	13,22	18,64	23,87	7,33	318,22	66,18
	2040	12,77	18,01	23,06	7,08	307,37	63,92
	2045	12,62	17,79	22,79	7	303,75	63,17
	2050	12,32	17,37	22,24	6,83	296,52	61,67
PM [t/y]	2030	0,479	0,676	0,866	0,266	11,54	2,4
	2035	0,474	0,668	0,856	0,263	11,4	2,37
	2040	0,458	0,646	0,827	0,254	11	2,29
	2045	0,452	0,638	0,817	0,251	10,89	2,27
	2050	0,442	0,623	0,798	0,245	10,63	2,21
CO ₂ [t/y]	2030	27,12	38,25	48,98	15,04	652,9	135,78
	2035	26,82	37,82	48,43	14,87	645,56	134,25
	2040	25,9	36,53	46,78	14,36	623,55	129,68
	2045	25,6	36,1	46,23	14,2	616,22	128,15
	2050	24,99	35,24	45,13	13,86	601,54	125,1

7.3. PROIEZIONI FUTURE CON IL SECONDO METODO

Le previsioni future, sempre per gli stessi anni, sono state ripetute con un secondo metodo. In particolare quest'ultimo prevede i seguenti steps:

- si considerano, per le sei città in esame, i gradi giorno calcolati in precedenza presenti in tabella 11;
- si esamina la correlazione tra i consumi di gas naturale e i gradi giorni medi per ciascun anno di interesse (2003-2015). Tali dati, riferiti esclusivamente alla zona climatica E, vengono prelevati direttamente dal report “*Consumi energetici e heating degree days (HDD) a confronto. Proiezioni al 2050 degli HDD in differenti scenari climatici*” e rappresentati nella figura 42 sottostante.

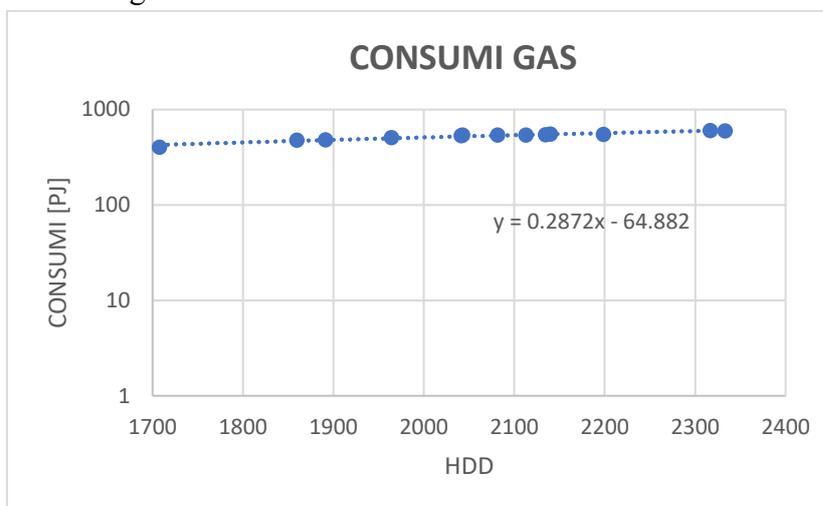


Figura 42: Grafico di dispersione consumi di gas- HDD [37]

- È necessario scalare l'asse delle ordinate (figura 37), cioè i consumi di gas, così da poterli correlare ai dati delle sei città. Pertanto, entrando nel grafico con il grado giorno specifico della città, si legge il rispettivo consumo di gas. Si divide il dato appena ottenuto con il consumo di energia primaria degli edifici sostituiti dal sistema TLR [11]. Si procede, di conseguenza, scalando l'asse delle ordinate con quest'ultimo risultato;
- Successivamente si rappresentano i nuovi consumi ottenuti per ogni città;
- Per ottenere il consumo di gas futuro, si considera il grado giorno di riscaldamento relativo agli anni 2030, 2035, 2040 2045, 2050 (figura 25 e 26) e con questo si entra nel grafico della città specifica e si ottiene il consumo di gas relativo a quel determinato anno. Tale procedimento viene ripetuto per le sei città in esame e per entrambi gli scenari climatici RCP4.5 e RCP8.5;
- Per il calcolo delle emissioni future, si procede moltiplicando i consumi relativi agli anni futuri per i fattori di emissioni specifici dei contaminanti (tabella 13).

Nelle pagine che seguono vengono riportati i grafici di dispersione scalati, i consumi di gas (GWh) e le emissioni future dei contaminanti (t/y) per ciascuna città e per entrambi gli scenari climatici.

