

DALLA “GREEN STATION” ALLA “BLUE STATION”: LA STAZIONE FERROVIARIA COME VOLANO DI RIQUALIFICAZIONE TERRITORIALE

Andrea Spinosa<sup>1</sup>

**SOMMARIO**

Il paper illustra lo studio della stazione ferroviaria moderna come oggetto complesso per farne, attraverso una strategia integrata di mitigazione e compensazione dell’impatto dell’esercizio ferroviario quotidiano, un volano di riqualificazione che vada oltre il singolo edificio in sé ma si proietti a scala urbana.

Il metodo si fonda sulla formulazione di un algoritmo per la misurazione dell’impronta ecologica (descritta in termini di fabbisogni equivalenti energetico e idrico) dell’esercizio di impianti (di medie e grandi dimensioni). La standardizzazione di questa analisi ha come scopo quello di fornire un supporto attivo nella pianificazione e progettazione mirata delle misure di mitigazione e compensazione nell’ambito della strategia di cui i vari gestori ferroviari si stanno dotando nei propri piano di sviluppo per l’azzeramento netto delle emissioni climalteranti dirette e indirette.

Il prodotto della ricerca è un nuovo modello di stazione, la *Blue station*, un paradigma che va oltre il concetto di “Green station” inteso come adozione di politiche e presidi maggiormente ecosostenibili mantenendo di fatto invariato il modello di sviluppo commerciale della *Grande stazione* come stazione-centro commerciale. La *Blue station*, puntando sul suo ruolo naturalmente centrale, vede la stazione come un potenziale esportatore di flussi energetici (energia prodotta in situ da FER, energia recuperata dalla frenatura dei treni, calore geotermico da sonde a bassa entalpia oppure semplicemente il contributo di stabilizzazione/regolazione della rete di distribuzione grazie a banchi di accumulo e rilascio programmato) e materie (acque meteoriche recuperate per usi specifici al contorno, acque esterne recuperate da impianti di stazione e cedute a terzi, semilavorati o lavorati da orti urbani, micro-impianti di verde urbano, impianti estensivi di forestazione urbana).

---

<sup>1</sup> Ente, Università e Dipartimento, Città, e-mail: nnnn @xxxx.it.

## 1. La stazione ferroviaria come ultimo impianto industriale urbano

La mobilità nel mondo contemporaneo si configura come il principale processo produttivo: questo significa che la sostenibilità di un territorio deve necessariamente essere prima di tutto una sostenibilità degli spostamenti. L'aumento degli spostamenti e soprattutto delle percorrenze, la convenienza economica e, non ultima, una maggiore sensibilità ambientale configurano una sempre maggiore rilevanza dell'uso del mezzo ferroviario. In questo quadro le stazioni sono oggetti complessi che richiedono rilevanti flussi di materie che costituiscono la loro impronta ecologica: nella sua complessità la stazione ferroviaria è l'ultimo impianto industriale accettato nella città contemporanea.



Figura 1. La stazione ferroviaria moderna come spazio del movimento ma anche dell'incontro e soprattutto dell'acquisto

Parlare di sostenibilità di una stazione significa indagare e misurare la sua impronta ecologica per fornire un supporto attivo nella pianificazione e progettazione mirata delle misure di mitigazione con una efficacia sicuramente amplificata dal ruolo naturale di centralità che è proprio delle stazioni ferroviarie. Le direttrici di lavoro sono sintetizzabili in quattro direttrici specifiche:

- **Chi utilizza le stazioni?**

Definizione dell'utente tipo che utilizza la stazione e per quali esigenze di spostamento sia di tipo sistematico (pendolare) che non sistematico, anche alla luce dei cambiamenti sociali indotti dalla pandemia di Cov-Sars-2 e dalle relative misure di distanziamento sociale

- **Di cosa hanno bisogno e cosa producono le stazioni?**

Catalogazione e misure dei flussi di energia e materia delle stazioni

- **Qual è l'impatto di questi flussi di persone e materie?**

Attraverso metodologie di *Life Cycle Sustainability Assessment* e *Social Life Cycle Assessment* dei materiali e prodotti richiesti quotidianamente dalle stazioni per il loro esercizio

- **È possibile mitigare e/o compensare questo impatto?**

Attraverso soluzioni tecnologiche e soluzioni *nature-based* in relazione alla potenzialità di mitigazione/compensazione dell'impronta ecologica di una stazione

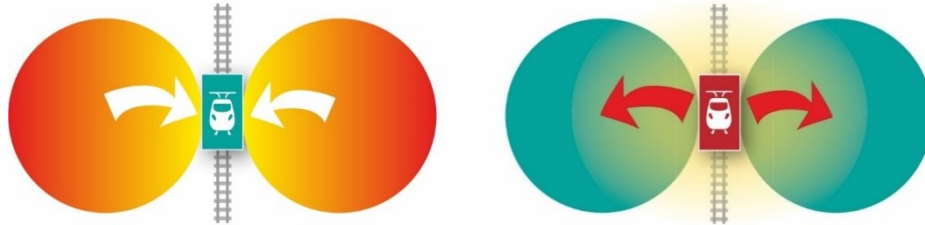


Figura 2. Con l'approccio tradizionale la stazione si adatta al contesto urbano; la Blue Station è un elemento attivo di miglioramento dell'ambiente urbano circostante

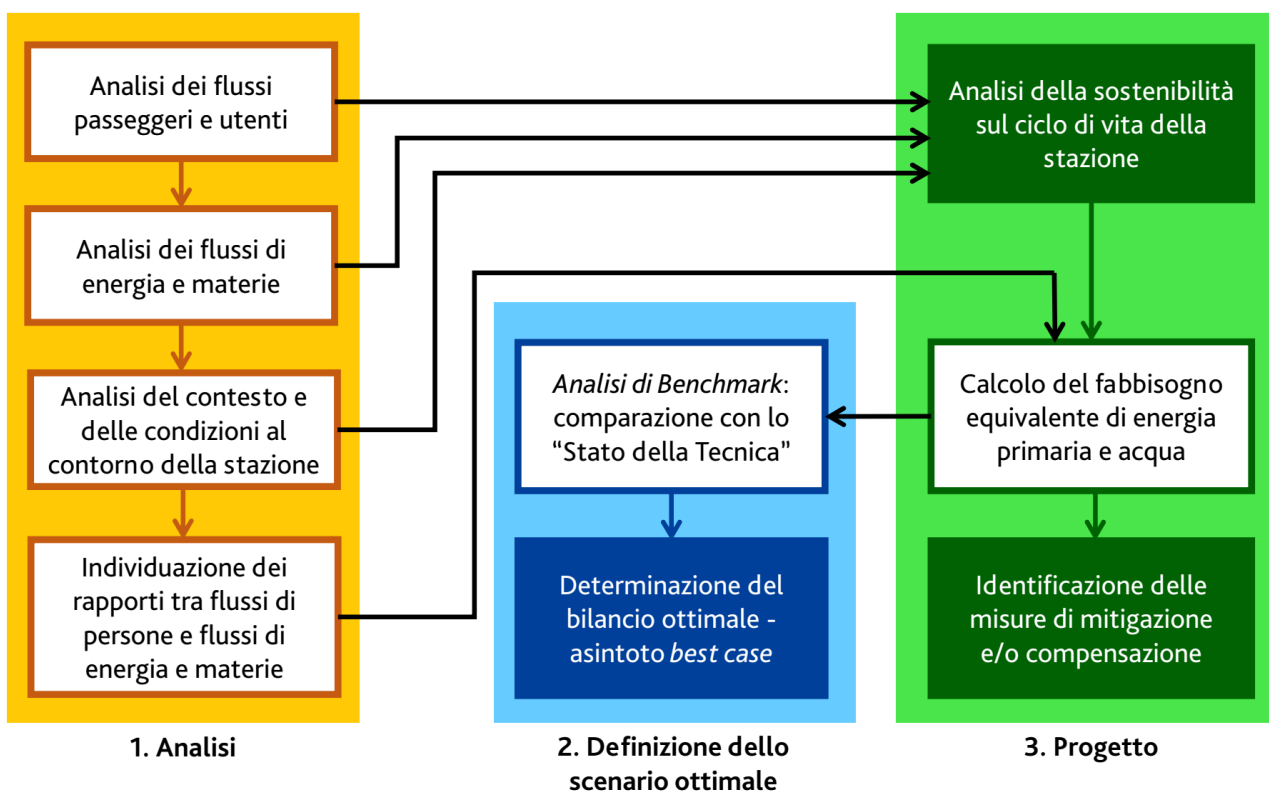


Figura 3. Schema concettuale dell'analisi della sostenibilità di una stazione

## 2. Illustrazione del metodo di analisi prestazionale: il caso della stazione Tiburtina e il nodo ferroviario di Roma

La stazione di Roma Tiburtina è localizzata sulla linea per Firenze, tra i quartieri Pietralata, Nomentano e Tiburtino. Nel 2011, nell'ambito delle cerimonie per i 150 anni dell'Unità d'Italia è stata dedicata a Camillo Benso, conte di Cavour. Con 485 treni per giorno feriale<sup>2</sup>, 145.000 transiti giornalieri e 15.134.200 viaggiatori annuali è la seconda stazione romana e la sesta a livello nazionale. È servita da tutti i treni a lunga percorrenza passanti sulla dorsale nord-sud e dalle linee regionali FL1 (Orte – Fiumicino Aeroporto) ed è capolinea della FL2 (Tiburtina – Tivoli) e FL3 (Tiburtina – Cesano – Viterbo). Tiburtina costituisce inoltre un nodo integrato con la stazione omonima della linea B della metropolitana e l'autostazione *Tibus*, terminal di arrivi e partenze

<sup>2</sup> Dati RFI al 2019



di autobus di linea a media e lunga percorrenza sia per l'Italia sia per l'estero. Il piazzale antistante ospita i capolinea di numerose linee di autobus che lo collegano con i quartieri Pietralata, Tiburtino, Casal Bertone ed il centro della città.

