

a cura di / edited by

Mario Losasso
Maria Teresa Lucarelli
Marina Rigillo
Renata Valente

Adattarsi al clima che cambia **Innovare la conoscenza per il progetto ambientale**

Adapting to the Changing Climate
Knowledge Innovation for Environmental Design

Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale
Adapting to the Changing Climate. Knowledge Innovation for Environmental Design
a cura di / edited by Mario Losasso, Maria Teresa Lucarelli, Marina Rigillo, Renata Valente

TECNOLOGIA
STUDI E PROGETTI
49

ARCHITETTURA
INGEGNERIA
SCIENZE



politecnica

MAGGIOLI
EDITORE

978-88-916-4318-6



€ 38,00

Book series STUDI E PROGETTI

Adattarsi al clima che cambia

Innovare la conoscenza per il progetto ambientale

Adapting to the Changing Climate

Knowledge Innovation for Environmental Design

a cura di / edited by

Mario Losasso
Maria Teresa Lucarelli
Marina Rigillo
Renata Valente



Indice / Summary

9 **Processi innovativi per l'adattamento climatico nella rigenerazione dei distretti urbani / Innovating Processes for Climate Adaptation in Urban District Regeneration**

Mario Losasso

15 **Progetto ambientale e sfida climatica / Environmental Design and Climate Challenge**

Maria Teresa Lucarelli, Marina Rigillo, Renata Valente

Le parole della ricerca / The Research Terms

a cura di / editor *Martino Milardi*

24 **Costruire un glossario per l'adattamento climatico / Editing a Glossary for Climate Adaptation**

Martino Milardi

31 **Cambiamento climatico / Climate Change, Paola Mercogliano**

41 **Hazard, Rossella Rossi, Maria Vittoria Arnetoli**

47 **Onda di calore / Heat Wave, Rossella Rossi, Maria Vittoria Arnetoli**

51 **Pluvial Flooding, Rossella Rossi, Maria Vittoria Arnetoli**

55 **Disaster Risk, Rossella Rossi, Maria Vittoria Arnetoli**

61 **Climate Sensitivity, Carlo Donadio, Alberto Fortelli**

71 **Indicatori di impatto / Impact Indicators, Mariateresa Mandaglio, Caterina Claudia Musarella**

77 **Vulnerabilità ai rischi naturali / Vulnerability to Natural Hazards, Mattia Federico Leone**

83 **Adattamento climatico e gestione del rischio / Climate Adaptation and Risk Governance, Mattia Federico Leone**

89 **Mitigazione climatica / Climate Mitigation, Mariateresa Mandaglio, Caterina Claudia Musarella**

95 **Resilienza / Resilience, Rossella Rossi, Maria Vittoria Arnetoli**

99 **Resilienza urbana / Urban Resilience, Rossella Rossi, Maria Vittoria Arnetoli**

103 **Resilience Management, Rossella Rossi, Maria Vittoria Arnetoli**

107 **Rigenerazione urbana / Urban Regeneration, Alessandra Battisti, Gaia Turchetti**

113 **Eco-Distretto / Eco-District, Fabrizio Tucci, Serena Baiani**

123 **Infrastrutture verdi / Green Infrastructure, Elena Mussinelli, Matteo Gambaro, Raffaella Riva, Davide Cerati, Andrea Tartaglia**

127 **Nature-Based Solution, Elena Mussinelli, Matteo Gambaro, Raffaella Riva, Davide Cerati, Andrea Tartaglia**

131 **Servizi ecosistemici / Ecosystem Services, Elena Mussinelli, Matteo Gambaro, Raffaella Riva, Davide Cerati, Andrea Tartaglia**

135 **Approccio bioclimatico / Bioclimatic Approach, Valeria Cecafofso, Domenico D'Olimpio**

141 **Efficienza energetica / Energy Efficiency, Giuseppe Piras, Elisa Pennacchia**

145 **Involucro/ Envelope, Martino Milardi, Mariateresa Mandaglio, Caterina Claudia Musarella**

151 **Climate Responsive Design, Enza Tersigni**

157 **Design Complexity, Francesca La Rocca**

Dialogo / Dialogue

167 **Riflessione intorno ai saperi per l'adattamento al clima / About the Climate Adaptation Knowledges**

Martino Milardi, Rosario Giuffré

Misurare l'adattamento climatico / Estimating Climate Adaptation

a cura di / editor *Valeria D'Ambrosio*

- 172** Progetto *climate proof*: indicatori, controllo e monitoring / Climate Proof Project: Indicators, Control and Monitoring
Valeria D'Ambrosio
- 179** Biotope Area Factor (BAF), *Anita Bianco*
- 183** Riduzione Impatto Edilizio (RIE), *Eduardo Bassolino*
- 187** Digital Terrain Model (DTM), *Francesco Alberti, Giulia Guerri*
- 191** Sky View Factor (SVF), *Francesco Alberti, Giulia Guerri*
- 195** Urban Aspect Ratio, *Francesco Alberti, Giulia Guerri*
- 199** Albedo, *Eduardo Bassolino*
- 203** Indice di permeabilità / Permeability Index, *Roberto Bosco, Salvatore Cozzolino, Carlo Donadio*
- 207** Trasmittanza termica dinamica / Dynamic Thermal Transmittance,
Martino Milardi, Mariateresa Mandaglio, Caterina Claudia Musarella
- 211** Rapporto superficie opaca /trasparente / Opaque/Transparent Surface Ratio,
Martino Milardi, Mariateresa Mandaglio, Caterina Claudia Musarella
- 215** Interfaccia edificio - spazio aperto / Building - Open Space Interface,
Martino Milardi, Mariateresa Mandaglio, Caterina Claudia Musarella
- 219** Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), *Romeo Di Pietro, Duilio Iamónico, Sandro Strumia*
- 223** Air Pollutant, *Elena Mussinelli, Roberto Bolici, Daniele Fanzini, Giovanni Castaldo, Andrea Tartaglia*
- 229** Indicatore di riduzione di CO₂ e CO₂eq / Indicator of CO₂ and CO₂eq Reduction,
Elena Mussinelli, Roberto Bolici, Daniele Fanzini, Giovanni Castaldo, Andrea Tartaglia
- 235** Greenhouse Gases, *Elena Mussinelli, Roberto Bolici, Daniele Fanzini, Giovanni Castaldo, Andrea Tartaglia*
- 241** Temperatura Media Radiante (TMR) / Mean Radiant Temperature (MRT), *Valeria Cecafozzo*
- 245** Physiological Equivalent Temperature (PET), *Marco Cimillo*
- 249** Predicted Mean Vote (PMV), *Marco Cimillo*
- 253** Velocità del vento / Wind Speed, *Marco Cimillo*
- Dialogo / Dialogue
- 257** L'uso degli indicatori nel progetto ambientale / Use of Indicators in the Environmental Project
Federica Dell'Acqua, Norbert Kühn

Casi studio per l'adattamento agli effetti del cambiamento climatico / Case Studies for Climate Change Adaptation

a cura di/ editor *Renata Valente*

- 262** Esperienze di progetti ambientali multiscalari / Multi-scale Environmental Design Experiences,
Renata Valente
- 267** Il Piano di Adattamento Climatico di Barcellona 2018-2030 / Pla Clima de Barcelona 2018-2030, *Enza Tersigni*
- 273** La scelta green di Amburgo: "das Hamburger Klimaschutzkonzept 2011" / The Hamburg Green Option: "das Hamburger Klimaschutzkonzept 2011", *Federica Dell'Acqua*
- 281** Approccio ecosistemico e soluzioni Nature-Based a Berlino: "StEP Klima 2016" / Ecosystem Approach and Nature-Based Solutions in Berlin: the "StEP Klima 2016", *Federica Dell'Acqua*

- 289 Strumenti di pianificazione resiliente a Rotterdam / Resilient Planning Tools in Rotterdam,
Mariateresa Mandaglio, Caterina Claudia Musarella
- 295 La collaborazione istituzionale per il piano di adattamento di Padova / The Institutional Collaboration for the Padua Adaptation Plan,
Mariateresa Mandaglio, Caterina Claudia Musarella
- 301 Il progetto di rigenerazione integrata di Clichy-Batignolles a Parigi / The Clichy-Batignolles Integrated Regeneration Project in Paris,
Valeria Cecafo
- 307 Euromediterranée-Smartseille Recovery, *Gaia Turchetti*
- 313 Ginko: un eco-quartiere sul lago di Bordeaux / Ginko: an Eco-neighborhood on the Lake Bordeaux, *Valeria Cecafo*
- 319 Caserne De Bonne: il nuovo centro di Grenoble / Caserne De Bonne: the New Grenoble Center, *Valeria Cecafo*
- 325 La riconversione ambientale di Ekostaden Augustenborg a Malmö / The Environmental Reconversion of Ekostaden Augustenborg in Malmö,
Elena Mussinelli, Raffaella Riva, Matteo Gambaro, Andrea Tartaglia
- 331 Hammarby Sjostad: rigenerazione urbana a Stoccolma / Hammarby Sjostad: Urban Regeneration in Stockholm,
Mariateresa Mandaglio, Caterina Claudia Musarella
- 337 Uno spazio verde sospeso a Dallas: Klyde Warren Park / A Suspended Green Space in Dallas: the Klyde Warren Park,
Elena Mussinelli, Raffaella Riva, Matteo Gambaro, Andrea Tartaglia
- 341 Forestazione urbana a Bologna: il Progetto Gaia / Urban Forestry in Bologna: the Gaia's Project, *Roberto Bologna, Giulio Hasanaj*
- 349 Il programma per le green streets a Portland / Green Streets Program in Portland, *Roberto Bosco, Pietro Ferrara*
- 355 Philadelphia Green Stormwater Infrastructures, *Roberto Bosco, Pietro Ferrara*
- 361 La gestione adattiva delle acque meteoriche a Seattle / Adaptive Stormwater Management in Seattle, *Roberto Bosco, Pietro Ferrara*
- 367 Bagby Street Reconstruction: un'infrastruttura adattiva a Houston / Bagby Street Reconstruction: an Adaptive Infrastructure in Houston,
Elena Mussinelli, Raffaella Riva, Matteo Gambaro, Andrea Tartaglia
- 375 Il corridoio ecologico del Passeig Sant Joan a Barcellona / The Ecological Corridor of the Passeig Sant Joan in Barcelona,
Roberto Bologna, Giulio Hasanaj
- 383 Water Square Benthemplein: spazi urbani multifunzionali a Rotterdam / Water Square Benthemplein: Multifunctional Urban Spaces in Rotterdam, *Roberto Bologna, Giulio Hasanaj*
- 391 Blue Infrastructures a Copenhagen. Il progetto di Tåsinge Square / Blue Infrastructures in Copenhagen. The Project of Tåsinge Square,
Roberto Bologna, Giulio Hasanaj
- Dialogo / Dialogue
- 399 Replicabilità e direzioni per il progetto ambientale appropriato / Replicability and Directions for Appropriate Environmental Design
Renata Valente, Louise A. Mozingo

Final Remarks

- 406 Sul confine. Assetti plurali per il progetto di adattamento climatico / On the Border. Plural Assets for the Climate Adaptation Project
Marina Rigillo

Air Pollutant

Elena Mussinelli, *Politecnico di Milano*
Roberto Bolici, *Politecnico di Milano*
Daniele Fanzini, *Politecnico di Milano*
Giovanni Castaldo, *Politecnico di Milano*
Andrea Tartaglia, *Politecnico di Milano*

Contesto, indicatori e loro evoluzione nel tempo

In campo ambientale la storia degli indicatori è strettamente correlata al concetto di sviluppo sostenibile e alle politiche globali per il suo perseguimento.