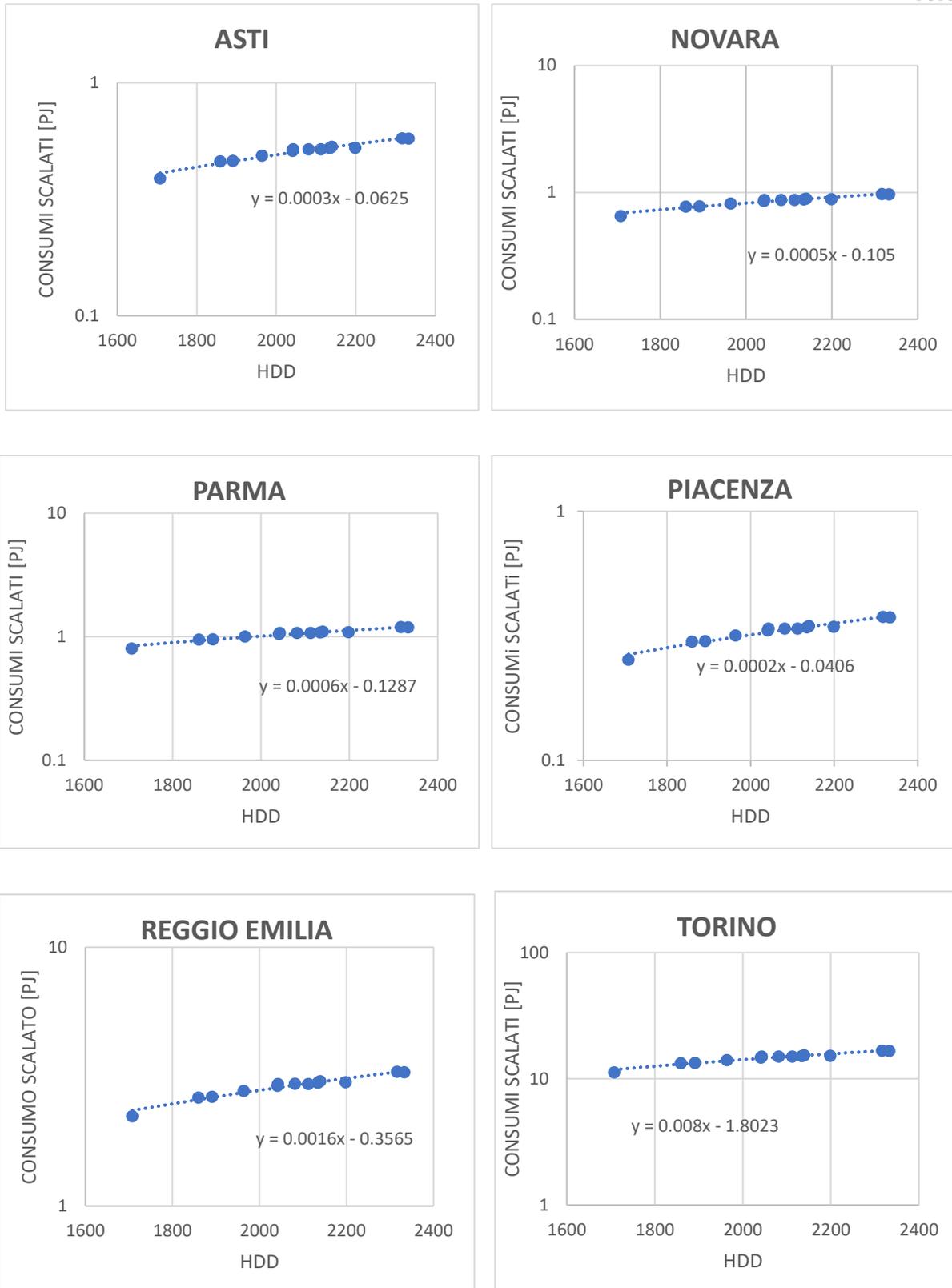


Figura 43: Grafici semi-log di dispersione consumi di gas- HDD scalati per ciascuna delle città

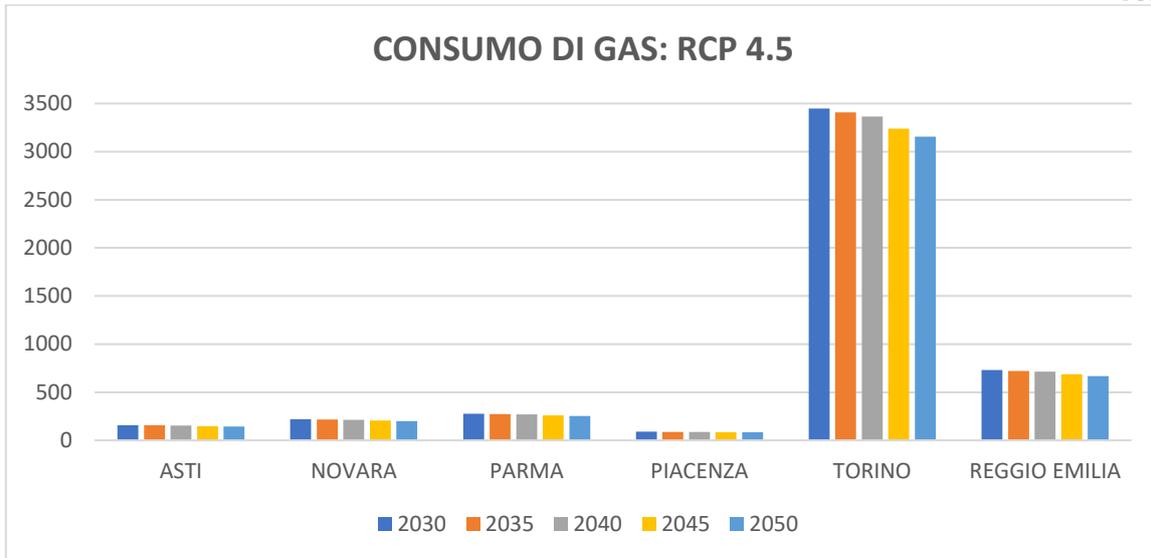


Figura 44: Proiezione futura del consumo di gas sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP4.5.

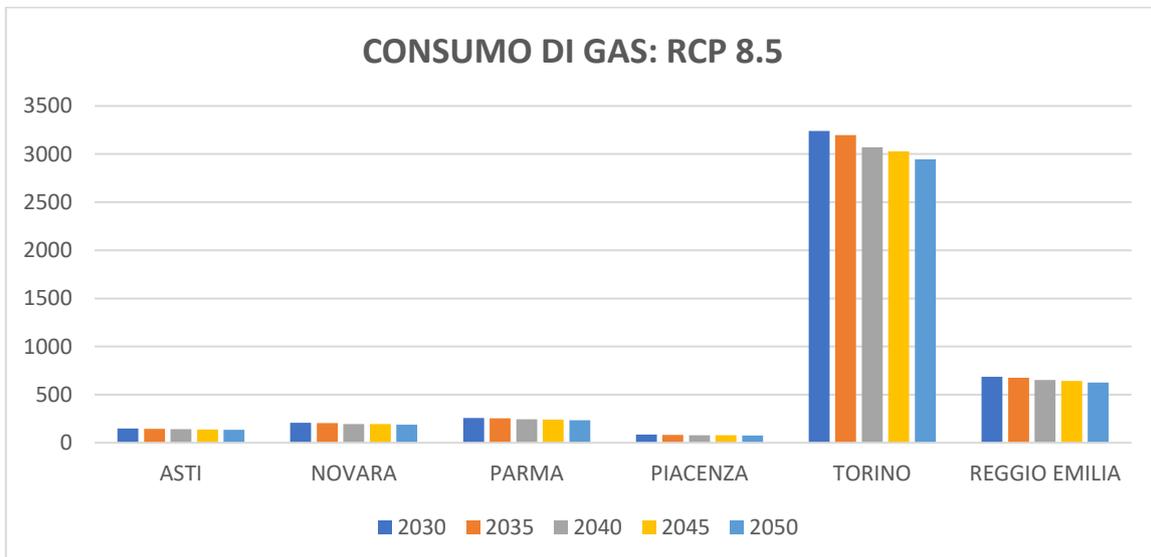


Figura 45: Proiezione futura del consumo di gas sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP8.5.

