



Fabio Lamanna

via Cavalleggeri Treviso 13, 31100, Treviso

P. IVA: 02534880303 | C.F. LMNFBA77D21L483F

(+39) 320 6070544

fabio@fabiolamanna.it

www.fabiolamanna.it

ALLEGATO 3

Risparmio di Emissioni di CO₂ in Atmosfera

INDICE

1	BENEFICI AMBIENTALI	3
1.1	IPOTESI DI CALCOLO E BASE DATI DI LAVORO	3
1.2	BENEFICI AMBIENTALI DOVUTI ALLA DIMINUZIONE DEL TRAFFICO PRIVATO	4
1.2.1	<i>Scenari di Analisi</i>	4
1.2.2	<i>Grado di Saturazione</i>	4
1.3	IMPATTO AMBIENTALE	9
1.3.1	<i>Minori Ritardi Veicolari ed Emissioni Inquinanti</i>	14
1.4	COMPARAZIONE DEI BENEFICI AMBIENTALI	15
1.4.1	<i>Fattori di Assorbimento del Bosco Bovedo</i>	15
1.4.2	<i>Impronta di Carbonio Dovuta alla Costruzione dell'Impianto</i>	16
1.4.3	<i>Impronta di Carbonio Dovuta alla Dismissione dell'Infrastruttura</i>	17
1.4.4	<i>Impronta di Carbonio Dovuta alla Minore Manutenzione Stradale</i>	17
1.4.5	<i>Impronta di Carbonio dovuta al Consumo Elettrico del Progetto in Esercizio</i>	18
1.4.6	<i>Minori Emissioni Inquinanti Dovute alla Riduzione del Traffico e della Congestione</i>	19
2	CONCLUSIONI	21

1 BENEFICI AMBIENTALI

Tra gli elementi positivi insiti in una soluzione progettuale come quella della cabinovia va messo in risalto il fatto che mediante la realizzazione di un impianto a fune si riduce l'impatto ambientale derivante dal traffico stradale garantendo comunque la mobilità in sicurezza di lavoratori e residenti. Limitando il consumo di suolo e circoscrivendolo principalmente all'area in corrispondenza delle stazioni, un impianto di questo tipo consente di inserirsi nel contesto territoriale della città senza contrapporsi alla realizzazione di aree verdi e parchi ed anzi valorizzando zone di assoluto pregio ambientale ed urbanistico come la futura area del Porto Vecchio oggetto di riqualificazione.

1.1 Ipotesi di Calcolo e Base Dati di Lavoro

Tutte le analisi tecniche presentate nel seguito fanno riferimento, per coerenza metodologica ed analitica, a dati ed ipotesi riferiti al Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS) approvato nel 2021. I dati riferiti alla saturazione degli archi differiscono da quelli proposti nell'Ambito del Rapporto Preliminare Ambientale in quanto, nel caso della presente relazione, sono stati considerati anche gli archi sotto la soglia limite di saturazione considerata nel RAP per i fini relativi a valutazione della velocità, della sicurezza e delle emissioni ambientali. Anche il dato relativo all'emissione media di CO₂ dei veicoli fa riferimento a quello utilizzato nel PUMS (indagini anno 2019) che per coerenza e comparazione dei risultati è stato mantenuto inalterato anche nelle indagini seguenti.

È importante sottolineare che le analisi sono riferite all'intero tracciato della Cabinovia Opicina – Park Bovedo – Porto Vecchio – Trieste e non solo al tratto oggetto di Variante al PRGC (tratto inclinato); a livello trasportistico la Cabinovia è un'unica linea di collegamento tra l'Altipiano, il Porto Vecchio e Trieste, e pertanto non avrebbe senso scorporarne soltanto una parte in quanto i benefici, a tutti i livelli, derivano dall'utilizzo completo dell'infrastruttura.

1.2 Benefici Ambientali Dovuti alla Diminuzione del Traffico Privato

Al fine di valutare i benefici trasportistici della Cabinovia di progetto si fa riferimento allo stato di congestione degli archi viari del trasporto privato nell'area di influenza del progetto, oltre che ai numeri puri di *split* modale da trasporto privato a quello pubblico.

1.2.1 Scenari di Analisi

Sulla base dei dati forniti ed elaborati, il modello di trasporto è in grado di restituire, per ogni arco interessato, il flusso viario relativo alla singola matrice OD assegnata in termini di flusso totale e di rapporto tra volume di traffico e capacità dell'arco stradale (V/C); quest'ultimo è definito dal rapporto tra il valore orario di flusso transitante in una direzione su arco nell'unità di tempo (v_{eq}/h) ed il corrispondente valore della capacità.

Gli scenari comparati nel modello multimodale sono:

- Scenario SF – Stato di Fatto;
- Scenario SR – Stato di Riferimento;
- Scenario SP – Stato di Progetto.

Si ricorda che lo Scenario SR fa riferimento ad uno stato di progettazione pianificato, coerente con il PUMS, avente già gli incrementi di domanda derivanti dalle stime di espansione del PRGC e degli altri strumenti urbanistici; lo Scenario SP di Progetto si differenzia dall'SR soltanto per l'aggiunta nel modello dell'infrastruttura di progetto, che va quindi ad integrare e completare il quadro pianificato (coerente con il PUMS). In questo modo è possibile valutare l'effetto trasportistico del progetto sulla mobilità.

La mobilità che va ad insistere sull'intervento di progetto si basa sulle assunzioni alla base del modello di domanda e di offerta multimodale, dove emerge già lo *split* modale da mezzo privato a mezzo pubblico grazie alle ipotesi del modello (che derivano a loro volta dalle scelte degli scenari del PUMS). Lo Scenario di Progetto va quindi a contribuire allo *split* modale da mezzo privato a pubblico, grazie alla sua configurazione ed al posizionamento delle stazioni e delle fermate presso le "cerniere di mobilità" previste e presso luoghi ad alta attrattività potenziale (Porto Vecchio, Trieste Molo IV).

1.2.2 Grado di Saturazione

Il grado di saturazione di un arco stradale fa riferimento al rapporto tra flusso veicolare (solitamente veh/h) e la capacità dell'arco stesso; quest'ultimo valore dipende da molti fattori quali, per esempio, la presenza di intersezioni a valle del tratto stradale considerato, la larghezza ed il numero di corsie

per senso di marcia, la presenza di mezzi pesanti etc. Il grado di saturazione è quindi l'indicatore ideale per valutare situazioni di congestione in quanto il puro valore di flusso veicolare non è indice di situazioni di criticità, in quanto va rapportato all'effettiva capacità dell'arco che attraversa.

Il modello di traffico utilizzato ha valutato, per ogni arco stradale, il relativo valore di capacità (in veh/h), così da visualizzare il rapporto flusso/capacità e valutare le situazioni di congestione puntuale sulla rete stradale.