L’attenzione al rilevamento e al controllo degli inquinanti (e tra questi di quelli aerei) è via via cresciuta, e con essa l’esigenza di una corretta informazione ambientale. A ciò è corrisposta la messa a punto di idonei indicatori ambientali, riconosciuti e adottati dalla comunità scientifica per veicolare informazioni sullo stato dell’ambiente e valutare l’efficacia delle azioni di miglioramento (dall’introduzione delle procedure di VIA degli anni ’80, all’Agenda XXI delle Nazioni Unite del ’92, alla Carta di Aalborg e alla successiva Convenzione di Aarhus, sino alla Direttiva europea 2003/4/CE e finalmente alla Direttiva 2016/2284/UE, che ha stabilito i limiti nazionali per le emissioni di SO₂, NO_x, COVNM, NH₃, PM_{2,5} per gli anni 2020-29 - Protocollo di Göteborg - e dal 2030 in poi).

Principali inquinanti aerei / Main air pollutants		Fonte di emissione / Source of emission
Ossido di zolfo/anidride solforosa / Sulfur oxide/sulfur dioxide	SO _x /SO ₂	Combustion di gas e petroli / Combustion of gases and oils
Ossidi di azoto/biossido di azoto / Nitrogen oxides/nitrogen dioxide	NO/NO ₂	Combustioni ad alte temperature / Combustion at high temperatures
Monossido di carbonio / Carbon monoxide	CO	Combustione incompleta di gas, carbone, legna. Scarichi degli autoveicoli / Incomplete combustion of gas, coal, wood. Vehicle exhausts
Biossido di carbonio / Carbon dioxide	CO ₂	Gas serra/combustione / Greenhouse gas/combustion
Composti organici volatili / Volatile organic compounds	COV	Vapori dei solventi e dei combustibili a base di idrocarburi / Vapors of solvents and hydrocarbon fuels
Particolato / Particulate	PM	Processi di erosione o combustione / Erosion or combustion processes
Ammoniaca / Ammonia	NH ₃	Processi agricoli / Agricultural processes
Piombo / Lead	PB	Fonderie, vernici, impianti idraulici / Foundries, paints, hydraulic systems
Organici persistenti / Persistent organic	POP	Processi industriali / Industrial processes
Ozono / Ozone	O ₃	Reazione chimica tra NO _x e COV / Chemical reaction between NO _x and VOC

Tab. 1 - Principali inquinanti aerei e Fonti di emissione / Main air pollutants and Sources of emission.

Context, indicators and their evolution over time

In the environmental field, the history of indicators is closely related to the concept of sustainable development and global policies for its pursuit.

Attention to the detection and the control of pollutants (and among these of the airborne ones) has gradually grown, and with it the need for correct environmental information. In the meantime, environmental indicators, recognized and adopted by the scientific community to convey information on the state of the environment and to evaluate the effectiveness of the improvement actions (from the introduction of the EIA procedures of the 1980s, to the Agenda XXI of the United Nations of 1992, to the Aalborg Charter and to the subsequent Aarhus Convention, up to the European Directive 2003/4 / EC and finally to Directive 2016/2284 / EU, which established the national limits for emissions of SO₂, NO_x, COVNM, NH₃, PM_{2,5} for the years 2020-29 - Gothenburg Protocol - and from 2030 onwards), have been developed.

The alteration of concentrations of gas in the air depends on natural and / or anthropic causes (emissions of industrial, artisanal and agricultural activities, thermal power stations and heating systems, mobility) and constitutes a phenomenon of significant impact on the human health (respiratory, cardiac and cardiovascular diseases) and on ecosystem and climatic balances.

The constant monitoring of the air quality (in particular in urban areas, where significant exposure values for a large and concentrated population are found), the systematic reduction of emissions at the source, as well as the mitigation and the absorption of the already present pollutants are therefore fundamental. The monitoring involves the detection of concentration values through measurement networks and the use of numerical simulation models (applied to traffic, emissions, local meteorology and pollutant concentrations) to assess the levels of exposure of the population.

In Italy the first measurements date back to the 1950s and 1960s, with increasing pressures deriving from industrial development and motorization. The introduction of threshold for

Inquinante / Pollutant	Unità di misura / Unit of measure	Limite / Limit	Periodo di mediazione / Mediation period	Valore limite / Limit value	Superamenti/anno / Exceedances/year
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Valore limite sulle 24 ore per la protezione della salute umana / 24-hour limit value for the protection of the human health	media giornaliera / average per day	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	massimo 35 / max 35
		Valore limite annuale per la protezione della salute umana / Annual limit value for the protection of the human health	anno civile / calendar year	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
PM2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Valore Limite annuale per la protezione della salute umana/ Annual limit value for the protection of the human health	anno civile/ calendar year	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
NO ₂	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Valore limite orario per la protezione della salute umana / Hourly limit for the protection of the human health	media massima oraria / maximum hourly average	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	massimo 18 / maximum 18
		Valore limite annuale per la protezione della salute umana / Annual Limit Value for the protection of human health	anno civile/ calendar year	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
O ₃	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Soglia d'informazione / Information threshold	media max oraria / max hourly average	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		Soglia d'allarme / Alarm threshold	media max oraria / max hourly average	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
		Valore obiettivo / Target value	media max giornaliera calcolata su 8 ore / max per day avarage calculated on 8 hours	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	≤ 25 volte/a.(media su 3 a.) / 25 times/year (average over 3 y.)
		Valore obiettivo per laprotezione della vegetazione / Target value for the protection of the vegetation	calcolato sulla base dei valori di 1 ora da maggio a luglio / calculated on the basis of the values of 1 hour from May to July	18000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media su 5 a. / average 5 y.)	
CO	mg/m^3	Valore limite orario per la protezione della salute umana / Hourly limit value for the protection of the human health	media max giornaliera calcolata su 8 ore / max per day avarage calculated on 8 hours	10 mg/m^3	
SO ₂	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Valore limite giornaliero / Daily threshold	media giornaliera / average per day	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	max 3 / max 3
		Valore limite su 1 ora per la protezione della salute umana / Limit on 1 hour for the protection of the human health	media massima oraria / maximum per day avarage	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	max 24 / max 24
Benzene / Benzene	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Valore limite su base annua / Annual threshold	anno civile/ calendar year	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Benzo(a)pirene / Benzo (a) pyrene	ng/m^3	Concentrazione nella frazione PM10 del materiale particolato (media su un anno civile) / Concentration of the particulate material in the PM10 fraction, (average over a calendar year)	anno civile / calendar year	1 ng/m^3	
Metalli pesanti / Heavy metals	ng/m^3	Arsenico / Arsenic	anno civile/ calendar year	6 ng/m^3	
		Cadmio / Cadmium	anno civile / calendar year	5 ng/m^3	
		Nichel / Nickel	anno civile / calendar year	20 ng/m^3	
		Piombo / Lead	anno civile / calendar year	0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

Tab. 2 - Limiti di riferimento (D.lgs 155/2010) / Reference limits (Leg. Decree. 155/ 2010) (Source: Elaboration of data from ISPRA and regional ARPA).

L'alterazione delle normali concentrazioni di gas nell'aria è dovuta a cause naturali e/o antropiche (emissioni di attività industriali, artigianali e agricole, centrali termiche e impianti di riscaldamento, mobilità) e costituisce un fenomeno di rilevante impatto sulla salute umana (patologie di tipo respiratorio, cardiaco e cardiovascolare) e sugli equilibri ecosistemici e climatici.

Sono quindi fondamentali sia il costante monitoraggio della qualità dell'aria (in particolare nelle aree urbane, dove si riscontrano valori di esposizione significativi per una popolazione consistente e concentrata), sia la sistematica riduzione delle emissioni alla fonte, nonché la mitigazione e assorbimento degli inquinanti già presenti. Il monitoraggio prevede il rilevamento dei valori di concentrazione attraverso reti di misurazione e l'impiego di modelli di simulazione numerica (applicati al traffico, alle emissioni, alla meteorologia locale e alla concentrazione degli inquinanti) per valutare i livelli di esposizione della popolazione.

In Italia le prime misurazioni risalgono agli anni '50 e '60, con le crescenti pressioni derivanti dallo sviluppo industriale e della motorizzazione, ma l'introduzione di valori limite per l'inquinamento atmosferico avviene solo con il DPCM 28 marzo 1983; è poi ripresa alla fine degli anni ottanta nel contesto delle procedure di VIA e di VAS, con una crescente attenzione per la qualità dell'aria nelle aree urbane, e poi con il D.Lgs 351/99, e ancora con il D.Lgs n.155/2010 (attuazione Direttiva 2008/50/CE) e il DM 26 gennaio 2017, che ha recepito la Direttiva UE 1480/2015 per quanto riguarda la determinazione degli inquinanti, le procedure per la garanzia di qualità delle reti e la comunicazione dei dati rilevati). Grazie alle osservazioni delle numerose agenzie nazionali e internazionali per l'ambiente è oggi possibile disporre di serie storiche relative alle concentrazioni, che registrano effetti di riduzione delle concentrazioni di inquinanti primari (SO_2 , CO , C_6H_6), ma non degli inquinanti secondari (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 e O_3). Nel corso degli anni la normativa è dunque cambiata più volte, adattandosi agli effetti positivi delle limitazioni e a crescenti obiettivi di qualità. L'attuale assetto normativo è rappresentato dal D.Lgs 30 maggio 2018, n. 81 (attuazione Direttiva UE 2016/2284), che definisce gli impegni nazionali relativi alla riduzione delle emissioni, ai programmi nazionali di controllo dell'inquinamento atmosferico, agli obblighi di monitoraggio e di comunicazione.

Air Quality Index, misurazione e applicazione

L'Air Quality Index (AQI) è un indice aggregato che permette di rappresentare in modo sintetico lo stato di qualità dell'aria considerando i dati di più inquinanti (tipicamente PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , NO_x , O_3 , CO , SO_2 e benzene), fornendo una stima articolata su vari livelli. Si tratta di un indice abbastanza efficace nel fornire un quadro sintetico e dinamico della qualità dell'aria nelle città, ma non impiegabile per la verifica puntuale della conformità delle emissioni ai limiti di legge.

I valori di concentrazione utili al calcolo dell'AQI sono raccolti attraverso stazioni di monitoraggio dotate di sensori con letture a scadenza oraria o giornaliera in relazione al tipo di inquinante, che identificano la stazione di monitoraggio, il sensore, l'inquinante misurato, la sua concentrazione e la data/ora di rilevamento.

L'AQI viene calcolato in diversi modi, in relazione al numero di inquinanti e delle concentrazioni misurate, stimate o previste. Inoltre, un passaggio importante è quello relativo alle modalità di aggregazione degli inquinanti, che può essere effettuata assumendo il valore più alto tra quelli dei sottoindici, oppure calcolandone il valore medio (eventualmente ponderato). L'EPA (US Environmental Protection

atmospheric pollution occurs only with the DPCM of the 28th March 1983. Moreover, it is resumed at the end of the Eighties in the context of the EIA and SEA procedures, with a growing attention to the air quality in urban areas; then with the Legislative Decree 351/99; then with the Legislative Decree n.155 / 2010 (implementation of Directive 2008/50 / EC); then with the Ministerial Decree 26th January 2017, which transposed EU Directive 1480/2015 regarding the determination of pollutants, the procedures for guaranteeing network quality and communication of the collected data).

Thanks to the observations of numerous national and international agencies for the environment, it is now possible to have time series relative to concentrations, which record effects of reduction of concentrations of primary pollutants (SO_2 , CO , C_6H_6), but not of secondary pollutants (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 and O_3).

Over the years, the legislation has therefore changed several times, adapting to the positive effects of limitations and to the new objectives of quality. The current regulatory framework is represented by the Legislative Decree 30th May 2018, n. 81 (implementation of EU Directive 2016/2284), which defines national commitments related to the reduction of the emissions, the national control programs of the air pollution, the monitoring and communication obligations.