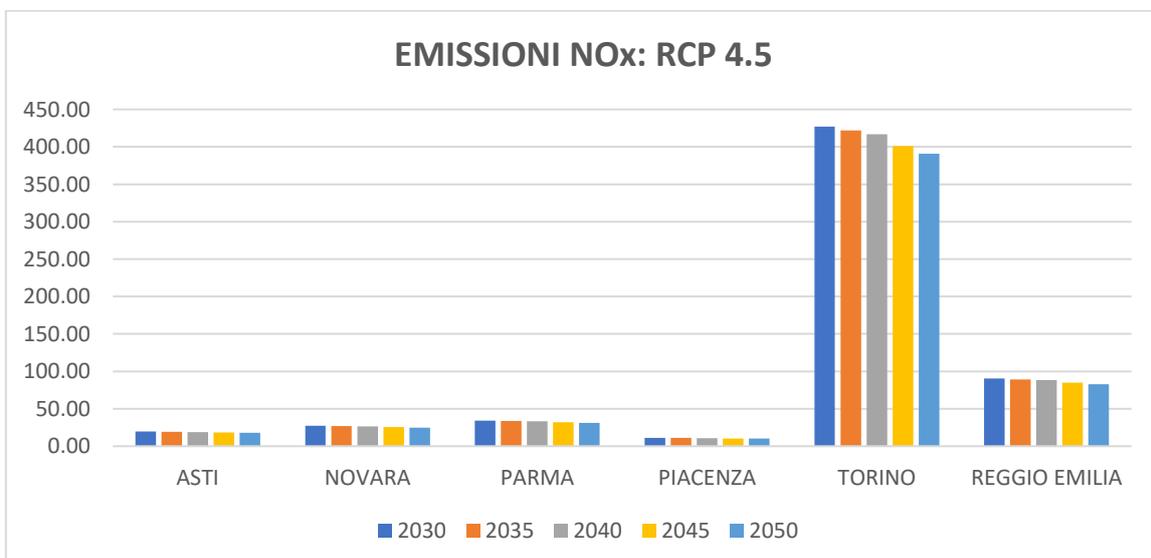


Figura 46: Proiezione futura di emissioni di NOx sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP4.5.

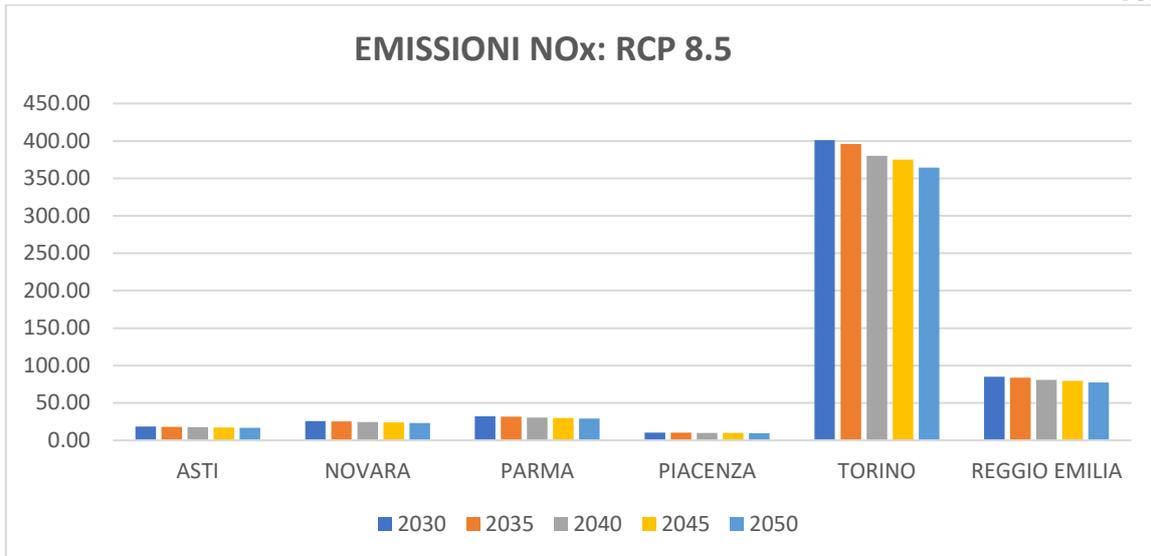


Figura 47: Proiezione futura di emissioni di NOx sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP8.5.

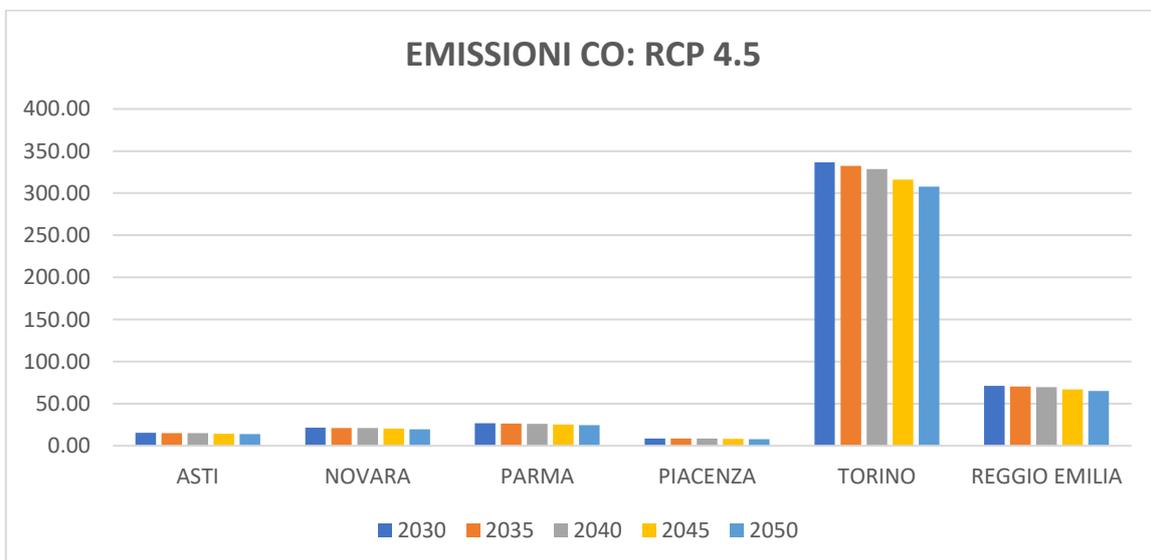


Figura 48: Proiezione futura di emissioni di CO sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP4.5.