I fenomeni di saturazione attuali e nello Scenario di Riferimento (nel quale è stata modellizzato l'incremento di domanda dovuto a tutti gli interventi previsti dagli strumenti urbanistici finanziati, tra cui lo sviluppo dell'area del Porto Vecchio), sono riportati nella Figura 1 a) e b), rispettivamente; si evidenziano le attuali criticità presso la discesa da via Nazionale e l'area di Piazza Libertà, con ulteriore aumento della saturazione nello Scenario di Riferimento; quest'ultimo è lo Scenario su cui si inserisce la Cabinovia di progetto.

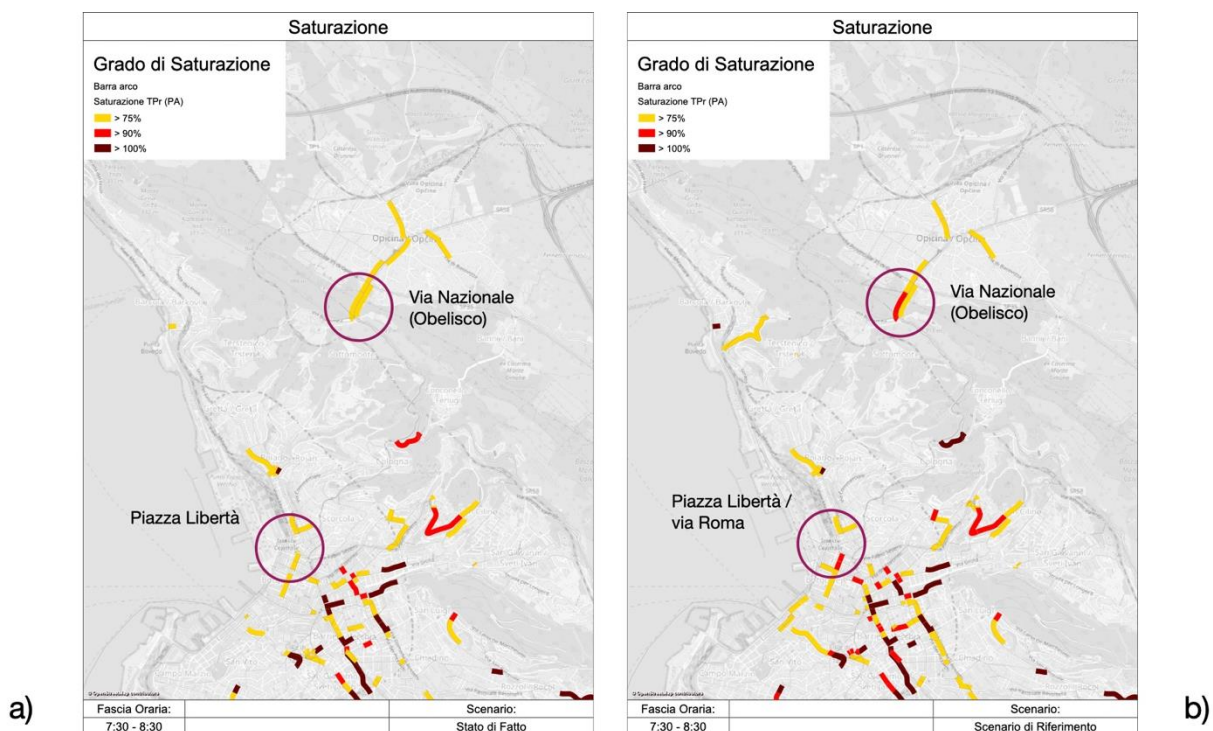


Figura 1 – Grado di Saturazione negli Scenari SF e SR

La ripercussione delle riduzioni veicolari indotte dalla Cabinovia sulla rete stradale è riportata nella seguente Figura 2 a) e b); si nota come gli archi di via Nazionale in discesa e l'area di Piazza Libertà tornino ad un livello di saturazione tollerabile nonostante gli aumenti di mobilità dovuti agli interventi pianificati, in particolare sullo sviluppo dell'area del Porto Vecchio. In questo senso non viene distinta la fascia oraria di punta e di morbida in quanto non si prevedono differenze significative tra i due scenari.

Analizzando più in dettaglio alcuni tra gli archi impattati positivamente dal progetto, emerge come la diminuzione del grado di saturazione sia dell'ordine del 4% con punte fino al 10% (per l'arco di via Nazionale) e via Roma (12%). Tali valori sono emersi da una analisi statistica sui valori del grado di saturazione della rete, dove è stato valutato il "delta" percentuale relativo all'aumento della saturazione sugli archi oltre la soglia del 80% di saturazione. In questo caso, considerando la quota relativa di saturazione che la cabinovia di progetto riesce a "scorporare" dalla rete dello Scenario di Riferimento, risulta che la quota di diversione modale auto – cabinovia contribuisce in maniera significativa alla saturazione sugli archi sovra-saturati.

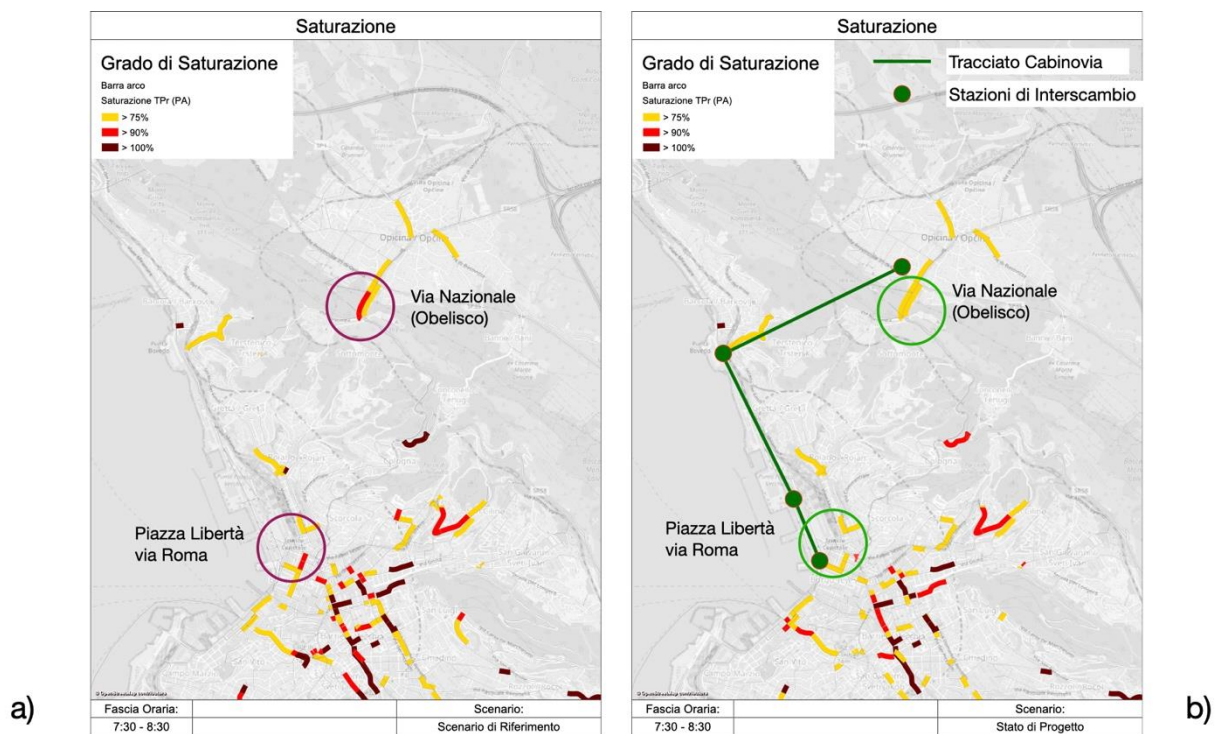


Figura 2 - Comparazione della saturazione sugli archi più critici in accesso Nord nello Scenario di Riferimento ed in quello di progetto