Air Quality Index, measurement and application

The Air Quality Index (AQI) is an aggregate index that allows to summarize the state of air quality considering the data of several pollutants (typically PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , NO_x , O_3 , CO , SO_2 and benzene), providing an articulated estimation on different levels. This is a fairly effective index in providing a synthetic and dynamic picture of the quality of the air in the cities, but it is not usable for the punctual verification of the compliance of the emissions with the limits defined by the law.

The concentration values useful for the AQI calculation are collected through monitoring stations equipped with sensors with hourly or daily readings in relation to the type of pollutant, which identify the monitoring station, the sensor, the measured pollutant, its concentration and the date / time of detection.

The AQI is calculated in different ways, in relation to the number of the measured pollutants, estimated or expected concentrations. Furthermore, an important step regards the methods of aggregation of pollutants, which can be carried out by assuming the highest value among those of the sub-indices, or by calculating the average value (possibly weighted).

The EPA (US Environmental Protection Agency) uses an air quality index articulated in six increasing levels of harmfulness to the human health and it is based on the five pollutants regu-

lated by the US legislation: O₃ at ground level (in ppm, or parts per million), PM2.5 and PM10 (in µg / m3), CO (in ppm, in parts per million), SO₂ (in ppm) and NO₂ (in ppm), for each of which a national standard is established.

In European countries, the index is calculated in different ways, although often with reference to O₃, PMX, SO₂, CO and NO_x. The need to have comparable and easily communicable data led to the definition of a common index - the CAQI, Common Air Quality Index -, based on the different existing quality indexes, with attention to the European Community thresholds. The CITEAIR project, Common Information to European Air, funded by the European Union under the INTERREG IIIC Program, defined three useful indexes to provide - on the interactive website Air Quality Now - information on air quality in over fifty cities European. These indexes - articulated on time scans (hourly, daily and yearly) and on 5 levels, on a scale from 0 (very low) to 100 (very high) - consider the three main pollutants (PM10, NO₂ and O₃) and , in perspective, three other significant pollutants (CO, PM2.5 and SO₂).

In Italy the AQUI is calculated by dividing the measurement relating to each pollutant by the related reference limit established by law by the Legislative Decree 155/2010.

The use of the air quality models allows also the simulation of the behaviour of pollutants in the atmosphere, integrating the analytical framework, on the one hand with data relating to physical-chemical phenomena and orographic and climatic conditions (temperature, pressure, humidity, precipitations, wind direction and speed, atmospheric stability) associated with each monitoring station and, on the other, with vehicle traffic data (number of vehicles entering in a specific zone / day), with specifications about vehicle category (type of fuel:

Agency) impiega un indice di qualità dell’aria articolato in sei livelli crescenti di nocività per la salute umana e basato sui cinque inquinanti regolamentati nella legislazione statunitense: O₃ a livello del suolo (in ppb, o parti per miliardo), PM2,5 e PM10 (in µg/m3), CO (in ppm, in parti per milione), SO₂ (in ppb) e NO₂ (in ppb), per ciascuno dei quali è stabilito uno standard nazionale.

Nei Paesi europei l’indice è calcolato in modo differenziato, anche se spesso con riferimento a O₃, PMX, SO₂, CO e NO₂. L’esigenza di rendere comparabili e facilmente comunicabili i dati ha portato alla definizione di un indice comune - il CAQI, Indice Comune di Qualità dell’Aria (Common Air Quality Index) -, basato sui diversi indici di qualità esistenti, con attenzione ai livelli soglia comunitari. Il progetto CITEAIR, Common Information to European Air, finanziato dall’Unione Europea nell’ambito del Programma INTERREG IIIC, ha definito tre indici utili per fornire al pubblico - sul sito interattivo Air Quality Now - informazioni sulla qualità dell’aria in oltre cinquanta città europee. Tali indici - articolati su scansioni temporali (orario, giornaliero e annuale) e in 5 livelli, su una scala da 0 (molto bassa) a > 100 (molto alta) -, considerano i tre principali inquinanti (PM10, NO₂ e O₃) e, in prospettiva, altri tre inquinanti di rilievo (CO, PM2.5 e SO₂).

Valori dell’Indice Air Quality Index/Air Quality Index Values	Livelli di pericolo per la salute / Levels of Health Concern	Colori / Colors
0-50	Buono / Good	Verde / Green
51-100	Moderato / Moderate	Giallo / Yellow
101-150	Dannoso per gruppi di persone sensibili / Unhealthy for sensitive groups	Arancio / Orange
151-200	Dannoso / Unhealthy	Rosso / Red
201-300	Molto Dannoso/Very Unhealthy	Viola / Purple
301-500	Pericoloso / Hazardous	Marrone / Maroon

Tab. 3 - Valori e livelli di rischio per la salute dell’Air Quality Index / Risk values and levels for the health of the Air Quality Index (Source: EPA, <https://www.airnow.gov>).

AIQ	Parametro / Parameter	Valore limite / Limit value	Molto buona / Very good	Buona / Good	Accettabile / Acceptable	Scarsa / Scarce	Molto scarsa / Very scarce
PM2.5	media giornaliera / daily average	25 µg/m ³	0-10	ott-20	20-25	25-30	50-800
PM10	media giornaliera / daily average	50 µg/m ³	0-20	20-35	35-50	50-100	100-1200
NO ₂	massimo orario / maximum hourly	200 µg/m ³	0-40	40-100	100-200	200-400	400-1000
O ₃	massimo orario / maximum hourly	180 µg/m ³	0-80	80-120	120-180	180-240	240-600
SO ₂	massimo orario / maximum hourly	350 µg/m ³	0-100	100-200	200-350	350-500	500-1250
CO	media mobile 8H / average 8H	10 mg/m ³					
C ₆ H ₆	media annuale / Annual average	5 µg/m ³					

Tab. 4 - Livelli del modello AIQ rapportati ai valori limite degli inquinanti su standard nazionale italiano / Levels of the AIQ model compared to the limit values of pollutants according to the Italian national standard (Source: Elaboration of data from ISPRA and regional ARPA).

In Italia l'AQUI è calcolato dividendo la misurazione relativa a ogni inquinante per il correlato limite di riferimento, stabilito per legge dal D.Lgs 155/2010.

L'impiego di modelli di qualità dell'aria consente inoltre di simulare il comportamento degli inquinanti in atmosfera, integrando il quadro analitico, da un lato con dati relativi ai fenomeni fisico-chimici e alle condizioni orografiche e climatiche (temperatura, pressione, umidità, precipitazioni, direzione e velocità del vento, stabilità atmosferica) associati a ciascuna stazione di monitoraggio e, dall'altro, ai dati del traffico veicolare (numero di veicoli in ingresso a una determinata zona/giorno), articolato per categoria di veicolo (per tipo di carburante: benzina, diesel, elettrico, GPL-Metano, ibrido, GPL, miscela, ibrido gasolio, metano, ibrido benzina; per tipo di veicolo (bus, merci, privati, ecc.) e per categoria di Euro.

Opere tecniche che agiscono sull'indicatore, esempi e limiti di applicazione

Le soluzioni tecniche per il miglioramento della qualità dell'aria nei distretti urbani attraverso l'assorbimento degli inquinanti operano sia per mezzo di materiali artificiali, sia mediante l'impiego di componenti naturali (NBS).

Tra le soluzioni artificiali troviamo in particolare:

- materiali e componenti a base di biossido di titanio, impiegati su superfici orizzontali e verticali, che - sotto l'azione dei raggi ultravioletti - utilizzano processi di fotocatalisi per assorbire/decomporre gli inquinanti; le proprietà fotocatalitiche sono applicate a diversi materiali e componenti edilizi (cemento e suoi derivati - malte e intonaci -, vernici, tegole, pannelli, lastre, masselli e piastrelle, vetro) per realizzare pavimentazioni, coperture, pannellature, finiture esterne e rivestimenti, le cui capacità di assorbimento sono validate da enti di ricerca, con riduzioni sensibili (anche > 50%).
- materiali filtranti (in particolare tessuti multistrato) capaci di assorbire/decomporre gli inquinanti attraverso processi nanomolecolari che sfruttano il movimento naturale dell'aria.

Per quanto concerne l'applicazione delle NBS, è possibile considerare le seguenti opere: tree planting; green roof; green walls; bio-basin.

Vi sono infine le soluzioni ibride, che sfruttano l'integrazione di componenti naturali e artificiali (muschio, filtri, sensori di rilevamento, ecc.) e che trovano applicazione soprattutto in elementi di attrezzamento urbano (es: CityTrees air filter). Valutare in modo puntuale l'efficacia di tali soluzioni in termini di cattura degli inquinanti aerei è piuttosto complesso, perché le prestazioni sono strettamente connesse alle caratteristiche fisico-spaziali, orografiche, climatiche e ambientali del contesto, alle fonti, alle tipologie e al grado di concentrazione degli inquinanti, nonché alle specifiche di ogni singola soluzione adottata.

Dal punto di vista metodologico sono possibili diverse modalità di misurazione/valutazione, applicabili *ex-ante* o *ex-post* (più rari i casi in letteratura di applicazione a supporto del processo decisionale/progettuale). Nel caso delle NBS, ad esempio, possono essere impiegati i modelli parametrici che adottano valori tabellari (ex. modello UFORE-Urban Forest Effect, LAI-Leaf Area Index), analitici (ex. modellazioni spaziali in GIS e simulazioni -, software I-Tree, ecc. - puntualmente riferite al sito), e/o strumentale (ex. misurazione diretta della variazione dei livelli di concentrazione degli inquinanti negli apparati fogliari).

Un esempio significativo è riscontrabile nella sperimentazione progettuale del gruppo Proxima per il Concorso C40 (sito di Via Serio a Milano), che ha svilup-

gasoline, diesel, electric, LPG-Methane, hybrid, LPG, mixture, diesel, methane, hybrid petrol, by type of vehicle (bus, goods, private, etc.).

Technical interventions that affect the indicator, examples and limits of the application

The technical solutions for the improvement of the air quality in urban districts through the absorption of pollutants regards both the use of artificial materials and the adoption of natural components (NBS).

Among the artificial solutions, we can list in particular:

- *materials and components based on titanium dioxide, used on horizontal and vertical surfaces, which - under the action of ultraviolet rays - use photo catalysis processes to absorb/decompose pollutants; the photo catalytic properties are applied to different building materials and components (cement and its derivatives - mortars and plasters -, paints, tiles, panels, slabs, blocks and tiles, glass) to create flooring, coverings, panelling, external finishes and coatings, the whose absorption capacity is validated by research institutes, with significant reductions (even> 50%).*
- *filtering materials (in particular multilayer fabrics) capable of absorbing / decomposing pollutants through nanomolecular processes that exploit the natural movement of the air.*
With regard to the application of NBS, it is possible to consider the following typologies: tree planting; green roof; green walls; bio-basin.

Finally, there are hybrid solutions, which take advantage of the integration of natural and artificial components (moss, filters, detection sensors, etc.) and which find application above all in multifunctional urban equipment (ex: CityTrees air filter). Evaluating punctually the effectiveness of these solutions in terms of capture of air pollutant is rather complex, because the performances are strictly connected to the physical-spatial, orographic, climatic and environmental characteristics of the context, to the sources, to the types and to the degree of concentration of pollutants, as well as to the specifications of each adopted solution.

From a methodological point of view, different measurement/evaluation methods are possible, applicable ex-ante or ex-post (the cases of application for supporting the decision-making / planning process are rare in literature). In the case of NBS, for example, parametric models can be used that adopt tabular values (ex. UFORE model - Urban Forest Effect, LAI-Leaf Area Index), analytical models (ex. Spatial modelling in GIS and simulations -, software I- Tree, etc. - punctually related to the site), and / or instrumental (e.g. Direct measurement of the variation of concentration levels of pollutants in foliar apparatus).