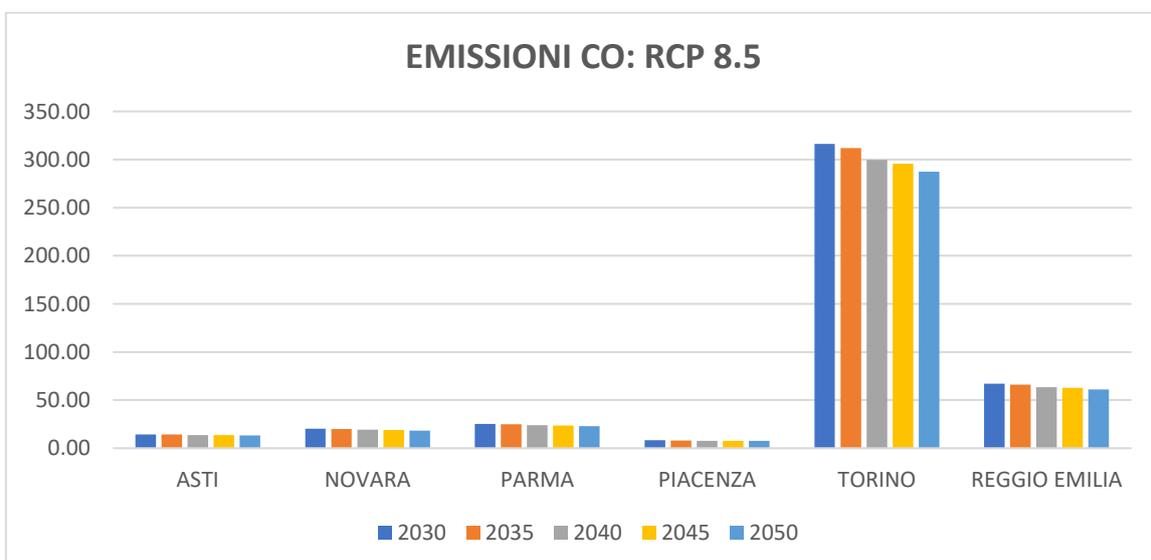


Figura 49: Proiezione futura di emissioni di CO sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP8.5.

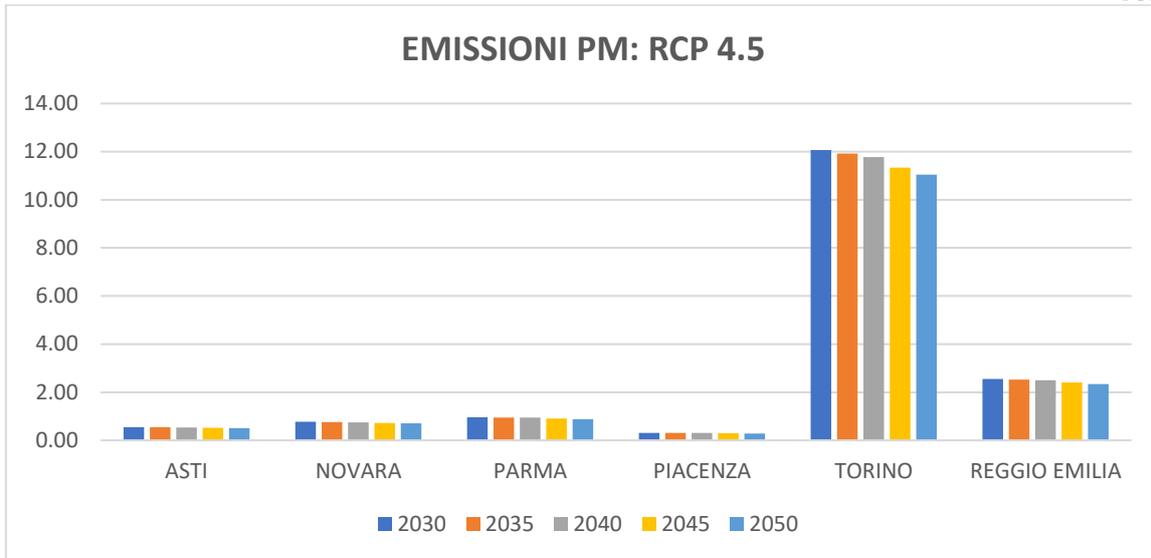


Figura 50: Proiezione futura di emissioni di PM sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP4.5.

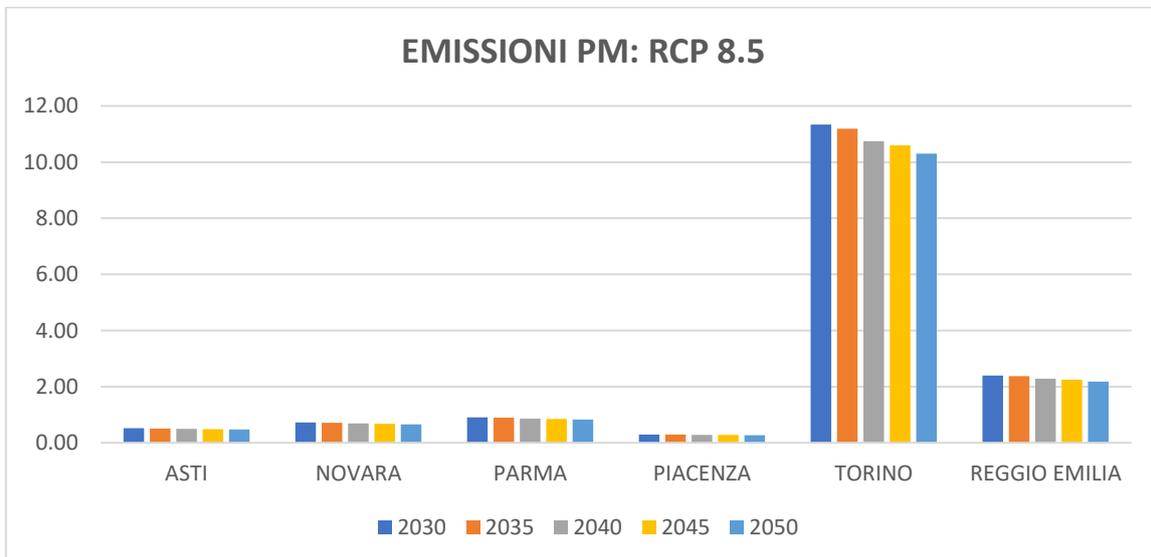


Figura 51: Proiezione futura di emissioni di PM sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP8.5.