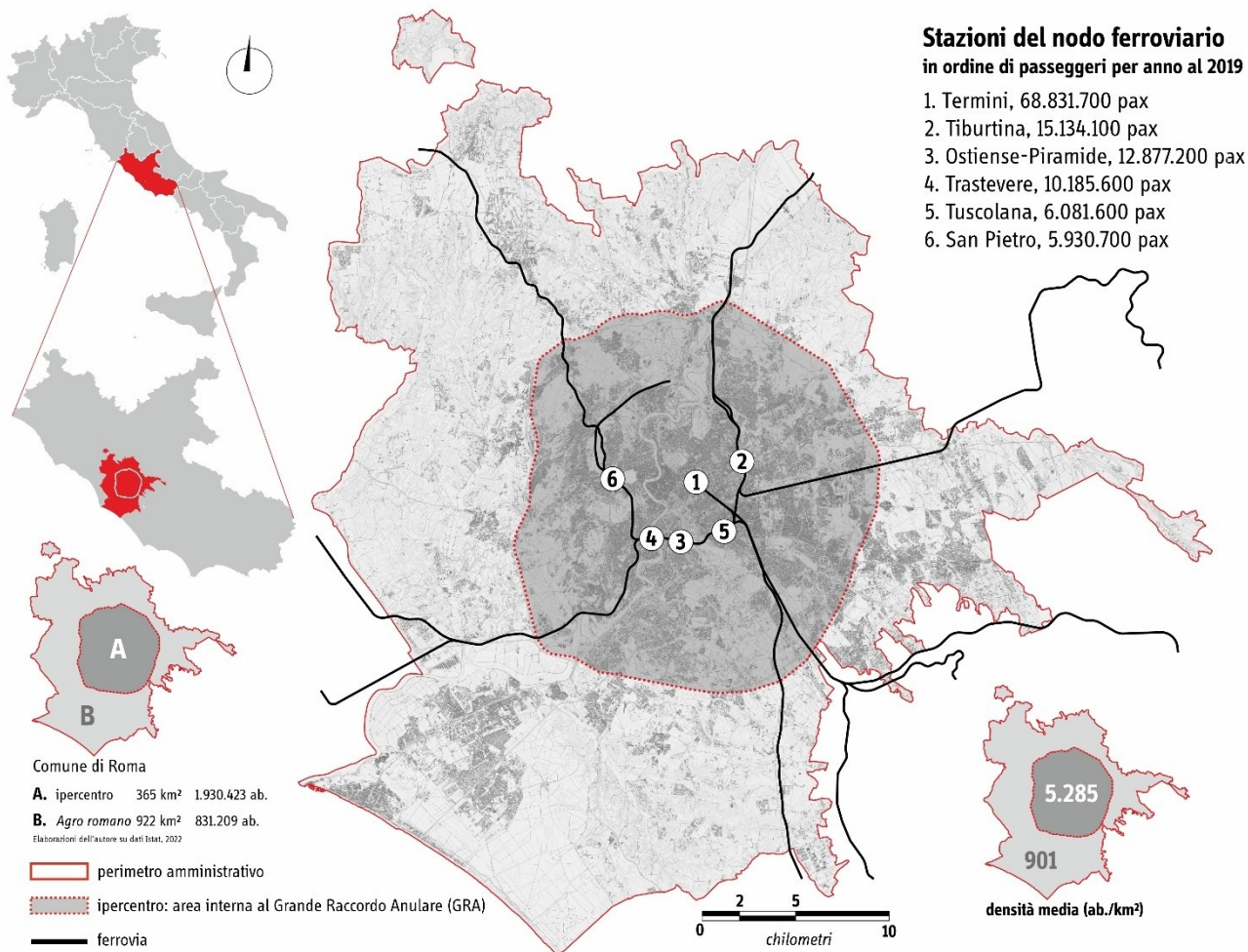


Figura 4. Il nodo ferroviario di Roma con le sei stazioni principali della città in relazione al perimetro comunale e all'area centrale della città identificata con l'area interna al perimetro del raccordo autostradale del GRA (Grande Raccordo Anulare)

Tipo di bacino	Residenti	Addetti
Bacino pedonale (raggio di 1 km)	31.160	10.780
Bacino ciclabile (raggio di 3 km)	96.580	39.240

Tabella 1. Bacino di mobilità della stazione Tiburtina

## 2.1. Valutazione dei fabbisogni annuali di energia primaria e acqua

Nella tabella 2 si riassumono i principali parametri dimensionali e funzionali (all'anno 2019) della stazione Tiburtina. L'analisi considera solo l'impatto dell'operatività quotidiana della stazione, al netto del traffico ferroviario. Sono quindi misurati tutti i fabbisogni energetici (tabella 3) e di acqua (tabella 4) indotti dall'illuminazione, dai sistemi di traslazione verticale (scale mobili e ascensori), dal funzionamento degli impianti sanitari, dalla preparazione di cibi e bevande per la vendita.

Il fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo – ai fini del fabbisogno energetico HVAC, *Heating, Ventilation and Air Conditioning* - sono calcolati sui gradi giorni necessari per la zona climatica di riferimento. Nel caso, la città di Roma è in zona climatica D: il grado-giorno (GG) è l'unità di misura che stima il fabbisogno energetico necessario per mantenere un ambiente confortevole nell'ambiente di riferimento e rappresenta la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, degli incrementi medi giornalieri di temperatura necessari per raggiungere la soglia di 20°.

Tabella 2. Principali caratteristiche dimensionali e funzionali della stazione Tiburtina (anno 2019)

**Dati architettonici**

Indicatore	UDM	Quantità
Superficie totale	m <sup>2</sup>	157.540,00
Banchine coperte e sottopassi	m <sup>2</sup>	11.687,50
Spazi connettivi	m <sup>2</sup>	14.614,70
Banchine coperte	m <sup>2</sup>	10.961,03
Sottopassi pedonali	m <sup>2</sup>	2.813,68
Sale di attesa viaggiatori	m <sup>2</sup>	840,00
Biglietteria e deposito bagagli	m <sup>2</sup>	2.040,80
Manutenzione e aree di riparazione	m <sup>2</sup>	3.354,70
Spazi tecnici	m <sup>2</sup>	876,40
Superficie commerciale	m <sup>2</sup>	14.560,00
Superficie area ristorazione	m <sup>2</sup>	4.462,00
Volume di refrigeratori per la conservazione degli alimenti	m <sup>3</sup>	16,52
Superficie amministrativa e uffici	m <sup>2</sup>	27.173,90
Sottovia stradali	m <sup>2</sup>	1.155,00
Superficie di parcheggio	m <sup>2</sup>	6.418,00
Altezza media netta	m	4,20
Unità commerciali	N.	49
Unità per la ristorazione	N.	17
Livelli	N.	4
Scale mobili	N.	32
Ascensori	N.	18
Impiegati	N.	536

**Dati di traffico**

Indicatore	UDM	Quantità
Binari	N.	19
Treni giornalieri	N.	485
Treni annuali	N.	160.050
Passeggeri annuali (2019)	N.	15.134.200

**Dati ambientali**

Indicatore	UDM	Quantità
Zona climatica	-	D
Fabbisogno di gradi giorno per il riscaldamento	HDD	1.290,35
Fabbisogno di gradi giorni per il raffrescamento	CDD	887,15
Orario giornaliero di apertura dell'impianto	Ore/giorno	19,00

I consumi giornalieri sono espansi all'anno considerando i seguenti coefficienti: ore giornaliere di apertura della stazione: 5:00 – 00:00 (19); giorni anno di apertura: 365. Per quanto attiene al sistema HVAC, l'efficienza di una pompa di calore è misurata dal coefficiente di prestazione COP - *Coefficient of Performance*, dato dal rapporto tra energia termica resa ed energia elettrica consumata; più il COP è alto e più la macchina è efficiente (basso consumo). Un valore del COP pari a tre vuol dire, ad esempio, che per ogni kW elettrico, la pompa di calore renderà 3kW d'energia termica all'ambiente da riscaldare; uno di questi fornito dall'energia elettrica consumata e gli altri due chilowattora prelevati dall'ambiente esterno. Per la stazione Tiburtina si assumono i seguenti valori: COP in riscaldamento: 3,00; COP in raffrescamento: 2,50.

Tabella 3. Calcolo del fabbisogno energetico (diretto e indiretto) della stazione Tiburtina

<i>Indicatore</i>	<i>UDM</i>	<i>Quantità</i>
Area uffici e servizi		m <sup>2</sup> 27.173,90
Superficie aperta al pubblico – negozi e ristorazione		m <sup>2</sup> 19.022,00
Superficie aperta al pubblico – spazi connettivi		m <sup>2</sup> 14.614,70
Banchine coperte e sottopassi pedonali	0,0054	kWh/m <sup>2</sup> 547.305,90
Spazi connettivi	0,0108	kWh/m <sup>2</sup> 820.958,85
Biglietteria e deposito bagagli	0,0162	kWh/m <sup>2</sup> 229.277,76
Manutenzione e aree di riparazione	0,0162	kWh/m <sup>2</sup> 376.890,48
Spazi tecnici	0,0108	kWh/m <sup>2</sup> 65.640,61
Area commerciale	0,0810	kWh/m <sup>2</sup> 8.178.861,60
Area ristorazione	0,0540	kWh/m <sup>2</sup> 1.670.974,38
Area uffici e servizi	0,0243	kWh/m <sup>2</sup> 4.579.359,21
Sottovia stradali	0,0027	kWh/m <sup>2</sup> 21.626,80
Parcheggi	0,0005	kWh/m <sup>2</sup> 10.119,90
Scale mobili	1,75	kWh/cad./giorno 388.360,00
Ascensori	0,23	kWh/viaggio 516.454,58
Refrigerazione per la conservazione degli alimenti	1.500,00	kWh/m <sup>3</sup> /anno 24.786,00
Fabbisogno per il riscaldamento	309,68	kWhH/m <sup>3</sup> 55.112.195,81
COP medio dell'impianto di riscaldamento	-	- 3,00
Fabbisogno per il raffrescamento	532,29	kWhC/m <sup>3</sup> 78.010.834,19
COP medio dell'impianto di raffrescamento	-	- 2,50
Potabilizzazione, fornitura e gestione delle acque	0,0080	kWh/l 2.969.524
Trattamento acque reflue	0,0175	kWh/l 6.495.833
<b>Fabbisogno energetico complessivo</b>		<b>kWh 76.471.039</b>

Tabella 4. Calcolo del fabbisogno idrico (diretto e indiretto) della stazione Tiburtina

<i>Indicatore</i>	<i>UDM</i>	<i>Quantità</i>
Fabbisogno idrico specifico per sanificazione – area uffici	12.100,00	l/persona/anno 6.479.550
Fabbisogno idrico specifico per sanificazione – area viaggiatori	21,43	l/pax 324.304.286
Fabbisogno idrico per ristorazione	0,24	l/pax 3.632.208
Superficie lorda da pulire – aperta al pubblico	0,15	l/m <sup>2</sup> /giorno 2.529.226
Superficie da pulire – chiusa al pubblico	0,05	l/m <sup>2</sup> /giorno 266.718
Fabbisogno idrico annuale		l 337.211.988
Sanificazione/pulizie – detergenti per stoviglie	1,25	l/100 pax 189.178
Sanificazione/pulizie – detergenti per la persona	0,50	l/100 pax 10.810
Sanificazione/pulizie – detergenti per superfici	1,00	l/ 500 m <sup>2</sup> 139.797
Consumo di detergenti e solventi		l 339.785
Consumo idrico equivalente		l 371.190.471
CO2 – emissioni equivalenti per kWh	276,3	t/GWh 44.213,3
CO2 – emissioni per produzione di detergenti e solventi	5.000,0	t/MI 1.698,9
<b>Emissioni equivalenti totali di CO2</b>		<b>t/anno 45.912,2</b>

Per quanto riguarda i consumi idrici sono considerati i seguenti bisogni: uso sanitario; uso alimentare; lavaggio, disinfezione e sanificazione degli ambienti. L'impatto idrico ha una doppia valenza in quanto si considera sia il fabbisogno in sé, quanto l'impatto energetico remoto indotto sul sistema di adduzione e su quello di smaltimento e depurazione dei reflui. il quadro è completato dal fabbisogno di detergenti e disinfettanti per uso sanitario e per la pulizia: anche in questo caso si pondera l'impatto produttivo, degli stessi e quello remoto in termini di depurazione finale delle acque.

Per quanto attiene ai fattori emissivi del comparto elettrico<sup>3</sup>, la tabella seguente mostra i fattori di emissione della produzione elettrica e dei consumi elettrici (Sinanet/Ispra<sup>4</sup>).