A significant example can be found in the design experimentation of the Proxima group for the Competition C40 (Via Serio site in Milan), which has developed - among others - also actions aimed at improving the quality of the area through NBS (trees, hedges, shrubs, lawns, ground cover, etc.). The simulations, which have considered several factors (exposure, meteorological data, ex-ante concentrations, etc.) and have evaluated for example the benefits, in terms of removal of air pollutants, deriving from the installation of 55 new trees of various essences (assuming its performance 15 years after planting) and the formation of bio-basins, provide the results shown in Table 5.

pato - tra le altre - anche azioni puntualmente finalizzate al miglioramento della qualità dell’area attraverso le NBS (alberi, siepi, arbusti, prati, tappezzanti, ecc.). Le simulazioni, che hanno considerato diversi fattori (esposizione, dati meteorologici, concentrazioni ex-ante, ecc.) e hanno valutato ad esempio i benefici, in termini di rimozione degli inquinanti aerei, derivanti dall’impianto di 55 nuovi alberi di varie essenze (ipotizzandone le prestazioni a 15 anni dalla messa a dimora) e dalla formazione di biobacini, forniscono i risultati riportati nella Tabella 5.

PIANTUMAZIONI. TABELLA RELATIVA AGLI INDICATORI DI RIMOZIONE DEGLI INQUINANTI AEREI E MANCATA EMISSIONE DI CO2 EQ IN ATMOSFERA										
	Numero	Rimozione inquinanti								CO2 equivalente
		O3		PM10		SO2		NO2		298 Kg CO2/kg NO2
		Kg/albero *anno	Kg/anno	Kg/albero *anno	Kg/anno	Kg/albero *anno	Kg/anno	Kg/albero *anno	Kg/anno	Kg CO2 eq/anno
Celtis Australis	21	0.130	2.73	0.143	3.003	0.265	5.565	0.186	3.906	1163.988
Liriodendron Tulipifera	6	0.25	0.78	0.21	1.260	0.425	2.550	0.32	1.920	572.160
Liquidambar styraciflua	6	0.13	1.5	0.127	0.762	0.35	2.100	0.11	0.660	196.680
Fraxinus Hornus	8	0.35	1.04	0.125	1.000	0.05	0.400	0.1	0.800	238.400
Pyrus calleryana	4	0.05	1.4	0.05	0.200	0.1	0.400	0.05	0.200	59.600
Tilia platyphyllos	10	0.3	0.5	0.152	1.520	0.32	3.200	0.6	6.000	1788.000
Ligustrum lucidum	100	0.03	3	0.015	1.5	0.08	8.000	0.09	9.000	2682.000
Photinia red Robin	80	0.03	2.4	0.015	1.2	0.08	6.400	0.09	7.200	2145.600
TOTALI	235		13.350		10.445		28.615		29.686	8846.428

BIOBACINI E PRATI. TABELLA RELATIVA AGLI INDICATORI DI RIMOZIONE DEGLI INQUINANTI AEREI E MANCATA EMISSIONE DI CO2 EQ IN ATMOSFERA										
		O3		PM10		SO2		NO2		CO2eq
Zone a biobacino	599	0.004492	2.690708	0.0006490	0.388751	0.001982	1.187218	0.002329	1.395071	415.731158
Zone a prato	1694	0.002871	4.863474	0.0005570	0.943558	0.001138	1.893892	0.001465	2.48171	739.54958
TOTALE	2293		7.554182		1.332309		3.08111		3.876781	1155.28074

Tab. 5 - Simulazioni progetto Proxima (Piantumazioni-Biobacini) / Proxima project simulations (Plantings-Biobacins) (Elaboration by Davide Cerati).

References

Cirillo, C.M. (2014), “Breve storia dell’inquinamento atmosferico in Italia”, in *Gazzetta Ambiente, Rivista sull’ambiente e il territorio*, n. 4/2014, Alpes, Perugia.

CNEIA, (2006), *Relazione del gruppo di lavoro 1 della Commissione Nazionale Emergenza Inquinamento Atmosferico del Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare*.

EEA (2014), *Digest of EEA indicators 2014*, available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/digest-of-eea-indicators-2014>.

EEA (2015), *Air quality report 2 2015*, Report, available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2015> (accessed 26 June 2019)

EPA (2014), *Air quality index. A guide to ari quality and your health*, available at: https://web.archive.org/web/20171117011127/https://www3.epa.gov/airnow/aqi_brochure_02_14.pdf (accessed 26 june 2019).

International Air Quality, available at: <https://www.airnow.gov/index.cfm?action=airnow.international>.

OECD (2008), *Handbook on contrstructing composite indicators, metodologia and user guide*, available at: <https://www.oecd.org/sdd/42495745.pdf>

Websites

- <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/about>
- https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators#c0=10&c12-operator=or&b_start=0
- <https://www.eionet.europa.eu>
- <https://projects.eionet.europa.eu/sense>
- <https://inspire.ec.europa.eu>

Indicatore di riduzione di CO₂ e CO₂eq Indicator of CO₂ and CO₂eq Reduction

Elena Mussinelli, *Politecnico di Milano*
Roberto Bolici, *Politecnico di Milano*
Daniele Fanzini, *Politecnico di Milano*
Giovanni Castaldo, *Politecnico di Milano*
Andrea Tartaglia, *Politecnico di Milano*

Contesto culturale e tecnico

Il diossido di carbonio (CO₂) è parte dei cicli biogeochimici naturali quale risultato dell'ossidazione delle molecole organiche definite "carboniose". In natura è prodotto da batteri aerobici nei processi di fermentazione alcolica, o dalla respirazione degli animali e dell'uomo. Le piante utilizzano il diossido di carbonio per la fotosintesi, un processo che, grazie all'azione della luce solare e della clorofilla, fornisce loro il nutriente per la sussistenza. Nel ciclo naturale esiste un sostanziale equilibrio tra i flussi di produzione e consumo di CO₂, che ne mantiene stabile la concentrazione in atmosfera. Bruciando combustibili fossili e deforestando l'uomo ha però modificato tale equilibrio, innescando il progressivo accumulo di CO₂, e il conseguente effetto serra.

Lo scienziato svedese Svante Arrhenius fu il primo, nel 1896, a stabilire la correlazione tra l'utilizzo di combustibili fossili e l'aumento del riscaldamento globale. Considerando la capacità di assorbimento delle radiazioni infrarosse da parte del vapore acqueo e dell'anidride carbonica, egli stabilì una correlazione tra la concentrazione di CO₂ in atmosfera e l'aumento della temperatura superficiale media del pianeta attraverso l'effetto serra (Maslin, 2004).

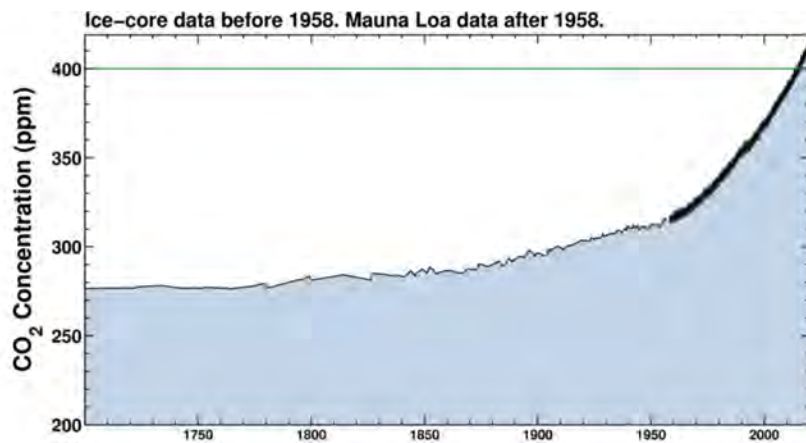


Fig. 1 - Aumento della concentrazione del CO₂ in atmosfera dal periodo pre-industriale ad oggi / Increase in the concentration of CO₂ in the atmosphere from the pre-industrial period to the present (Source: https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/CO2_800k_zoom.png).

The technical and cultural context

The carbon dioxide (CO₂) is part of the natural biogeochemical cycles as a result of the oxidation of organic molecules called "carbon". In nature it is produced by aerobic bacteria in alcoholic fermentation processes, or by the respiration of animals and humans. Plants use carbon dioxide for the photosynthesis, a process that, due to the action of the sunlight and the chlorophyll, provides them with the nutrient for subsistence.

In the natural cycle there is a substantial balance between the flows of production and consumption of CO₂, which keeps stable the concentration in the atmosphere. Through the burning of fossil fuels and the deforestation this balance is changed, triggering the progressive accumulation of CO₂ and the consequent greenhouse effect.

The Swedish scientist Svante Arrhenius was the first, in 1896, to recognize the correlation between the use of fossil fuels and the increase in global warming. Considering the capacity of absorption of infrared radiation by water vapor and carbon dioxide, he established a correlation between the concentration of CO₂ in the atmosphere and the increase of the average surface temperature of the planet through the greenhouse effect (Maslin, 2004).

The Keeling curve (a diagram that indicates the seasonal cyclic trend of the concentration of CO₂ in the atmosphere) records the constant increase in CO₂ values from the 1950s to today. In 2013 the threshold of 400 parts per million (ppm) was exceeded, a value that had not been reached on Earth for millions of years. But if the overcoming of this threshold seemed an absolutely exceptional event, the value of 414.15 recorded on the 3rd of May 2019 at the Mauna Loa observatory in Hawaii was even more striking, as it was close to the threshold of 450 ppm, threshold over which the increase of temperature could exceed the so-called point of no return (Aengenheyster et al., 2018).

The increase in the global average surface temperature results today at least 1 degree higher than the pre-industrial period (from 1850 to 1900). According to the report of the Intergovernmental Panel on global warming, if we continue to

release greenhouse gases into the atmosphere at current rates, this increase could reach a value of $+1.5^{\circ}\text{C}$ (0.5°C lower than the point of no return) within twenty years. The most worrying thing is that, even in the case of a significant reduction in the emission of greenhouse gases into the atmosphere, the temperature growth trend will continue at least until the year 2055, before recording a reversal trend (Allen et al., 2018).

Although in 2015 the carbon dioxide has been recognized by all the signatory Countries of the final document of the Paris Conference 2015 (COP21) as the cornerstone for the effective control of the climate change, some countries such as China, the United States and India have increased their emissions. Monitoring and assessing the situation through appropriate indicators and measurement methodologies is the necessary precondition for the development of adequate policies and strategies to face the global warming.

Concentration of CO_2 in atmosphere: measurement and application

The CO_2 present in the atmosphere is measured in % with respect to the unit of volume or in ppm (parts per million). The most common measurement technologies include: thermal detectors (useful in particular for the determination of losses of CO_2 from reservoirs or confinement fields), monitors with continuous emission (CEM) for the evaluation of the efficiency of capture and laser and diodes spectrometers for atmospheric measurements. The main CO_2 monitoring technologies in the atmosphere are based on the use of appropriate sensors, which exploit IR Infrared Radiation, or accelerators for mass spectrometry AMS (Accelerator Mass Spectrometry).

A unique detection technology has recently been developed in the CNR laboratories. This is extremely high-precision laser spectroscopy, which allows the measurement of the small amounts of CO_2 present in nature (1 CO_2 molecule per thousand billion ordinary carbon dioxide molecules). The technology, which today still has a sensitivity at least 1000 times higher than the best existing alternative technologies, has already been scientifically validated and it will allow the portability of extremely high-precision measuring instruments throughout the world.