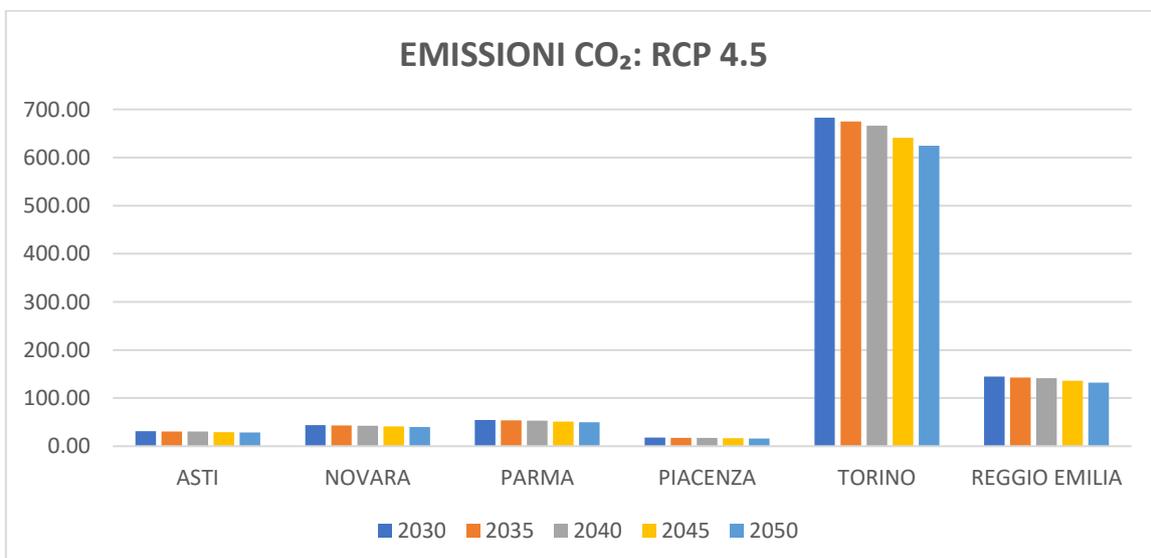


Figura 52: Proiezione futura di emissioni di CO₂ sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP4.5.

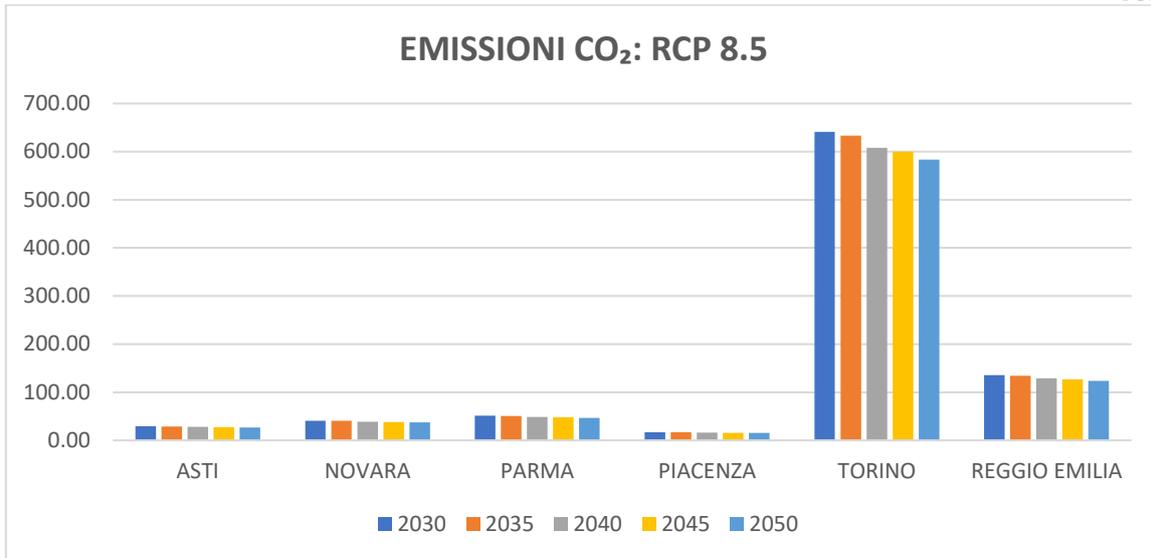


Figura 53: Proiezione futura di emissioni di CO₂ sviluppato con il secondo metodo. Scenario RCP8.5.

Tabella 19: Proiezioni future delle emissioni. Secondo metodo. Scenario RCP4.5

		METODO 2: RCP4.5					
		ASTI	NOVARA	PARMA	PIACENZA	TORINO	REGGIO EMILIA
Nox [t/y]	2030	19,46	27,22	34,05	11,11	427	90,41
	2035	19,23	26,89	33,64	10,97	421,8	89,31
	2040	19	26,56	33,23	10,84	416,6	88,22
	2045	18,31	25,58	32	10,44	401	84,95
	2050	17,85	24,92	31,18	10,18	390,6	82,76
CO [t/y]	2030	15,34	21,46	26,84	8,76	336,6	71,27
	2035	15,16	21,2	26,52	8,65	332,5	70,41
	2040	14,98	20,94	26,19	8,55	328	69,55
	2045	14,44	20,17	25,23	8,23	316	66,97
	2050	14,08	19,65	24,58	8,02	307,9	65,25
PM [t/y]	2030	0,55	0,77	0,96	0,314	12,1	2,56
	2035	0,54	0,76	0,95	0,31	11,9	2,53
	2040	0,53	0,75	0,94	0,307	11,7	2,49
	2045	0,52	0,72	0,9	0,295	11,33	2,4
	2050	0,5	0,7	0,88	0,29	11,04	2,34
CO ₂ [t/y]	2030	31,13	43,54	54,45	17,76	682,98	144,59
	2035	30,76	43,01	53,8	17,55	674,66	142,85
	2040	30,39	42,49	53,14	17,34	666,34	141,1
	2045	29,29	40,91	51,18	16,7	641,37	135,86
	2050	28,55	39,86	49,87	16,28	624,73	132,37