Anche nelle condizioni di sotto-saturazione (Tabella 1), si assiste comunque a benefici importanti dal punto di vista della diminuzione del traffico che, come visto nell'Allegato 2, può portare benefici sia dal punto di vista della sicurezza stradale, correlando il dato di traffico alla probabilità di incidenti sull'asse viario in esame, sia da quello delle minori emissioni inquinanti, come si vedrà nel seguito della relazione. I valori di saturazione indicati fanno riferimento sia alla minore quantità di veicoli nella rete (grazie allo *split* modale) che alla ridistribuzione dei restanti flussi sulla rete che, grazie alla minore congestione su alcuni archi, trovano più appetibile cambiare itinerario per la rispettiva coppia O/D rispetto allo Scenario di Riferimento.

Tabella 1 – Diminuzione del Grado di Saturazione per alcuni archi critici – in rosso gli archi alla soglia della saturazione (v/c maggiore di 0,8).

VIA	Saturazione Scenario Riferimento	Saturazione Progetto	Diff. %
VIALE MIRAMARE (ROIANO)	0,65	0,55	-16%
MILANO	0,57	0,48	-16%
VIA PAULIANA	0,78	0,72	-8%
ROMA	0,90	0,79	-12%
DALMAZIA	0,47	0,42	-11%
NAZIONALE (OBELISCO)	0,99	0,89	-10%
COMMERCIALE	0,84	0,77	-8%
COSTIERA	0,27	0,25	-7%
DUCA DEGLI ABRUZZI	0,50	0,47	-6%
VALERIO	0,96	0,91	-5%
FRIULI	0,84	0,80	-5%
TRE NOVEMBRE	0,69	0,66	-4%
CAVOUR	0,52	0,50	-4%
UDINE	0,79	0,78	-1%

Per comprendere l'impatto che anche piccole variazioni del grado di saturazione (in condizioni di saturazione) abbiano sulla fluidità della circolazione, si fa riferimento al Diagramma Fondamentale del Traffico riportato nella Figura 3. Nel diagramma si illustra l'andamento della velocità (u) al variare del flusso (q), fino al livello di saturazione (q_c). A flusso vicino allo 0 la velocità è a flusso libero (u_f , senza interferenze tra veicoli); all'aumentare del flusso, la funzione $U_e(q)$ della velocità rispetto al flusso segue la parte superiore del diagramma, dove il flusso è stabile fino al punto in cui il flusso raggiunge la capacità (grado di saturazione pari a 1), e la velocità raggiunge il punto critico (u_c). Da questo punto il flusso diventa instabile, causando fenomeni di accodamento che possono portare al blocco del traffico (velocità pari a 0).

Nel contesto della presente analisi, si fa notare che a ridosso del punto critico, anche piccoli scostamenti del flusso (in meno, nel diagramma ipotizzati dalla linea rossa), possono garantire un cambio di regime da critico a stabile, essendo la curva $U_e(q)$ quasi verticale in prossimità della capacità.

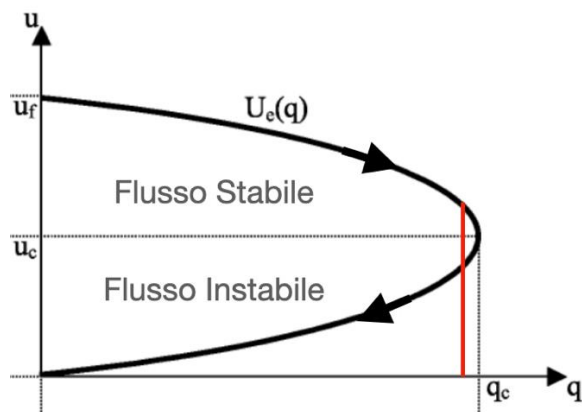


Figura 3 – Diagramma Fondamentale del Traffico

In questo senso, quindi, gli scostamenti del grado di saturazione previsti su alcuni archi critici dell'ordine del 4% e fino al 10% possono garantire il miglioramento del regime della circolazione da critico a stabile o da instabile a stabile, con aumento della velocità di marcia del flusso. I calcoli di cui sopra valgono per il modello lineare di Greenshields, più semplice nella trattazione; in situazioni di congestione il modello logaritmico di Greenberg può avere risultati migliori, ma valgono le stesse considerazioni di cui sopra.

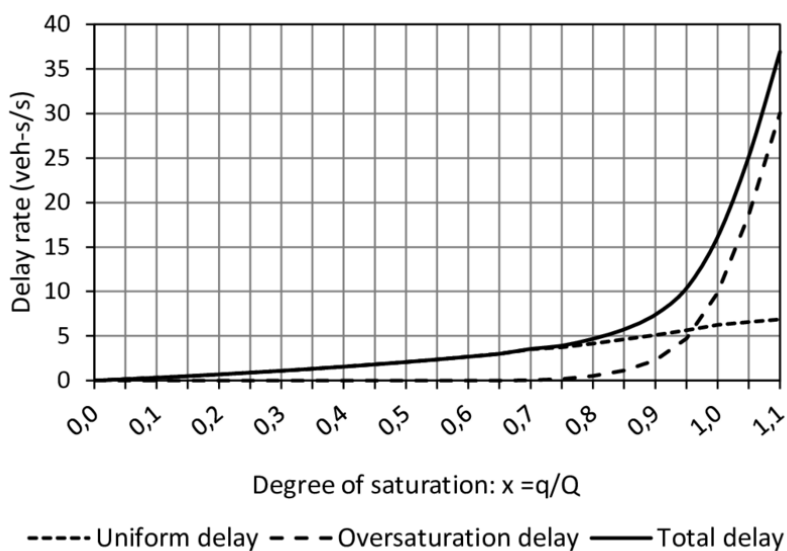


Figura 4 – Rapporto tra grado di saturazione e ritardo medio per veicolo

La Figura 4 illustra la funzione che lega il grado di saturazione x con il ritardo medio per veicolo. Anche in questo caso si nota come con gradi di saturazione maggiori dell'80% il ritardo segua un andamento di crescita sovra-lineare; una diminuzione del 10% del grado di saturazione (da 1.0 a 0.9) implica una riduzione del ritardo per veicolo del 66% (da 15 secondi/veicolo a 5 secondi/veicolo).