Tabella 5. Fattori emissivi (in gCO<sub>2</sub>/kWh) della produzione elettrica e dei consumi (2019 stime preliminari, fonte Sinanet/Ispra)

Anno	Produzione termoelettrica lorda (solo combustibili fossili)	Produzione termoelettrica lorda (1)	Produzione termoelettrica lorda e calore (1,3)	Produzione elettrica lorda (2)	Produzione di calore (3)	Produzione elettrica lorda e calore (2,3)	Consumi elettrici
2005	582,6	571,4	513,1	485,0	239,0	447,4	464,7
2010	544,8	522,4	468,2	403,0	246,1	378,2	388,6
2011	546,6	520,6	459,4	394,3	226,9	366,5	377,8
2012	560,6	528,4	465,9	385,3	225,9	359,9	372,9
2013	554,0	504,7	437,1	337,0	217,0	316,6	326,4
2014	573,3	512,1	437,7	323,2	205,5	303,4	308,8
2015	542,6	487,7	423,9	331,6	217,8	311,8	314,2
2016	516,3	465,6	407,7	321,3	219,1	303,4	313,1
2017	491,0	445,4	393,1	316,4	214,2	298,8	308,1
2018	493,8	444,4	388,6	296,5	208,8	281,4	281,4
2019	473,3	426,8	377,7	284,5	218,9	273,3	276,3

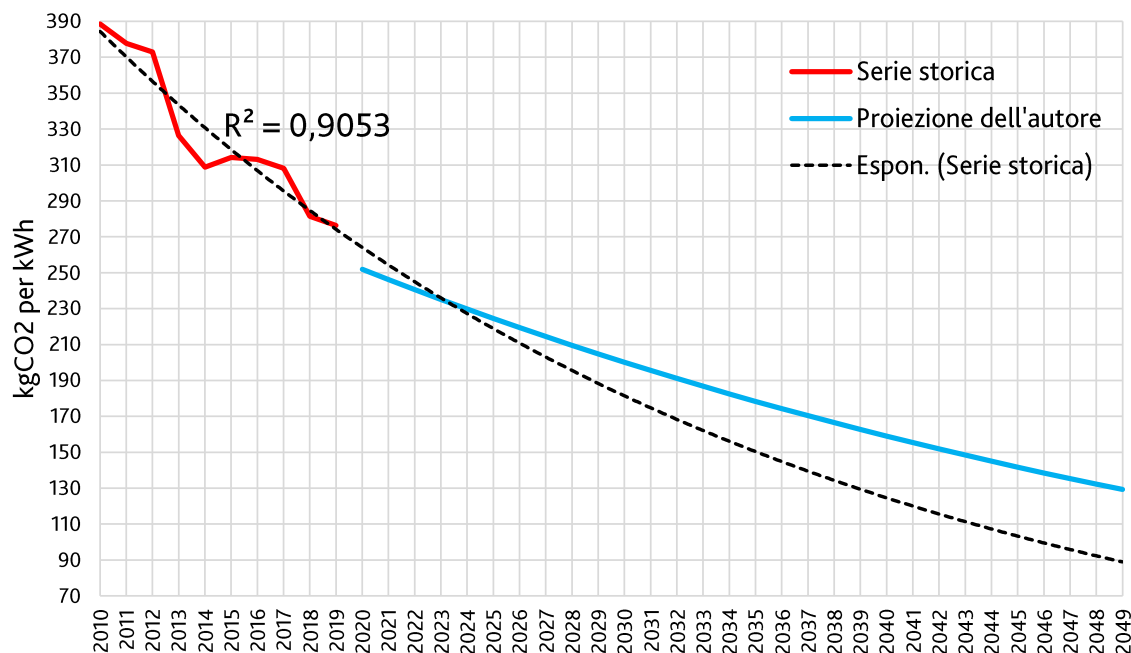
(1) comprensiva della quota di elettricità prodotta da bioenergie

(2) al netto di apporti da pompaggio

(3) considerate anche le emissioni di CO<sub>2</sub> per la produzione di calore (calore convertito in kWh)

La proiezione dei fattori emissivi al periodo di validità dell'analisi (30 anni) è svolta su parametri cautelativi rispetto al tendenziale storico e alle stime UE<sup>5</sup>.

Figura 5. Proiezione dei fattori emissivi per kWh dalla rete elettrica nazionale



<sup>3</sup> Si veda anche Enea: <http://kilowattene.enea.it/KiloWattene-CO2-energia-primaria.html>

<sup>4</sup> Si veda: <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-la-produzione-ed-il-consumo-di-energia-elettrica-in-italia/view>

<sup>5</sup> Dal Libro verde 2030: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52013DC0169>

Complessivamente, per la stazione Tiburtina si trovano i seguenti fabbisogni ordinari (2019):

- **Energia:** 76.471.039 kWh pari a 5,053 kWh per passeggero
- **Acqua:** 371.190.471 litri (371.190 m<sup>3</sup>) pari a 24,52 litri per passeggero

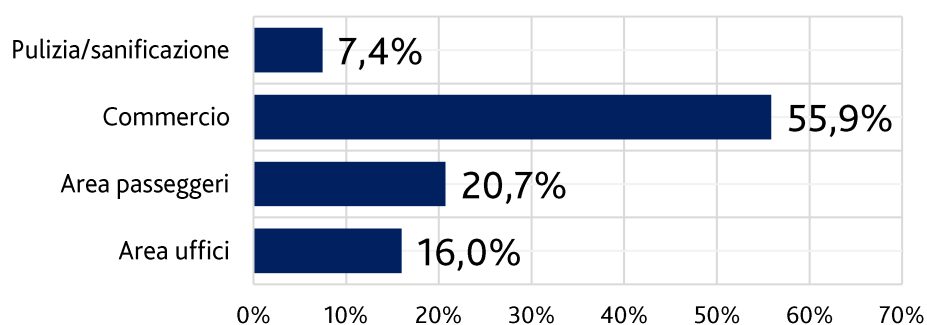
Il **fabbisogno energetico lordo** della stazione è ripartito per il 65% sull’HVAC ovvero sul riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell’aria: la quota prevalente è sul raffrescamento estivo (41% del totale) mentre il riscaldamento si attesta al 24%. L’illuminazione si attesta al 22%, la forza motrice dei sistemi di comunicazione/traslazione intorno al 4%.

Tabella 6. Ripartizione del fabbisogno energetico (diretto e indiretto) della stazione Tiburtina (kWh lordi per anno)

<i>Uso</i>	<i>Totale in kWh</i>	<i>Quota</i>
Illuminazione	16.501.015	21,6%
Forza motrice	904.815	1,2%
HVAC - riscaldamento	18.370.732	24,0%
HVAC - raffrescamento	31.204.334	40,8%
Funzionamento degli impianti	2.994.310	3,9%
Altri usi	6.495.833	8,5%
Totale	76.471.039	

A questi valori corrisponde una impronta ecologica di 45.912,2 tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente pari a 3,034 kg per passeggero. A livello di emissioni, il fabbisogno energetico è la fonte emissiva principale (77%). Il trattamento delle acque e i detersivi (produzione e smaltimento) complessivamente incidono per l’11,5%. L’esercizio e la manutenzione degli impianti, infine, si attesta poco meno del 4% del totale. A livello di ripartizione per macroarea operativa, l’impatto climalterante è ripartito (figura 6) per il 56% circa sul commerciale, per il 21% sull’area passeggeri, per il 16% sull’area uffici e per il 7% circa sulla pulizia e sanificazione.

Figura 6. Ripartizione dell’impatto climalterante per macroarea funzionale



## 2.2. Definizione delle possibili misure compensative

Le azioni compensative possibili sono ponderate partendo dai seguenti assunti:

- le operazioni di gestione e manutenzione siano allo stato migliore della tecnica;
- i rifiuti e i materiali di scarto prodotti nell’esercizio quotidiano della stazione e delle attività in essa ospitate siano correttamente raccolti e immessi nella catena del riciclo in una quota non inferiore al 95%. In particolare, che l’uso della plastica sia ridotto al minimo necessario e solo ove non ci siano alternative in materiali riciclabili (vetro, carta, derivati compostabili).

La mitigazione delle emissioni prodotte dalla stazione è possibile attraverso l’azione combinata di specifici cunei compensativi. Cunei che comportano a loro volta un impatto di realizzazione e un impatto operativo:



complessivamente questi impatti sono assorbiti dai benefici indotti, con un bilancio complessivo comunque positivo. In particolare, ciascun cuneo è legato a una delle seguenti azioni:

1. produzione di energia da utilizzare a parziale copertura del fabbisogno giornaliero;
2. raccolta delle acque meteoriche a parziale copertura dei fabbisogni idrici giornalieri e/o riduzione del volume di acque reflue attraverso il parziale recupero e riuso;
3. produzione in situ di calore ed eventualmente energia in modo combinato per ridurre il fabbisogno energetico complessivo per il riscaldamento e raffrescamento;
4. assorbimento compensativo della CO<sub>2</sub> complessivamente immessa in atmosfera attraverso un impianto di forestazione urbana intensiva.

Gli scenari sono due, mediano e ottimale in termini di investimento e benefici attivi sulle emissioni climalteranti finali: il cuneo 4, l'impianto intensivo di forestazione urbana è una misura passiva che si fa carico dell'impatto residuo che non è ridotto dall'azione attiva degli altri cunei. Le azioni proposte sono valutate in termini di fattibilità tecnica e sostenibilità economica in relazione alle peculiarità e alle esigenze gestionali di una stazione ferroviaria. In particolare, gli scenari e i relativi cunei di azione sono i seguenti:

#### ***Scenario mediano***

Cuneo 1.1: recupero e accumulo per uso locale dell'energia in frenata dei treni in arrivo nella stazione

Cuneo 1.2: installazione di un campo solare per la produzione energetica

Cuneo 2.1: raccolta delle acque meteoriche

Cuneo 2.2: parziale recupero delle acque grigie

Cuneo 4: impianto di forestazione urbana

#### ***Scenario ottimale***

Cuneo 1.1: recupero e accumulo per uso locale dell'energia in frenata dei treni in arrivo nella stazione

Cuneo 1.2: installazione di un campo solare per la produzione energetica

Cuneo 2.1: raccolta delle acque meteoriche

Cuneo 2.2: parziale recupero delle acque grigie

Cuneo 3: estrazione del calore del sottosuolo con un impianto geotermico a bassa entalpia

Cuneo 4: impianto di forestazione urbana

### ***2.3. Caratterizzazione dei cunei di mitigazione/compensazione dell'impatto della stazione***

Di seguito i parametri di calcolo assunti per ciascuna azione (cuneo).

#### **2.3.1. Primo cuneo – Azione 1: recupero dell'energia di frenatura dei treni in ingresso nella stazione**

L'impianto di recupero è costituito dalle apparecchiature di bordo del treno e dal sistema di terra, che permette di raccogliere, indirizzare e accumulare parte dell'energia generata dal sistema di trazione di bordo che, in fase di frenatura, si comporta come un generatore di corrente. Si tratta di un sistema che ha diverse applicazioni nelle reti alimentati in corrente continua (in Italia, le linee regionali) mentre è ancora in fase di studio per i sistemi in corrente alternata (in Italia, la rete ad Alta velocità). Per quanto concerne il sistema di terra, si distingue:

- l'interfaccia con la rete di alimentazione ferroviaria;
- limitatore di corrente, che protegge sia la linea di contatto che il sistema di accumulo dalle sovracorrenti;
- sistema di accumulo per lo stoccaggio e il rilascio progressivo della tensione elettrica per l'uso in situ.

I parametri del sistema di accumulo sono quelli assunti per dimensionare il costo di investimento e l'impronta ecologica dell'impianto. I riferimenti unitari sono derivati dalle seguenti fonti:

- per l'impronta ecologica, dai documenti biennali *PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable* pubblicato<sup>6</sup> da Re-Charge, *The Advanced Rechargeable & Lithium Battery Association*;
- per i costi di installazione e manutenzione, dal rapporto *World Bank. 2020. Economic Analysis of Battery Energy Storage Systems*<sup>7</sup> della Banca Mondiale.

La tabella seguente riassume i parametri di calcolo assunti nel modello di calcolo.

Tabella 7. Primo cuneo – Azione 1, recupero dell'energia di frenatura dei treni in ingresso nella stazione: parametri di riferimento

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>	<i>UDM</i>
Costruzione – fabbisogno di energia primaria	4,18E-03	kWh/kWh
Costruzione – fabbisogno idrico	2,31E-01	m <sup>3</sup> /kWh
Esercizio – fabbisogno di energia primaria	4,00E-04	kWh/kWh
Esercizio – fabbisogno idrico	1,43E-04	m <sup>3</sup> /kWh
Energia unitaria generata	392,01	kWh/treno
Capacità netta di accumulo	58,80	kWh/treno
Costo lordo dell'impianto	200,00 x 1,25	Eur/kWh
Vita media	10	anni

### 2.3.2. Primo cuneo – Azione 2: produzione elettrica in situ da campo fotovoltaico

L'azione prevede la posa in opera di un impianto fotovoltaico: in genere in copertura oppure in un'area adiacente alla stazione purché non interessata da ombreggiamento durante l'arco della giornata al variare delle stagioni. I riferimenti unitari sono derivati dalle seguenti fonti:

- Per la produttività dell'impianto:
  - Atlante italiano della radiazione solare<sup>8</sup>, Enea Area Fonti Rinnovabili;
  - Rapporti periodici<sup>9</sup> della Banca Mondiale.
- Per l'impronta ecologica, i costi di installazione e manutenzione, dai rapporti tecnici<sup>10</sup> tematici della Banca Mondiale.