The measurements already carried out show that the growth rate of CO_2 concentration in the air has gone from 11.4 billion tons (Gt) CO_2 per year in the period 1960/2008 up to 34.4 Gt CO_2 per year in the 2008-2017 period. In 2018, the article by a group of researchers from the Global Carbon Project, published in the journal *Earth System Science Data* at the same time of the United Nations climate summit (COP24) in Katowice (Poland), quantifies the achievement of the record of 37.1

La curva di Keeling (diagramma che indica l'andamento ciclico stagionale della concentrazione della CO_2 in atmosfera) registra il costante aumento dei valori di CO_2 dagli anni '50 a oggi. Era il 2013 quando venne superata la soglia delle 400 parti per milione (ppm), un valore che sulla Terra non si raggiungeva da milioni di anni. Ma se il superamento di tale soglia sembrò un dato del tutto eccezionale, il valore di 414,15 registrato il 3 maggio 2019 presso l'osservatorio di Mauna Loa alle Hawaii risultò ancora più eclatante, in quanto prossimo alla soglia di 450 ppm, soglia oltre la quale l'aumento della temperatura potrebbe eccedere il cosiddetto punto di non ritorno (Aengenheyster et al., 2018).

L'aumento della temperatura media superficiale globale risulta già oggi di almeno 1 grado superiore al periodo preindustriale (dal 1850 al 1900). Secondo la relazione del Panel Intergovernativo sul riscaldamento globale, se si continuerà ad immettere gas serra in atmosfera ai ritmi attuali, tale aumento potrebbe raggiungere il valore di $+1,5^{\circ}\text{C}$ ($0,5^{\circ}\text{C}$ inferiore rispetto al punto di non ritorno) entro vent'anni. La cosa più preoccupante è che, anche nel caso di una sensibile riduzione dell'immissione di gas serra in atmosfera, il trend di crescita della temperatura proseguirà almeno fino all'anno 2055, prima di registrare una inversione di tendenza (Allen et al., 2018).

Sebbene nel 2015 il diossido di carbonio sia stato riconosciuto da tutti i Paesi firmatari del documento finale della Conferenza di Parigi 2015 (COP21) come il caposaldo per l'effettivo controllo dei cambiamenti climatici, alcuni paesi quali Cina, Stati Uniti e India hanno aumentato le loro emissioni. Monitorare e valutare la situazione attraverso opportuni indicatori e metodologie di misurazione è la pre-

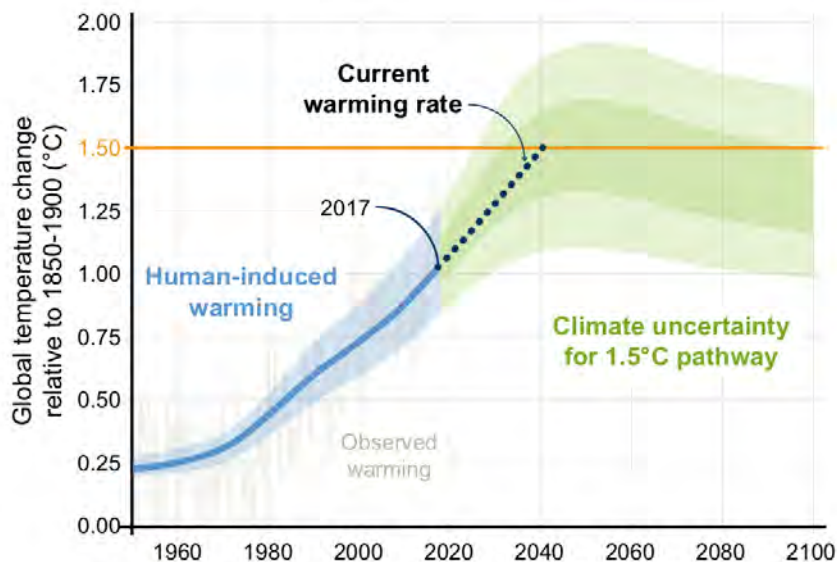


Fig. 2 - Crescita della temperatura globale e soglia per una possibile inversione di tendenza in caso di immediata riduzione delle emissioni / Global temperature growth and threshold for a possible reversal trend in case of immediate emission reduction (Source: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter1_Low_Res.pdf).

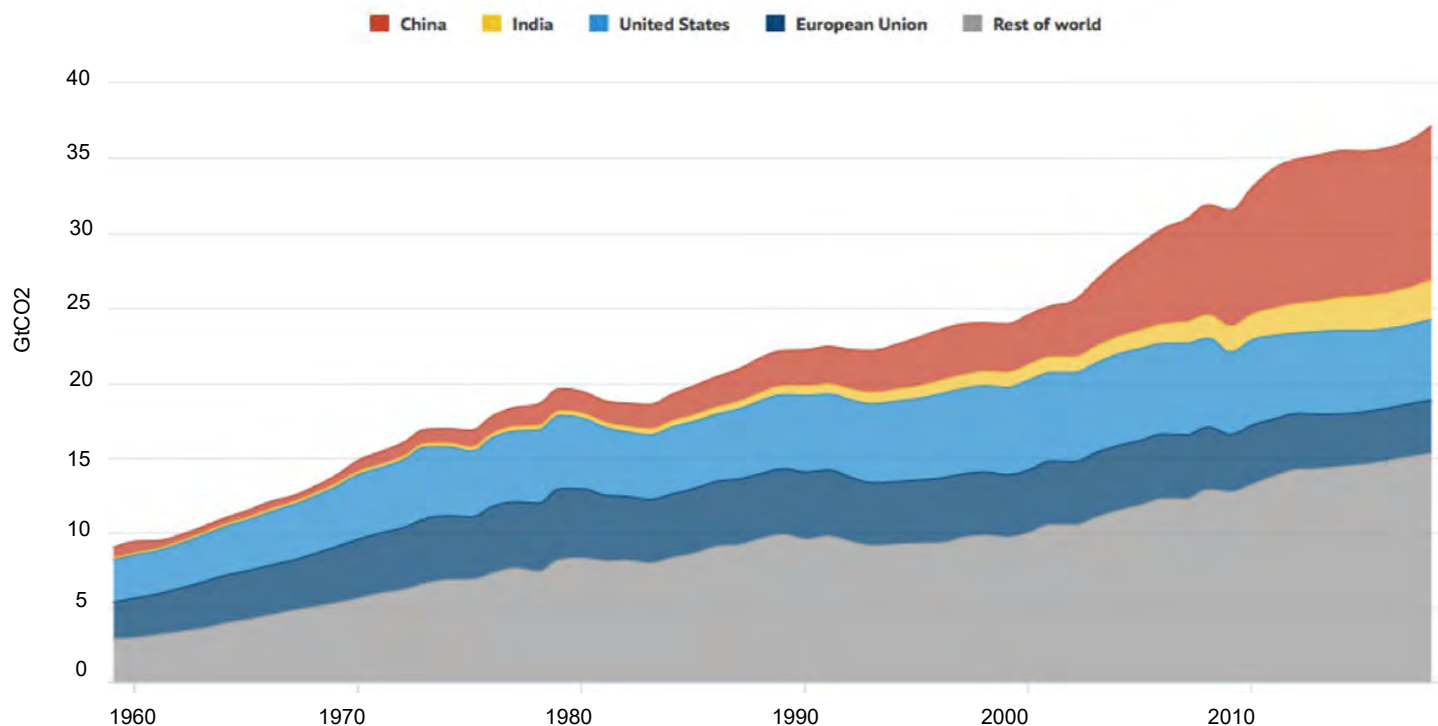


Fig. 3 - Emissioni annuali CO₂ da combustibili fossili per principali Paesi emettitori e per il resto del mondo (1959-2018), in miliardi di tonnellate di CO₂ l'anno (GtCO₂ a-1). Per il 2018 i dati sono stime preliminari / Annual CO₂ emissions from fossil fuels for major emitting countries and for the rest of the world (1959-2018), in billions of tons of CO₂ per year (GtCO₂ a-1). For 2018 the data are preliminary estimations (Source: Global Carbon Project).

condizione necessaria allo sviluppo di adeguate politiche e strategie di contrasto al surriscaldamento globale.

Concentrazione di CO₂ in atmosfera: misurazione e applicazione

La CO₂ presente in atmosfera si misura in % rispetto all'unità di volume o in ppm (parts per million). Tra le tecnologie di misurazione più comuni si segnalano: i rilevatori termici (utili soprattutto per determinare perdite di CO₂ da serbatoi o giacimenti di confinamento), i monitor a emissione continua (CEM) per la valutazione dell'efficienza di cattura e gli spettrometri laser a diodi per le misure atmosferiche. Le principali tecnologie di monitoraggio della CO₂ in atmosfera si basano sull'utilizzo di opportuni sensori, che sfruttano la Radiazione Infrarossa IR, o acceleratori per spettrometria di massa AMS (Accelerator Mass Spectrometry).

Nei laboratori del CNR è stata recentemente messa a punto una tecnologia di rilevamento unica e al momento ineguagliata. Trattasi della spettroscopia laser di altissima precisione, che consente di misurare le minime quantità di CO₂ presenti in natura (1

billion tons of CO₂ equivalent year).

Measurements of CO₂ concentrations in the atmosphere allow to make predictions about the future climate, also in order to define possible strategies to combat negative effects. The approaches to this type of study have changed considerably over the years: from the first political attempts based on the "command and control" principle of the Seventies, to the more effective market system "cap and trading" off the Kyoto Protocol in the Nineties and to the still more effective strategy that today aims to consider CO₂ as a good (not a waste) that can be economically valorised.

It is already possible today to use CO₂ in the agri-food industry as a preservative solution for food or beverage gasifier, in the chemical industry as a raw material for obtaining construction materials (polycarbonates) and in the production of fuels. A promising technology foresees the possibility of using solar furnaces to dissociate CO₂ into CO and O₂, and thus feeding fuel cells or loose carbonates (MCFC) to produce electricity and heat (ISPRA, 2018).

Solutions for the reduction of CO₂ in atmosphere

The European Platform on adaptation to the climate change launched in 2012 based on the objectives of the 2009 White

Paper provides useful tools to support policies to make Europe more resilient to the climate change. In the European strategy there is a strong reference to adaptation actions that can be implemented at the urban level. The Mayors Agreement, an initiative that involves 4,000 local authorities on a voluntary basis, aims to correlate these strategies with other policies for improving the quality of life in urban contexts.

In June 2015, with the Directive Decree n.86, Italy approved its own National Strategy for Adaptation to Climate Change (SNAC). To implement this strategy, in 2016 the process of multi-sectoral involvement and interaction between bodies, territories, politicians, experts and scholars was launched, which would shortly lead to the National Plan for Adaptation to Climate Change (PNACC). The PNACC has the main goal of identifying a set of connected and synergic activities for adaptation to climate change, articulating four specific objectives: limiting the vulnerability of natural, social and economic systems to the impacts of climate change, increasing adaptability, improving the exploitation of opportunities and encouraging the coordination of actions at different levels.

Within these guidelines, the Green City National Conference aims to support the commitment of cities to tackle climate change, opening a debate that can lead them to become active subjects. The second edition of the Conference, held at the Politecnico di Milano on the 16th of July 2016, had as its central theme the promotion and updating of the plans of measures for adaptation and mitigation. During the Conference, the Declaration for the Green City Climate Adaptation and the decalogue were presented: 1 - defining and updating plans and measures for climate adaptation in the cities; 2 - integrating adaptation measures with mitigation measures (renewable energies, energy

molecola di CO₂ ogni mille miliardi di molecole di anidride carbonica ordinaria). La tecnologia, che a tutt'oggi possiede una sensibilità almeno 1000 volte maggiore delle migliori tecnologie alternative esistenti, è già stata scientificamente validata e consentirà la portabilità di strumenti di misura di altissima precisione in tutto il mondo.