1.3 Impatto Ambientale

Gli archi interessati dalla diminuzione del traffico risiedono su itinerari che si scaricano per la presenza del nuovo collegamento Nord – Centro Città; tale fatto conferma le ipotesi in premessa sui benefici che il progetto può avere rispetto al collegamento relativo alla “penetrazione Nord” di Trieste.

Si evidenzia, inoltre, che tali dati fanno riferimento all’ora di punta della mattina, dove i flussi di mobilità sono, per la maggior parte, nella direzione Nord – Sud. Si ipotizza che i flussi relativi alla punta serale, sebbene più dilatata nel tempo, possano interessare più da vicino anche la viabilità più prossima alla zona del Porto Vecchio, con ulteriori benefici.

L’intervento progettuale porta dei benefici trasportistici legati alla diminuzione percentuale del grado di saturazione su alcuni archi critici della viabilità principale di Trieste (dal 4% al 12%), grazie alla divergenza modale auto-cabinovia che si registra nelle cerniere di mobilità (interscambio modale) e nei punti di attrazione/generazione di spostamenti (Porto Vecchio, Trieste Centro), dell’ordine di circa 450 veicoli equivalenti nell’ora di punta tolti alla rete viaria, per un totale di circa 4.050 veicoli al giorno in meno.

L’impatto positivo che la diminuzione veicolare, dovuta allo *split* modale da mezzo privato a mezzo pubblico (Cabinovia), ha sull’ambiente può essere analizzato su due aspetti:

Beneficio Diretto: diminuzione delle emissioni dovute alla minore presenza di veicoli su strada; al fine di stimare la quota di emissioni inquinanti evitata grazie al progetto, ed in particolare dallo spostamento modale da mezzo privato motorizzato alla Cabinovia, sono state utilizzate le formulazioni previste dall’ISPRA e dal Ministero dell’Ambiente per il consumo di carburante e di emissione di CO₂ in atmosfera. I dati di ingresso al calcolo sono:

- *Veicoli orari non utilizzati per trasferimento modale: 450 veh/ora*
- *Coefficiente di rapporto ora di punta/giorno: 9*
- *Percorrenza media giornaliera risparmiata per singolo veicolo: 12 km (in questo caso si considera la media delle percorrenze evitate di un mezzo a motore lasciato ai parcheggi di interscambio per raggiungere la destinazione finale. Per esempio, il tragitto A/R dal capolinea nord della Cabinovia al Capolinea Sud (Molo IV) è di circa 14 km).*
- *Fattore di emissione medio di CO₂ per unità di percorrenza di un veicolo: 163 g/km*
- *Giorni di operatività annui dell’infrastruttura: 322 (ipotesi cautelativa sull’effettivo periodo di servizio)*
- *La riduzione media giornaliera delle percorrenze in autovettura privata dovuta alla realizzazione dell’intervento, pertanto, è pari a: 450 veh/h * 9 * 12 km = 48.600 km/giorno.*

La cabinovia riduce quindi il traffico giornaliero in città di una percorrenza di circa 50.000 km/giorno.

Il calcolo del risparmio annuale di CO₂ dovuto al trasferimento modale mezzo privato a motore – Cabinovia viene quindi effettuato attraverso la formulazione:

$$\text{Risparmio Inquinante (kg/anno)} = (48.600 \text{ km/giorno}) \times (163 \text{ g/km}) \times (322 \text{ giorni}) / 1000$$

e si traduce quindi in circa 2.551 tonnellate/anno di CO₂ in meno rilasciata in atmosfera.

Accanto alla mancata emissione di CO₂ in atmosfera, si hanno benefici analoghi (ma con diversi ordini di grandezza) anche su altri fattori inquinanti, quali CO, NO_x e PM10. Non avendo a disposizione una base dati ampia di riferimento, tali valori non sono stati calcolati puntualmente.

Beneficio Indiretto: diminuzione delle emissioni dovute ai veicoli che comunque continuano a percorrere la rete stradale, ma dovuta al minor grado di saturazione su alcuni archi congestionati e quindi alla maggiore fluidità del traffico; in questo ambito si fa riferimento alla letteratura scientifica per valutare il beneficio indiretto dell'opera sull'ambiente. Tutti i modelli emissivi di inquinanti in atmosfera valutano la correlazione tra velocità media ed emissioni in atmosfera. In condizioni di saturazione, è stato verificato che le emissioni diminuiscono al diminuire dei ritardi alle intersezioni¹; è stata dimostrata inoltre la relazione tra aumento di emissione e la transizione all'interno di fenomeni di *stop and go*², tipica delle situazioni di traffico instabile o al limite dell'instabilità. A conferma di ciò, è stato inoltre proposto che un opportuno coordinamento di impianti semaforici per alleviare la congestione possa portare ad una diminuzione del 50% delle emissioni inquinanti in atmosfera³.

Al fine di valutare in modo quantitativo il beneficio indiretto sull'ambiente, si fa riferimento ad uno studio⁴ che ha analizzato le dinamiche di traffico ed i coefficienti di emissione di inquinanti in atmosfera in situazioni di saturazione.

¹ S. Hallmark, I. Fomunung, R. Guensler, et al. - *Assessing impacts of improved signal timing as a transportation control measure using an activity-specific modeling approach* - Transportation Research Record, 1738 (2000), pp. 49-55.

² N. Rouphail, H.C. Frey, J.D. Colyar, et al. - *Vehicle emissions and traffic measures: exploratory analysis of field observations at signalized arterials* - The 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC (2001), p. 2001.

³ H. Rakha, A. Medina, H. Sin, et al. - *Traffic signal coordination across jurisdictional boundaries: field evaluation of efficiency, energy, environmental, and safety impacts* - Transportation Research Record, 1727 (2000), pp. 42-51.

⁴ V. Shepelev, A. Glushkov, O. Fadina, A. Gritsenko - *Comparative Evaluation of Road Vehicle Emissions at Urban Intersections with Detailed Traffic Dynamics* - Mathematics 2022, 10, 1887.

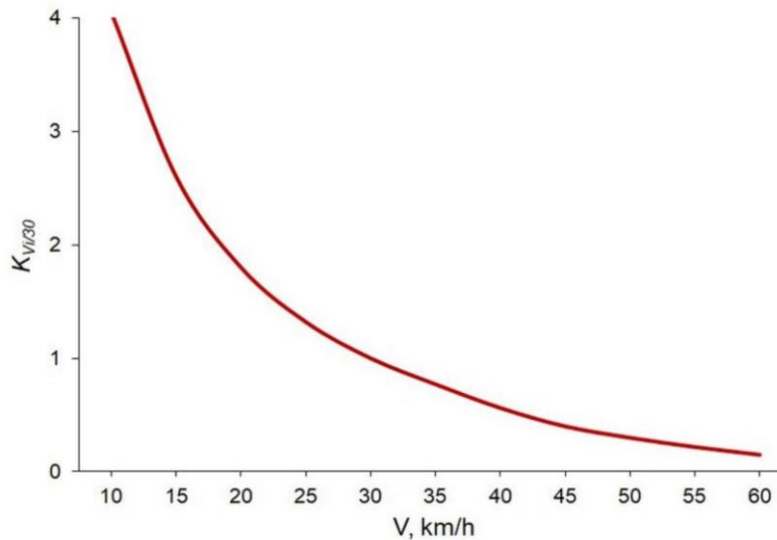


Figura 5 – Comparazione del coefficiente di emissione K base a 30 km/h in funzione della velocità

In accordo con i modelli, la quantità di emissioni dipende fortemente dalla velocità media del flusso. Assumendo un valore base emissivo per la velocità di 30 km/h, un incremento di velocità fino a 50 km/h su un tratto stradale in saturazione comporta una diminuzione di emissioni inquinanti del 30% circa (Figura 5).

