UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

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

TESI DI LAUREA

IMPRONTA CARBONICA PER L'EDIFICAZIONE DELL'EX FORO BOARIO E SCENARI DI RIQUALIFICAZIONE IN AREA DI VERDE URBANO

Relatore: PROF. SALVATORE PAPPALARDO
Correlatori: DOTT. GIACOMO ROSINA
Laureando: **MARTIN IKENNA NNABUIFE**

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Abstract

Gli anni ‘60 sono stati per l’Italia un periodo di boom economico nel quale molte infrastrutture sono state realizzate, spesso, con scarsa attenzione alle problematiche ambientali che allora non erano ancora evidenti. L’obiettivo dello studio è quello di quantificare il carico ambientale della struttura “ex Foro Boario”, situata nella città di Padova, stimandone l’impronta carbonica per la realizzazione della pavimentazione. La ricerca si focalizza principalmente sul suolo, senza includere nel calcolo dell’impronta carbonica la cubatura degli edifici. Nella prima parte dello studio si effettuerà l’inventario del carbonio, successivamente verrà esposto un possibile scenario di mitigazione grazie all’implementazione di formazioni arboree. Al fine di una più puntuale valutazione delle emissioni si adotterà un approccio di *Life Cycle Assestment* (LCA) eseguendo uno studio *cradle to gate* che include nel computo le fasi di approvvigionamento, produzione, distribuzione e uso. I materiali elaborati si basano su dati del rapporto di Eurobitume (2010), dell’*International association of oil & gas producers* (IOGP) e di uno studio di *Life Cicle Inventory* del *Swedish Enviroment Research Institute*.

Dai risultati emergerà che la maggior parte delle emissioni (89%), sono dovute al settore produttivo, in particolare, all’interno di esso, il materiale che grava di più a livello ambientale risulta essere l’ossido di calcio, il quale è un costituente principale sia dell’asfalto che del cemento. La fase di trasporto via nave, che generalmente incide molto, si vedrà che non possiede un ruolo predominante alla scala del caso studio. Nel cercare misure di mitigazione degli impatti sarebbe quindi opportuno agire sui processi produttivi di questi due materiali. Oltre al danno ambientale legato all’edificazione, va tenuto conto anche del continuo deficit nell’assorbimento di anidride carbonica dovuto al cambio di uso di suolo. Il cemento impedisce infatti al terreno di svolgere la sua funzione di *carbon sink*, questo senza contare eventuali alberature che potrebbero apportare un notevole ausilio nella cattura dell’anidride carbonica.

Per quanto riguarda le prospettive di riqualificazione, verranno proposti due scenari: il primo si attiene alle disposizioni contenute nel PUA, il secondo mira a sfruttare anche alcune porzioni di suolo inutilizzate, duplicando quindi la quantità di installazioni arboree previste. Nello specifico si andrà ad osservare la quantità di CO_2 che viene assorbita dalla specie *Tilia platyphyllos* nel corso degli anni. I calcoli, fatti grazie all’utilizzo del software i-Tree eco mostrano che nel primo caso 199 alberature necessitano di 42 anni per recuperare la totalità delle emissioni prodotte. Considerando però anche il “disservizio” causato dalla cementazione del suolo, ciò che emerge dai dati mostra che quel numero di tigli non è sufficiente a neutralizzare il bilancio negativo. Nel secondo scenario si osserva invece che in 54 anni dalla piantumazione, la capacità di cattura e stoccaggio di CO_2 degli alberi supererà quella che avrebbe il suolo non cementato, andando quindi a compensare i mancati assorbimenti causati dal cambio di uso del suolo.

È quindi evidente come un approccio orientato alla sostenibilità convenga, anche a fronte dei costi economici, in quanto la cattura della CO_2 comporta un risparmio di soldi sul lungo periodo.

Indice

1 Introduzione 7
1.1 Contesto e problematica 7
1.2 Obiettivi 7
1.3 Servizi ecosistemici 8
1.4 Inquadramento 8
2 Materiali e metodi 11
2.1 Materiali 11
2.2 Software e dati 11
Life Cycle Assessment 13
Simulazione di scenari di mitigazione: modellizzazione tramite software i-Tree eco 13
2.3.1 Produzione 15
2.3.2 Trasporto in situ 16
2.3.3 Posa in opera 16
3 Risultati 18
3.1 Analisi e rappresentazioni 18
3.1.1 Estrazione materie prime 18
3.1.2 Produzione di cemento 20
3.1.3 Trasporto 20
3.1.4 Posa in opera 21
3.2 Progetto di riqualificazione 22
3.3 Statistiche tabelle e grafici 22
3.4 Scenari di mitigazione tramite soluzioni *Nature-Based* 27
3.5 Carbon market: analisi e traiettorie 31
4 Conclusioni 34
Bibliografia 36

1 Introduzione

1.1 Contesto e problematica

Nel 1968 venne inaugurata a Padova l'area oggi denominata ex Foro Boario. L'idea iniziale fu quella di creare un mercato di bestiame di rilevanza internazionale ma, 12 anni dopo, tale prospettiva si infranse lasciando il luogo abbandonato. Negli anni successivi ci furono sporadici tentativi di riutilizzo: come mercato florovivaistico, insediatosi negli anni tra il 1985 e il 2004 o come impianto di atletica *indoor* dal 2005 al 2008, successivamente chiuso a causa di normative a tutela dal rischio sismico [I]. Ad oggi l'area resta inutilizzata e ciò, chiaramente, grava sull'ambiente e nello specifico sul suolo che non ha possibilità di rigenerarsi con conseguente perdita della capacità di fungere da serbatoio per il carbonio
Secondo la Commissione europea [VIII], il settore delle costruzioni è responsabile da solo del 40% della domanda di energia primaria nell'UE e del 36% delle emissioni di gas serra. In Italia, nello specifico, il comparto contribuisce per il 27,9% alla domanda di energia e per il 24,2% alle emissioni climalteranti. Da quanto emerge sempre dal medesimo rapporto di legambiente [VIII], tra il 2020 e il 2050 il 50% delle emissioni del settore edile sarà causato dal trasporto dei materiali in cantiere. Una nuova edificazione comporta il 75% in più delle emissioni rispetto ad una ristrutturazione. Già da questi dati si capisce quanto possano essere significative le emissioni derivanti dalla costruzione dell'area in esame.

1.2 Obiettivi

L'obiettivo principale di questo studio è calcolare l'impronta carbonica che la costruzione del sito in esame ha avuto; per fare ciò verrà eseguito un inventario del carbonio che prenderà in esame tutte le fasi del ciclo produttivo dei materiali e la loro posa in opera.

Al fine di valorizzare l'importanza dei servizi ecosistemici e delle *nature based solutions (NBs)* vengono proposti anche i seguenti obiettivi specifici:

-Stimare il tempo richiesto all'area per riassorbire la quota di emissioni causate dalla sua edificazione. Nei due scenari esaminati questa stima si otterrà grazie ai dati forniti in output da i-Tree.

-Mostrare il valore generato, sia dal punto di vista ambientale che economico, dall'adozione di un approccio orientato alla sostenibilità.

1.3 Servizi ecosistemici

I servizi ecosistemici sono le condizioni e i processi attraverso i quali gli ecosistemi sostengono la vita umana, sono essenziali per la produzione di beni di varia natura e per il mantenimento delle funzioni ecosistemiche di supporto alla vita[XI]. Il Millennuim Ecosystem Assessment (MA, 2005) propone una divisione dei servizi in quattro categorie:

- Supporto alla vita (es. formazione suolo)
- Approvvigionamento risorse (cibo, materie prime)
- Regolazione (controllo erosione)
- Valori culturali (paesaggistici o religiosi)

Questo studio si concentrerà sui servizi di supporto (fotosintesi) e regolazione (stoccaggio carbonio) per stimare la quantità di CO_2 sottratta annualmente all'ambiente. Entrambi gli aspetti sono inclusi nelle equazioni allometriche che il software impiegato utilizza per misurare l'entità dei servizi forniti dalle alberature.

Il secondo scenario, prevede semplicemente l'aumento nel numero di installazioni arboree, senza implementare ulteriori tecnologie di *carbon capture* poiché, nel caso specifico della rimozione della CO_2, una tra le alternative migliori è ancora l'impiego di alberi. Questo è un chiaro esempio di *nature based solution,* ossia una gestione e uso sostenibile della natura per superare problematiche ambientali. Adottare questo tipo di risposta ai problemi ha molteplici benefici: oltre a poter gestire e preservare le funzionalità di un ecosistema, può essere anche rilevante dal punto di vista della salvaguardia della biodiversità. Quest'ultima è infatti al centro di molte politiche comunitarie, l'UE infatti mira ad abbattere significativamente il degrado ambientale entro il 2030 e per farlo, una strada che concilia questi ed altri obiettivi è quella delle NBs.

1.4 Inquadramento

Per individuare e perimetrare la zona è stato impiegato il software *Google Earth Pro*, ricavando le seguenti metriche areali e l'output cartografico (Tabella e Figura 1.3.1):

Perimetro	2.125,04 m
Area totale	171.498,98 m²
Area ricoperta a verde	28.210,73 m^2
Restante area asfaltata	143.288,98 m^2

Tabella 1.3.1 Misurazioni delle superfici esaminate nel caso studio

Figura 1.3.1 Area di studio "Ex Foro Boario": analisi di copertura/uso del suolo ed elaborazione cartografica mediante software Google Earth

Al fine di avere misurazioni più precise della superficie ricoperta dagli edifici, oltre a questo software, ci si è avvalsi anche del Piano Urbanistico Attuativo (PUA, 2019) che il Comune di Padova ha predisposto per questa area studio (Figura 1.3.2, Figura 1.3.3).

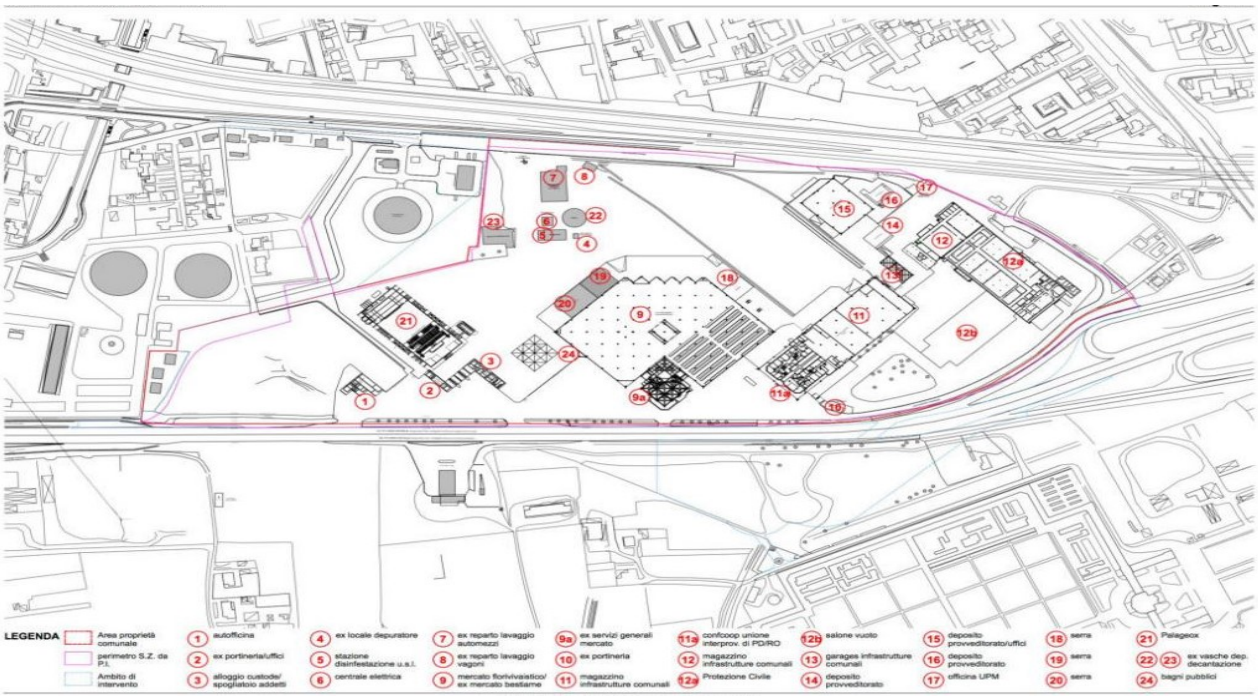

Figura 1.3.2 Tavola planimetrica dello stato di fatto (PUA, 2019)