Le misurazioni sino ad oggi effettuate indicano che il tasso di crescita della concentrazione di CO₂ nell'aria è passato dal ritmo 11,4 miliardi di tonnellate (Gt) CO₂ l'anno nel periodo 1960/2008, a 34,4 GtCO₂ l'anno nel periodo 2008-2017. Nel 2018 l'articolo di un gruppo di ricercatori del *Global Carbon Project*, pubblicato sulla rivista *Earth System Science Data* in concomitanza con l'avvio del vertice sul clima (COP24) delle Nazioni Unite a Katowice (Polonia), quantifica il raggiungimento della cifra record di 37,1 miliardi di tonnellate di CO₂ equivalente anno.

Le misurazioni delle concentrazioni di CO₂ in atmosfera permettono di effettuare previsioni sul clima futuro, anche al fine di definire possibili strategie di contrasto degli effetti negativi. Gli approcci a questo tipo di studi sono cambiati notevolmente nel corso degli anni: dai primi tentativi politici basati sul principio "command and control" degli anni '70, si passa, negli anni '90, al più efficace sistema di mercato "cap and trading" del Protocollo di Kyoto e all'ancora più efficace odierna strategia che punta a considerare il CO₂ come una commodity (non un rifiuto) passibile di essere valorizzata anche economicamente.

È già oggi possibile utilizzare la CO₂ nell'industria agro-alimentare come conservante per i cibi o gassificatore di bevande, nell'industria chimica come materia prima per ottenere materiali da costruzioni (policarbonati) e nella produzione di combustibili. Una promettente tecnologia prevede la possibilità di usare fornaci solari per dissociare la CO₂ in CO e O₂, e così facendo alimentare celle a combustibili o carbonati sfusi (MCFC) per la produzione di energia elettrica e termica (ISPRA, 2018).

Soluzioni che influiscono sulla riduzione della CO₂ in atmosfera

La Piattaforma Europea sull'adattamento ai cambiamenti climatici lanciata nel 2012 a partire dagli obiettivi del Libro Bianco 2009 fornisce utili strumenti di sostegno alle politiche per rendere l'Europa più resiliente ai cambiamenti climatici. Nella strategia europea c'è un forte riferimento alle azioni di adattamento realiz-

Combustibili	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	gCO ₂ /kWh lorda									
Solidi	876,9	863,2	852,0	914,9	889,7	873,7	862,5	882,1	876,7	899,9
Gas naturale	530,2	519,1	480,4	396,2	388,2	381,8	384,5	369,8	373,1	365,0
Gas derivati	1.816,4	1.855,8	1.498,3	1.906,3	1.664,9	1.630,0	1.495,9	1.606,0	1.793,9	1.624,8
Prodotti petroliferi	683,5	674,0	713,0	675,1	681,1	614,9	629,4	566,0	584,9	564,6
Altri combustibili ^[1]	1,231,6	540,0	265,0	296,8	256,6	240,9	212,9	156,4	153,1	144,0
Altri combustibili ^[2]	2.463,1	2.439,8	1.253,1	1.394,8	1.385,8	1.373,1	1.385,9	1.322,5	1.323,1	1.294,3
Totale termoelettrico ^[1]	708,0	680,6	633,6	570,6	521,7	520,3	528,0	506,1	513,2	488,9
Totale termoelettrico ^[2]	708,2	681,7	638,0	581,8	544,0	546,3	560,3	555,5	574,5	544,0

[1] E' compresa l'elettricità prodotta da rifiuti biodegradabili, biogas e biomasse di origine vegetale.

[2] E' esclusa l'elettricità prodotta da rifiuti biodegradabili, biogas e biomasse di origine vegetale.

Tab. 1 - Fattori di emissione di anidride carbonica da produzione termoelettrica lorda per combustibile / Factors of CO₂ emission in the termoelectric production (Source: https://www.isprambiente.gov.it/files2018/pubblicazioni/rapporti/R_280_18_Emissioni_Settore_Elettrico.pdf).

zabili a livello urbano. Il *Patto dei Sindaci*, un'iniziativa cui hanno aderito su base volontaria oltre 4.000 autorità locali, ha l'obiettivo di correlare tali strategie alle altre politiche di miglioramento della qualità della vita nei contesti urbani.

Nel giugno 2015 con decreto direttoriale n.86 l'Italia ha approvato una propria *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (SNAC). Per dare attuazione a tale strategia, nel 2016 è stato avviato il processo di coinvolgimento e interazione multisettoriale fra enti, territori, politici, esperti e studiosi che da lì a breve avrebbe portato al *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (PNACC). Il PNACC ha l'obiettivo ultimo di identificare un set di attività connesse e sinergiche per l'adattamento ai cambiamenti climatici, declinando quattro obiettivi specifici: contenere la vulnerabilità dei sistemi naturali, sociali ed economici agli impatti dei cambiamenti climatici, incrementare la capacità di adattamento degli stessi, migliorare lo sfruttamento delle eventuali opportunità e favorire il coordinamento delle azioni a diversi livelli.

Nell'ambito di questi indirizzi, la Conferenza Nazionale delle Green City mira a supportare l'impegno delle città sul fronte del contrasto al cambiamento climatico, aprendo un dibattito che possa portarle a farsi soggetti attivi. La seconda edizione della Conferenza, svoltasi presso il Politecnico di Milano il 16 luglio 2016, ha avuto come tema centrale la promozione e l'aggiornamento dei piani delle misure per l'adattamento e la mitigazione. Nel corso della Conferenza sono stati presentati la *Dichiarazione per l'Adattamento climatico delle Green City* e il decalogo che ne struttura l'operatività: 1 - definire e aggiornare piani e misure per l'adattamento climatico nelle città; 2 - integrare le misure di adattamento con quelle di mitigazione (energie rinnovabili, risparmio energetico, mobilità sostenibile, economia circolare, ecc.); 3 - aggiornare la valutazione dei rischi e le misure di emergenza e di lungo termine (conoscenza degli impatti urbani del cambiamento climatico quale condizione per reggere gli effetti del cambiamento climatico); 4 - valorizzare le ricadute positive delle misure di adattamento contabilizzando i costi dovuti all'assenza di tali misure; 5 - sviluppare capacità adattive attraverso un processo di apprendimento continuo e continui aggiornamenti e circolazione delle buone pratiche; 6 - puntare di più sulle soluzioni basate sulla natura, di tipo multifunzionale, che offrono vantaggi di bioadattamento, qualità dell'aria, benessere sociale, riduzione del rischio idrogeologico; 7 - ridurre la vulnerabilità e i rischi delle precipitazioni intense riducendo l'impermeabilizzazione del suolo; 8 - affrontare gli effetti dell'isola di calore, anche attraverso le misure per il controllo bioclimatico degli edifici (radiazione solare, ventilazione, raffrescamento); 9 - promuovere investimenti nelle misure di adattamento, anche attraverso partenariati pubblico/privati e nuovi strumenti assicurativi; 10 - rafforzare la governance e il coordinamento degli uffici comunali e dei diversi livelli locale, regionale e nazionale, anche attraverso la partecipazione dei cittadini.

Al momento hanno già aderito al Protocollo più di quaranta realtà urbane di varia grandezza, tra cui Milano, Napoli e Roma. In questo contesto l'impiego delle soluzioni tecniche basate sulla natura (NBS), singolarmente o in modo sistematico e a rete sino a dar luogo a vere e proprie infrastrutture verdi e blu, riveste un ruolo centrale.

Il potenziale di assorbimento della CO₂ derivante da queste soluzioni - tree planting e forestazione, green roof, green walls, bio-basin - dipende dalle capacità di cattura e sequestro di carbonio da parte della vegetazione e del suolo (Davies et

savings, sustainable mobility, circular economy, etc.); 3 - updating risk assessment and emergency and long-term measures (knowledge of the urban impacts of climate change as a precondition to withstand the effects of climate change); 4 - enhancing the positive effects of adaptation measures by accounting for the costs due to the absence of such measures; 5 - developing adaptive skills through a continuous learning process and continuous updates and circulation of good practices; 6 - focusing more on the multi-functional nature-based solutions, which offer bio-adaptation, air quality, social well-being, reduction of hydrogeological risk; 7 - reducing the vulnerability and risks of intense precipitation by reducing soil sealing; 8 - facing the effects of the heat island, also through the measures for the bioclimatic control of buildings (solar radiation, ventilation, cooling); 9 - promoting investments in adaptation measures, including through public / private partnerships and new insurance instruments; 10 - strengthening the governance and coordination of municipal offices and of the different local, regional and national levels, also through the participation of citizens.

Currently, more than forty cities of different dimension have already joined the Protocol, including Milan, Naples and Rome.

In this context, the use of technical solutions based on nature (NBS), stand-alone or in a systematic and networked way such as real green and blue infrastructures, plays a central role.

The potential absorption of CO₂ deriving from these solutions - tree planting and forestation, green roofs, green walls, bio-basins - is based on the capturing and sequestration of carbon capacity of vegetation and soil (Davies et al., 2011; Pataki et al., 2006) and in any case requires a site specific punctual evaluation, because the performances can considerably vary even in relation to the conformation of the context and to the configuration of the adopted solutions. In coherence to their multifunctional nature, the benefits achievable through the NBSs and the GBIs must also be verified considering the possibility of integration with the mitigation policies and with the actions of adaptation. Indeed, it is relevant to consider the co-benefits terms of energy efficiency, improvement of the environmental quality and use of urban space.

In general terms, it can be assumed that, on an urban and district scale, the presence and/or the creation of large green areas and densely planted trees (large belt parks and large urban parks) can represent a significant resource in terms of "storage" of CO₂, more or less effective in relation to the leaf area index (LAI-Leaf Area Index) of the trees present, but certainly more significant than for example the green roofs or green walls.

The methods and tools for the evaluation of the capacity of sequestration of CO₂ of vegetation refer to direct measurements

(with extraction and weighing of the biomass from the root system of the plants) or to parametric estimations that take into account the characteristics of the trees (DBH- Diameter Breast Height), such as those at the base of the UFORE model developed by the USDA-United States Department of Agriculture, which can be implemented using the I-Tree software, which allows the calculation procedure to be adapted to the specificities of the environmental context and with reference to a high number of tree and shrub species.

al., 2011; Pataki et al., 2006) e richiede in ogni caso una valutazione puntuale *site specific*, perché le prestazioni possono variare in modo anche considerevole in relazione alla conformazione del contesto e alla stessa configurazione delle soluzioni adottate. In coerenza con la loro natura multifunzionale, i benefici conseguibili attraverso le NBS e le GBI devono inoltre essere verificati considerando la possibilità di integrare politiche di mitigazione e adattamento ad azioni di valorizzazione dei co-benefici derivanti ad esempio in termini di efficienza energetica e di miglioramento della qualità ambientale e fruitiva dello spazio urbano.

In termini generali si può assumere che, a scala urbana e di distretto, presenza e/o la formazione di aree verdi di grandi dimensioni e di densamente alberate (grandi parchi di cintura e parchi urbani di ampia estensione) possa rappresentare una risorsa rilevante in termini di “stoccaggio” di CO₂, più o meno efficace in relazione all’indice di area fogliare (LAI-Leaf Area Index) delle alberature presenti, ma certamente più significativa rispetto ad esempio ai green roof o ai green wall.

I metodi e gli strumenti per valutare la capacità di sequestro di CO₂ da parte della vegetazione fanno riferimento a misurazioni dirette (con estrazione e pesatura della biomassa direttamente dall’apparato radicale delle piante) o a stime parametriche che tengono conto delle caratteristiche delle alberature (DBH-Diameter Breast Height), quali quelle alla base del modello UFORE sviluppato dall’USDA-United States Department of Agriculture, implementabile attraverso l’utilizzo del software I-Tree, che consente di adattare il procedimento di calcolo alle specificità del contesto ambientale e con riferimento a un elevato numero di specie arboree e arbustive.