È stato quindi calibrato un modello di traffico di Greenshields⁵ (Figura 6) ottenendo la relazione tra velocità, flusso e grado di saturazione su un arco urbano tipo. Assumendo dai dati di progetto che la saturazione nello Scenario di Riferimento sugli archi oggetto di analisi sia vicina al 100%, e che la velocità sia quindi vicina a 30 km/h (velocità critica), con una diminuzione del 4% della saturazione, la velocità aumenta di circa 10 km/h, fino a 40 km/h. Con il 10% di saturazione in meno, da 30 km/h si passa ad una velocità di circa 50 km/h.

⁵ BD Greenshields – *A study of traffic capacity* - Highway research board proceedings (1935).

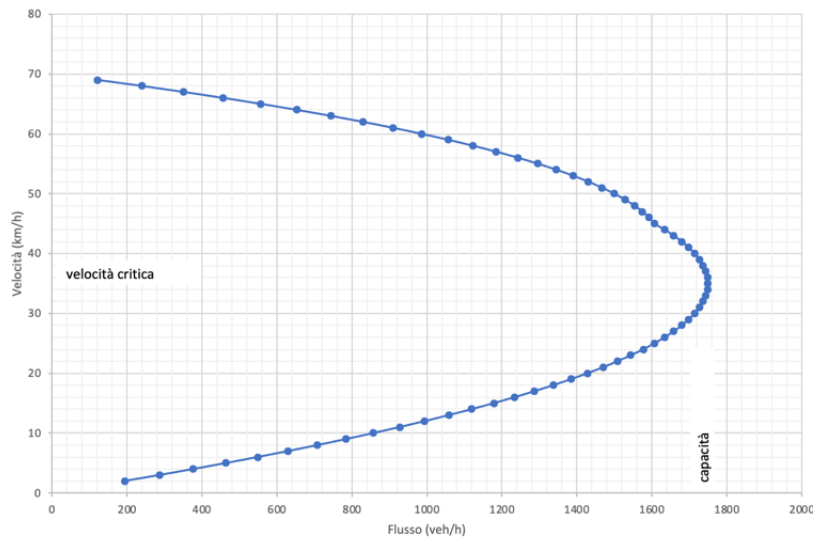


Figura 6 – Modello di Greenshields

Si può quindi stimare un miglioramento delle condizioni emissive pari ad una diminuzione dal 30% circa sull'arco di via Nazionale ad Opicina, per esempio (miglioramento del 10% del grado di saturazione), fino al 15% circa per gli archi in cui il grado di saturazione diminuisce del 4%.

Questi ultimi benefici indiretti sono notevoli, considerando che avvengono “soltanto” per un leggero miglioramento delle condizioni di circolazione su archi critici, ma che implicano notevoli risparmi a livello di minori emissioni in atmosfera (fino al 30% in meno sugli archi oggi più critici).

Si riportano infine alcune considerazioni sul beneficio indiretto quantitativo (in termini di minori emissioni emesse grazie alla riduzione della congestione), utilizzando il modello semplificato adottato nel calcolo delle minori emissioni per la riduzione del traffico veicolare. In questo caso occorre considerare che le riduzioni della congestione sono puntuali, ma contribuiscono a diminuire il tempo di viaggio totale dell'utente grazie all'aumento localizzato delle velocità (come visto in precedenza). La metodologia di calcolo dei benefici indiretti è la seguente:

1. *Valutazione del flusso orario dei veicoli che interessano gli archi alla soglia della saturazione nello Scenario di Riferimento (ante operam);*
2. *Valutazione del flusso orario dei veicoli che interessano gli archi di cui sopra nello Scenario di Progetto (post operam).*

I dati di cui sopra sono stati estratti dal modello di trasporto utilizzato nella pianificazione del progetto. Le coppie O/D sugli archi sono le stesse nei due scenari, in quanto l'infrastruttura di progetto non cambia le destinazioni ma soltanto il mezzo di trasporto utilizzato. Gli utenti che ancora percorrono gli archi stradale con il mezzo proprio a valle del progetto, trovano giovamento nel minore tempo di percorrenza dovuto alla minore congestione.

Tabella 2 – Archi in saturazione e calcolo delle emissioni sui tratti critici negli Scenari di Riferimento (SCR) e di Progetto (SCP).

VIA	Lunghezza Tratto Critico (km)	Variazione $K(v)$ SCR / SCP	Emissioni SCR (tonn CO ₂ / anno)	Emissioni SCP (tonn CO ₂ / anno)	Minori Emissioni dovute alla minore congestione stradale (tonn CO ₂ / anno)	Stato Saturazione
ROMA	0,2	23%	73	49	-24	SOVRASATURAZIONE
NAZIONALE	0,3	23%	217	150	-67	
COMMERCIALE	0,3	20%	39	29	-10	
VALERIO	0,5	13%	242	200	-42	
FRIULI	0,4	13%	186	154	-32	
MIRAMARE	0,2	9%	67	51	-16	SOTTOSATURAZIONE
MILANO	0,2	9%	73	56	-17	
PAULIANA	0,2	9%	59	50	-10	
DALMAZIA	0,1	5%	102	86	-15	
COSTIERA	1	5%	434	385	-50	
DUCA DEGLI ABRUZZI	0,2	5%	108	97	-11	
TRE NOVEMBRE	0,2	9%	208	181	-26	
CAVOUR	0,2	5%	108	99	-9	
UDINE	0,5	9%	112	101	-11	
TOTALE					-341	

La Tabella 2 riporta i dati di emissione ante e post operam sugli archi alla soglia della saturazione (maggiore dell'80%), dove la diminuzione della saturazione porta maggiori giovamenti alla circolazione e ad una minore emissività dei veicoli, in accordo a quanto riportato in precedenza. Nei calcoli sono stati considerati gli stessi coefficienti di passaggio da ora di punta a giorno (9) e da giorno ad anno (322) utilizzati in precedenza nel modello emissivo. Il coefficiente di emissività di CO₂ (g/km) è stato calcolato sulla base dell'andamento del coefficiente di emissione $K(v)$ in funzione della velocità, riportato nella Figura 5, modulando il coefficiente di emissione base (163 g di CO₂/km) in funzione della velocità dovuta alla congestione. In particolare, conta la differenza tra i coefficienti in funzione di due situazioni di saturazione a velocità differenti. I flussi riportati negli Scenari fanno riferimento alla minore presenza di veicoli dovuti allo *split* modale, ma soprattutto alla riassegnazione del percorso di utenti che, grazie alla minore congestione, trovano più appetibili alcuni itinerari che prima non impiegavano perché troppo saturi.