STATO DI FATTO								
n.	*destinazione*	*numero piani*	*superficie lorda pavimento*	*slp portici Prof maggiore 150 cm*	*totale slp*	*superficie coperta*	*demolizioni*	*differenza*
1	autofficina	1	399,23	62,14	461,37	461,37		
2	ex portineria/uffici	1	143,91	299,49	443,40	443,40		
3	alloggio custode/spogliatoio	1	331,20	0,00	331,20	331,20		
4	ex locale depuratore	1	27,00	0,00	27,00	27,00		
5	stazione disinfestazione u.s.l.	1	309,28	0,00	309,28	309,28	309,28	
6	centrale elettrica	1	143,41	0,00	143,41	143,41		
7	ex reparto lavaggio automezzi	1	900,20	0,00	900,20	900,20	900,2	
8	ex reparto lavaggio vagoni	1	97,29	0,00	97,29	97,29	97,29	
9	mercato florivivaistico/ ex mercato bestiame	1	15988,33	59,19	16047,52	16047,52		
9a	ex servizi generali	2	2580,55	216,56	2797,11	2452,52		
10	ex portineria	1	116,45	68,66	185,11	185,11		
11	magazzino infrastrutture comunali	1	3999,85	0,00	3999,85	3999,85		
11a	confcoop unione interprovinciale di PD e RO	2	4419,15	489,25	4908,40	3495,57		
12	magazzino infrastrutture comunali							
12a	protezione civile							
12b	salone vuoto				12246,08	12246,08		
13	garages infrastrutture comunali	1	351,83	0,00	351,83	351,83		
14	deposito provveditorato	1	331,72	0,00	331,72	331,72	331,72	
15	deposito provveditorato/uffici	1	2142,25	0,00	2142,25	2142,25		
16	deposito provveditorato	1	257,86	0,00	257,86	257,86	257,86	
17	officina UPM	1	95,83	0,00	95,83	95,83	95,83	
18	serra	1	403,93	0,00	403,93	403,93		
19	serra	1	631,16	0,00	631,16	631,16	631,16	
20	serra	1	804,21	0,00	804,21	804,21		
21	Palageox	1	3879,92	34,91	3914,83	3914,83		
22	ex vasca di depurazione	-						
23	ex vasca di decantazione	-						
24	bagni	1	32,84	0,00	32,84	32,84		
	TOTALE		**38387,40**		**51863,68**	**50106,26**	**2623,34**	**47482,92**

Figura 1.3.3 Superficie ricoperta dalle varie destinazioni (PUA, 2019)

2 Materiali e metodi

2.1 Materiali

Nel computo dell'inventario del carbonio per l'area di studio si assume, approssimando, che i parcheggi vengano realizzati in maniera analoga alle strade. Dai quaderni tecnici dell'ANAS (volume V) [13] risulta che la struttura delle strade in Italia sia la sotto riportata; per gli spessori si è fatto riferimento alle dispense dell'ingegnere Vittorio Ranieri del politecnico di Bari [4]

- 5 cm manto d'usura di asfalto,
- 5 cm di binder (base bituminosa),
- 17 cm di base d'asfalto,
- 32 cm di fondo stradale stabilizzato in cemento.

Dagli stessi quaderni ricaviamo anche i valori della densità degli strati, quelli contenenti asfalto si attestano a 2,42 g/cm^3, mentre, per quanto riguarda il fondo stradale, essendo una miscela tra terreni che possono essere di vario tipo e cemento, è stato preso un valore medio di 2,1g/cm^3 che tenesse conto dell'influenza che i vari tipi di suolo possono avere sulla densità.

Dalle normative tecniche del Comune di Bolzano [3], il manto d'usura risulta composto per l'80% di aggregati grossi (sabbie), il 6,5% di bitume e la restante parte da additivi e filler. Il binder è formato per il 68% da aggregato grosso (2 mm), il 23% da aggregato fino (2 mm), il 4% da filler e il 5% da legante bituminoso. Le percentuali di composizione del binder fanno riferimento ai dati della SuperBeton [2].

2.2 Software e dati

I-Tree eco

È un'applicazione sviluppata in collaborazione da *US Forest Service Northern Research Station, USDA State and Private Forestry's Urban and Community Forestry Program, Davey Tree Expert Company e SUNY College of Environmental Science and Forestry.* Il software è un adattamento del modello UFORE (sviluppato da SUNY-ESF, USFS e NRS), utilizza dati di inquinamento del suolo, dell'aria e dati meteorologici, per quantificare le caratteristiche delle foreste urbane. Ad oggi ci sono 5 componenti del modello

- **UFORE-A** Anatomia delle foreste urbane (es. specie presenti, densità, stato di salute)
- **UFORE-B** Emissioni di composti biogenici organici volatili: vengono quantificate ogni ora le emissioni di composti che portano alla formazione di O_3 e grazie a questo si calcola il quantitativo di ozono e CO presente
- **UFORE-C** Sequestro e stoccaggio di carbonio
- **UFORE-D** Rimozione degli inquinanti dall'aria
- **UFORE-E** Risparmio energetico (stima l'effetto che la presenza degli alberi può avere sul consumo di energia e sulle emissioni degli stabilimenti)

Dataset

Il dataset impiegato è stato ricavato dalle misurazioni sul campo effettuate da Dott. Giacomo Rosina durante la produzione del suo elaborato di tesi [9]. Tra tutti gli alberi campionati è stata presa in esame una popolazione di 13 tigli (*Tilia platyphyllos*), successivamente si è calcolato un valore medio per ogni parametro da inserire nel programma. Secondo quanto riportato nel testo *Tilia cordata Miller C. D. Pigott [18],* nella famiglia dei tigli, il tasso di crescita annuo si attesta intorno al 10% (sia per altezza che per diametro del tronco). Supponendo questo tasso di crescita costante, si è proceduto a ritroso diminuendo di un 10% annuo i valori dei dati medi trovati, finché non si è giunti a una condizione nella quale gli alberi fossero sufficientemente piccoli per potersi considerare come appena trapiantati nel nostro sito. Utilizzando questi valori come *baseline* è stato possibile ipotizzare uno scenario di crescita a condizioni costanti in cui i tigli aumentano le loro dimensioni di anno in anno fino al raggiungimento di un'altezza media massima di 25,76 m (sottostima conservativa del valore medio di altezza massima che un tiglio può raggiungere in età adulta, ossia 30 m). Successivamente questi dati possono essere importati all'interno del software dopo averli opportunamente organizzati in un foglio di calcolo (Microsoft Excel©). In figura 2.2.3 viene esposta una parte della tabella con inseriti e contrassegnati i valori.

ID	Crew	Survey Date	Species	Land Use	Photo ID	DBH 1 (cm)	DBH 1: Height (m)	DBH 1: Measured?
1	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		5,9	1,30	☑
2	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		6,5	1,30	☑
3	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		7,2	1,30	☑
4	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		7,9	1,30	☑
5	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		8,7	1,30	☑
6	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		9,5	1,30	☑
7	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		10,5	1,30	☑
8	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		11,5	1,30	☑
9	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		12,7	1,30	☑
10	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		13,9	1,30	☑
11	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		15,3	1,30	☑
12	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		16,9	1,30	☑
13	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		18,6	1,30	☑
14	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		20,4	1,30	☑
15	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		22,5	1,30	☑
16	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		24,7	1,30	☑
17	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		27,2	1,30	☑
18	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		29,9	1,30	☑
19	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		32,9	1,30	☑
20	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		36,2	1,30	☑
21	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		39,8	1,30	☑
22	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		43,8	1,30	☑
23	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		48,1	1,30	☑
24	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		52,9	1,30	☑
25	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		58,2	1,30	☑
26	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		64,1	1,30	☑
27	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		70,5	1,30	☑
28	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		70,5	1,30	☑
29	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		70,5	1,30	☑
30	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		70,5	1,30	☑
31	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		70,5	1,30	☑
32	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		70,5	1,30	☑
33	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		70,5	1,30	☑
34	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		70,5	1,30	☑
35	singolo		Bigleaf linden (Tilia platyphyllos)	Commercial/Industrial		70,5	1,30	☑

Figura 2.2.3 Tabella contenente i dati inseriti all'interno del software

Il software I-Tree inserirà automaticamente i dati forniti all'interno di equazioni dette allometriche, le quali a seconda della specie di albero preso in esame sono in grado di fornire in output i quantitativi di sostanze catturate dalla pianta come ad esempio CO_2, NO_x, PM, ma anche altri servizi ecosistemici come il miglioramento delle caratteristiche del suolo e la riduzione del rischio idrogeologico.

2.3 Metodi

Inventario del carbonio

Se si è intenzionati ad implementare una strategia di riduzione del proprio impatto climatico, è necessario essere prima in grado di quantificare l'impronta di carbonio della propria attività. Per riuscire in questo scopo è necessario tracciare ogni fase del processo produttivo in questione in modo da poter evidenziare passaggi critici.

Life Cycle Assessment

Per poter svolgere in maniera efficace un inventario del carbonio è stato necessario implementare un'analisi in ottica LCA.
LCA è un processo di valutazione dei carichi ambientali connessi ad una determinata attività o prodotto, effettuato quantificando energia e materiali richiesti per ogni singola fase: estrazione e trattamento delle materie prime, produzione, trasporti e distribuzione, uso, riciclo e smaltimento[12]. L'utilità di un approccio LCA è riscontrabile anche in ottica di progettazione di future strutture, il loro design potrebbe infatti tenere conto della fase di smaltimento o di un possibile riciclo dei materiali e pertanto impiegare tecniche o materie prime diverse e meno impattanti a livello ambientale[X]

Nel caso di questo studio sviluppato, il tipo di analisi effettuata sarà della categoria *cradle to gate,* ovvero sono state considerate solo le fasi iniziali del ciclo di vita di un prodotto, partendo dall'estrazione delle materie prime per arrivare all'uscita del prodotto finito dallo stabilimento produttivo. Fasi di fine vita dei materiali non verranno conteggiate poiché l'area è stata già destinata a riqualificazione e non è possibile sapere che percentuale dei materiali verrà smaltita o in alternativa riutilizzata.

Simulazione di scenari di mitigazione: modellizzazione tramite software i-Tree eco

Software

È un'applicazione sviluppata in collaborazione da *US Forest Service Northern Research Station, USDA State and Private Forestry's Urban and Community Forestry Program, Davey Tree Expert Company e SUNY College of Environmental Science and Forestry.* Il software ha lo scopo di misurare i servizi ecosistemici forniti da diversi esemplari di specie arboree. Per raggiungere questo obiettivo, l'applicazione utilizza delle equazioni allometriche, le quali possono variare a seconda della specie considerata. Queste equazioni necessitano di dati quali DBH (*diameter at breast height*), ossia il diametro del fusto a 1,30m dal suolo e la specie, per produrre delle stime di base che possono però essere rese più precise con l'aggiunta di altri parametri:

- Altezza totale della pianta
- Altezza della chioma dalla base

- Altezza totale della chioma
- Diametro N/S e E/W della chioma
- Condizioni di salute della chioma (percentuale di rami non morti)
- % di chioma mancante (facendo riferimento ad un esemplare in salute)
- Esposizione luminosa (considera le quattro direzioni cardinali e la parte sommitale)

Scenari di mitigazione

Per la seconda parte dello studio sono stati proposti due scenari di riqualificazione secondo due possibili utilizzi del suolo che basati sull'implementazione di formazioni arboree per il servizio ecosistemico "sequestro di carbonio". Lo scopo è mostrare in quanto tempo si sarebbe riusciti a raggiungere un bilancio nullo di emissioni di CO_2 rispetto a quelle dovute al ciclo produttivo dei materiali impiegati. Per poter utilizzare il programma è innanzitutto necessario inquadrare la zona di interesse, in modo da far sì che il software sia in grado di recuperare i dati caratterizzanti l'area geografica che verranno successivamente utilizzati nelle equazioni allometriche per il calcolo del sequestro di carbonio. Le figure 2.2.1 e 2.2.2 mostrano i parametri utilizzati per impostare il modello (l'anno di riferimento è il 2015 poiché è il più recente che fornisce anche dati sull'inquinamento atmosferico oltre che le condizioni meteo). I dati contrassegnati in rosso sono i dati minimi necessari che il programma richiede per funzionare, quelli blu sono opzionali per aumentare l'accuratezza dei calcoli, mentre quelli neri sono informazioni aggiuntive specifiche.