References

- Aengenheyster, M., Qing Yi Feng, Q., van der Ploeg, F. & Dijkstra H.A. (2018) “The point of no return for climate action: effects of climate uncertainty and risk tolerance”, *Earth Syem Dynamics*, vol. 9, pp. 1085-1095.
- Allen, M.R., Dube, O.P. , Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Zickfeld, K. et al.(2018), “Framing and Context”, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O., Pörtner, D., Roberts, J., Skea, P.R., Shukla, A., Pirani, W., Moufouma-Okia, C., Péan, R., Pidcock, S., Connors, J.B.R., Matthews, Y., Chen, X., Zhou, M.I., Gomis, E., Lonnoy, T., Maycock, M., Waterfield, T. et al.(eds), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter1_Low_Res.pdf (accessed 22 July 2019).
- IPCC (2018), *Special report: Global warming of 1,5°C*, available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (accessed 22 July 2019).
- ISPRA (2018), available at: http://www.isprambiente.gov.it/files2018/pubblicazioni/rapporti/R_280_18_Emissioni_Settore_Elettrico.pdf (accessed 22 July 2019).
- Maslin, M. (2004), *Global Warming, a very short introduction*, Oxford University Press, Oxford.

Websites

- Climate ADAPT, available at: <https://climate-adapt.eea.europa.eu>
- Decreto Direttoriale 16 giugno 2015, n. 86, available at: <https://www.minambiente.it/normative/decreto-direttoriale-16-giugno-2015-n-86-approvazione-del-documento-strategia-nazionale-di>
- Piano Nazionale di Adattamento ai cambiamenti Climatici (PNACC), available at: https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio_immagini/adattamenti_climatici/documento_pnacc_luglio_2017.pdf

Greenhouse Gases

Elena Mussinelli, *Politecnico di Milano*
Roberto Bolici, *Politecnico di Milano*
Daniele Fanzini, *Politecnico di Milano*
Giovanni Castaldo, *Politecnico di Milano*
Andrea Tartaglia, *Politecnico di Milano*

Contesto culturale e tecnico

Le emissioni in atmosfera di anidride carbonica (CO₂) e di altri gas che concorrono al cosiddetto “effetto serra” hanno ormai raggiunto una soglia critica, tanto da divenire oggetto di policy internazionali e di interventi per la mitigazione e l’adattamento al *climate change*. Infatti le emissioni dei cosiddetti Green House Gasses (GHG) sono riconosciute come impattanti sul riscaldamento globale (GWP - *Global Warming Potential*). La valutazione delle emissioni rispetto al GWP necessita di comparare situazioni ambientalmente diversificate. L’“impronta di carbonio” o *carbon footprint* (CF), è lo strumento normalmente utilizzato per definire la quantità di GHG derivante da un prodotto o un servizio antropico.

In generale, la misurazione della CF può essere applicata a un’ampia gamma di prodotti e processi, attraverso un approccio metodologico piuttosto complesso e articolato, che richiede valutazioni estese al loro ciclo di vita (LCA), in grado di individuare e quantificare sia le risorse impiegate che le emissioni generate lungo l’intera filiera produttiva, estendendole alle fasi d’uso e gestione, sino al fine vita (materie prime utilizzate, trasporti necessari, consumo di energia e altre risorse, produzione dei rifiuti, emissioni in aria, acqua o suolo, ecc.).

Fino a poco tempo fa non esisteva una definizione univoca e una modalità di misurazione e quantificazione della CF e delle emissioni di GHG da considerare per la misurazione del GWP. Allo stesso modo non erano chiare le unità di misura e i limiti da considerare nell’analisi.

La pubblicazione del 2013 “*Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification*” diventa riferimento normativo unico per la definizione della CF e per la costruzione della norma ISO 14067:2018¹, che definisce la CF come «l’ammontare totale di gas ad effetto serra emessi direttamente o indirettamente da un’attività, un prodotto, un’azienda o una persona, ed è un indicatore dell’impatto che le attività umane hanno sui cambiamenti climatici».

La CF è dunque un indicatore ambientale che misura l’impatto delle attività umane sul GWP considerando sia l’emissione diretta di CO₂, sia quella dei GHG indicati dal Protocollo di Kyoto (CH₄, N₂O, HFCs, SF₆, PFCs) e misurati in termini di “anidride carbonica equivalente” (CO₂eq). Tale quantificazione pondera il contributo di ogni gas all’aumento dell’effetto serra rispetto a quello della CO₂.

La CO₂eq è quindi l’unità di misura degli impatti sul GWP di una certa quantità

The technical and cultural context

The atmospheric emissions of carbon dioxide (CO₂) and other gases that contribute to the so-called “greenhouse effect” have now reached a critical threshold, so much so that they have become the subject of international policies and measures for the mitigation and adaptation to climate change. In fact, the emissions of the so-called Green House Gasses (GHG) are recognized as having an impact on global warming (GWP - Global Warming Potential). The assessment of emissions compared to GWP requires a comparison of environmentally diverse situations. The “carbon footprint” (CF) is the tool normally used to define the amount of GHG deriving from an anthropic product or service.

In general, the CF measurement can be applied to a wide range of products and processes, through a rather complex and articulated methodological approach, which requires assessments extended to their life-cycle (LCA), capable of identifying and quantifying both the resources and the emissions generated along the entire production chain, including the use and management phases, up to the end of life (raw materials used, necessary transport, consumption of energy and other resources, waste production, emissions to air, water or soil, etc.).

Until recently, there was no clear definition and no way of measuring and quantifying CF and GHG emissions to be considered for measuring GWP. In the same way, the units of measurement and the limits to be considered in the analysis were not clear.

The 2013 publication Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification becomes the regulatory reference for the definition of the CF and for the construction of the ISO 14067: 2018¹ standard, which defines the CF as «the total amount of greenhouse gases emitted directly or indirectly by an activity, a product, a company or a person, and it is an indicator of the impact that human activities have on climate change».

¹ Recepita dall’UNI ed entrata in vigore in Italia il 30 ottobre 2018 (UNI EN ISO 14067:2018).

¹ Recognized by UNI and come into effect in Italy on October the 30th 2018 (UNI EN ISO 14067:2018).

CF is therefore an environmental indicator that measures the impact of human activities on the GWP considering both the direct emission of CO₂ and that of the GHG indicated by the Kyoto Protocol (CH₄, N₂O, HFCs, SF₆, PFCs) and measured in terms of “carbon dioxide equivalent” (CO₂eq). This quantification weighs the contribution of each gas to the increase in the greenhouse effect compared to that of CO₂.

CO₂eq is therefore the unit of measurement of the impacts on the GWP of a certain amount of greenhouse gas compared to the same amount of carbon dioxide (CO₂) and is used to compare and sum together the contributions of the various GHGs².

In recent years, various reference standards have been developed which guarantee the methodology and correctness of measurements, and which constitute an effective system for comparing the CF of different products and services. The references most applied are: ISO 14044 Standard (PAS 2050, by the British Standard Institution <http://www.bsigroup.com/PAS2050>; WRI / WBCSD GHG Protocol Product Standard, developed by the World Resource Institute and World Business Council for Sustainable Development <http://www.ghgprotocol.org/standards>).

Measurement and application

There are two main fields of application for CF. The first is applied and it measures the so-called “product CF”. Generally expressed in tons of CO₂eq, it considers the overall emissions of all life stages, comparing them to the GWP of the CO₂ (taking into account the supply and treatment phases of the raw materials, those of processing for the production of the product / service, storage and transport, the use and management phase, end of life disposal). The second, defined as the “organization CF”³, considers the resources consumed and the emissions produced by the companies that deal with the production of goods and the provision of services.

These applications derive from the need to contain globally the GHG emissions. The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) of 1992 set for the first time the goal of stabilizing the concentration of greenhouse gases in the atmosphere. The Kyoto Protocol, the most important im-

2 The equivalences between CO₂ and GHG were developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, which associated with each gas a “global warming potential-GWP” comparable to the effects of CO₂ in a given interval of time, taking CO₂ as the reference gas (CO₂ GWP = 1).

3 For “Organization”, the ISO 14064 standard means both Companies and Supra-corporate organizational structures (such as holding companies, groups, etc.) but also, in a broader sense, individual construction sites, production sites, tenders, etc.

Inquinante	GWP
CO ₂ – Anidride carbonica	1
CH ₄ – Gas metano	21
N ₂ O – Ossido di diazoto	310
SF ₆ – Esafluoruro di zolfo	23900
PCF – Composti perfluorurati	6500 ÷ 9200
HFC – Idrofluorocarburi	140 ÷ 11700

Tab. 1 - GWP dei principali gas inquinanti / GWP of the main polluting gases (Source: IPCC, 2007).

di gas serra rispetto alla stessa quantità di anidride carbonica (CO₂) e viene utilizzata per confrontare e sommare tra loro i contributi dei diversi GHG².

Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi standard di riferimento che garantiscono la metodologia e la correttezza delle misure, e che costituiscono un sistema efficace per comparare la CF di prodotti e servizi diversi. I riferimenti maggiormente applicati sono: Standard ISO 14044 (PAS 2050, a cura del British Standard Institution <http://www.bsigroup.com/PAS2050>; WRI/WBCSD GHG Protocol Product Standard, sviluppato dal World Resource Institute e World Business Council for Sustainable Development <http://www.ghgprotocol.org/standards>).

Misurazione e applicazione

Due sono i principali campi di applicazione della CF.

Il primo è applicato e misura la cosiddetta “CF di prodotto”. Generalmente espressa in tonnellate di CO₂eq, considera le emissioni complessive di tutte le fasi di vita, rapportandole al GWP della CO₂ (la contabilità considera le fasi di approvvigionamento e trattamento delle materie prime costitutive, quelle di lavorazione per la produzione del prodotto/servizio, lo stoccaggio e i trasporti, la fase di utilizzo e gestione, lo smaltimento a fine vita). Il secondo, definito come la “CF di organizzazione”³, considera le risorse consumate e le emissioni prodotte dalle aziende che si occupano di produzione di beni e fornitura di servizi.

Tali applicazioni derivano dall’esigenza di contenere a livello globale le emissioni di GHG. La Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) del 1992 ha posto per la prima volta l’obiettivo di stabilizzare la concentrazione dei gas serra in atmosfera. Il Protocollo di Kyoto, il più importante strumento attuativo della Convenzione, ha imposto una riduzione delle emissioni di GHG pari ad almeno il 5% rispetto ai valori del 1990, impegnando i Paesi sottoscrittori ad adeguare di conseguenza le proprie emissioni, anche attraverso forme di cooperazione e criteri compensativi. Nel 2016 i partner della Conven-

2 Le equivalenze tra CO₂ e GHG sono state elaborate dal Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC), che ha associato a ogni gas un “potenziale di riscaldamento globale-GWP” equiparabile agli effetti della CO₂ in un dato intervallo di tempo, assumendo la CO₂ come gas di riferimento (GWP della CO₂=1).

3 Per “Organizzazioni” lo standard ISO 14064 intende sia Aziende o Strutture organizzative sovra-aziendali (quali Holding, Gruppi, etc.) ma anche, in senso più ampio, singoli cantieri, siti produttivi, appalti, etc.

zione hanno deciso nuove misure per limitare l'aumento medio della temperatura globale, riportandolo a valori inferiori a livelli pre-industriali. Per raggiungere tale obiettivo, oltre alle soluzioni di contrasto basate sui limiti all'emissione di GHG, è stata riconosciuta l'importanza di ridurre quelli già presenti in atmosfera.