A livello di flussi, gli archi in sovra-saturazione vedono una diminuzione di circa 300 veicoli/ora complessivi, direttamente correlabili a quelli legati allo *split* modale. I restanti 150 veicoli/ora tolti dalla rete stradale a seguito del progetto sono ripartiti uniformemente sugli archi in sotto-saturazione, a cui si sommano ulteriori riduzioni dovute alla diversa scelta del percorso dovuta alle locali situazioni di miglioramento e fluidità del traffico (archi meno saturi attirano più passaggi veicolari). Per gli archi

in sotto-saturazione il beneficio in termini di minori emissioni inquinanti è minore rispetto al caso della sovra-saturazione, in quanto le variazioni di velocità sono anch'esse minori ma comunque non trascurabili. In quest'ultimo caso il coefficiente di emissione $K(v)$ aumenta di circa il 9% per gli archi a maggior valore di saturazione.

Si tratta di emissioni puntuali sui tratti in congestione, ma che vengono amplificate dai passaggi veicolari. Il coefficiente di passaggio da ora di punta a giorno mitiga il fatto che le congestioni possono avvenire soltanto in alcune fasce orarie, ma va comunque a normalizzare il calcolo per tenere conto di un effetto complessivo medio giornaliero, in coerenza con il modello emissivo utilizzato per il calcolo delle minori emissioni a valle della riduzione del traffico veicolare nell'ora di punta. Il totale delle emissioni risparmiate si attesta quindi a circa 341 tonnellate di CO₂ / anno, come beneficio indiretto della minore congestione su alcuni assi critici.

1.3.1 Minori Ritardi Veicolari ed Emissioni Inquinanti

Un ulteriore contributo positivo del progetto si può ricercare nella diminuzione dei ritardi dovuta alla minore congestione di alcuni assi critici⁶.

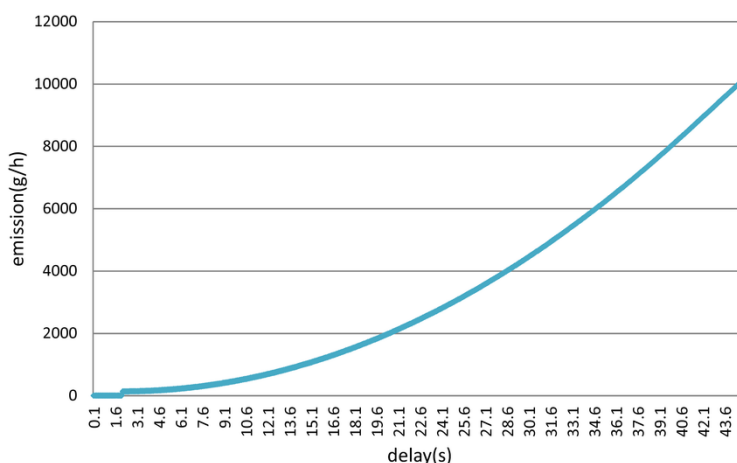


Figura 7 – Correlazione tra ritardi medi ed emissioni in inquinanti.

In questo caso si fa riferimento ai ritardi medi alle intersezioni, essendo queste ultime i nodi che limitano la capacità degli archi afferenti. La Figura 7 illustra la correlazione tra ritardo ed emissione complessiva di agenti inquinanti. Nel caso in esame si assume come ritardo il valore derivato dalla minore congestione negli archi di cui alla Tabella 2. Si fa riferimento al calcolo del ritardo alle intersezioni come proposto dal Manuale *HCM*, in cui compaiono sia il grado di saturazione che la capacità dell'intersezione più prossima a valle del corrispondente arco stradale. Al fine di calcolare

⁶ Lin, Ciyun & Gong, Bowen & Qu, Xin. (2015). Low Emissions and Delay Optimization for an Isolated Signalized Intersection Based on Vehicular Trajectories. PLoS one. 10. e0146018. 10.1371/journal.pone.0146018.

le emissioni di CO₂ orarie, è stata quindi riproposta la funzione di correlazione tra emissioni e ritardo secondo la legge:

$$y = 0.0538x^2 - 1.6877x + 106.07$$

Dove y rappresenta la quantità oraria di emissioni e x il ritardo alle intersezioni; è stato ipotizzato un andamento della quantità di emissioni di CO₂ rispetto all'emissione complessiva di inquinanti dovuta al traffico veicolare secondo le indicazioni riportate nel Manuale HCM⁷, in particolare stimandola analoga a quella di CO, pari al 70% delle emissioni totali.

L'applicazione di tale formulazione agli archi e intersezioni maggiormente sature porta a ulteriori risparmi di tonnellate annue di CO₂. Tuttavia, la non certezza di perfetta sovrapposibilità degli effetti dei ritardi con quelli della congestione, porta a non considerare tale contributo a titolo cautelativo.

1.4 Comparazione dei Benefici Ambientali

Di seguito, per completezza, si analizzano le emissioni di CO₂ assorbite dal Bosco Bovedo e quelle riferite all'impronta di carbonio della Cabinovia in esercizio dovute al consumo di energia elettrica, comparandole ai benefici ambientali ottenuti dalla minore quantità di veicoli circolanti grazie allo *split* modale mezzo privato – Cabinovia.

1.4.1 Fattori di Assorbimento del Bosco Bovedo

Al fine di comparare il dato di beneficio ambientale dovuto al minore traffico veicolare con le emissioni di CO₂ assorbite da un ettaro di bosco (nel caso specifico di Bosco Bovedo), si fa riferimento all'Inventario Nazionale delle Foreste in Friuli-Venezia Giulia ed al Piano per la Qualità dell'Aria della Regione Toscana. Quest'ultimo documento riporta i fattori di assorbimento di CO₂ per tipologia di albero in tonnellate/anno. Nell'area del Bosco Bovedo si possono trovare specie ruderali/vivaistiche, poi salendo nel percorso si susseguono boscaglia a roverella (*Quercus pubescens*) e in alto bosco di impianto a pino nero. I fattori di assorbimento per tali tipi di vegetazione sono:

- *Quercus pubescens* - assorbimento circa 0,12 t/anno di CO₂
- *Pino Nero* - assorbimento circa 0,08 t/anno di CO₂

Dai rilievi effettuati, il numero di alberi ad ettaro presso il bosco Bovedo è di circa 800 alberi/ha (= un albero ogni 12-13 mq). Questo dato deriva dalla media dei rilievi effettuati in campo, rilievi

⁷ Board TR. Highway Capacity Manual. Washington DC.: TRB, 2000 Special Report 209.

effettuati per aree di saggio con misurazione del diametro a petto d'uomo di tutti gli alberi aventi diametro maggiore a 10 cm. Effettuando il calcolo sull'assorbimento annuo di CO₂ da parte di un ettaro di alberi, considerando un valore medio di 0,1 tonnellate di CO₂/anno (dai dati di cui sopra), si ottiene che un ettaro di bosco Bovedo contribuisce all'assorbimento di circa 80 tonnellate di CO₂ annue, contro un beneficio dovuto alla Cabinovia nella scelta modale del trasporto pubblico di 2.551 minori tonnellate di CO₂ annue non emesse in atmosfera.