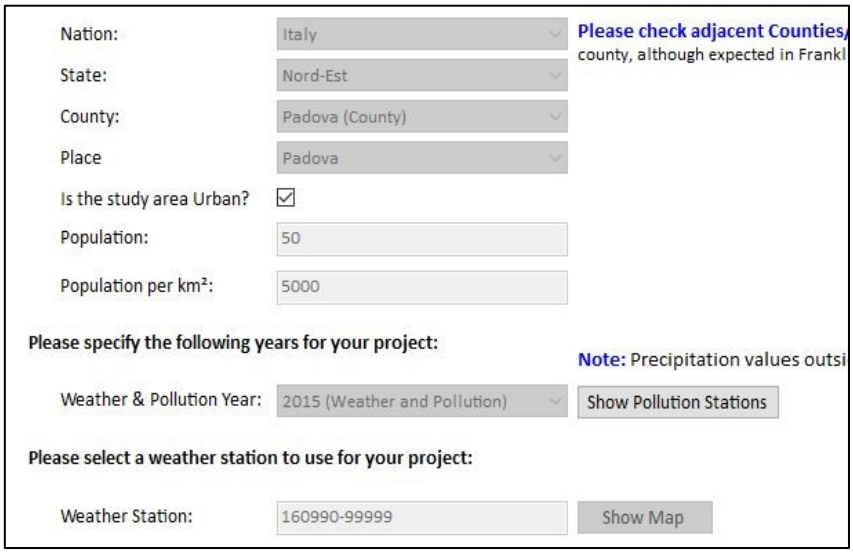

Figura 2.2.1 Parametri utilizzati nella sezione "Location" del software

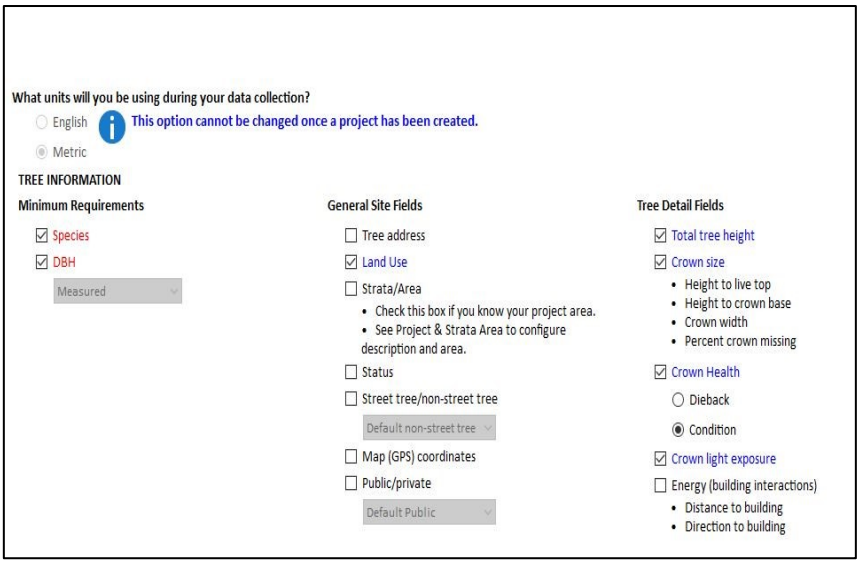

Figura 2.2.2 Parametri utilizzati nella sezione "Data Collection" del software

2.3.1 Produzione

Asfalto

L'asfalto è composto al 90% da ossido di calcio ed il restante 10% da bitume secondo i dati forniti da Eurobitume nel 2015 [17]. Prendendo in esame il processo di fusione a caldo, al composto sopra menzionato, viene aggiunta anche una parte di ghiaia o di inerti.

Il bitume si produce dalla distillazione del petrolio; dal rapporto di Eurobitume (2010) [7] è stato calcolato che il consumo medio di vapore è di 0,28 t a 1000 psi per tonnellata di petrolio. I calcoli sono stati effettuati immaginando l'efficienza del generatore di vapore del 70% e l'energia totale richiesta è di 1.779 MJ. I dati sulle emissioni sono stati ottenuti confrontando vari stabilimenti.

Per la produzione di ossido di calcio (CaO) si parte dal carbonato di calcio ($CaCO_3$) che, dopo essere estratto dalle cave, viene portato negli stabilimenti per la combustione; da quest'ultima si ottiene CaO, secondo la reazione $CaCO_3(s) \rightarrow CaO(s) + CO2(g)$, il prodotto finito è quindi pronto per l'impiego nei settori di destinazione.

Per far avvenire la reazione sono necessari 180 KJ/mol, sapendo la massa molare dell'ossido di calcio (65,077g/mol), si calcola che saranno necessari 2.765,95 MJ per produrre una tonnellata di CaO.

Cemento

Secondo i dati della *Portland Cement Association* (PCA) la miscela utilizzata per l'edilizia stradale è composta da acqua (17%), aggregati (ghiaia e sabbia 71%) e cemento (12%) in proporzioni variabili a seconda dell'impiego. Si è assunto, per questo studio, che il cemento utilizzato sia il più comune nel settore edilizio, ossia, il cemento *Portland*. Per la composizione di quest'ultimo si fa riferimento al testo *Portland Cement Composition[10];* al termine delle reazioni necessarie per la produzione del cemento le proporzioni sono le seguenti 59,7% ossido di calcio (CaO), 32,8% ossido di alluminio (Al_2O_3), 7,5%, silice (SiO_2).

Sabbia e ghiaia naturali si ipotizza vengano estratte da pozzi tramite una pala caricatrice e che siano poi caricati nei camion per i successivi trasporti, per questi lavori il terreno è di classe due (secondo la classificazione usata per questo studio). Per quanto riguarda i consumi di energia del cantiere, i dati sono stati presi da un vero cantiere (2.398 MJ/tonnellata ghiaia o sabbia). La provenienza dell'ossido di calcio si ipotizza essere la stessa di quello impiegato nella produzione di asfalto.

2.3.2 Trasporto in situ

La materia prima che viene principalmente importata nell'ambito di costruzioni stradali è il petrolio, pertanto sarà l'unica emissione legata al trasporto considerata in questo studio. L'analisi è stata fatta considerando il petrolio proveniente dalla Libia (secondo fornitore dell'Italia con il 19% di esportazioni, subito sotto all'Azerbaijan con il 23%).

2.3.3 Posa in opera

Il tipo di materiale da lavorare incide notevolmente nei consumi energetici, un terreno più duro richiederà più tempo e potenza per essere lavorato rispetto ad un suolo più malleabile. Per riuscire a differenziare le varie casistiche sono state elaborate cinque classi di materiali sulla base della difficoltà nella lavorazione. Ai fini dello studio in esame, è stata presa in considerazione la seconda classe (difficoltà media: suolo compatto, argilla dura, ghiaia e meno del 25% di pietra). Per quanto riguarda i macchinari usati, i dati fanno riferimento ad una tipica pala caricatrice utilizzata nei lavori stradali (Volvo BM L180) e sono stati adattati per terreni di classe due. La produzione media risulta essere quindi 470m^3/h, con un consumo di carburante di 23l/h [8] (Tabella 2.3.1)

Pala caricatrice

In or outflow	Unit	Total per MJ used diesel	Total per production volume (m^3), Excavation class 1	Total per production volume (m^3), Excavation class 2	Total per production volume (m^3), Excavation class 3	Total per production volume (m^3), Excavation class 4
Diesel oil	MJ	1.1	1.71E+00	1.89E+00	3.30E+00	3.65E+00
CO_2	g	79	1.23E+02	1.36E+02	2.37E+02	2.62E+02
SO_2	g	0.038	5.90E-02	6.53E-02	1.14E-01	1.26E-01
NO_x	g	0.71	1.11E+00	1.23E+00	2.14E+00	2.37E+00
Dust	g	0.028	4.42E-02	4.89E-02	8.53E-02	9.46E-02
CO	g	0.085	1.32E-01	1.46E-01	2.55E-01	2.83E-01
N_2O	g	0.0016	2.48E-03	2.75E-03	4.79E-03	5.31E-03
HC	g	0.051	7.98E-02	8.83E-02	1.54E-01	1.71E-01
CH_4	g	0.00005	7.76E-05	8.59E-05	1.50E-04	1.66E-04
Oil (aq)	g	0.0004	6.21E-04	6.87E-04	1.20E-03	1.33E-03
Phenol (aq)	g	0.00057	8.85E-04	9.79E-04	1.71E-03	1.89E-03
COD	g	0.0012	1.86E-03	2.06E-03	3.60E-03	3.98E-03
Tot-N (aq)	g	0.00019	2.95E-04	3.26E-04	5.69E-04	6.31E-04

Tabella 2.3.1 Emissioni di una pala escavatrice per vari tipi di suolo IVL Research Institute [8]

Per gli escavatori operanti su un terreno di classe due la produzione è di 430 m^3/h e il consumo di carburante corrisponde a 34 l/h. Le emissioni sono raffigurate in Tabella 2.3.2.

In or outflow	Unit	Total per MJ used diesel	Total per production volume (m^3), Excavation class 1	Total per production volume (m^3), Excavation class 2	Total per production volume (m^3), Excavation class 3	Total per production volume (m^3), Excavation class 4
Diesel oil	MJ	1.1	2.92E+00	3.05E+00	3.65E+00	4.38E+00
CO_2	g	79	2.10E+02	2.19E+02	2.62E+02	3.14E+02
SO_2	g	0.038	1.01E-01	1.05E-01	1.26E-01	1.51E-01
NO_x	g	0.71	1.89E+00	1.98E+00	2.37E+00	2.84E+00
Dust	g	0.028	7.55E-02	7.90E-02	9.44E-02	1.13E-01
CO	g	0.085	2.26E-01	2.36E-01	2.82E-01	3.39E-01
N_2O	g	0.0016	4.24E-03	4.44E-03	5.30E-03	6.36E-03
HC	g	0.051	1.36E-01	1.43E-01	1.70E-01	2.04E-01
CH_4	g	0.00005	1.33E-04	1.39E-04	1.66E-04	1.99E-04
Oil (aq)	g	0.0004	1.06E-03	1.11E-03	1.33E-03	1.59E-03
Phenol (aq)	g	0.00057	1.51E-03	1.58E-03	1.89E-03	2.27E-03
COD	g	0.0012	3.18E-03	3.33E-03	3.98E-03	4.77E-03
Tot-N (aq)	g	0.00019	5.04E-04	5.27E-04	6.30E-04	7.56E-04

Tabella 2.3.2 Emissioni di un escavatore per vari tipi di suolo IVL Research Institute [8]

3 Risultati

3.1 Analisi e rappresentazioni

Viene ora calcolato il quantitativo totale di materiale richiesto per la costruzione della pavimentazione dell'area, conoscendo la densità finale della sostanza, lo spessore dello strato e la superficie ricoperta, è possibile misurare la massa ottenendo i valori rappresentati nella Tabella 3.1.1

Strati		Volume(m^3)	Massa totale(t)
Strati a base di asfalto	Manto d'usura	7.164,45	17,34
	Binder	7.164,45	17,34
	Base	24.359,13	58,95
Fondazione cementizia		45.852,47	96,29

Tabella 3.1.1 Cubatura e massa degli strati della pavimentazione del sito

Sapendo ora i quantitativi totali e la composizione percentuale dei vari strati, possono essere calcolate le masse dei materiali richiesti (Tabella 3.1.2)

Componenti	Unità di misura	Manto d'usura	Binder	Base	Fondaz. Cement.	Totale
Aggregati (sabbie/ghiaia)	kg	13.870,38	14.043,76	/	68.366,03	96.280,17
Bitume	kg	1.126,97	866,90	5.894,91	/	7.888,78
Ossido di calcio	kg	/	/	53.054,18	6.898,23	59.952,41
Altri componenti	kg	2.340,63	693,52	/	4.656,59	7.690,74
Energia(sola produzione)	MJ	35.266,04	35.219,14	157.232,26	183.021,91	410.739,30

Tabella 3.1.2 Masse dei materiali impiegati nella costruzione della pavimentazione

Si prendono ora in esame i dati relativi alle emissioni legate ai processi produttivi e di approvvigionamento.