La tabella seguente riassume i parametri di calcolo assunti nell'analisi.

<sup>6</sup> Si veda: [https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR\\_Batteries.pdf](https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_Batteries.pdf)

<sup>7</sup> Si veda: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33971>

<sup>8</sup> Si veda: <http://www.solaritaly.enea.it/>

<sup>9</sup> *Global Photovoltaic Power Potential by Country*, <http://documents1.worldbank.org/curated/en/>

<sup>10</sup> Si veda, tra gli altri: *Environmental and Social Impact Assessment Report Under Feasibility Study for Development of Utility Scale Solar PV & Wind Projects in Bangladesh*, <http://documents1.worldbank.org/curated/en/449091539166909882/pdf/07102018-Final-ESIA-Report-of-Utility-Scale-PV-Wind-Project-cleared.pdf>

Tabella 8. Primo cuneo – Azione 2, produzione elettrica in sito con campo fotovoltaico: parametri di riferimento

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>	<i>UDM</i>
<b>Impronta ecologica</b>		
1) Panelli solari		
Costruzione – fabbisogno di energia primaria	1.250,0	kWh/m <sup>2</sup>
Costruzione – fabbisogno idrico	12,012	m <sup>3</sup> /kWp
Esercizio – fabbisogno di energia primaria	0,8	kWh/m <sup>2</sup>
Esercizio – fabbisogno idrico	0,472	m <sup>3</sup> /kWp
2) Batterie		
Costruzione – energia primaria	4,18E-03	kWh/m <sup>2</sup>
Costruzione – acqua	2,31E-01	m <sup>3</sup> /kWp
Esercizio – energia primaria	4,00E-04	kWh/m <sup>2</sup>
Esercizio - acqua	1,43E-02	m <sup>3</sup> /kWp
Produzione annuale per kW di picco	Valore locale	kWh/kWp
Radiazione solare	Valore locale	kWh/m <sup>2</sup>
Potenza totale dell'impianto $\Pi$	Area disponibile/5,5	kWp
Produzione annuale netta $\Sigma$	3.217.909,09	kWh
<b>Costo economico lordo</b>		
Materiali	1.500 euro · $\Pi$	
Struttura di supporto	220 euro · $\Pi$	
Inverter	350 euro · $\Pi$	
Batterie	200 euro · $\Sigma$ / 365	
Progettazione	7,50%	Euro sul costo delle opere
Direzione lavori	5,00%	Euro sul costo delle opere
Collaudo	2,20%	Euro sul costo delle opere
Costi per la sicurezza non inclusi nei costi unitari	3,50%	Euro sul costo delle opere
Rilievi e indagini in situ	2,00%	Euro sul costo delle opere
Connessione alla rete	5,00%	Euro sul costo delle opere
Imprevisti	5,00%	Euro sul costo delle opere
<b>Vita media dell'impianto</b>	25	anni

### 2.3.3. Secondo cuneo: raccolta delle acque meteoriche e riutilizzo parziale delle acque grigie

L'impianto di raccolta delle acque meteoriche e parziali recupero delle acque grigie si traduce nella posa in opera di un bacino di raccolta, sanificazione e nell'impiantistica di collegamento alla rete idrosanitaria della stazione. I parametri dimensionali del bacino sono quelli assunti per dimensionare il costo di investimento e l'impronta ecologica dell'impianto.

I riferimenti unitari sono derivati dalle seguenti fonti:

- Per l'impronta ecologica, dalla ricerca<sup>11</sup> *EFIResources: Resource Efficient Construction towards Sustainable Design - Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*, pubblicato dalla Commissione Europea;
- Per i costi di installazione e manutenzione, dai rapporti<sup>12</sup> *TECA - Technologies and Practices for Small Agricultural Producers* della FAO.

La tabella 9 riassume i parametri di calcolo assunti nell'analisi.

<sup>11</sup> Si veda: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/model-life-cycle-assessment-lca-buildings>

<sup>12</sup> Si veda: <http://www.fao.org/teca/about-teca/en/>

Tra i vari report, si segnala: <http://www.fao.org/3/a-br326e.pdf>

Tabella 9. Secondo cuneo - raccolta delle acque meteoriche e riutilizzo parziale delle acque grigie: parametri di riferimento

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>	<i>UDM</i>
Costruzione – fabbisogno di energia primaria	337,50	kWh/m <sup>3</sup>
Costruzione – fabbisogno idrico	4,20E-01	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Esercizio – fabbisogno di energia primaria	2,78	kWh/m <sup>3</sup>
Esercizio – fabbisogno idrico	1,18E-04	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Costo lordo dell’impianto	80,00	euro/ m <sup>3</sup>
Vita utile dell’impianto	15	anni

#### 2.3.4. Terzo cuneo: estrazione del calore del sottosuolo con un impianto geotermico a bassa entalpia

Un impianto geotermico a bassa entalpia utilizza delle sonde geotermiche profonde al fine di scambiare energia con il terreno in modo continuo e naturale. Dal punto di vista teorico il calore della terra aumenta con la profondità ed è sempre costante in ogni periodo dell'anno: ad esempio a circa 500 metri di sottosuolo, la temperatura raggiunge circa i 25° sia d'estate e sia di inverno. Generalmente per le sonde verticali viene scelta un posizionamento ad una profondità di circa 100 metri nel sottosuolo e a esse vengono collegate una pompa di calore e poi un sistema idraulico per scambiare il calore con l'utenza finale. L'impianto geotermico a bassa entalpia si compone dei seguenti elementi base:

- sonde di scambio del calore con il terreno: consistono in un insieme di tubazioni in polietilene ad alta densità (HDPE), collegate in parallelo, nelle quali circola in fluido termovettore e che rappresentano le batterie di scambio del calore; lo geoscambiatore valorizza l'energia termica presente nel sottosuolo ed anche nelle eventuali falde acquifere intersecanti.
- terminali di erogazione del calore: il fluido termovettore può essere utilizzato per erogare energia sia per raffrescamento, sia per il riscaldamento che per la produzione di acqua calda sanitaria;
- centrale termica, munita di pompa di calore: la pompa di calore è una macchina termica in grado di trasferire energia termica da una sorgente a temperatura più bassa ad una sorgente a temperatura più alta e viceversa; in particolare, una pompa di calore geotermica (acqua-acqua) reversibile riesce a produrre acqua calda ed acqua refrigerata per la climatizzazione invernale ed estiva della struttura, oltre all'acqua calda sanitaria lungo tutto l'anno (a circa 50°).

I riferimenti unitari sono derivati dalle seguenti fonti:

- per l'impronta ecologica, il rapporto<sup>13</sup> della ricerca *EFIResources: Resource Efficient Construction towards Sustainable Design - Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*, pubblicato dalla Commissione Europea;
- per i costi di installazione e manutenzione, derivati e attualizzati dal rapporto<sup>14</sup> *2015 JRC Geothermal Energy Status Report del Centro di Ricerca JRC del Consiglio Europeo*;
- per il potenziale geotermico, il database<sup>15</sup> *JRC Geothermal Power Plant Dataset*.

La tabella 10 riassume in dettaglio i parametri di calcolo assunti nell'analisi.

<sup>13</sup> Si veda: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/model-life-cycle-assessment-lca-buildings>

<sup>14</sup> Si veda: [https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/2015\\_jrc\\_geothermal\\_energy\\_status\\_report.pdf](https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/2015_jrc_geothermal_energy_status_report.pdf)

<sup>15</sup> Disponibile su: <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/jrc-10128-10001>

Tabella 10. Terzo cuneo - estrazione del calore del sottosuolo con un impianto geotermico a bassa entalpia: parametri di riferimento

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>	<i>UDM</i>
<b>Impronta ecologica</b>		
1) sonde geotermiche		
Costruzione – fabbisogno di energia primaria	2.320,0	kWh/m
Costruzione – fabbisogno idrico	24,378	m <sup>3</sup> /m
Esercizio – fabbisogno di energia primaria	1,747	kWh/m
Esercizio – fabbisogno idrico	0,472	m <sup>3</sup> /m
2) serbatoio di accumulo		
Costruzione – fabbisogno di energia primaria	4,18E-03	kWh/m <sup>3</sup>
Costruzione – fabbisogno idrico	1,27E-01	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Esercizio – fabbisogno di energia primaria	4,00E-04	kWh/m <sup>3</sup>
Esercizio – fabbisogno idrico	7,87E-03	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Fabbisogno di calore dalla stazione	10,00	kW/m <sup>2</sup>
Potenza geotermica	0,05	kW/m <sup>2</sup>
Profondità massima delle sonde	120,00	m
Densità delle sonde a 4 tubi	1	Sonde/250 m <sup>2</sup>
Dimensionamento del serbatoio di accumulo	2,50	l/ m <sup>2</sup>
<b>Costo economico lordo</b>		
Scavo	90,00	Euro/m per sonda
Installazione e cementazione delle sonde	30,00	Euro/m per sonda
Pompa di calore	45,00	Euro/ m <sup>2</sup>
Serbatoio di accumulo	0,35	Eur/l
Progettazione	7,50%	Euro sul costo delle opere
Direzione lavori	5,00%	Euro sul costo delle opere
Collaudo	2,20%	Euro sul costo delle opere
Costi per la sicurezza non inclusi nei costi unitari	3,50%	Euro sul costo delle opere
Rilievi e indagini in situ	2,00%	Euro sul costo delle opere
Connessione alla rete	5,00%	Euro sul costo delle opere
Imprevisti	5,00%	Euro sul costo delle opere
<b>Vita utile dell'impianto</b>	25	anni

### 2.3.5. Quarto cuneo: impianto di forestazione urbana

Si tratta di un impianto intensivo protetto e lasciato il più possibile in autogestione. L'approccio, seppure in scala limitata, è quello proposto nel 2016 dal biologo<sup>16</sup> Edward Osborne Wilson: destinare metà della superficie terrestre a riserva naturale della *wilderness* per preservare la biodiversità.

La compensazione è basata sui coefficienti di assorbimento di alcune specie autoctone su un periodo di 30 anni. Tali valori sono stati calcolati da Ibimet-CNR nell'ambito del progetto GAIA-forestazione urbana<sup>17</sup>.

Sono molteplici i fattori che influenzano il processo di assorbimento e sequestro del carbonio atmosferico nelle molecole organiche: specie, dimensione, luogo d'impianto e sesto, clima, intensità degli stress al

<sup>16</sup> Dal testo, *Half-Earth: Our Planet's Fight for Life*, Liveright 2016 dal quale è scaturito un progetto di cooperazione e ricerca internazionale: <https://www.half-earthproject.org/>

<sup>17</sup> Il progetto si è contraddistinto per aver definito conoscenze, strumenti e modalità innovative di utilizzo della forestazione urbana. Attraverso la partnership pubblico-privato, GAIA è riuscita a creare una collaborazione fra diversi attori del territorio (24 imprese, associazioni di categoria, istituzioni) ed ha consentito di parlare di sostenibilità ambientale (in particolare di CO<sub>2</sub> e *carbon management*) ad una platea vasta e diversificata. Grazie ai risultati raggiunti con l'iniziativa, nel 2013 il Comune di Bologna con una delibera di giunta (PG.147297/2013) ha deciso di farne uno degli strumenti dell'amministrazione per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>. Per maggiori informazioni: <http://www.pdc.minambiente.it/it/progetti/gaia-accordo-la-forestazione-urbana>



contorno. Tutti fattori che vanno a incidere sui fattori di accrescimento e quindi sul processo di assorbimento della CO<sub>2</sub> atmosferica. Per questo motivo il dato temporale (assorbimento mensile o annuale) ha poco senso ma è preferibile parlare di contenuto totale di CO<sub>2</sub> assorbita da un albero durante tutto il suo ciclo vitale medio. Per il caso in esame sono state analizzate sette essenze di medio-alto fusto: sei autoctone della campagna romana *Acer campestre*, *Fraxinus ornus*, *Morus alba*, *Quercus cerris*, *Tilia platyphyllos*, *Ulmus minor* e una, *Gingko biloba*, alloctona ma ormai naturalizzata. I parametri di vita media per queste essenze sono riassunti nella tabella 11.