Tabella 20: Proiezioni future delle emissioni. Secondo metodo. Scenario RCP8.5

		METODO 2: RCP8.5					
		ASTI	NOVARA	PARMA	PIACENZA	TORINO	REGGIO EMILIA
Nox [t/y]	2030	18,31	25,58	32	10,44	401	84,95
	2035	18,08	25,25	31,59	10,31	395,8	83,85
	2040	17,39	24,27	30,36	9,91	380	80,58
	2045	17,16	23,94	29,95	9,78	378	79,49
	2050	16,7	23,28	29,13	9,51	364,6	77,3
CO [t/y]	2030	14,44	20,17	25,23	8,23	316	66,97
	2035	14,26	19,91	24,9	8,13	312	66,11
	2040	13,71	19,13	23,94	7,81	299,7	63,52
	2045	13,53	18,87	23,61	7,71	295,26	62,66
	2050	13,17	18,36	22,97	7,5	287,4	60,94
PM [t/y]	2030	0,52	0,72	0,9	0,295	11,33	2,4
	2035	0,51	0,71	0,89	0,291	11,19	2,37
	2040	0,49	0,69	0,86	0,28	10,74	2,28
	2045	0,48	0,68	0,85	0,276	10,6	2,25
	2050	0,47	0,66	0,82	0,269	10,3	2,19
CO ₂ [t/y]	2030	29,29	40,91	51,18	16,7	641,37	135,86
	2035	28,92	40,39	50,52	16,49	633,05	134,11
	2040	27,82	38,81	48,56	15,85	608,09	128,87
	2045	27,45	38,29	47,9	15,64	599,77	127,12
	2050	26,72	37,24	46,6	15,21	583,13	123,63



7.4. CONCLUSIONI

Per il riscaldamento delle abitazioni vengono impiegate numerose quantità di combustibile fossile, con conseguenti emissioni di gas-serra. In una strategia di decarbonizzazione diventa fondamentale stimare in modo adeguato il fabbisogno energetico.

Per descrivere la relazione non lineare tra domanda energetica e temperatura viene utilizzato il seguente indice: gradi giorno di riscaldamento (heating degree days HDD).

Il lavoro svolto ha avuto come obiettivo quello di stimare i gradi giorno di riscaldamento relativi a sei città: Asti, Novara, Parma, Piacenza, Torino e Reggio Emilia per le successive decadi considerando eventuali cambiamenti climatici. A tale scopo sono stati considerati due scenari climatici, RCP4.5 e RCP8.5, e utilizzate due metodologie, le quali differiscono sostanzialmente nell'uso dei valori:

- con il primo metodo vengono applicate direttamente le riduzioni delle proiezioni dei gradi giorno di riscaldamento, ottenute dal seguente report *“Consumi energetici e heating degree days (HDD) a confronto. Proiezioni al 2050 degli HDD in differenti scenari climatici”*, per la stima degli HDD e del consumo energetico, quest'ultimo utilizzato successivamente per la stima delle emissioni future;
- con il secondo metodo, invece, si considerano i consumi nazionali di gas, relativi al periodo 2003-2015, sempre dello stesso report precedente, i quali vengono, però, adeguatamente scalati secondo i consumi delle abitazioni delle città in esame, il cui sistema di riscaldamento è sostituito da quello TLR. Da ciò, mediante gli HDD futuri, si stima il consumo di gas relativo agli anni 2030, 2035, 2040, 2045, 2050 e le conseguenti emissioni.

Secondo i risultati, ottenuti da entrambi i metodi, è possibile osservare una sostanziale riduzione, sia per il consumo di gas sia per le emissioni per tutte le città in esame. In particolare la diminuzione tende ad aumentare man mano che ci riferiamo a periodi futuri più lontani (2050) rispetto al periodo di riferimento. Inoltre tale comportamento è più accentuato per il secondo scenario climatico, RCP8.5, in quanto prevede un aumento più elevato della temperatura dell'aria. Questo evidentemente si traduce in una minore necessità di utilizzo di riscaldamento e quindi un minor consumo di gas e una minore quantità di emissioni di contaminanti nel periodo invernale.

Le due metodologie appaiono tra loro equivalenti in quanto i risultati ottenuti sono pressoché analoghi. In particolare quelli del primo metodo appaiono leggermente più elevati rispetto a quelli calcolati con il secondo, eccetto per Torino e Reggio Emilia (tabella 21 e 22). Questo dipende esclusivamente dal valore relativo al consumo di energia primaria degli edifici sostituiti dal sistema TLR, utilizzato per scalare l'asse delle ordinate. Infatti queste due città presentano un consumo molto più elevato rispetto alle altre, proporzionale alla dimensione dell'impianto TLR (tabella 1).

Da un punto di vista analitico, risulta più cautelativo il secondo procedimento perché i consumi nazionali del gas a cui si fa riferimento sono opportunamente scalati secondo i valori dell'energia primaria consumata dagli edifici caratterizzati dal sistema TLR.

È necessario, inoltre, evidenziare che i seguenti metodi si basano su un periodo relativo a 15 anni. In generale, però, la scelta della lunghezza temporale su cui effettuare analisi climatiche è solitamente 30 anni, come indicato da IPPC [37]. Questo perché viene ritenuto un periodo



abbastanza lungo e adeguato per la caratterizzazione sia dei valori medi sia dei valori estremi della variabile di interesse.

Quest'ultima parte dello studio, pertanto, vuole evidenziare le conseguenze dovute all'impatto dei cambiamenti climatici, in particolare l'influenza che si avrebbe dal riscaldamento globale dell'aria, e conferma la necessità di un piano di sviluppo più efficiente e sostenibile del riscaldamento del settore residenziale, il quale risulterebbe oltre che una misura di adattamento anche di mitigazione in quanto si avrebbero delle emissioni di inquinanti più contenute. A tal proposito la valutazione effettuata nella prima parte della tesi, dimostra come un sistema di teleriscaldamento alimentato da centrali cogenerative rappresenti una scelta ambientale adatta per ridurre l'impatto.

Tabella 21: Differenze percentuali tra i due metodi. Scenario RCP4.5

		DIFFERENZE IN % TRA I DUE METODI: SCENARIO RCP4.5					
		ASTI	NOVARA	PARMA	PIACENZA	TORINO	REGGIO EMILIA
Nox [t/y]	2030	8,65%	7,76%	5,26%	11,88%	-0,96%	0,83%
	2035	8,52%	7,60%	5,13%	11,60%	-1,12%	0,68%
	2040	8,39%	7,44%	4,96%	11,75%	-1,27%	0,52%
	2045	7,96%	6,98%	4,47%	11,06%	-1,77%	0,06%
	2050	7,66%	7,04%	4,14%	10,77%	-2,12%	-0,28%
CO [t/y]	2030	8,64%	7,79%	5,25%	11,88%	-0,97%	0,82%
	2035	8,52%	7,61%	5,11%	11,61%	-1,13%	0,67%
	2040	8,39%	7,44%	4,93%	11,62%	-1,41%	0,52%
	2045	8,00%	7,00%	4,52%	11,07%	-1,81%	0,06%
	2050	7,73%	6,62%	4,15%	10,62%	-2,13%	-0,28%
PM [t/y]	2030	8,70%	7,84%	5,03%	11,74%	-0,74%	1,19%
	2035	7,78%	7,65%	4,97%	11,51%	-1,65%	0,88%
	2040	6,85%	7,30%	5,03%	11,64%	-1,93%	0,40%
	2045	8,56%	6,51%	3,93%	10,90%	-1,82%	0,00%
	2050	6,61%	5,90%	4,02%	11,54%	-2,13%	0,00%
CO ₂ [t/y]	2030	8,69%	7,77%	5,26%	11,77%	-0,96%	0,82%
	2035	8,54%	7,61%	5,12%	11,64%	-1,11%	0,68%
	2040	8,42%	7,46%	4,96%	11,51%	-1,27%	0,53%
	2045	8,00%	44,81%	4,49%	11,04%	2,47%	0,06%
	2050	7,70%	6,61%	4,16%	10,75%	-2,11%	-0,27%