Nella sostanza la realizzazione della cabinovia contribuisce a un risparmio di CO₂ pari a circa 32 ettari di un Bosco Bovedo, ma l'equivalenza su un bosco generico in letteratura porta a un risparmio di CO₂ pari anche a oltre 100 ettari di bosco per i soli benefici diretti della cabinovia.

L'eliminazione degli alberi (non della vegetazione in generale) che possono intralciare il tracciato della cabinovia non è qui calcolato in termini di minore assorbimento di CO₂, in quanto tra le misure previste nel rapporto ambientale vi è la ripiantumazione di nuove essenze arboree in misura doppia a quelle eliminate. Non considerare quindi questo elemento gioca in favore di sicurezza, senza contare, inoltre, che un bosco "anziano" ha un coefficiente di assorbimento di CO₂ spesso minore di un bosco giovane.

1.4.2 Impronta di Carbonio Dovuta alla Costruzione dell'Impianto

Per completezza è stata valutata, di massima, il valore dell'impronta di carbonio dovuta alla costruzione dell'impianto elettromeccanico e delle opere civili di forza relative alla Cabinovia. Al livello di progettazione attuale non è ovviamente possibile avere una stima perfetta di tutti i processi produttivi necessari alla realizzazione degli acciai e dei calcestruzzi. Si fornisce pertanto una stima riferita ad una simulazione dell'impianto con 100 cabine, lunghezza inclinata di 4.873 m, 2 stazioni motrici e 3 stazioni di rinvio, 37 pali standard non tipo Leitwind; il risultato per la sola produzione e installazione (inclusi i basamenti in c.a.) è di 5.040 t CO₂ equivalenti. Di questo valore il potenziale di riciclaggio ammonta a 1.880 t di CO₂ equivalenti, arrivando quindi a un saldo di 3.160 t CO₂ equivalenti.

Trattandosi di una stima una-tantum, non è stata quindi riportata nel computo globale dei benefici che si avrebbero ogni anno utile di esercizio dell'impianto, sia perché, come si vedrà in seguito, viene recuperata già nel primo anno di esercizio, sia per altre giustificazioni che si evidenziano nei successivi paragrafi.

1.4.3 Impronta di Carbonio Dovuta alla Dismissione dell'Infrastruttura

In accordo con uno studio recente⁸, è stato valutato come in uno scenario di 10 anni (fino al 2031), l'utilizzo di una quota di materiali riciclati al 70% (in media) porti ad un risparmio di circa il 50% della quota di Carbonio emessa in caso di dismissione a fine vita utile. I materiali da costruzione utilizzati per la Cabinovia hanno anch'essi un elevato coefficiente di riciclo e pertanto non sono stati computati come parte di un contributo negativo sulle emissioni totali dell'infrastruttura per le ipotesi di cui sopra, in quanto il contributo a fine vita (40 anni) si ritiene che sia trascurabile e comunque puntuale nel tempo. Valgono inoltre le considerazioni del successivo paragrafo.

1.4.4 Impronta di Carbonio Dovuta alla Minore Manutenzione Stradale

Tipicamente lo strato di usura stradale va adeguato e ripristinato ogni 5 anni, in condizioni di traffico medio. Correlando tale valore con il TGM medio nello Scenario di Riferimento e quello stimato (ridotto) nello Scenario di Progetto, è possibile valutare la differenza media in maggiori tempi di manutenzione dovuta al minore traffico sugli assi critici di cui sopra. Tale valore risulta pari a circa 6 mesi di maggiore vita utile della strada ogni 5 anni, quindi il 10% in più rispetto allo Scenario di Riferimento.

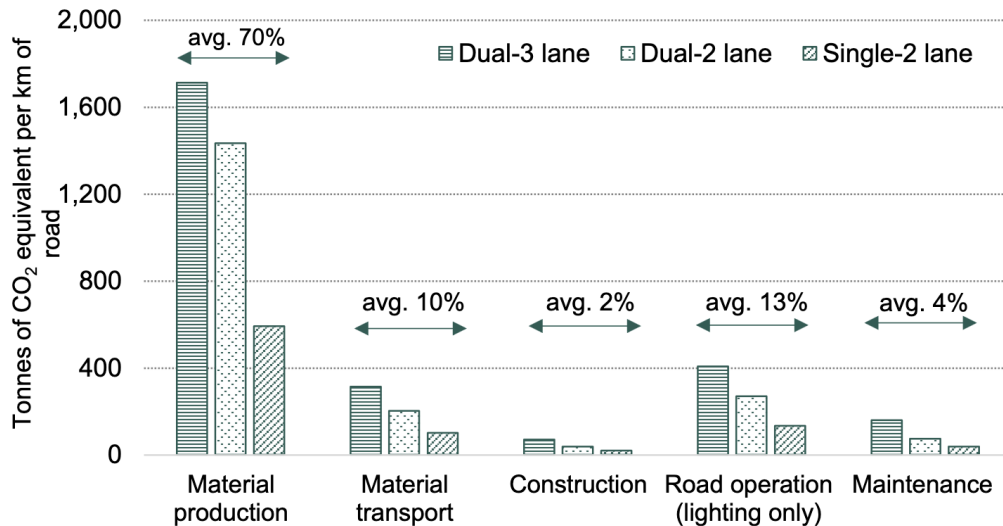


Figura 8 – Ciclo di emissione di Carbonio per diverse configurazioni stradali – cit. Lokesh et al.

⁸ Wang, T.; Li, K.; Liu, D.; Yang, Y.; Wu, D. Estimating the Carbon Emission of Construction Waste Recycling Using Grey Model and Life Cycle Assessment: A Case Study of Shanghai. Int. J. Environ. Res. Public Health 2022, 19, 8507. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148507>

È stata quindi stimata la produzione di Carbon Footprint dovuta al minore ciclo di manutenzione delle strade. Ci si è affidati ad uno studio⁹ che computa le quote parte della costruzione e della manutenzione delle infrastrutture nel calcolo della quantità di CO₂ equivalente/anno prodotta dal trasporto e dalla posa di una pavimentazione stradale tipica.

In generale è stato valutato che l'intero ciclo produttivo della costruzione di una strada a due corsie (prendendo come esempio un caso urbano) implica l'emissione di circa 880 tonnellate di CO₂ equivalenti per 1 km di strada. Valutato quindi il peso della sola manutenzione dalla figura precedente (4%), si può valutare in 35 tonn/CO_{2e}/km di strada l'unità di emissione della manutenzione. Valutando l'estensione della rete stradale oggetto di riduzione del traffico (assi più critici dai nodi di interscambio di Opicina e Bovedo fino alla zona centrale della città), si ottiene una rete stradale di circa 20 km che può beneficiare di una minore manutenzione.