Tabella 11. Campo di variabilità del dato di vita media per le sette essenze considerate nel caso studio. Elaborazione da Loehle (1988), gli acronimi indicano: MINREP, età minima per la prima riproduzione; AVEREP, età media per la prima riproduzione; TYPMORT, età media di essiccamento; MAXMORT, longevità massima della specie.

Essenza	MINREP	AVEREP	TYPMORT	MAXMORT
<i>Acer campestre</i>	10	20	150	300
<i>Fraxinus ornus</i>	20	40	150	250
<i>Gingko biloba</i>	25	50	250	500
<i>Morus alba</i>	10	15	50	125
<i>Quercus cerris</i>	25	50	200	400
<i>Tilia platyphyllos</i>	15	50	100	250
<i>Ulmus minor</i>	20	40	250	300

#### 2.4. Analisi degli scenari di progetto

Il periodo di analisi è di 30 anni, un periodo ponderato sul tempo medio di crescita e consolidamento di un impianto di forestazione urbana. Questo significa che l'analisi calcola l'impatto da mitigare/compensare per l'esercizio ordinario della stazione Tiburtina su un periodo di 30 anni. Nel conteggio si assumono quindi anche i costi economici di rinnovo di tutti gli impianti che hanno una vita media inferiore al periodo di analisi: seguendo l'approccio del buon contabile, il valore economico residuo non viene ponderato in quanto contabilizzabile, in senso ambientale, su un periodo di analisi più lungo.

La funzione di riduzione del fattore emissivo dell'energia elettrica da rete (figura 5) per l'anno di analisi progressivo  $x$  ( $2019 = 1$ ) è la seguente:

$$\varepsilon_u = 399e^{(-0,023x)}$$

La produzione complessiva di CO<sub>2</sub> equivalente da compensare per l'esercizio trentennale della stazione Tiburtina ammonta a 522.284 tonnellate delle quali il 74% afferente a bisogni elettrici diretti e indiretti, il 26% al fabbisogno idrico diretto o indotto.

##### 2.4.1. Scenario mediano

Lo scenario è caratterizzato dalle seguenti azioni:

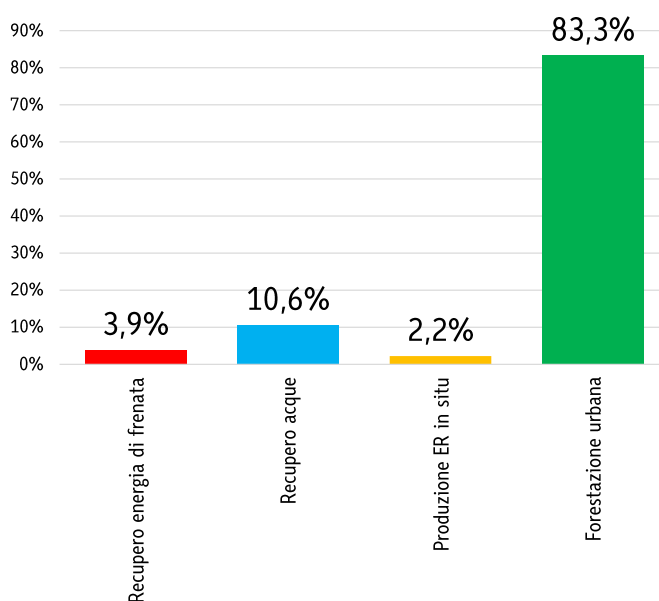
- Cuneo 1.1: Recupero e accumulo per uso locale dell'energia in frenata dei treni in arrivo nella stazione
- Cuneo 1.2: installazione di un campo solare per la produzione energetica
- Cuneo 2.1: raccolta delle acque meteoriche
- Cuneo 2.2: parziale recupero delle acque grigie
- Cuneo 4: impianto di forestazione urbana

Come misura compensativa dell'impronta ecologica indotta dall'esercizio della Stazione Tiburtina si considera la creazione di un impianto di forestazione urbana intensiva. L'impatto è ponderato su un periodo di 30 anni nel quale si valuta l'assorbimento complessivo di CO<sub>2</sub> della crescita arborea. Per quanto concerne l'impronta annuale dell'esercizio della stazione valgono i seguenti assunti iniziali: si considera costante il volume di passeggeri annui; si considera una riduzione dell'impronta indotta dai consumi energetici per il

miglioramento del coefficiente unitario emissivo da produzione elettrica; si considera costante, invece, l'impronta indotta dai consumi idrici.

Dal punto di vista delle azioni di mitigazione attiva lo scenario prevede un investimento impiantistico di 12,936 milioni di euro per una riduzione del 9% circa del fabbisogno energetico complessivo e del 41% del fabbisogno idrico. L'effetto compensativo dei cunei è riassunto in figura 7: il miglioramento del ciclo delle acque incide ancora per l'11% circa mentre gli interventi impiantistici incidono per poco più del 5%; conseguentemente gran parte della compensazione resta a carico di misure passive come l'impianto di forestazione.

Figura 7. Scenario mediano di compensazione dell'esercizio della stazione Tiburtina di Roma: ripartizione del potere compensativo sui vari cunei attivi e passivi



Il fabbisogno forestale per arrivare a un pareggio delle emissioni complessive indotte dall'esercizio della stazione Tiburtina su un periodo di 30 anni, valutato su un assorbimento medio di 3.382 kg CO<sub>2</sub> per albero, consta di 136 mila essenze arboree per una superficie complessiva di 218 ettari.

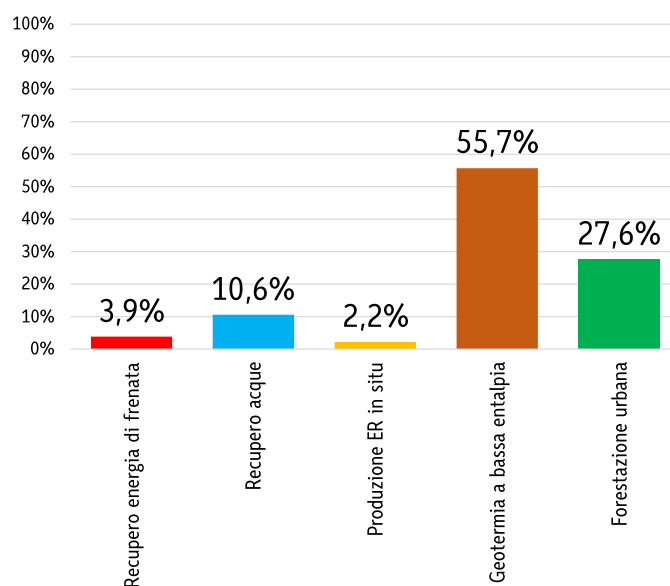
#### 2.4.2. Scenario ottimale

Lo scenario è caratterizzato dalle seguenti azioni:

- Cuneo 1.1: Recupero e accumulo per uso locale dell'energia in frenata dei treni in arrivo nella stazione
- Cuneo 1.2: installazione di un campo solare per la produzione energetica
- Cuneo 2.1: raccolta delle acque meteoriche
- Cuneo 2.2: parziale recupero delle acque grigie
- Cuneo 3: impianto geotermico
- Cuneo 4: impianto di forestazione urbana

Dal punto di vista delle azioni di mitigazione attiva lo scenario prevede un investimento impiantistico di 17,570 milioni di euro per una riduzione del 65% del fabbisogno energetico complessivo e del 33% del fabbisogno idrico. L'effetto compensativo dei cunei è riassunto in figura 8: il miglioramento del ciclo delle acque incide ancora per l'11% circa mentre gli interventi impiantistici incidono ora per il 60% grazie all'beneficio della disponibilità di calore geotermico (che da solo assorbe il 55% dell'impatto) in luogo dell'energia da rete per l'HVAC; la capacità compensativa dell'impianto di forestazione si riduce conseguentemente al 28%.

Figura 8. Scenario ottimale di compensazione dell'esercizio della stazione Tiburtina di Roma: ripartizione del potere compensativo sui vari cunei attivi e passivi



Il fabbisogno forestale per arrivare a un pareggio delle emissioni complessive indotte dall'esercizio della stazione Tiburtina su un periodo di 30 anni consta di 72 mila essenze arboree per una superficie complessiva di 115 ettari. Come detto, per far sì che l'impianto di forestazione abbia l'effetto compensativo voluto ovvero realizzi la cattura e l'immagazzinamento della quantità di CO<sub>2</sub> stimata è necessario che sia realizzato come area naturalizzata solo parzialmente fruibile: ogni diradamento e alterazione della fisiologia naturale avrebbe come conseguenza quella di alterare i cinematismi di accrescimento o, nel peggiore dei casi, peggiorare la salute degli individui arborei, riducendone le dimensioni oppure causandone la morte prematura. In figura 9 si mostra la possibile localizzazione e l'estensione dell'impianto di forestazione nei due scenari, mediano e ottimale, di compensazione dell'impatto indotto dall'esercizio della stazione Tiburtina.

## 2.5. Considerazioni generali sul caso di studio

Le possibili azioni compensative dell'esercizio di una stazione ferroviaria sono raggruppabili in tre gruppi: mediando tra i valori minimo e massimo di efficacia (figura 10) si trova che l'ottimizzazione in termini di efficienza degli impianti della stazione può compensare il 13% circa delle emissioni. La produzione centralizzata di energia termica (sia per il riscaldamento che per il raffrescamento e la produzione di acqua calda sanitaria) può compensare fino al 31% delle emissioni. In tutto le misure di compensazione attiva riescono a compensare il 44% delle emissioni. La quota restante può essere compensata con misure passive, come un impianto di forestazione urbana o suburbana intensivo. L'analisi, impostata su un periodo di 30 anni (2030-2050) è svolta nello scenario *business-as-usual* per quanto concerne la compensazione della produzione di energia elettrica primaria: è in corso la definizione della strategia comunitaria<sup>18</sup> *UE climate-neutral* che prevede il raggiungimento della piena compensazione (net-zero) al 2050. In altri termini, per quanto concerne l'energia primaria da rete, questa sarebbe già compensata: gli oneri per la compensazione dell'esercizio delle stazioni ferroviarie si ridurrebbe di conseguenza prevalentemente agli impatti dei cicli di trasformazione. Per la stazione Tiburtina la riduzione delle emissioni da compensare sarebbe in questo caso del 55%.

L'analisi evidenzia alcuni elementi di riflessione generalizzabili rispetto al caso di studio: (1) la rilevanza del fabbisogno energetico per il riscaldamento/condizionamento (sia nello scenario BAU che in quello Net-Zero); (2) la rilevanza dell'impatto dei consumi idrici e dell'uso di detergenti: 19% delle emissioni complessive nello scenario BAU, 42% in quello Net-Zero.