Tabella 22 Differenze percentuali tra i due metodi. Scenario RCP8.5

		DIFFERENZE IN % TRA I DUE METODI: SCENARIO RCP8.5					
		ASTI	NOVARA	PARMA	PIACENZA	TORINO	REGGIO EMILIA
Nox [t/y]	2030	7,96%	6,98%	4,47%	11,06%	-1,77%	0,06%
	2035	7,81%	6,77%	4,33%	10,86%	-1,94%	-0,11%
	2040	7,41%	6,26%	3,79%	10,36%	-2,53%	-0,62%
	2045	7,25%	6,07%	3,63%	10,14%	-1,89%	-0,80%
	2050	6,91%	5,67%	3,22%	9,82%	-3,06%	-1,18%
CO [t/y]	2030	8,00%	7,00%	4,52%	11,07%	-1,81%	0,06%
	2035	7,87%	6,81%	4,32%	10,91%	-1,95%	-0,11%
	2040	7,36%	6,22%	3,82%	10,31%	-2,50%	-0,63%
	2045	7,21%	6,07%	3,60%	10,14%	-2,80%	-0,81%
	2050	6,90%	5,70%	3,28%	9,81%	-3,08%	-1,18%
PM [t/y]	2030	8,56%	6,51%	3,93%	10,90%	-1,82%	0,00%
	2035	7,59%	6,29%	3,97%	10,65%	-1,84%	0,00%
	2040	6,99%	6,81%	3,99%	10,24%	-2,36%	-0,44%
	2045	6,19%	6,58%	4,04%	9,96%	-2,66%	-0,88%
	2050	6,33%	5,94%	2,76%	9,80%	-3,10%	-0,90%
CO ₂ [t/y]	2030	8,00%	6,95%	4,49%	11,04%	-1,77%	0,06%
	2035	7,83%	6,80%	4,32%	10,89%	-1,94%	-0,10%
	2040	7,41%	6,24%	3,81%	10,38%	-2,48%	-0,62%
	2045	7,23%	6,07%	3,61%	10,14%	-2,67%	-0,80%
	2050	6,92%	5,68%	3,26%	9,74%	-3,06%	-1,18%



BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] <http://www.italiaenergetica.com/>
- [2] <http://www.irenenergia.it/ChiSiamo/Attivita/Teleriscaldamento/>
- [3] Gruppo IREN. (2013). Gli impianti di cogenerazione e il teleriscaldamento a Torino
- [4].http://ambiente.comune.forli.fc.it/public/cms_page_media/75/BROCHURE%20TELERIS CALDAMENTO-RENAEL.pdf
- [5] ARPA Piemonte. Stazioni di misura.
- [6] ARPA Piemonte. Dati elaborati tramite modelli diagnostici.
- [7] ARPA Emilia Romagna. Stazioni di misura.
- [8] ARPA Emilia Romagna. Dati elaborati tramite modelli diagnostici.
- [10] <https://www.gruppoiren.it/teleriscaldamento-la-rete-iren>
- [11] Mariachiara Zanetti, Deborah Panepinto, Marco Ravina. (2017-2019). *Studio degli impatti sulla qualità dell'aria del sistema di teleriscaldamento delle città di Asti Novara, Parma, Piacenza, Torino e Reggio Emilia*
- [12] Fracastoro G.V., Mutani G., Verda V. (2013). Piano d'azione per l'energia sostenibile della Provincia di Torino. Analisi del fabbisogno di energia per gli edifici residenziali e della potenzialità di risparmio energetico e delle fonti rinnovabili in ambito urbano.
- [13] Nada Osseiran, Christian Lindmeier. (2/05/2018). *9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action*. Tratto da <https://www.who.int/news-room/detail/>
- [14] Terzano, C. (2018). *Lifestyle*. Tratto da The Next Tech: <https://thenexttech.startupitalia.eu/65563-20180504-linquinamento-piu-morti-guerra>
- [15] Fareg Frafog. (2018). *Che cos'è lo smog?* Tratto da <https://www.frareg.com/it/ambiente/che-coselo-smog/>
- [16] Città di Torino. (2018). *Qualità dell'aria a Torino*. Tratto da InformAmbiente: http://www.comune.torino.it/ambiente/aria/aria_torino/index.shtml
- [17] ISPRA 2018, Gli indicatori del clima in Italia nel 2018, tratto da: <http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/gli-indicatori-del-clima-in-italia-nel-2018>
- [18] Fondazione Sviluppo Sostenibile. (2017). *La sfida della qualità dell'aria nelle città italiane*. https://www.fondazionevilupposostenibile.org/wpcontent/uploads/dlm_uploads/2017/09/Report-La_sfida_della_qualita_dell_aria_nelle_citta_italiane_2017.pdf
- [19] Marco Ivaldi, Marco Testa, Luca Feletti, Giovanni Cugliari*. (2018). *Inquinamento atmosferico: effetti sulla salute umana e sulla performance sportiva*. Tratto da:



<https://www.infobuildenergia.it/appfondimenti/inquinamento-atmosferico-effetti-salute-umana-performance-sportiva-383.html>

[20] WHO. (2005). *Air Quality Guidelines Global Update 2005*. Tratto da:
https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/

[21] EEA (2019). European Environment Agency. *Air quality in Europe 2019*.
<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019d>

[22] D'Elia, I., Peschi, E., (2013) *Lo scenario emissivo nazionale nella negoziazione internazionale*. ENEA Technical Report, RT/2013/10/ENEA

[23] D'Elia I., Peschi E., (2016) *How national integrated air quality models can be used in defining environmental policies: the revision of the NEC directive*.
ENEA Technical report, RT/2016/30ENEA

[24] Arpa. L'aria in Emilia-Romagna. *Normativa*. Tratto da:
https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=3885&idlivello=2078

[25] Arpa Piemonte. *NORMATIVA*. Tratto da:
<http://www.arpa.piemonte.it/chi-siamo/normativa>

[26] Arpa Piemonte. (2019). *Relazione Ambiente*. Tratto da:
<http://relazione.ambiente.piemonte.it/2019/it/aria/impatti/salute>

[27] Geobiolab. (s.d.). *L'apparato respiratorio*. Tratto da
<https://geobiolab.jimdo.com/2-media/lapparato-respiratorio>

[28] Ravina, M., Panepinto, D., Zanetti, M.C. (2018). *DIDEM - An integrated model for comparative health damage costs calculation of air pollution*. *Atmospheric Environment* 173, 81-95, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.010.