Dalle ipotesi di cui sopra si ottiene una emissione di 35 tonnCO_{2e} per 20 km, pari a circa 700 tonnCO_{2e} ogni 5 anni, e quindi di 5.600 tonnCO_{2e} sui 40 anni di vita utile della Cabinovia. Il guadagno in termini di minori emissioni dovute al minore ciclo di manutenzione su alcuni assi stradali si valuta quindi nel 10% del totale, pari a circa 560 tonnCO_{2e}.

A favore di sicurezza, comunque, tale contributo positivo non è stata computato nel bilancio totale delle emissioni, anche a compensazione dell'eventuale contributo dovuto alla dismissione dell'infrastruttura a fine vita.

Inoltre, su un orizzonte temporale di quaranta anni andrebbe considerato anche il risparmio in termini di ristrutturazione complessiva della strada la cui durata anche in questo caso viene proporzionalmente aumentata grazie alla sottrazione di traffico da parte della cabinovia. Tale contributo favorevole è qui trascurato a titolo cautelativo e ben compensa l'aver trascurato il contributo per la realizzazione dell'impianto funiviario.

1.4.5 Impronta di Carbonio dovuta al Consumo Elettrico del Progetto in Esercizio

Di seguito si riporta una stima dell'Impronta di Carbonio (Emissione di CO₂ equivalente) dovuta alla fase di esercizio della Cabinovia in un anno tipo di funzionamento. I fattori di emissione per la produzione e consumo di energia elettrica considerati in seguito sono stati calcolati in base al consumo di combustibili comunicati a ISPRA¹⁰ (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca

⁹ Lokesh, K., Densley-Tingley, D. and Marsden, G. (2022) Measuring Road Infrastructure Carbon: A 'critical' in transport's journey to net-zero. Leeds: Decarbon8 Research Network.

¹⁰ Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del settore elettrico – ISPRA, 2020 - <https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/r363-2022.pdf> - consultato nel mese di febbraio 2023.

Ambientale) da TERNA a partire dal 2005. Si fa riferimento al dato di fattore di emissione (g di CO₂ / kWh) a livello di utente finale, che nel 2020 (ultimo dato consolidato) è pari a 255 g di CO₂ / kWh.

All'interno del progetto della Cabinovia sono stati stimati i consumi annui di energia elettrica necessari per il funzionamento dell'infrastruttura. La Tabella 3 illustra i dati di ingresso (consumi medi per tratta), le ore e le giornate di funzionamento. Apportando un coefficiente correttivo dell'80% sui consumi (ipotizzandolo come consumo medio rispetto alle esigenze di picco), e moltiplicando i kW annui per il coefficiente di emissione di cui sopra, si ottiene un valore di circa 1.019 tonnellate di CO₂ / anno equivalenti, come impronta di carbonio dovuta all'esercizio della Cabinovia.

Tabella 3 – Emissioni di CO₂ equivalenti dovute all'esercizio della Cabinovia

Tratta	kWh a regime	Ore/giorno di funzionamento	Giornate / anno	Emissione (tonn CO ₂ / anno)
Opicina - Bovedo	600	14,5	322	571
Bovedo - Trieste	470	14,5	322	447
Totale Emissioni				1.019

1.4.6 Minori Emissioni Inquinanti Dovute alla Riduzione del Traffico e della Congestione

Si riportano per chiarezza espositiva i benefici ambientali dovuti al minore traffico veicolare ed alla minore congestione come di seguito:

Benefici diretti: circa 2.551 tonnellate/anno di CO₂ in meno rilasciata in atmosfera.

Benefici indiretti (congestione): circa 341 tonnellate/anno di CO₂ in meno rilasciata in atmosfera.

Benefici indiretti (ritardi): ulteriore contributo in termini di tonnellate/anno di CO₂ in meno rilasciata in atmosfera che si trascura a titolo cautelativo.

Per il settore della auto, l'impronta di carbonio dovuta alle sole emissioni rappresenta circa il 65% di tutta la Carbon Footprint legata ai cicli produttivi in tutte le parti, ai processi di distribuzione, filiera carburante ed energia, ecc¹¹. Passando a livello della Carbon Footprint, quindi, il beneficio totale di avere una quantità minore di automobili in circolazione pesa ancora per circa il 35%, ottenendo un valore di Impronta di Carbonio minore pari a circa 3.924 tonnellate di CO₂ non emesse in atmosfera (considerando tutto il ciclo produttivo di fabbricazione dell'automobile).

¹¹ Si fa riferimento allo standard ISO 14040 (LCA, life cycle assessment) valido a livello globale, certificati da enti indipendenti su un database tipo proveniente dall'Azienda Volkswagen.

In questo contesto chiaramente l'infrastruttura di progetto funziona a livello di nodo di interscambio modale, diminuendo le percorrenze dei veicoli privati e non annullandone completamente la presenza su strada. Va considerato, dall'altra parte, che minori percorrenze implicano una maggiore durata del mezzo, minore usura delle parti ed una vita media più lunga, con indubbi benefici sulla minore necessità di acquisto di nuovi mezzi sul breve / medio periodo.

Benefici Indotti (carbon footprint extra emissioni su strada): circa 1.373 tonnellate/anno di CO₂ in meno rilasciata in atmosfera.

2 CONCLUSIONI

A valle delle analisi di cui sopra, si può ragionevolmente affermare che il Progetto della Cabinovia, in fase di esercizio a regime, è *Carbon Free*, in quanto i benefici ottenuti dalla riduzione del traffico veicolare, dalla minore congestione veicolare ed ai minori ritardi sulla rete superano le emissioni di CO₂ necessarie al funzionamento dell'infrastruttura (consumo di energia elettrica), anche a fronte di un minore contributo di assorbimento di CO₂ del Bosco Bovedo dovuto ad uno sfoltimento di circa un ettaro di vegetazione.

Tipologia di Emissione	Causa	Contributo	Emissione (tonn CO₂ / anno)
Diretta	Minor numero di veicoli sulla rete	minori emissioni	-2.551
Indiretta	Minore congestione	minori emissioni	-341
Indiretta	Minori ritardi sulla rete	minori emissioni	non computata
Indotta	Carbon Footprint produzione automobili	minori emissioni	-1.373
Diretta	Esercizio della Cabinovia	maggiori emissioni	1.019
Minori emissioni in atmosfera totali/anno			-3.246

Tali benefici si ripropongono ogni anno di esercizio della cabinovia. Si osserva che in questo contesto si sono non computati anche i valori di carbon footprint di produzione dell'infrastruttura che sono una tantum (e che comunque devono rispettare i criteri ambientali minimi molto stringenti cui il progetto si attiene) e che si ritengono comunque trascurabili in relazione alla vita utile dell'impianto.

Il bilancio di risparmi annui di emissioni di CO₂, pari a circa 3.250 tonnellate annue, è comparabile all'assorbimento di CO₂ che si avrebbe realizzando circa 130 ettari di bosco.