<sup>18</sup> Nell'ambito della strategia comunitaria ([https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy\\_it](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_it)) è stata pubblicata la Strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra ([https://www.mite.gov.it/sites/default/files/lts\\_gennaio\\_2021.pdf](https://www.mite.gov.it/sites/default/files/lts_gennaio_2021.pdf))

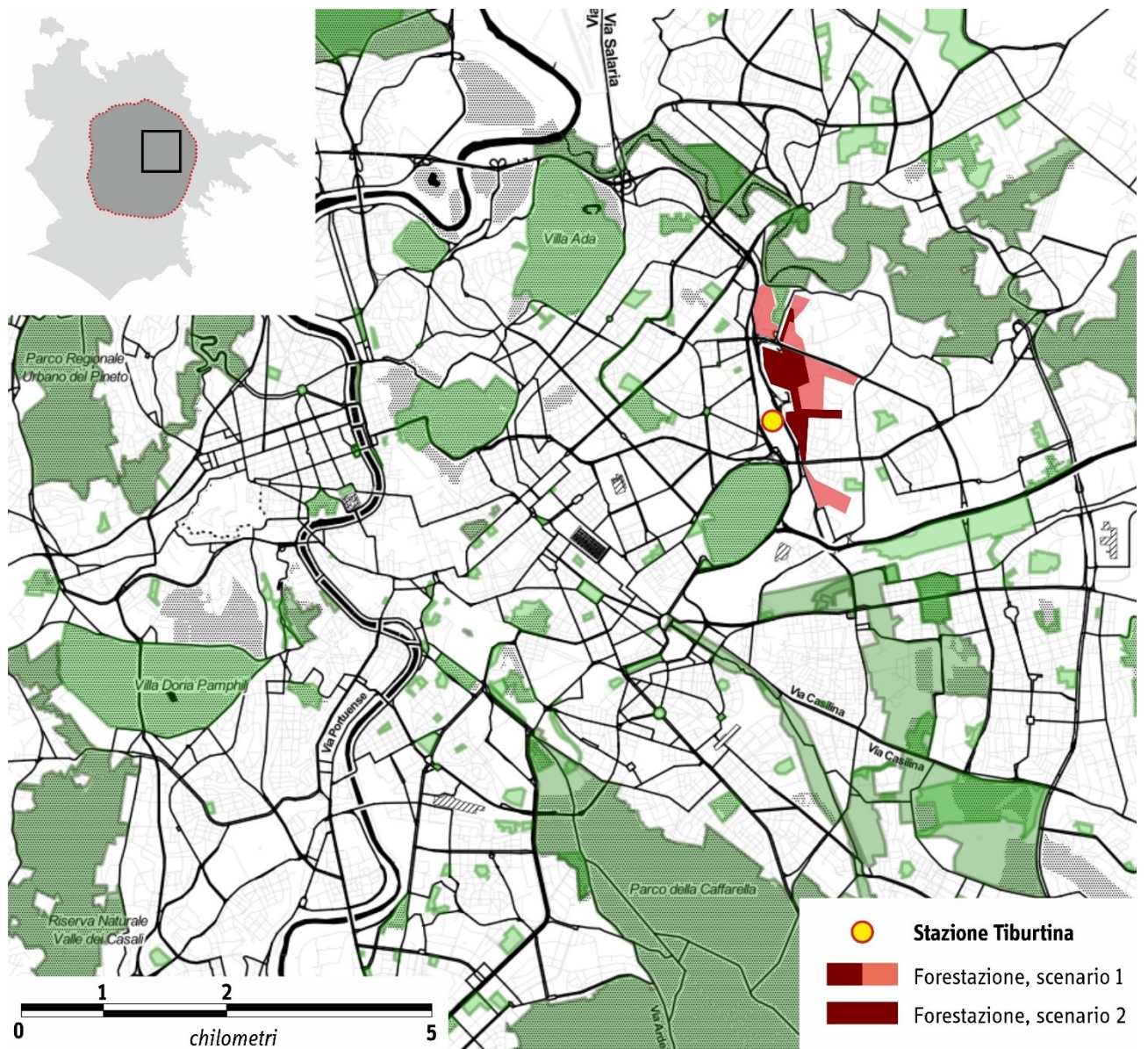


Figura 9. Possibili localizzazione ed estensione dell'impianto di forestazione urbana nei due scenari compensativi discussi

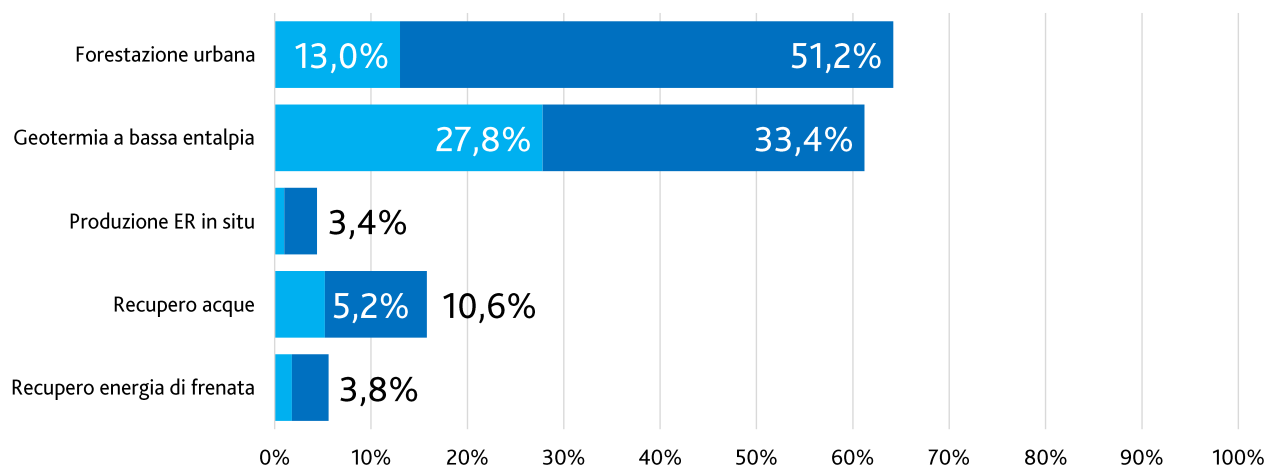


Figura 10. Campi d'efficacia – sul totale delle emissioni della stazione – per i cunei di mitigazione/compensazione individuati



Dal punto 1 consegue la necessità di un ripensamento del complesso sistema idrico della stazione con l'introduzione sia di serbatoi di accumulo sia delle acque meteoriche che, soprattutto, del riuso progressivo delle acque grigie prima dello smaltimento finale.

Dal punto 2 consegue la necessità di inquadrare la stazione non più come oggetto complesso ma isolato ma come parte del corpo urbano o almeno di una parte di esso. Appare come inevitabile indirizzo progettuale in questo senso la proposta di introdurre il teleriscaldamento di quartiere utilizzando pompe di calore e sonde geotermiche per estrazione/accumulo di calore da utilizzare per la regolazione della temperatura interna e la produzione di acqua calda sanitaria. Nel caso specifico le cartografie<sup>19</sup> del *PETA – Pan European Thermal Atlas* di Connolly et al. (figura 11) mostrano che la stazione Tiburtina è vicina ad aree a maggiore domanda di energia termica della città di Roma. Giocoforza che la stazione, con gli spazi adiacenti, possa trovare elementi di estremo interesse in chiave di elemento nodale per un impianto di teleriscaldamento di quadrante urbano o comunque di quartiere.

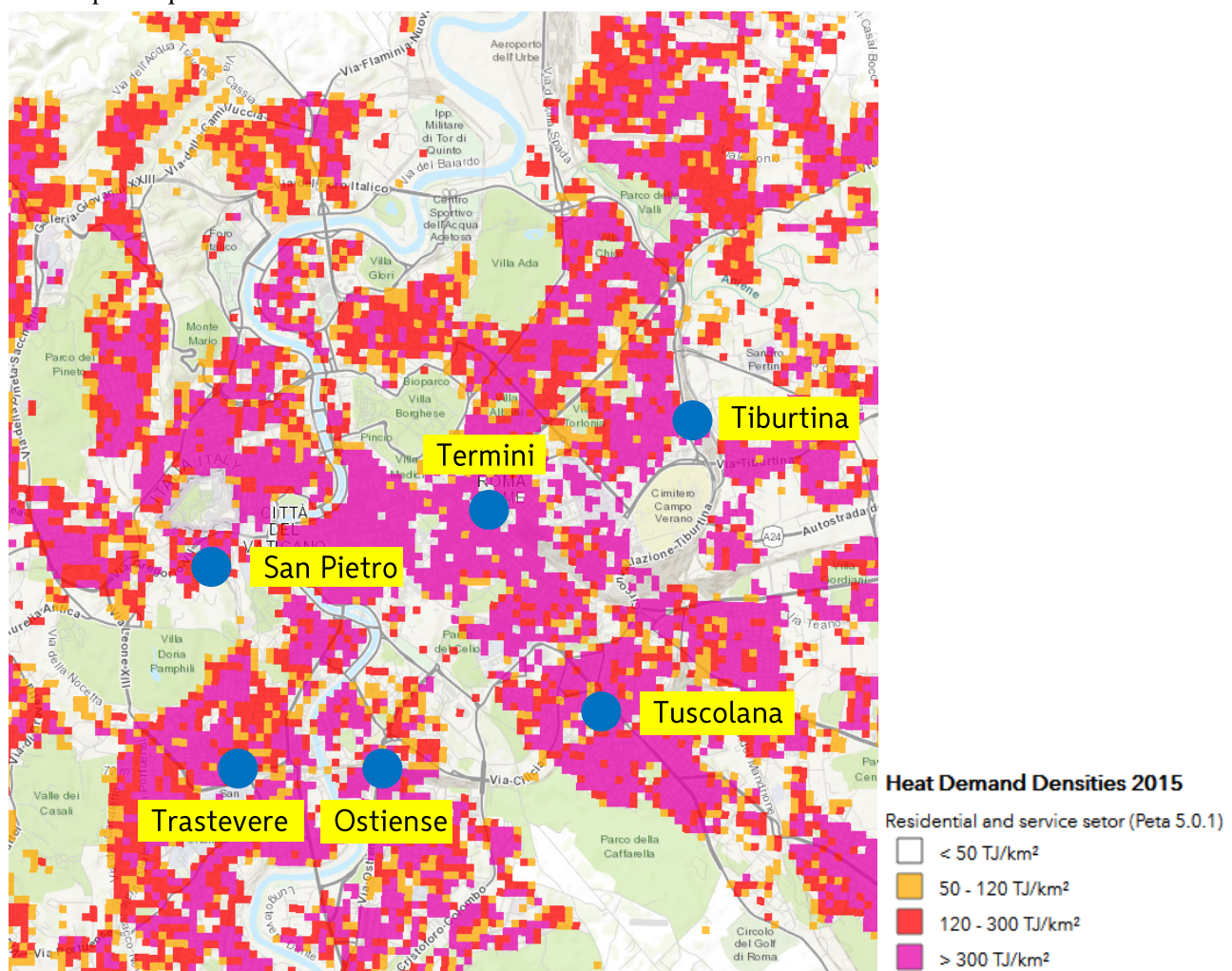


Figura 11. Le stazioni del nodo ferroviario sulla cartografia del fabbisogno termico per la città di Roma. Elaborazione su *PETA – Pan European Thermal Atlas*

In conclusione, la strategia che appare più efficace per portare l'esercizio della stazione Tiburtina – ma si tratta di conclusioni assolutamente generalizzabili – verso l'obiettivo di azzeramento delle emissioni climalteranti si fonda sulle seguenti azioni progettuali:

- 1) miglioramento prestazionale dell'involucro edilizio ed efficientamento intrinseco degli impianti;

<sup>19</sup> Atlante interattivo in versione 5.2 (consultazione luglio 2022):  
<https://euf.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8d51f3708ea54fb9b732ba0c94409133>



- 2) parziale chiusura dei cicli idrici con introduzione della capacità di accumulo sia delle acque meteoriche che di quelle grigie per il riuso locale previa sanificazione;
- 3) realizzazione di reti di quartiere di teleriscaldamento basato su pompe di calore geotermiche per estrazione e accumulo del calore;
- 4) realizzazione di impianti di forestazione urbana intensiva.

La forestazione urbana, sebbene concepita in una logica compensativa, assume una valenza ben maggiore e più articolata per le aree urbane:

- in termini di creazione di aree di inerzia termica e idraulica, fondamentali per aumentare la capacità di compensare tanto le onde di calore quanto le precipitazioni intense senza andare a sovraccaricare i sistemi di raccolta delle acque meteoriche;
- in termini ecologici e, non da meno, sociali sia per la funzione di parziale filtrazione degli inquinanti aerodispersi che per la provata funzione di miglioramento del benessere collettivo.

### 3. Le stazioni come fonte di benessere per tutta la città

L’algoritmo proposto consente di passare da una visione qualitativa (o, al più, misurata “a corpo”) a una visione quantitativa delle azioni di miglioramento dei processi gestionali e manutentivi di una stazione ferroviaria, potrebbe con le opportune modifiche di interfaccia, essere applicato tal quale ad altri processi industriali oppure residenziali.