3.1.1 Estrazione materie prime

Come specificato in precedenza, tutto il petrolio necessario si considera come importato dalla Libia, i dati delle emissioni sono stati supposti uguali alla media dei paesi esportatori dell'Africa (dati ricavati da un report del 2018 dell'IOGP).

L'andamento delle emissioni è decrescente negli anni, si considera il dato più vecchio in letteratura risalente al 2016, secondo il quale, per ogni tonnellata di petrolio estratto

vengono emesse in atmosfera due tonnellate di anidride carbonica. Solo per il 68% di queste emissioni è stata segnalata l'origine, in particolare il 46% deriva dalla produzione di energia, il 15% dal *gas flaring*, il 3% da areazione e lo 0,02% da perdite. Si considera un petrolio greggio ad alto contenuto bituminoso (60%), la quantità di petrolio necessaria sarà quindi $\frac{7.888,776}{0,6} = 13.147,96\ \mathrm{kg}$. Il quantitativo di CO_2 nel caso studio, risulta essere di conseguenza 26.295,92 kg.

Andando ad esaminare la produzione di aggregati ci si avvale dei dati del LCA dell'IVL Swedish Enviromental Research Institute [8] (Tabella 3.1.3)

Composto	Unità	Flusso/tonnellata aggregato	Totale
CO_2	kg	1,42	136,71
SO_2	g	0,79	75,87
NO_x	g	0,12	11,84
CO	g	1,49	143,46

Tabella 3.1.3 Emissioni di gas durante il processo di frantumazione degli aggregati [8]

Per l'ossido di calcio si può stimare un valore teorico di emissione di anidride carbonica di 786 g CO_2 / kg CaO; tuttavia bisogna tenere conto anche delle emissioni legate ai processi produttivi, nei dati forniti da IVL oltre a ciò, vengono conteggiati anche i consumi dei trasporti per una distanza di 500 km(Tabella 3.1.4).

Composto	Unità	Flusso per kg di CaO	Totale
CO_2	kg	2,04	122.003,15
SO_2	g	0,94	56.355,27
NO_x	g	3,25	194.845,33
CO	g	0,37	22.182,39

Tabella 3.1.4 Emissioni di gas durante la produzione di ossido di calcio [8]

3.1.2 Produzione di cemento

I dati sono relativi all'analisi di inventario di un cementificio svedese medio. Sebbene siano già state conteggiate le emissioni causate dalla produzione dei materiali necessari alla realizzazione del cemento, ci sono ulteriori processi di miscelazione da considerare come mostrato nello studio di H. Stripple [8] (Tabella3.1.5).

Composto	Unità	Flusso per kg di cemento	Totale necessario
CO_2	kg	0,81	77.609,89
SO_2	g	1,00	96.290,19
NO_x	g	2,00	192.580,38
CO	g	$8,20 \cdot 10^{-4}$	78,96

Tabella 3.1.5 Emissioni gassose durante la miscelazione del cemento [8]

3.1.3 Trasporto

Dati delle navi presi da *Neste Oil Shipping*, velocità media di viaggio 25 km/h, consumo carburante a pieno carico 56 t/day. Le emissioni di monossido di carbonio, anidride carbonica e nitrati sono calcolate a partire dai fattori di emissione forniti dall'*Environmental Protection Agency* (EPA) e sono riferite a un kg di carburante; il quantitativo di S si suppone sia uguale al massimo ammesso dalla normativa odierna (2,7%) e l'emissione di anidride solforosa (SO_2) viene calcolata di conseguenza (Tabella 3.1.6).

Composto	Emissione(g/kg di carburante)
SO_2	54
NO_x	47,80
CO	3,56
CO_2	3.125

Tabella 3.1.6 Emissioni in atmosfera di una petroliera da 106.000 DWT per kg di carburante [7]

Osservando le analisi fatte da Eurobitume si riesce a calcolare un consumo di carburante pari a 93,3 kg/km; grazie al software di *Google Earth*, si può misurare la distanza tra i due porti di riferimento: Brega in Libia e Trieste in Italia per una distanza di 1.940,73km. La scelta del porto di Trieste è dovuta al fatto che negli anni '60 le aree portuali più vicine, come Porto Marghera, non erano ancora state adibite alla ricezione di petroliere.

Si ottiene quindi un consumo totale di carburante di 181,07 tonnellate. Utilizzando poi i dati disponibili ed effettuando controlli incrociati con altri software di calcolo delle emissioni (Interreg web calculator, Carbon Footprint Calculator Fleet News), si ottiene un quantitativo totale di CO_2 emessa pari a 565,89 t. Facendo la proporzione tra il carico massimo della nave 106.000 DWT (*Dead Weight Tonne*) e il quantitativo di petrolio richiesto per la realizzazione del nostro sito (13.147,96 kg) e ipotizzando inoltre un grado di riempimento della nave dell'80% si ha che il carburante consumato risulta essere 56,15 kg, le emissioni sono raffigurate di seguito (Tabella 3.1.7):

Composto	Emissione (kg)
SO_2	2,43
NO_x	2,15
CO	0,16
CO_2	175,48

Tabella 3.1.7 Emissioni totali in aria della petroliera per la tratta compiuta [7]

3.1.4 Posa in opera

Con i dati precedentemente presentati (Tabella 2.3.1, Tabella 2.3.2) si calcolano, ora, le emissioni dei macchinari impiegati. Il volume totale da scavare, senza contare le fondamenta degli edifici, è 101.184,4 m^3, nelle tabelle vengono rappresentate le emissioni (Tabella 3.1.8)(Tabella3.1.9):

Pala escavatrice

Composto	Emissione(g/m^3suolo)	Emissione totale(kg)
SO_2	0,06	5,97
NO_x	1,11	112,32
CO	0,13	13,36
CO_2	123	12.445,68

Tabella 3.1.8 Emissioni provenienti dalle pale escavatrici impiegate nella costruzione del sito

Escavatore

Composto	Emissione(g/m^3suolo)	Emissione totale(kg)
SO_2	0,10	10,22
NO_x	1,89	191,24
CO	0,23	22,87
CO_2	210	21.248,72

Tabella 3.1.9 Emissioni provenienti dagli escavatori impiegati nella costruzione del sito

3.2 Progetto di riqualificazione

Secondo quanto scritto nel Piano Urbanistico Attuativo (PUA) disposto per l'area in questione, è prevista la piantumazione di 199 individui arborei e 299 piccoli arbusti; la superficie totale coperta da queste piante ammonterebbe al 20% della superficie totale, ossia 24.895,57m^2. Tale quantitativo risulta essere ancora inferiore a quello attualmente presente. Si vuole inoltre far notare che, secondo disposizioni del piano, il totale della superficie alla quale non verrà assegnato alcun servizio è il 47% (se escludiamo l'ulteriore già citato 20% destinato agli alberi).

Verrà di seguito esposta l'analisi svolta sul servizio ambientale di tali alberi in due scenari, uno che rispetta quanto stabilito dal PUA e un altro in cui anche parte dell'area non sfruttata viene destinata a zone di verde. In entrambi i casi è stato conteggiato solo il contributo degli alberi a causa dell'impossibilità di implementare arbusti nelle equazioni del software.

3.3 Statistiche tabelle e grafici

Sommando tutti i contributi delle varie fasi l'impronta carbonica per la realizzazione della pavimentazione dell'Ex Foro Boario risulta essere di 251,08 tonnellate. Andando ad analizzare le emissioni causate dalla produzione dei vari componenti (Figura 3.3.1) osserviamo che: la produzione e stesura del manto ha emesso 3,78t di CO_2, per il binder 2,91t, 14,13t per la fondazione cementizia, mentre 127,61t per la base di asfalto.

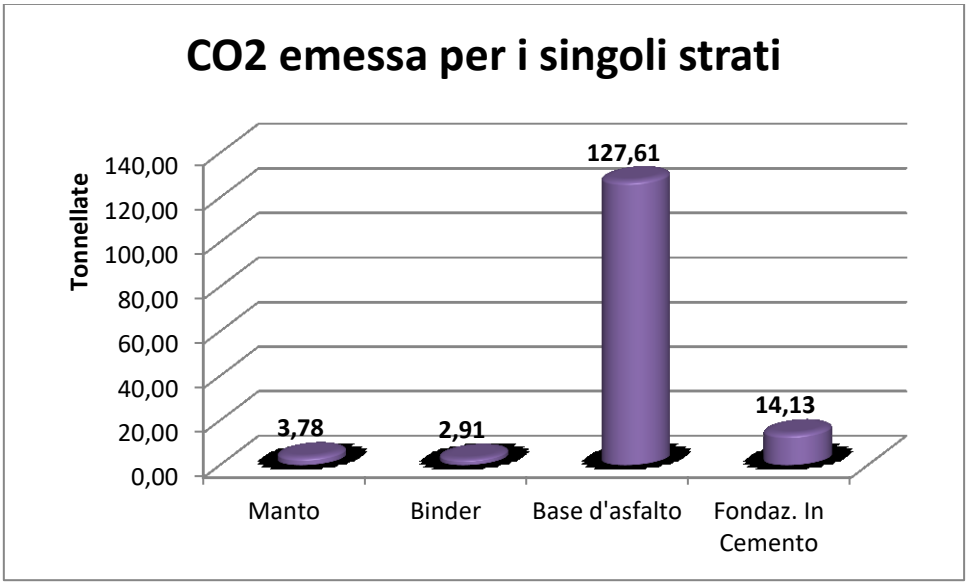

Figura 3.3.1 Risultati in kg delle emissioni allocate nei vari elementi costitutivi di una strada

Si può notare che lo strato contenente asfalto sia responsabile del 79,8% delle emissioni, ciò è dovuto al fatto che l'asfalto è il componente con il più elevato contenuto di ossido di calcio, il quale risulta essere la sostanza col processo produttivo più inquinante.

Nella distribuzione percentuale delle emissioni che le fasi del ciclo produttivo dei materiali hanno avuto, si può notare come il settore del trasporto risulti essere quello più emissivo

se consideriamo la totalità degli inquinanti prodotti da una petroliera (Figura 3.3.2). Questo risultato è in linea con i dati dello studio *Well to tank carbon emissions from crude oil marittime transportation,* proposto da Suzanne Greene, Haiying Jia e Gabriela Rubio Domingo (2020) [19]. Nella ricerca in oggetto è stato stimato che il trasporto marino costituisce il 3% delle emissioni globali di CO_2; di questo, il 13% è causato interamente dalle petroliere, le quali sono quindi responsabili di produrre 114 millioni di tonnellate di anidride carbonica in un anno.