[29] WHO (2013a). *Health Risks of Air Pollution in Europe*. HRAPIE Project. *Recommendations for Concentration-response Functions for Cost-benefit Analysis of Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*; World Health Organization, Regional Office for Europe; p 54.

[30] Holland M. (2014). *Implementation of the HRAPIE Recommendations for European Air Pollution CBA Work*. Report.

[31] G PERIN. (2004). *AMBIENTE E SALUTE, INDICI AMBIENTALI*. Tratto da:
https://www.unive.it/media/allegato/download/Scienze/Materiale%20didattico%20Perin/Ambiente%20e%20salute/9_Indici_di_qualita.pdf

[32] Stefano Zauli Sajani, Stefano Marchesi, Fabiana Scotto, ARPA EMILIA ROMAGNA. *DEFINIZIONE DI UN INDICE DI QUALITA' DELL'ARIA PER EMILIA-ROMAGNA*

[33] Inemar. *Inventario emissioni aria. Regione Lombardia*
<http://www.inemar.eu/xwiki/bin/view/InemarDatiWeb/Inquinanti+e+loro+effetti>

[34] Filippo Giorgi. *Costruire il futuro*. Tratto da:
<https://costruireilfuturo.com/streaming/>

[35] *IPPC Report Graphics*. Tratto da



<https://archive.ipcc.ch/report/graphics/index.php?t=Assessment%20Reports&r=AR5%20-%20WG1&f=Technical%20Summary>

[36] IPCC. (2018). *Riscaldamento globale di 1.5°C*. Tratto da:
<https://www.ipcc.ch/>

[37] ISPRA. (2017). *Consumi energetici e heating degree days (HDD) a confronto. Proiezioni al 2050 degli HDD in differenti scenari climatici*.

[38] Paola Faggian, Giuseppe Maurizio Riva, Riccardo Bonanno. (2018). *STIMA DEI GRADI-GIORNO PER LA VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO ENERGETICO NAZIONALE NEI PROSSIMI DECENNI*. Tratto da:
https://www.ingegneriadellambiente.net/vol5_n4/Faggian_IDA_4_2018.pdf?fbclid=IwAR2WFjZDAUCclMorK-jvtOUJMqQ_fSY-b3SrgQPejsGd4CVaAlTr23tLiaQ

[39] Paola Mercogliano Giuliana Barbato. (2017). *ANOMALIA CLIMATICA MENSILE PER INDICATORI HDD E CDD*. Tratto da:
<https://www.ispraambiente.it>

[40] Zone climatiche e GG secondo il DPR-412-93. Tratto da:
http://www.contabilizzazionecalore.biz/news/46-zone-climatiche-e-gg-secondo-il-dpr-412-93.html?fbclid=IwAR1DT7N63yKjCBQx8ba1X3wu4FxBDcF4fFTcMdxzyT5v_VFrXrkGIVouWTg

[41] Teleriscaldamento e teleraffreddamento in Italia. Tratto da:
https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Nota%20TLR%202019.pdf

[42] Samanta Meli (Università di Pavia). *IL SETTORE DEL TELERISCALDAMENTO IN ITALIA: STRUTTURA E ASSETTO REGOLATORIO*. Tratto da:
<http://economieweb.unipv.it/wp-content/uploads/2017/06/DEMWP0120.pdf>

[43] Cogenerazione. Tratto da:
<http://www.tecnoenergiespeziasrl.com/cogenerazione/cogenerazione/>

[44] <https://sycous.com/eu-directive-on-energy-efficiency-2012-the-impact-andpotential-across-europe/>

[45] *GREEN CITY E TELERISCALDAMENTO. GLI ESEMPI IN EUROPA*. Tratto da:
https://www.lifegate.it/impresenews/green_city_e_teleriscaldamento_gli_esempi_in_europa

[46] RENAEL - REte Nazionale delle Agenzia Energetiche Loca. *TELERISCALDAMENTO TECNOLOGIE, VANTAGGI E ASPETTI NORMATIVI*.

[47] www.ilTeleriscaldamento.eu

[48] Brattebø H, Reenaas M (2012) Confrontando le emissioni di CO₂ e NO_x di un sistema di teleriscaldamento con l'incenerimento dei rifiuti di bruciature di massa rispetto alle probabili soluzioni alternative - Città di Trondheim, 1986-2009. Resour Conserv Recycl 60:

[49] Torchio MF, Genon G, Poggio A, Poggio M (2009) Fusione di analisi energetiche e ambientali per i sistemi di teleriscaldamento.



RINGRAZIAMENTI

“È il tempo che hai perduto per la tua rosa che ha reso la tua rosa così importante”.

È così che voglio concludere il mio lavoro di tesi, con questa citazione tratta da “Il Piccolo Principe” di Antoine De Saint-Exupery, in quanto rappresenta al meglio quello che per me ha significato questo percorso universitario.

Dedico quest’ultime righe a tutte le persone che hanno contribuito a rendere possibile il raggiungimento di tale obiettivo, supportandomi e sopportandomi sempre.

Ringrazio i miei relatori che mi hanno aiutato nella realizzazione della tesi, in particolar modo esprimo la mia gratitudine alla Prof.ssa Deborah Panepinto e all’ Ing. Marco Ravina per loro disponibilità ed esperienza.

Il ringraziamento più importante va ai miei genitori, che, con il loro affetto e sostegno hanno permesso tutto questo. Condivido con loro la gioia di questo traguardo.

Infine ringrazio di cuore i miei amici e tutti i colleghi conosciuti in questi anni, che con cene, serate e risate hanno contribuito a rendere indimenticabile questa esperienza.