Il contributo realmente innovativo, in relazione alla letteratura e alle attuali linee di ricerca *in progress*, è quello del guardare all’oggetto urbano della stazione ferroviaria non più come a un oggetto necessario all’esercizio ferroviario o, al più, al nodo della rete dei trasporti ma come un volano di riqualificazione per il tessuto residenziale e sociale circostante. Tessuto che molto difficilmente potrà essere, almeno nell’immediato, realisticamente coinvolto da politiche di trasformazione ecologica. Almeno non nella misura che lo stato delle cose richiederebbe: le misure una-tantum come gli sgravi fiscali per le ristrutturazioni o gli incentivi al rinnovamento degli involucri edilizi nella migliore delle ipotesi sono delle leve limitate quando il loro beneficio non viene disinnescato da una eccessiva parcellizzazione – sarebbe meglio dire atomizzazione - procedurale e realizzativa.

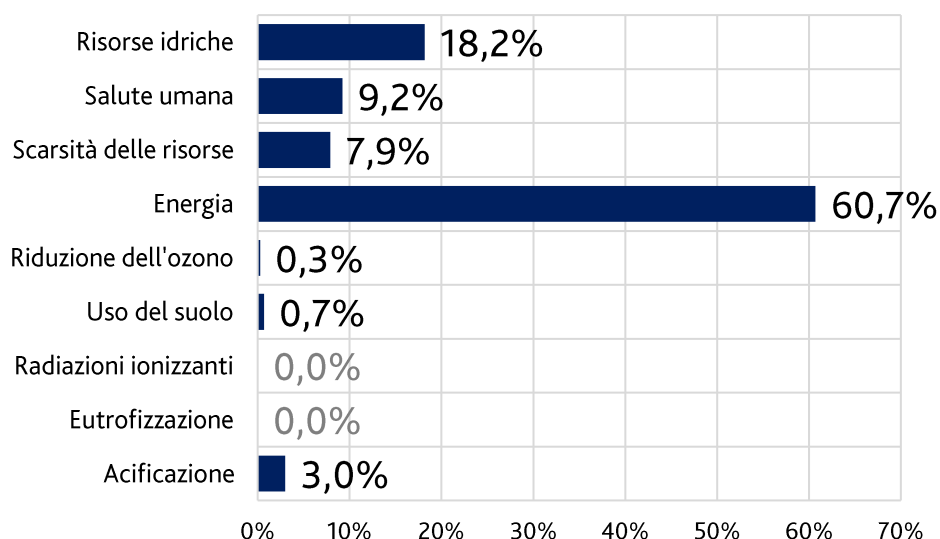


Figura 12. Stazione Tiburtina di Roma: ripartizione dell’impatto ambientale per categorie

È possibile misurare questi benefici sull’ecosistema sociale e ambientale – e quindi sul benessere collettivo – della città: la tabella 12 riporta le aree chiave di sfida secondo la metodologia di valutazione del progetto comunitario *Nature4Cities*<sup>20</sup>. Gli indicatori adottati derivano dall’accessibilità delle informazioni a un operatore dell’esercizio ferroviario, che resta il target della metodologia qui discussa.

Tabella 12. Valutazione dell'impatto delle misure di mitigazione e compensazione ambientale secondo la metodologia adottata dal progetto comunitario *Nature4Cities*<sup>20</sup>

<i>Aree chiave di sfida per la società</i>	<i>Indicatore</i>	<i>UDM</i>
Resilienza climatica	Riduzione delle emissioni climalteranti	t (anno) di CO2 eq
Gestione delle acque	Acque trattate	m <sup>3</sup>
Rischi naturali e climatici	Area totale permeabile	ettari
Gestione degli spazi verdi	Aree verdi monitorate	ettari
Miglioramento ecosistemico	Aree verdi ecologicamente interconnesse	ettari
Qualità dell'aria	Emissioni indotte di particolato atmosferico	kg PM10
Rigenerazione urbana	Superficie degli spazi pubblici	ettari
Consapevolezza e capacità sociali	Persone raggiunte dal processo di condivisione e informazione	abitanti
Pianificazione partecipata e governance	Residenti coinvolti nei processi partecipativi	abitanti
Giustizia e coesione sociale	Adozione di protocolli certificati (ad esempio ISO9001 e ISO14001)	imprese · addetti
Salute e benessere	Residenti nel bacino della stazione	abitanti
Nuove opportunità economiche e posti di lavoro verdi	Lavori verdi (direttamente e come indotto)	addetti

Tabella 13. Valutazione dell'efficacia delle misure di mitigazione e compensazione dell'impatto dell'esercizio della stazione Tiburtina per le aree di impatto riportate nella tabella 12. Il riferimento è calcolato sull'ipercentro di Roma, ovvero l'area interna al perimetro del Grande Raccordo Anulare (figura 4)

<i>Indicatore</i>	<i>Valore</i>		<i>Riferimento (Roma intra GRA)</i>	<i>UDM</i>
	<i>Min</i>	<i>Max</i>		
Riduzione delle emissioni climalteranti	229.926	435.082	11.640.616	t anno di CO2 eq
Acque trattate	4.758	71.370	121.708.288	m <sup>3</sup>
Area totale permeabile	18,5	35,0	82.508	ettari
Aree verdi monitorate	115	218	4.968	ettari
Aree verdi ecologicamente interconnesse	115	218	33.120	ettari
Emissioni indotte di particolato atmosferico	5,2	26,1	11.641	kg PM10
Superficie degli spazi pubblici	7,4	21,0	128.919	ettari
Persone raggiunte dal processo di condivisione e informazione	28.525	104.593	1.901.692	abitanti
Residenti coinvolti nei processi partecipativi	3.596	8.390	1.901.692	abitanti
Adozione di protocolli certificati (ad esempio ISO9001 e ISO14001)	625.000	3.750.000	103.521.046.375	imprese · addetti
Residenti nel bacino della stazione	16.957	33.913	1.901.692	abitanti
Lavori verdi (direttamente e come indotto)	2.500	7.500	805.794	addetti

La tabella 14 mostra che il potenziale complessivo sulla sostenibilità urbana (misurato sull'ipercentro dell'area urbana, qui individuato nell'area interna al perimetro del Grande Raccordo Anulare) indotto dalla trasformazione della stazione Tiburtina di Roma secondo il modello qui proposto della *Blue station* è di circa il 4% (scenario mediano 1,26% - scenario ottimale 4,24%). Ma se si ampliasse l'ambito di progetto a tutte le sei stazioni dell'anello ferroviario di Roma (figura 4) questo beneficio (tabella 15) si amplia considerevolmente (scenario mediano 10,4% - scenario ottimale 36,0%).

In questi ultimi due anni le questioni legate al contenimento della pandemia da Cov-Sars-2 hanno sensibilizzato il dibattito anche sull'impatto economico della mobilità e delle sue infrastrutture. Per essere efficace, come tutti auspichiamo, la transizione ecologica non può essere vista come un mero processo di decarbonizzazione dei trasporti.

<sup>20</sup> Si veda: <https://www.nature4cities.eu/>

Tabella 14. Impatto della trasformazione della stazione Tiburtina in *Blue Station* sulla riduzione delle esternalità ambientali prodotte dall'ipercentro (area interna al Grande Raccordo Anulare) dell'area urbana di Roma: la trasformazione può incidere per il 4% sul totale delle emissioni complessive dell'area urbana centrale

Potenziale di miglioramento indotto dalla trasformazione della Stazione Tiburtina in "**Blue Station**" sulle esternalità della città di Roma (area interna al GRA)

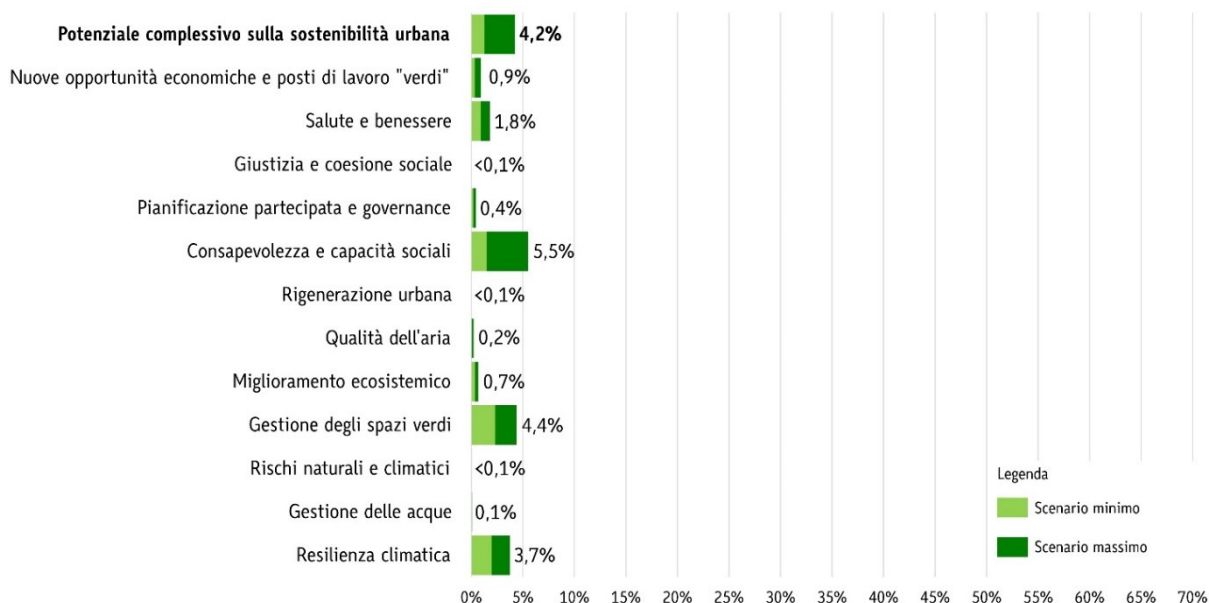
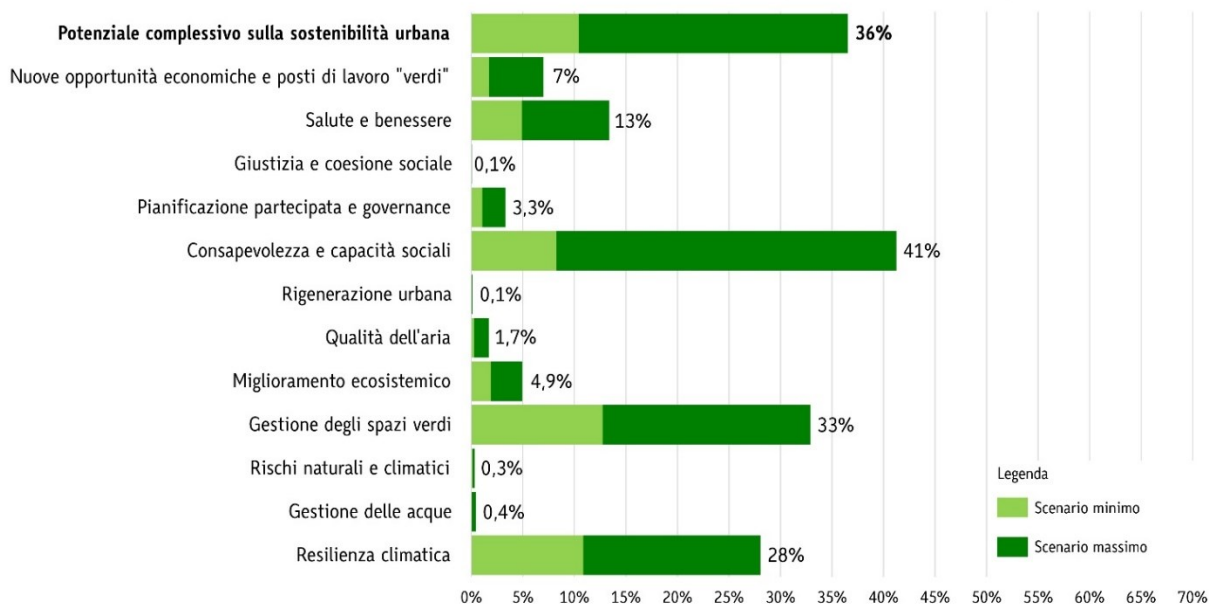


Tabella 15. Impatto della trasformazione delle 5 stazioni ferroviarie più importanti della città (figura 4) in *Blue Station* sulla riduzione delle esternalità ambientali prodotte dall'ipercentro dell'area urbana di Roma: la trasformazione può incidere fino al 36% del totale delle emissioni complessive dell'area urbana centrale

Potenziale di miglioramento indotto dalla trasformazione di tutte le stazioni dell'Anello in "**Blue Station**" sulle esternalità della città di Roma (area interna al GRA)



C'è una dimensione più ampia del problema<sup>21</sup>, di dinamica dei sistemi che richiede il superamento dell'approccio micro-marginalista. Mentre le piccole azioni anche se moltiplicate su grandi quantità (lo schema degli incentivi o delle defiscalizzazioni) vedono vanificati i loro effetti positivi dall'inerzia del sistema climatico, le discontinuità si superano partendo da subito dalle azioni più complesse e onerose.