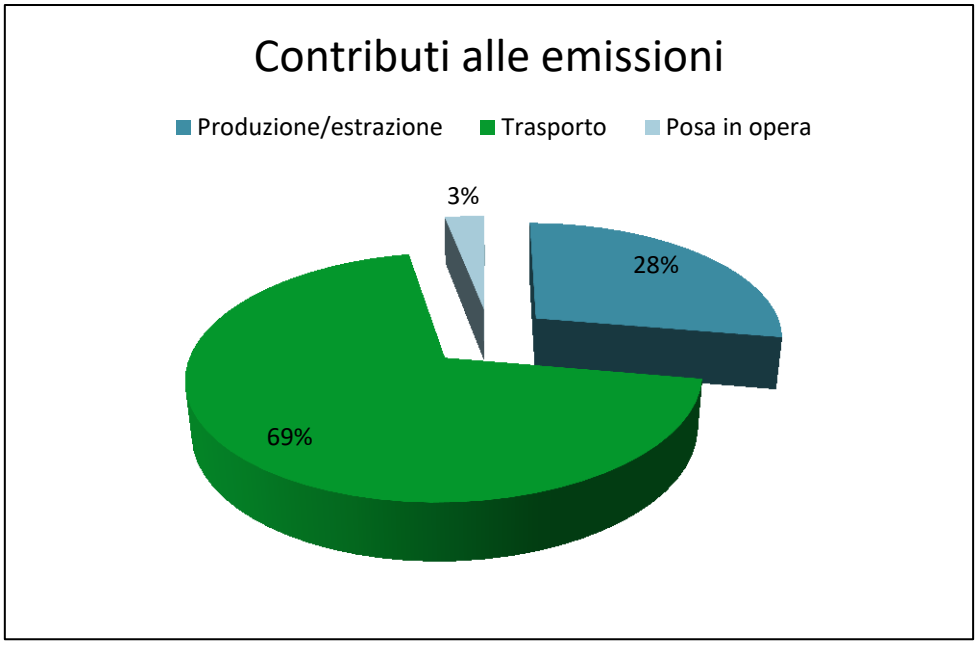

Figura 3.3.2 Percentuale delle emissioni nei vari step del Life Cycle Assestment, totale

Calcolando invece la quota parte delle emissioni prodotte da una petroliera si ottiene che: la fase di produzione ed estrazione costituisce l'85,5% delle emissioni, la posa in opera il 14,42%, mentre la fase di trasporto lo 0,08%. Per ricavare questi valori si è diviso il carico massimo trasportabile dalla nave (considerando un fattore di riempimento dell'80%) per il peso del materiale per la realizzazione del sito in esame e moltiplicato il risultato per il totale di emissioni di CO_2 generato nella tratta considerata. In questo caso, grazie alla proporzione fatta, i risultati ottenuti sono in linea con quelli dello studio di F. Ma, A. Sha, R. Lin, Y. Huang, e C. Wang [5], il quale eseguiva un inventario del carbonio per una porzione di superficie stradale in Cina. Dalla suddetta relazione, si osserva che la fase di produzione delle materie prime è causa della maggior parte delle emissioni (in entrambi i casi prossime al 90%), mentre il trasporto dei materiali ha un contributo che si attesta intorno all'1%.

Si analizzano ora gli aspetti energetici:

Fasi	Componenti	Energia (MJ)	Energia totale (MJ)
Produzione	Aggregati	230.879,84	410.739,34
	Bitume	14.034,13	
	CaO	165.825,37	
Trasporto in nave*	Petrolio	732,31	732,31
Posa in opera	Manto	35.266,04	499.850,93
	Binder	35.219,14	
	Base	157.232,26	
	Fondaz. cemento	183.021,91	

Tabella 3.3.3 Consumi di energia richiesti durante le fasi di Lyfe Cycle Assestment valutate

*Conoscendo il quantitativo di carburante necessario si calcola l'energia prodotta dal motore della nave a partire dall'archivio dati *Neste Oil Shipping*[8]

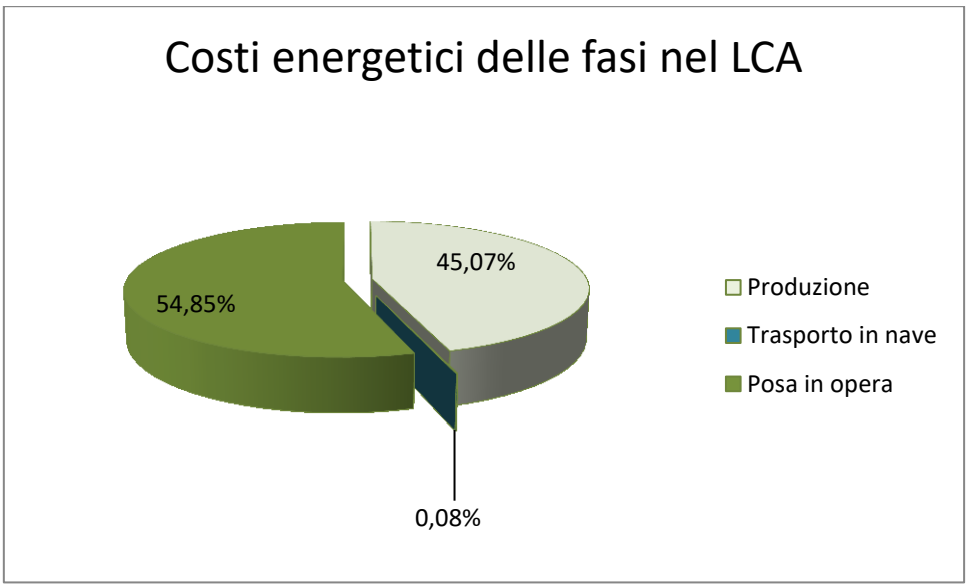

Figura 3.3.4 Rappresentazione dei consumi di energia degli step considerati nel LCA

La fase di trasporto continua a essere la meno onerosa sotto tutti i punti di vista, questo è dovuto al fatto che non è stato considerato il trasporto di tutte le materie, inoltre, la tratta in nave risulta essere relativamente breve.

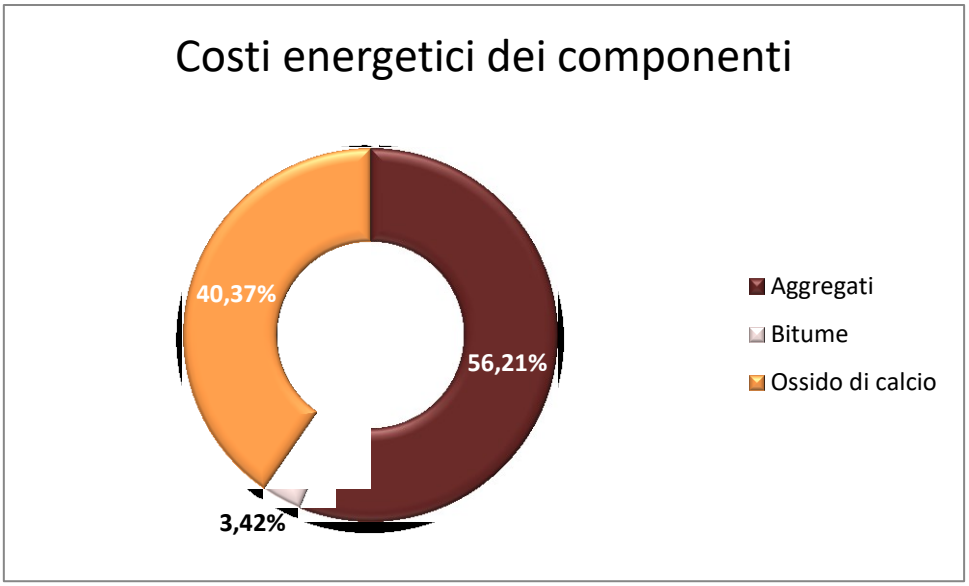

Figura 3.3.5 Percentuali di energia impiegata per la produzione delle materie prime

È da notare che la fase di frantumazione degli aggregati risulta essere quella più energivora, ma, nonostante ciò, non è la responsabile della maggior parte delle emissioni. Questo è dovuto al fatto che il 38,62% della CO_2 che si libera durante la produzione di CaO è a causa unicamente della reazione chimica, la quale non è invece presente in tutti gli altri processi.

Dalle tavole prodotte dall'ARPAV nella relazione sulla salinità dei suoli [15], si può notare che l'area di Padova (come la maggior parte del Veneto) presenta un suolo alcalino (pH 7,9-8,4); si suppone ragionevolmente che anche il sito oggetto di studio, goda delle stesse proprietà. Secondo quanto trovato dalle analisi dell'articolo [1], è noto che la capacità di assorbire anidride carbonica di un terreno alcalino è di 0,06 $\mu mol/m^2/s^{-1}$ (valore medio giornaliero), se si converte questo valore, nota la massa molecolare dell'anidride carbonica (44,01 g/mol) si ottiene 2,64 $\mu g/m^2/s^{-1}$. Si calcola ora la capacità assorbente stimata della superficie in esame (escludendo quella già coperta da verde) ipotizzando uno scenario nel quale non sia ricoperta di asfalto, risulta quindi di circa 33 kg/day. Si può stimare di conseguenza che, ogni anno, l'area dell'ex Foro Boario, a causa della cementificazione, non riesca ad assorbire 11,929 tonnellate di anidride carbonica. In tutti gli anni di inattività, sono state lasciate in atmosfera 644,19 tonnellate di anidride carbonica.

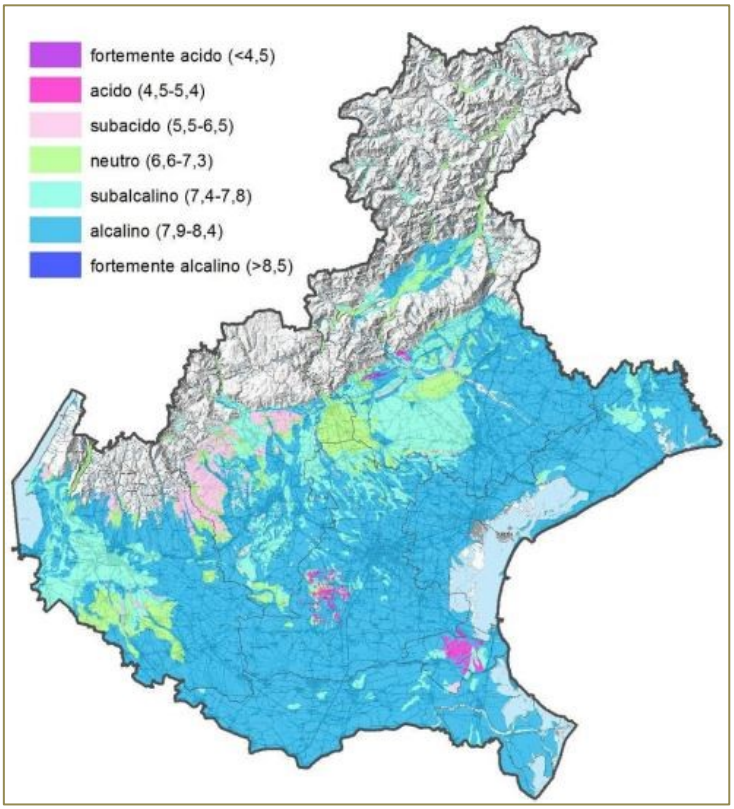

Figura 3.3.6: Mappa di ARPA del pH del suolo nella regione Veneto

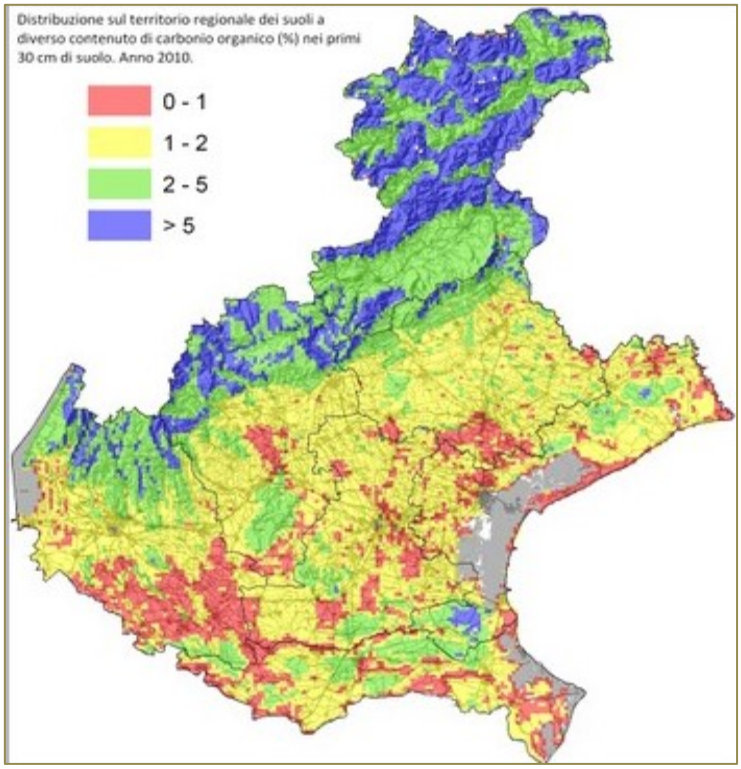

Figura 3.3.7: Mappa di ARPA della concentrazione di carbonio organico nel suolo della regione Veneto

Come si vede dalla seconda mappa (Figura 3.3.7) infatti, seppur la potenziale capacità di stoccaggio della CO_2 sia alta nel suolo della regione, quello che traspare è un generalmente basso contenuto di carbonio organico. Ciò è dovuto all'elevato livello di urbanizzazione della regione e alla grande percentuale di consumo di suolo (secondo solo alla Lombardia, ARPA 2022). Si osserva infatti come nelle aree meno cementante del Veneto (Alpi e zona montana) si riscontrano le più alte percentuali di carbonio organico nel suolo.

3.4 Scenari di mitigazione tramite soluzioni *Nature-Based*

Il primo scenario è quello che prevede la piantumazione di 199 individui arborei e uno spazio verde inferiore a quello attualmente esistente. Nella figura 3.4.1 è rappresentato l'andamento della capacità di sequestro di CO_2 di tutto il sito in un periodo di 50 anni in seguito alla piantumazione dei tigli; dopo 27 anni il valore viene considerato costante in quanto per le ipotesi fatte in precedenza, gli alberi in media raggiungono le loro massime dimensioni; avremo quindi una condizione "a regime" in cui l'area sarà in grado di sequestrare 11,59 $ton_{CO_2}/anno$.

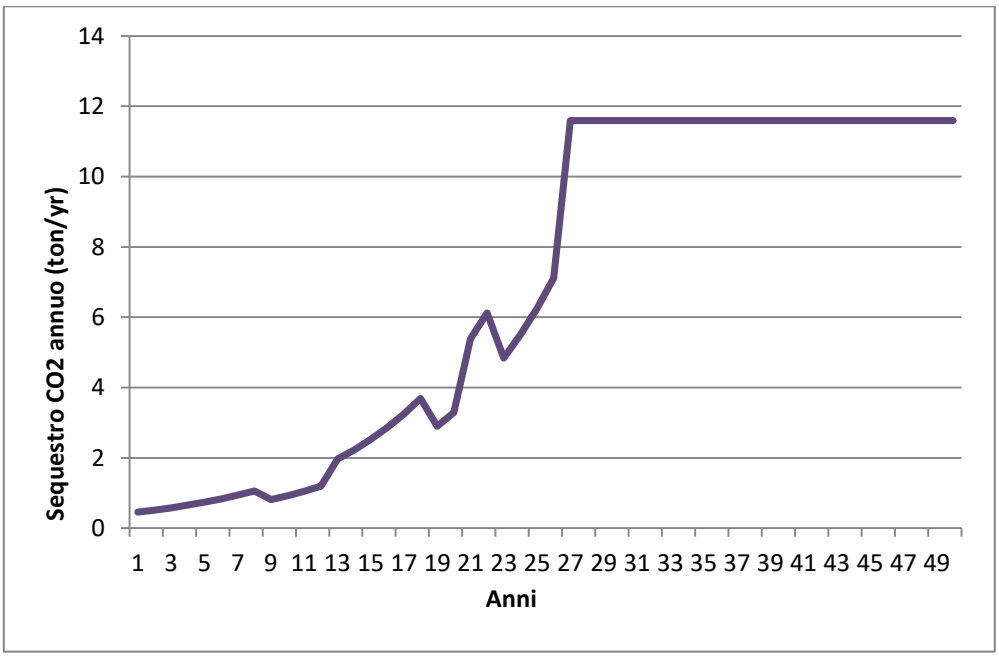

Figura 3.4.1 Variazione annuale sequestro CO2

Nel primo scenario si mostra in quanto tempo gli alberi riescono a compensare il quantitativo di CO_2 emessa per la realizzazione dell'ex Foro Boario, e risulta che in seguito alla realizzazione del piano, servirebbero 42 anni per raggiungere il bilancio nullo (Figura 3.4.2).

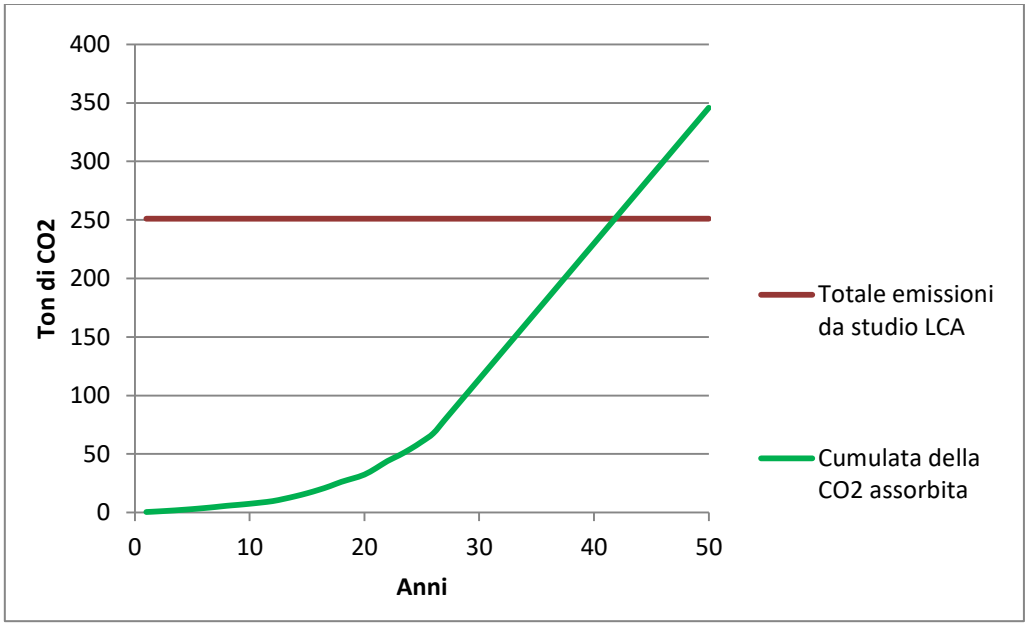

Figura 3.4.2: Andamento della cumulata della CO2 assorbita rispetto al quantitativo totale emesso

Tuttavia è opportuno considerare anche il "disservizio" che la cementazione dell'area comporta; infatti, come precedentemente esposto, ogni anno c'è un mancato assorbimento di 11,93 tonnellate di anidride carbonica; dato che nei piani di riqualificazione previsti lo spazio dedicato agli alberi è sempre caratterizzato da una pavimentazione cementizia, è ragionevole assumere questo valore costante anche per i prossimi calcoli.

Integrando quindi questo dato nel modello si può vedere dalla Figura 3.4.1, come il bilancio non si annulli mai in quanto, la retta che segna la CO_2 lasciata in atmosfera ha pendenza maggiore di quella che indica l'assorbimento della stessa. Anche se le rette si dovessero incrociare oltre l'intervallo temporale considerato, non avrebbe senso tenerne conto nel modello poiché, trascorso un tale periodo di tempo, una grande percentuale degli alberi sarebbero morti o comunque data l'età dell'esemplare, la sua capacità di sequestro di inquinanti non potrebbe più essere ritenuta costante.

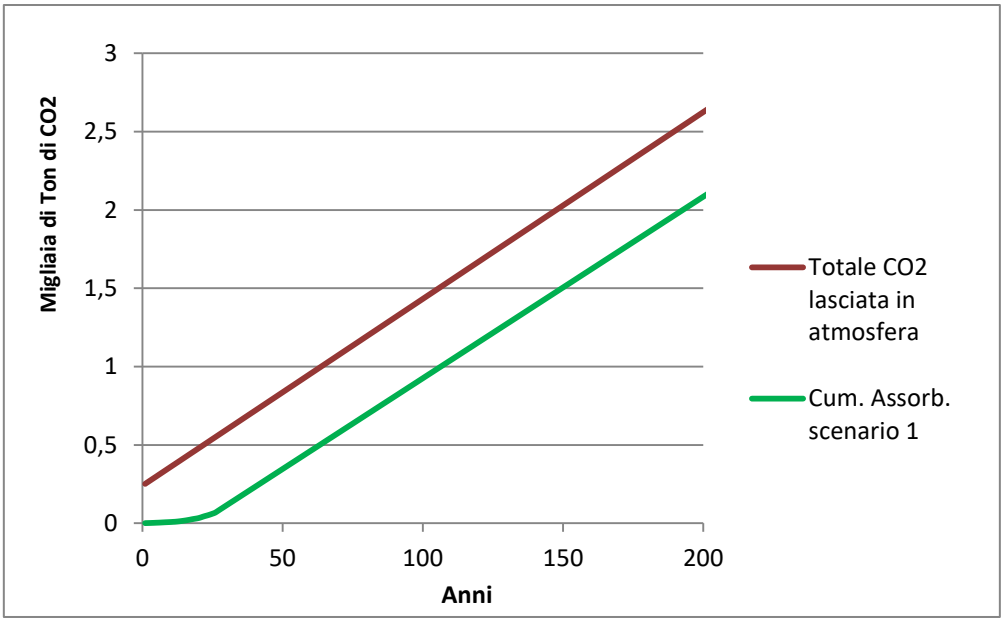

Figura 3.4.3 Cumulata assorbimenti della CO2 in relazione alla CO2 non catturata

Per elaborare il secondo scenario è stato nuovamente impiegato Google Earth Pro; dal PUA viene estratto il render del progetto finito; in seguito tramite l'opzione *overlay* immagine è possibile sovrapporre il render alla mappa georeferenziata contenuta nel software. Si può quindi procedere tracciando le aree in corrispondenza degli spazi liberi nel disegno di progetto. Il risultato è mostrato nella Figura 3.4.4.

Figura 3.4.4 Render dell'area oggetto di esame sovrapposto alla mappa di Google Earth Pro

Da quanto risulta in seguito alle misurazioni fatte con Google Earth, la superficie viola in esame ammonta a 30.645 m^2; sapendo che le alberature ufficialmente previste sono 199 e conoscendo l'area sulla quale verranno installate (contrassegnata in azzurro nella mappa), effettuando un semplice rapporto è possibile ricavare il quantitativo di alberi per km^2 ossia 7.993. Assumendo come costante per tutte le aree questo valore, si stima che nelle superfici inutilizzate evidenziate sarebbe possibile piantumare altri 245 tigli, arrivando così a un totale di 444 alberi. Si specifica inoltre che non è prevista la cementificazione dell'area evidenziata in rosso, la quale risulta essere ancora uno spazio verde; tuttavia non sono presenti disposizioni specifiche che ne regolino la gestione del suolo ed eventuali nuove installazioni arboree, pertanto quella superficie non è stata considerata nella porzione di suolo che non assorbe CO_2, tuttavia verrà comunque inclusa in questo studio di riqualificazione.

Grazie ai dati modellizzati forniti dal software i-Tree, è stato ottenuto il seguente grafico (Figura 3.4.5.) che mette a confronto i due scenari.

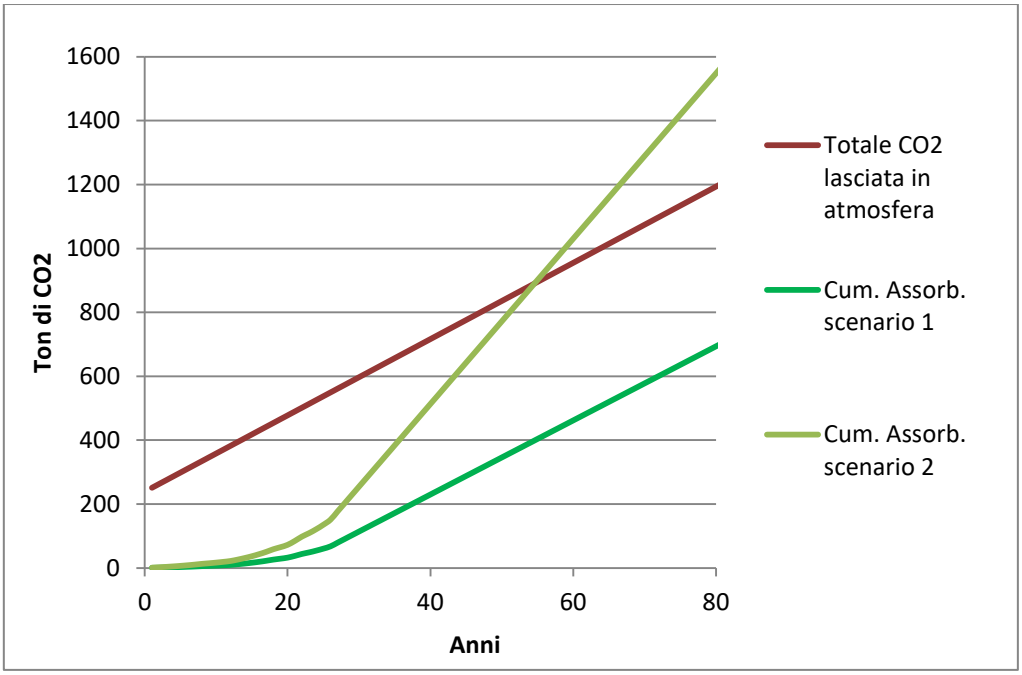

Figura 3.4.5 Confronto delle capacità di sequestro nei due scenari

Mentre, come già detto, se si rispetta il piano disposto non sarà mai possibile raggiungere la neutralità del bilancio, qualora si ipotizzi di seguire la strada più sostenibile, in 54 anni saremmo in grado di eguagliare le emissioni prodotte ed assorbimenti. Tale scenario consente, per di più, di ottenere nei successivi anni un bilancio a favore del sequestro carbonico. Tutto questo semplicemente aumentando la piantumazione di alberi, in maniera non invasiva, all'interno di spazi che non sarebbero comunque utilizzati.