<sup>21</sup> Si veda, in particolare, *Climate policy: When starting with the most expensive option makes sense*, A. Vogt-Schilb, G. Meunier, S. Hallegatte, <https://voxeu.org/article/climate-policy-when-starting-most-expensive-option-makes-sense>



Figura 13. Schema dei meccanismi di correlazione positiva in senso di transizione ecologica e miglioramento del benessere collettivo tra *Blue station* e città: in blu il miglioramento tecnologico e impiantistico, in giallo la generazione di calore geotermico e in verde gli impianti di forestazione urbana

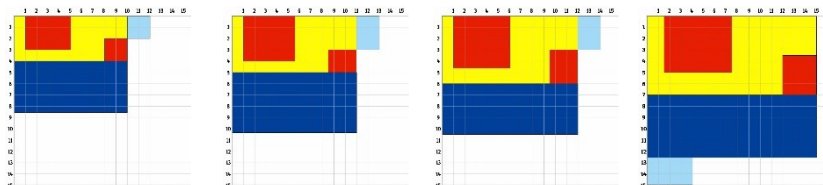
È una linea favorevole tanto agli investimenti infrastrutturali quanto all'aggregare la transizione ecologica delle città a partire proprio dai grandi contenitori di funzioni come le stazioni. E la loro trasformazione può essere una leva per il ridisegno funzionale delle parti di città che le contornano.

Tabella 16. Superfici e volumi indicativamente necessari per la trasformazione di una stazione in *Blue Station*

Taglia della stazione	Small	Medium	Large	Extralarge
Passeggeri giornalieri	5.000	10.000	15.000	30.000
Passeggeri annuali	1.500.000	3.000.000	5.000.000	10.000.000
<b>Fabbisogni diretti e indiretti</b>				
(1) energetico (kWh/anno)	3.000.000	4.500.000	6.000.000	10.000.000
(2) idrico (m <sup>3</sup> /anno)	33.750	60.000	87.500	150.000
<b>Superfici complessive (m<sup>2</sup>)</b>				
Superficie utile	1.500	3.000	5.000	10.000
Nuova superficie utile (m <sup>2</sup> )	2.175	3.300	4.450	7.500
Area tecnica	75	150	250	500
Campo solare	600	900	1.200	2.000
Campo geotermico	1.500	2.250	3.000	5.000
<b>Volumi addizionali (m<sup>3</sup>)</b>				
Stoccaggio e trattamento acque	51,0	90,0	131,0	225,0
<b>Foresta urbana compensativa</b>				
Superficie in ha (sesto 3x3m)	1,5	2,25	3,0	5,0
Numero minimo di alberature	2.000	2.500	3.500	6.000

Rappresentazione schematica

- Spazio connettivo
- Superficie commerciale
- Spazio tecnico
- Superficie utile per impianti di miglioramento energetico



#### 4. Bibliografia

- C. Loehle (1988), *Tree life history strategies: the role of defenses*
- M. Givoni and P. Rietveld (2007), *The access journey to the railway station and its role in passengers' satisfaction with rail travel*, *Transp. Policy*, 14, 5: 357–365
- G. Dupuy, *Urban Networks-Network Urbanism*, 2008, Techne Press, 7
- F. Bruinsma, E. Pels, H. Priemus, P. Rietveld, and B. Van Wee (2008), *The impact of railway development on urban dynamics*, in *Railway Development: Impacts on Urban Dynamics*, Physica-Verlag HD, pagg. 1–11
- L. Bertolini (2008), *Station areas as nodes and places in urban networks: An analytical tool and alternative development strategies*, in *Railway Development: Impacts on Urban Dynamics*, Physica-Verlag HD, pagg. 35–57
- N. B. Grimm et al. (2008), *Global change and the ecology of cities*, *Science*, 319, 5864: 756–760
- M. Brons, M. Givoni, and P. Rietveld (2009), *Access to railway stations and its potential in in-creasing rail use*, *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, 43, 2: 136–149
- A. Jørgensen, M. Z. Hauschild, M. S. Jørgensen, and A. Wangel (2009), *Relevance and feasibility of social life cycle assessment from a company perspective*, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Springer, 14, 3: 204–214
- W. Wu Ma, X. Yan Liu, L. Li, X. Shi, and C. Q. Zhou (2009), *Research on the waiting time of passengers and escalator energy consumption at the railway station*, *Energy Build.*, 41, 12: 1313–1318
- J. Bowyer, D. S. Bratkovich, K. Fernholz, J. Howe, and H. Groot (2010), *The human health and social benefits of urban forests*
- M. V. Chester, A. Horvath, and S. Madanat (2010), *Comparison of life-cycle energy and emissions footprints of passenger transportation in metropolitan regions*, *Atmos. Environ.*, 44, 8: 1071–1079
- A. Jørgensen, M. Finkbeiner, M. S. Jørgensen, and M. Z. Hauschild (2010), *Defining the baseline in social life cycle assessment*, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 15, 4: 376–384
- B. Monardo (2010), *La città liquida. Nuove dimensioni di densità urbanistica*, Maggioli Editore
- C. Benoît-Norris et al. (2011), *Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA*, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 7: 682–690
- A. Halog and Y. Manik (2011), *Advancing Integrated Systems Modelling Framework for Life Cycle Sustainability Assessment*, *Sustainability*, 3, 2: 469–499
- M. Tuchschnid, W. Knörr, A. Schacht, M. Mottschall, M. Schmied (2011), *Carbon Footprint and environmental impact of Railway Infrastructure*, IFEU-Institut and Öko-Institut e.V. for International Union of Railways (UIC), Heidelberg-Berlin
- J. Zacharias, T. Zhang, and N. Nakajima (2011), *Tokyo Station City: The railway station as urban place*, *Urban Des. Int.*, 16, 4: 242–251
- M. Chester, S. Pincetl, Z. Elizabeth, W. Eisenstein, and J. Matute (2013), *Infrastructure and auto-mobile shifts: Positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals*, *Environ. Res. Lett.*, 8, 1
- S. Valdivia, C. M. L. Ugaya, J. Hildenbrand, M. Traverso, B. Mazijn, and G. Sonnemann (2013), *A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment - Our contribution to Rio+20*, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 18, 9: 1673–1685
- A. Zamagni, H. L. Pesonen, and T. Swarr (2013), *From LCA to Life Cycle Sustainability Assessment: Concept, practice and future directions*, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 18, 9: 1637–1641
- D. Connolly et al (2014), *Heat roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system*, *Energy Policy*, 65: 475–489



- S. A. Hosseini, S. Mansour, and M. A. Shirazi (2014), *Social life cycle assessment for material selection: A case study of building materials*, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 19, 3: 620–645
- T. Lin et al. (2014), *Spatial analysis of access to and accessibility surrounding train stations: A case study of accessibility for the elderly in Perth, Western Australia*, *J. Transp. Geogr.*, 39: 111–120
- S. Mathe (2014), *Integrating participatory approaches into social life cycle assessment: The SLCA participatory approach*, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Springer Verlag, 19, 8: 1506–1514
- N. C. Onat, M. Kucukvar, and O. Tatari (2014), *Integrating triple bottom line input-output analysis into life cycle sustainability assessment framework: The case for US buildings*, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 19, 8: 1488–1505
- W. Ma, C. Xiang, L. Li, and G. Liu (2015), *Impact of cool roof on energy consumption for a rail-way station*, *Indoor Built Environ.*, 24, 8: 1095–1109
- S. Shin, H. Kim, H. Jung, J. Y. Park, and B. Hyun (2015), *Multilevel inverter development to utilize renewable energy in urban railway station*, *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, 64, 2: 324–330
- M. Longo, S. Franzo, V. M. Latilla, and G. Antonucci (2018), *Smart Energy Management of a Railway Station*
- I. Şengör, H. C. Kiliçkiran, H. Akdemir, B. Kekezoğlu, O. Erdinç, and J. P. S. Catalão (2018), *Energy Management of a Smart Railway Station Considering Regenerative Braking and Stochastic Behaviour of ESS and PV Generation*, 2018, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 9, 3: 1041–1050
- A. Vogt-Schilba, G. Meunier, S. Hallegatte (2018), *When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment*, *Journal of Environmental Economics and Management*, 88: 210-233
- G. Manoli et al. (2019), *Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population*, *Nature*, 573, 7772: 55–60
- C. Pierer and F. Creutzig (2019), *Star-shaped cities alleviate trade-off between climate change mitigation and adaptation*, *Environ. Res. Lett.*, 14, 8: 085011
- F. Creutzig, X. Bai, R. Khosla, V. Viguie, and Y. Yamagata (2020), *Systematizing and upscaling urban climate change mitigation*, 2020, *Environ. Res. Lett.*, 15, 10: 100202
- G. Piovesan and F. Biondi (2020), *On tree longevity*, 2020, *New Phytologist*. Blackwell Publishing Ltd
- AA.VV., *Evaluating the impact of Nature-based Solutions: a handbook for practitioners*, (2021), EU Research and Innovation Commission, [https://ec.europa.eu/info/news/evaluating-impact-nature-based-solutions-handbook-practitioners-2021-may-06\\_en](https://ec.europa.eu/info/news/evaluating-impact-nature-based-solutions-handbook-practitioners-2021-may-06_en)

## 5. Abstract

Nowadays, mobility represents the main productive process: this means that territorial sustainability must necessarily include sustainable movements as a key component. The increase in transport entity and transport routes, economic convenience, and, last but not least, a higher environmental awareness, are leading to higher consideration of the use of railways. In this framework, railway stations represent complex objects requiring significant material flows, which make up their ecological footprint. In this sense, a railway station is the last industrial plant to be accepted in contemporary cities. The last 2 years of pandemics have amplified both the need for tangible sustainability and the demand for active mobility-friendly cities. Discussing the sustainability of a station involves examining and measuring its ecological footprint, to provide active support to the targeted planning and design of mitigation measures. Their impact and effectiveness are certainly amplified by the natural central role of the railway stations. And what if the pursuit of sustainability for the railway stations could be intertwined with the search for quality collective spaces?

The answer is positive. The proposed algorithm allows shifting from a qualitative view (so to say, measured on a flat-rate basis), to a quantitative view of the possible improvement actions on the operation and maintenance processes of railway stations. Moreover, through minor adaptations, it could also be applied to industrial or residential processes.

In the framework of the related scientific literature and of the current in-progress research fields, the inherent innovation of the paper consists in providing an interpretation of the railway station as a driving force for the requalification of the surrounding building and social fabric, rather than as a mere infrastructural element of the railway network, or a node of the transport system.

In the last 20 months, the issues related to the containment of the Cov-Sars-2 pandemic have also sensitized the debate on the economic impact of mobility and infrastructures. An effective ecological transition cannot be merely linked to de-carbonization: the problem has a wider dimension in terms of system dynamics, which requires surpassing micro-marginalist approaches. The positive effects of small actions, even when performed at larger scales (the system of incentives or tax reliefs) are nullified by the inertia of climate change; instead, discontinuities must be overcome through complex and onerous actions. Interventions on big function containers such as railway stations represent a strong action, which benefits both infrastructural investments and urban ecological transitions. Their trans-formation can be a leverage for the functional redesign of the urban areas around them.