3.5 Carbon market: analisi e traiettorie

Infine, è possibile considerare un ulteriore beneficio dovuto al sequestro carbonico, ossia quello del risparmio economico; i-Tree eco permette anche di calcolare quanto si risparmia ogni anno tramite l'assorbimento di CO_2 utilizzando il valore di mercato dell'anidride carbonica. All'interno dell'UE c'è un sistema di *Emission Trading* (EU ETS) che ha lo scopo di ridurre progressivamente le emissioni prodotte dai paesi membri, essendo possibile vendere e comprare delle quote che corrispondono alla possibilità di emettere gas climalteranti, la CO_2 assume un valore economico. Secondo un rapporto della SENDECO2 [11], il prezzo medio della CO_2 nel 2022 è stato 80,83 €. Andando indietro nel tempo ad analizzare l'andamento dal 2008 ad oggi, è possibile osservare un aumento esponenziale avvenuto specialmente negli ultimi 4 anni, come mostrato nella Figura 3.5.1.

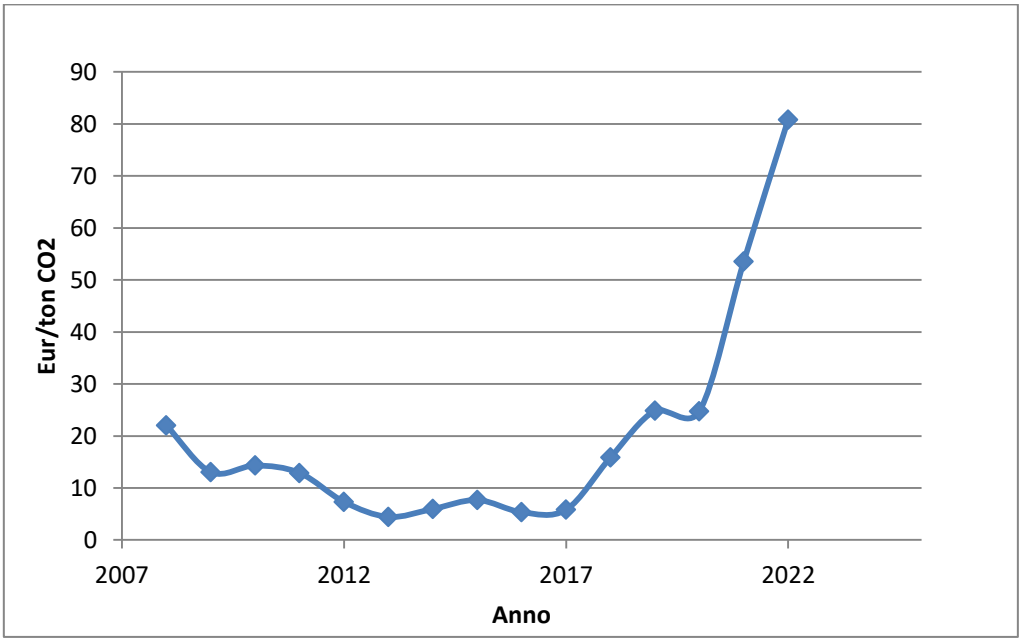

Figura 3.5.1 Andamento del valore della CO2 a partire dal 2008 [11]

Ipotizzando una crescita lineare a partire dall'anno 2016 ed interpolando i dati trovati, è possibile calcolare un andamento previsto del prezzo fino al 2050. È stato assunto uno scenario conservativo in cui i prezzi non continuano ad aumentare in maniera esponenziale. Tale ipotesi è stata formulata considerando che per via di come è costruito il sistema EU ETS, il numero di quote disponibili ogni anno andrà a calare e questo provocherà un inevitabile aumento del prezzo, soprattutto immaginando situazioni in cui gli stati mantengono costante la loro impronta carbonica. Le assunzioni fatte pertanto, rispecchiano una linea di azioni intermedia tra un intenso utilizzo di risorse fossili (che comporterebbe un aumento esponenziale del prezzo) e una rapida transizione a fonti rinnovabili (la quale invece comporterebbe una crescita al massimo di tipo logaritmico, o alternativamente una situazione nella quale il prezzo resta costante).

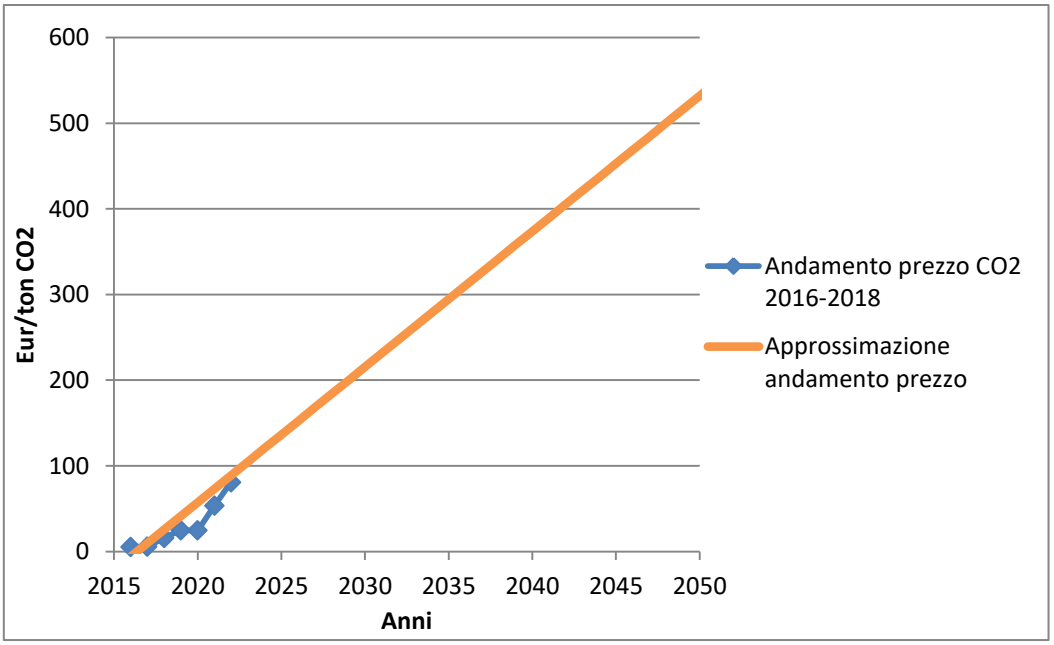

Figura 3.5.2: Andamento stimato del prezzo della CO2 nella prima metà del secolo

Da questa stima otteniamo che nel 2050 il prezzo della CO_2 per tonnellata avrà raggiunto 375,86€. Integrando l'andamento dei prezzi così ricavato nel modello prodotto precedentemente è stato poi stimato un possibile risparmio secondo i due scenari proposti.

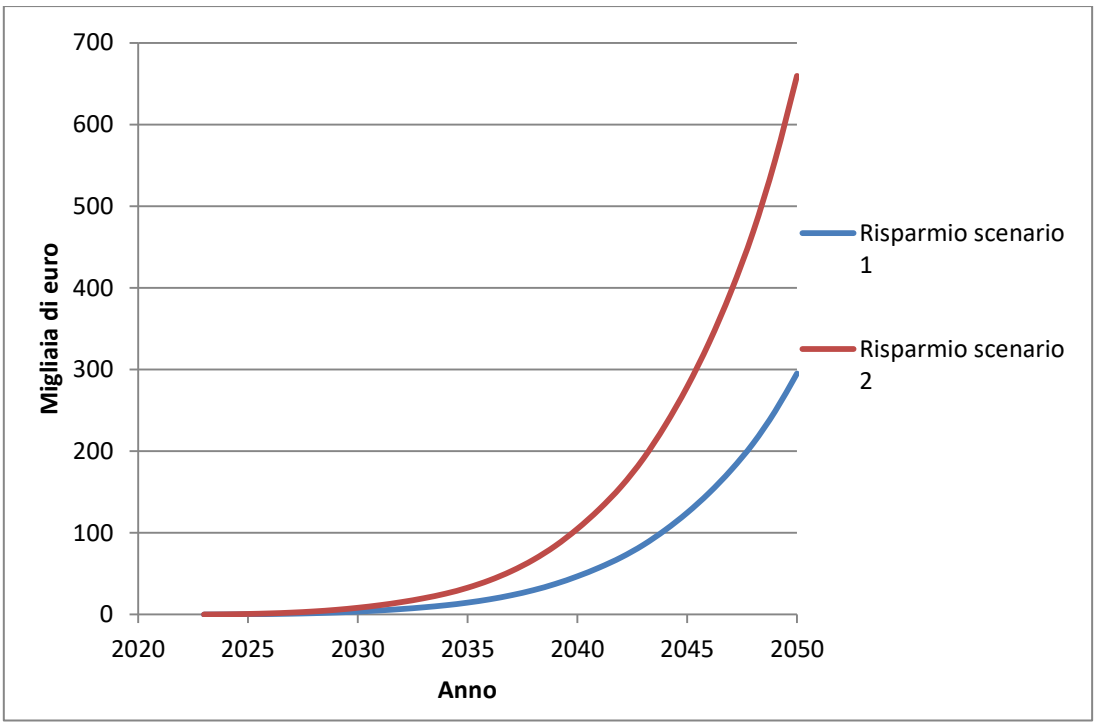

Figura 3.5.3 Andamento delle curve di risparmio nei prossimi 30 anni

Nel primo caso (sole 199 alberature previste dal PUA), entro il 2050, il totale di capitale risparmiato ammonta a 295.126,12€, seguendo lo scenario sostenibile (444 alberature) si risparmia una cifra pari a 659.554,10€.

Oltre alla CO_2 sequestrata dall'atmosfera c'è anche un quantitativo che viene immagazzinato all'interno della pianta che utilizzerà il carbonio come costituente della sua struttura, trasformandosi in un serbatoio di C (*carbon sink*). Anche questa quota è possibile derivarla tramite l'utilizzo di i-Tree senza bisogno di aggiungere ulteriori dati. Se consideriamo sempre il prezzo a mercato della CO_2, è possibile anche attribuire un valore economico agli alberi dal punto di vista ambientale. Nei seguenti grafici (Figure 3.5.4 e 3.5.5) vengono mostrati rispettivamente il quantitativo totale di anidride carbonica immagazzinata all'interno dei tigli e il valore complessivo di tutte le alberature presenti all'interno dell'area.

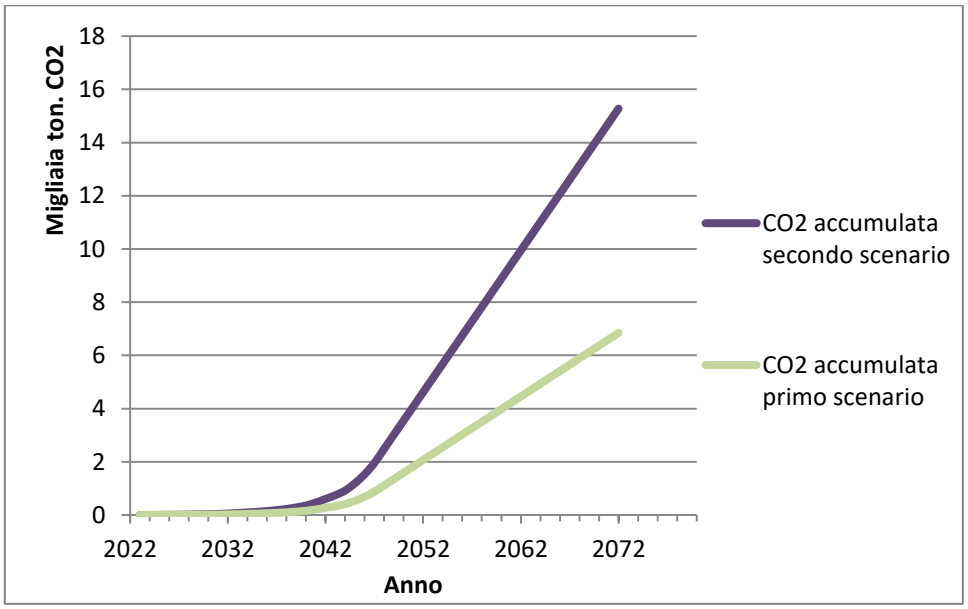

Figura 3.5.4 Quantitativi di CO2 accumulata all'interno degli alberi

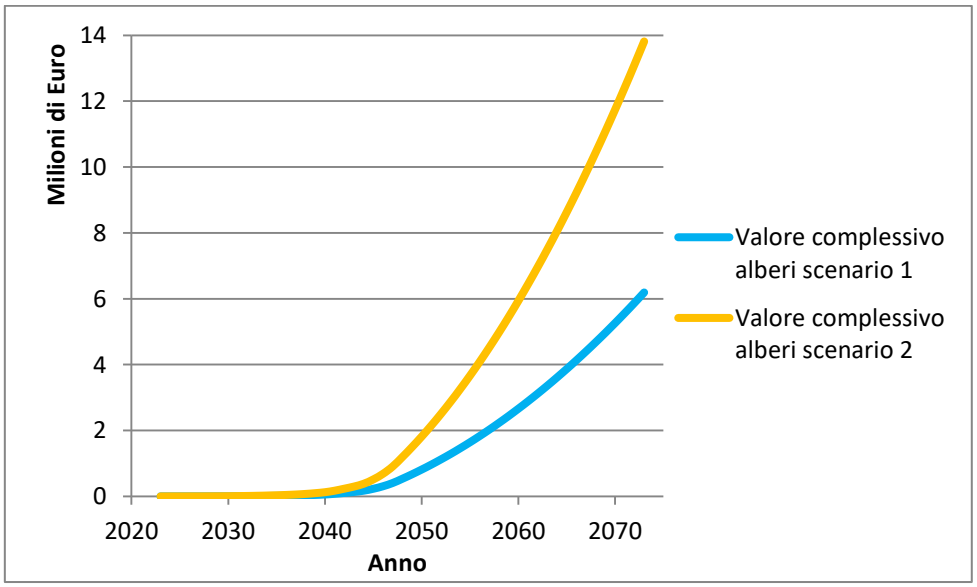

Figura 3.5.5 Valore complessivo degli alberi in termini di contenuto di carbonio

4 Conclusioni

Per cercare di fornire un'idea più immediata dei valori in gioco, si consideri il data set di Moran Daniel (Earth System Science Data, 2021) [20] sulle emissioni in 108.000 città europee, si trova che il quantitativo pro capite delle emissioni nella città di Padova è 3,55t/anno, secondo questi dati, l'edificazione del sito equivale all'inquinamento prodotto da 71 cittadini in un intero anno. Dal medesimo data set, è possibile ricavare anche il totale delle emissioni della città e queste, per Padova, ammontano a 729.829,00t; è un valore considerevole, in quanto tra le 108.000 città che hanno fornito i dati per lo studio, Padova si trova al 698° posto. Rapportata a questa impronta carbonica, la quota di CO_2 prodotta per l'edificazione del sito è appena lo 0,34‰. Va evidenziato che le emissioni calcolate da questo studio costituiscono una stima conservativa del reale valore, poiché non sono stati conteggiati i trasporti di una parte dei materiali e, a causa di mancanza di dati, si è dovuto fare riferimento a studi recenti, i quali prendono in esame processi produttivi più efficienti dal punto di vista delle emissioni rispetto a quelli degli anni '60.

Per quanto riguarda l'energia, il quantitativo totale richiesto è stato approssimativamente 911,32 GJ; da un rapporto di Isprambiente si vede che la Provincia di Padova consuma in media 5170,3 GWh ossia 1861,31 $\times 10^4$ MJ. L'edificazione del sito in esame in proporzione si attesta quindi a un valore del 4,89‰.

Si può notare quindi che l'edilizia costituisce una grande fonte di emissioni di gas ad effetto serra, sarebbe dunque opportuno, quando possibile, cercare di integrare all'interno dei progetti, delle iniziative di rigenerazione del verde urbano. Come si è potuto vedere dai dati, infatti, solo l'area dell'ex Foro Boario in 50 anni avrebbe assorbito quasi la totalità delle emissioni comunali di un anno. Si ricorda che in questo caso è stata considerata unicamente la capacità assorbente del solo terreno abbandonato.

Esaminando invece quanto emerso dallo studio sulla riqualificazione è chiaro come sia molto più conveniente percorrere la strada del secondo scenario. Le alberature infatti potrebbero essere collocate in zone totalmente non invasive, avendo inoltre la possibilità di rendere più gradevole il paesaggio e favorendo le dinamiche ecologiche che portino ad un aumento di biodiversità. La convenienza sussiste anche dal punto di vista economico, pensando che un singolo esemplare di tiglio può costare circa 150 €, abbiamo una spesa totale di 66.000 € (36.150 € in più rispetto al primo scenario); ipotizzando di effettuare le installazioni nel 2023, nel 2036 si sarebbe già in grado di ripagare ciò che è stato speso in più per la riqualificazione del secondo caso; nel 2038 si avrebbe un valore generato pari a 67.127,41€. Visto l'andamento esponenziale della curva del risparmio, piccole differenze nelle condizioni iniziali possono comportare significativi cambiamenti nel lungo termine.

Con questo studio si è voluto mostrare come i carichi ambientali possano estendersi anche a monte di molti processi produttivi, spesso in fasi lontane da controlli. Persino un sito già realizzato comporta uno stress per l'ambiente, non necessariamente contando le emissioni dovute alle utenze, ma semplicemente da un punto di vista di cambio di uso del suolo. La riduzione dell'impronta carbonica, è un obiettivo non sempre facilmente raggiungibile, specialmente in settori come quello dell'edilizia, poiché come è stato

osservato ci sono dei processi che a livello di reazione chimica emettono CO_2. Non essendo quindi possibile in certi casi azzerare completamente le emissioni, dove non si riescono ad implementare delle materie prime sostenibili, una valida alternativa può essere costituita dalle NBs. Volgendo uno sguardo al futuro ci si può rendere conto di quanto sia vantaggioso investire in questi settori sostenibili già da ora.

Bibliografia

[1] «CO2 absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle», J. Xie, Y. Li, C. Zhai, C. Li, e Z. Lan, *Environ Geol*, vol. 56, fasc. 5, pp. 953–961, gen. 2009, doi: 10.1007/s00254-008-1197-0.

[2] Super Beton, «Composizione Granulometrica binder D14», p. 2.

[3] «DIRETTIVE TECNICHE PER PAVIMENTAZIONI BITUMINOSE Revisione 2013 1 Articolo 4 TAPPETO DI USURA TRADIZIONALE A CALDO PER STRADE URBANE » Provincia Autonoma di Bolzano.

[4] «Dispense Pavimentazioni Stradali Ing. Vittorio Ranieri Politecnico di Bari». https://www.aup.it/wp-content/uploads/2013/02/6-pavimentazioni-e-materiali.pdf.

[5] «Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Construction: A Case Study in China», *Int J Environ Res Public Health*, vol. 13, fasc. 3, p. 351, mar. 2016, doi: 10.3390/ijerph13030351 F. Ma, A. Sha, R. Lin, Y. Huang, e C. Wang.

[6] «INEMARVeneto2017_EmissCom_provPD — Arpa Veneto». https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/file-e-allegati/dati-inemar-veneto-2017/dati-comunali/INEMARVeneto2017_EmissCom_provPD.ods/view .

[7] «LCI Report-Website-2ndEdition-20120726.pdf». https://www.eurobitume.eu/fileadmin/pdf-downloads/LCI%20Report-Website-2ndEdition-20120726.pdf.

[8] «Life Cycle Assessment of Road» H. Stripple.

[9] «Mappatura e modellazione di servizi ecosistemici del verde arboreo nel complesso Vallisneri» Dott. Giacomo Rosina, Università degli Studi di Padova

[10] *Portland Cement: Composition, Production and Properties*. Thomas Telford, 1999 G. C. Bye,.

[11] «Prezzi CO2 - Sendeco2». https://www.sendeco2.com/it/prezzi-co2.

[12]Progress in Life Cycle Assessment (2018) Christoph Herrmann, Felipe Cerdas, Liselotte Schebek

[13]«Quaderni_tecnici_volume_5.pdf». https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/1.3.3/Quaderni_tecnici_volume_5.PDF

[14]«Rapporto IOGP 2018-Enviromental Performance Indicators.pdf». https://data.iogp.org/Downloads/Environment/2018e.pdf.

[15] «Relazione regione Veneto carta salinità ARPAV». https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/file-e-allegati/documenti/minacce-di-degradazione/ARPAV_CARTA_SALINITA_REAZIONE_REGIONE_VENETO_2020.pdf.

[16] «Resources Optimization and Sustainable Waste Management in Construction Chain in Italy: Toward a Resource Efficiency Plan»A. Luciano *et al.*, *Waste Biomass Valor*, vol. 11 ott. 2020, doi: 10.1007/s12649-018-0533-1.

[17] *The bitumen industry: a global perspective : production, chemistry use, specification and occupational exposure*, Third edition. Lexigton, KY], [Brussels, Belgium: Asphalt Institute ; Eurobitume, 2015.

[18] «Tilia Cordata Miller» C. D. Pigott, *Journal of Ecology*, vol. 79, fasc. 4, pp. 1147–1207, 1991, doi: 10.2307/2261105.

[19] «Well-to-tank carbon emissions from crude oil maritime transportation», S. Greene, H. Jia, e G. Rubio-Domingo, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 88, p. 102587, nov. 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102587.

[20] Zenodo data set, Moran, Daniel. (2021). OpenGHGMap - Europe - CO2 Emissions in 108,000 European Cities (2018_20210907a). https://doi.org/10.5281/zenodo.5482480

Sitografia

I. «Presentazione EX FORO BOARIO.pdf»: https://www.padovanet.it/sites/default/files/attachment/Presentazione%20EX%20FORO%20BOARIO.pdf
II. PCA report «How Concrete is Made»:
III. https://www.cement.org/cement-concrete/how-concrete-is-made
IV. «Viaggio nell'ex Foro boario di Padova, dallo splendore al declino», *Il Mattino di Padova*, 17 aprile 2017. https://mattinopadova.gelocal.it/padova/cronaca/2017/04/17/news/viaggio-nell-ex-foro-boario-di-padova-dallo-splendore-al-declino-1.15211335
V. Importazioni di petrolio in Italia: https://rienergia.staffettaonline.com/articolo/34991/Da+chi+importa+petrolio+l'Italia/Gabriele+G.+Marchionna+e+Elisa+De+Siati#:~:text=Se%20guardiamo%20al%20dato%20totale,con%20il%209%2C6%25
VI. Costo della CO2 negli anni: https://www.sendeco2.com/it/prezzi-co2
VII. Politiche UE biodiversità https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_it#:~:text=La%20strategia%20dell%27UE%20sulla%20biodiversità%20per%20il%202030%20è,prevede%20azioni%20e%20impegni%20specifici.
VIII. «Decarbonizzare le costruzioni, la nuova sfida del settore edilizio • Legambiente», *Legambiente*, 8 novembre 2022. https://www.legambiente.it/comunicati-stampa/decarbonizzare-le-costruzioni-sfida-settore-edilizio/
IX. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj5ufOmwKj7AhXzYPEDHdIPCPwQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.itreetools.org%2F&usg=AOvVaw1j4QP4ZtK0NjgK8uWVsxRS
X. Informazioni su LCA https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/certificazioni/ipp/lca
XI. Servizi ecosistemici e Nature based solutions https://www.isprambiente.gov.it/files/biodiversita/SERVIZI_ECOSISTEMICI.pdf