I principali sono il vapore acqueo (H₂O), l'anidride carbonica (CO₂), il protossido di azoto (N₂O), il metano (CH₄), i fluorocarburi (PFC) e l'esasolfuro di zolfo (SF₆). Di origine sia naturale che antropica, ciascuno di essi ha uno specifico impatto sul sistema climatico il cui valore è calcolato considerandone la forzante

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency (W m ⁻² ppb ⁻¹)	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR ¹ (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO ₂	See below ^a	^b 1.4x10 ⁻⁶	1	1	1	1
Methane ^c	CH ₄	12 ^c	3.7x10 ⁻⁴	21	72	25	7.6
Nitrous oxide	N ₂ O	114	3.03x10 ⁻³	310	289	298	153
Substances controlled by the Montreal Protocol							
CFC-11	CCl ₃ F	45	0.25	3,800	6,730	4,750	1,620
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	0.32	8,100	11,000	10,900	5,200
CFC-13	CClF ₃	640	0.25		10,800	14,400	16,400
CFC-113	CCl ₂ CFClF ₂	85	0.3	4,800	6,540	6,130	2,700
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	300	0.31		8,040	10,000	8,730
CFC-115	CClF ₂ CF ₃	1,700	0.18		5,310	7,370	9,990
Halon-1301	CBrF ₃	65	0.32	5,400	8,480	7,140	2,760
Halon-1211	CBrClF ₂	16	0.3		4,750	1,890	575
Halon-2402	CBrF ₂ CBrF ₂	20	0.33		3,680	1,640	503
Carbon tetrachloride	CCl ₄	26	0.13	1,400	2,700	1,400	435
Methyl bromide	CH ₃ Br	0.7	0.01		17	5	1
Methyl chloroform	CH ₃ CCl ₃	5	0.06		506	146	45
HCFC-22	CHClF ₂	12	0.2	1,500	5,160	1,810	549
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	1.3	0.14	90	273	77	24
HCFC-124	CHClF ₂ CF ₃	5.8	0.22	470	2,070	609	185
HCFC-141b	CH ₃ CCl ₂ F	9.3	0.14		2,250	725	220
HCFC-142b	CH ₃ CClF ₂	17.9	0.2	1,800	5,490	2,310	705
HCFC-225ca	CHCl ₂ CF ₂ CF ₃	1.9	0.2		429	122	37
HCFC-225cb	CHClF ₂ CClF ₂	5.8	0.32		2,030	595	181
Hydrofluorocarbons							
HFC-23	CHF ₃	270	0.19	11,700	12,000	14,800	12,200
HFC-32	CH ₂ F ₂	4.9	0.11	650	2,330	675	205
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	29	0.23	2,800	6,350	3,500	1,100
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14	0.16	1,300	3,830	1,430	435
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	52	0.13	3,800	5,890	4,470	1,590
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	1.4	0.09	140	437	124	38
HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	34.2	0.26	2,900	5,310	3,220	1,040
HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	240	0.28	6,300	8,100	9,810	7,660
HFC-245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	7.6	0.28		3,380	1030	314
HFC-365mfc	CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃	8.6	0.21		2,520	794	241
HFC-43-10mee	CF ₃ CHFCF ₂ CF ₃	15.9	0.4	1,300	4,140	1,640	500
Perfluorinated compounds							
Sulphur hexafluoride	SF ₆	3,200	0.52	23,900	16,300	22,800	32,600
Nitrogen trifluoride	NF ₃	740	0.21		12,300	17,200	20,700
PFC-14	CF ₄	50,000	0.10	6,500	5,210	7,390	11,200
PFC-116	C ₂ F ₆	10,000	0.26	9,200	8,630	12,200	18,200

Tab. 2 - Conversione dei GHG in CO₂eq secondo diversi orizzonti temporali
(Source: Ricerche IPCC/TEAP, 2005).

plementing instrument of the Convention, imposed a reduction of GHG emissions of at least 5% compared to 1990 values, committing the signatory countries to adjust their emissions accordingly, also through forms of cooperation and compensatory criteria. In 2016, the partners of the Convention decided on new measures to limit the average increase in global temperature, bringing it back to values lower than pre-industrial levels. To achieve this goal, in addition to the contrast solutions based on the limits on the emission of GHG, the importance of reducing those already present in the atmosphere was recognized.

The main ones are water vapor (H₂O), carbon dioxide (CO₂), nitrous oxide (N₂O), methane (CH₄), fluorocarbons (PFC) and sulfur hexasulphide (SF₆). Of both natural and anthropic origin, each of them has a specific impact on the climate system whose value is calculated considering its forcing radiative, concentration and permanence in the atmosphere.⁴ Considering the quantities of GHG emitted into the atmosphere, it is possible to carry out analyzes, estimates and comparisons of their degree of contribution to the greenhouse effect and the determination of the quantity of CO₂eq in relation to the quantity of carbon dioxide (CO₂) (tab. 2).

The Figure 1 hows the variation of the contributions of single gases to the CO₂eq. from 1950 to 2016⁵, meanwhile the Figure 2 shows the increasing concertation of CO₂ in atmosphere for the last 50 years.

The conversion of a GHG into tons of CO₂eq also considers the time spent in the atmosphere. The conversion figure is currently valued on a 100-year basis.

The European Environment Agency (EEA) contemplates different methods for aggregating the concentration of GHG, as well as various units of measurement to express the potential of GWP associated with the individual gas. With reference to the first aspect, three different approaches are considered: grouping only the six gases produced by man considered by the Kyoto Protocol; grouping the Kyoto Protocol gases and the Montreal Protocol gases (chlorofluorocarbons, hydrochlorofluorocarbons and chloroform); considering all greenhouse gases including ozone, water vapor and aerosols⁶.

The EU Regulation n. 517 of 16th of April 2014 supplies the GWP of different mixtures and describes the method for calcu-

4 <https://climatepolicyinfohub.eu/glossary/co2eq>

5 <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-6/assessment/#fieldset-legend-a1683190941e4d41adeffc04b99599ae-0>

6 <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-6/assessment/#fieldset-legend-a1683190941e4d41adeffc04b99599ae-0>



Fig. 1 - Contributo dei gas alla CO₂eq dal 1950 al 2016 / Gases contributions to CO₂eq from 1950 to 2016 (Source: EEA).

lating the CO₂ of different aggregate gases. The method is based on the weighted average obtained from the sum of the weight fractions of the individual substances multiplied by the respective global warming potential (GWP), according to the formula:

$$\Sigma (\text{substance } X\% \times \text{GWP}) + (\text{substance } Y\% \times \text{GWP}) + (\text{substance } N\% \times \text{GWP}),$$

where% is the contribution by weight with a tolerance of $\pm 1\%$.

Normally the calculation methodology used to quantify GHG emissions is based on the multiplication between the "Activity data"⁷ and the corresponding "Emission factor"⁸.

Finally, the data collected contribute to the construction of an GHG inventory of the activity under consideration.

The limits of the evaluation are highlighted mainly in the following aspects:

- on the one hand, the availability of the "Activity data" considers whether the data are available, estimated and accurate and if the registration system needs improvement. The procedure defined by the standards provides assigning values on a scale from 1 to 3 as follows: data not available (1); estimated data (2); accurately calculated or reliably mea-

⁷ The "Activity Data" is the quantity, generated or used, which describes the activity, expressed in terms of energy (J or MWh, mass (Kg) or volume (mc or l).

⁸ The "Emission factor" is the factor that can transform the quantity into the consequent emission of GHG, expressed in CO₂ emitted per unit of given activity.

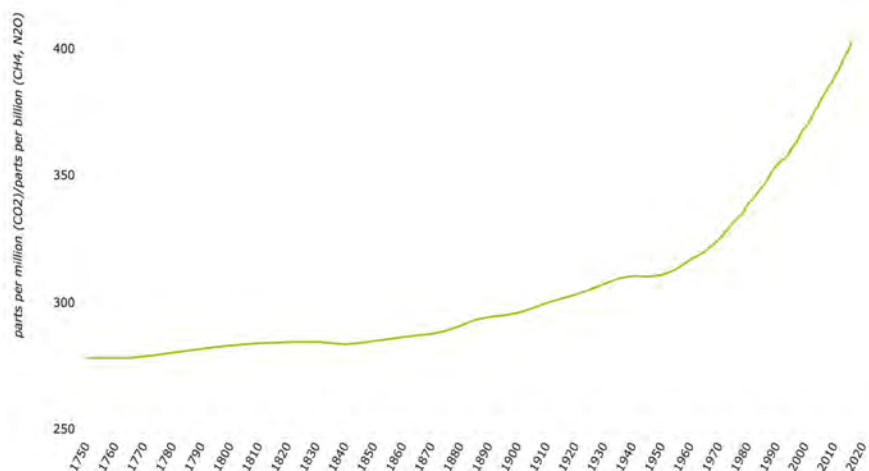


Fig. 2 - Andamento della concentrazione di CO₂ in atmosfera / CO₂ concentration in atmosphere (Source: European Environment Agency, 2019).

radiativa, la concentrazione e la permanenza in atmosfera.⁴ Partendo dai quantitativi di GHG emessi in atmosfera, è possibile effettuare analisi, stime e comparazioni del loro grado di contribuzione all'effetto serra e alla determinazione della quantità di CO₂eq in rapporto alla quantità di anidride carbonica (CO₂) (Tab. 2).

La Figura 1 indica il variare del contributo dei singoli gas alla CO₂eq dal 1950 al 2016⁵, mentre la Figura 2 mostra l'innalzamento della concentrazione di CO₂ in atmosfera degli ultimi 50 anni. La conversione in tonnellate di CO₂eq di un GHG considera anche il tempo di permanenza in atmosfera. Attualmente il dato di conversione è valutato su base 100 anni. L'Agenzia Europea per l'Ambiente (*European Environment Agency - EEA*) contempla diversi metodi per aggregare la concentrazione dei GHG, così come varie unità di misura per esprimere il potenziale di GWP associato al singolo gas. Con riferimento al primo aspetto sono considerati fondamentalmente tre diversi approcci: raggruppare i soli sei gas prodotti dall'uomo considerati dal Protocollo di Kyoto; raggruppare i gas del Protocollo di Kyoto e i gas del Protocollo di Montreal (clorofluorocarburi, idroclorofluorocarburi e cloroformio); considerare tutti i gas a effetto serra compresi ozono, vapore acqueo e gli aerosol⁶.

Il Regolamento (UE) n. 517 del 16/04/2014 fornisce il GWP di diverse miscele e descrive il metodo per calcolare la CO₂ di diversi gas aggregati. Il metodo si basa sulla media ponderata ottenuta dalla somma delle frazioni di peso delle singole sostanze moltiplicate per il rispettivo potenziale di riscaldamento globale (GWP), secondo la formula:

$$\Sigma (\text{sostanza } X \% \times \text{GWP}) + (\text{sostanza } Y \% \times \text{GWP}) + (\text{sostanza } N \% \times \text{GWP})$$

⁴ <https://climatepolicyinfohub.eu/glossary/co2eq>

⁵ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-6/assessment/#fieldsetlegend-a1683190941e4d41adef1c04b99599ac-0>.

⁶ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-6/assessment/#fieldsetlegend-a1683190941e4d41adef1c04b99599ac-0>

dove % è il contributo in peso con una tolleranza pari a ± 1 %.

Normalmente la metodologia di calcolo utilizzata per quantificare le emissioni di GHG è basata sulla moltiplicazione tra il “Dato attività”⁷ e il corrispondente “Fattore di emissione”⁸. I dati raccolti concorrono infine alla costruzione di un inventario dei GHG dell’attività presa in esame. I limiti della valutazione si evidenziano principalmente nei seguenti aspetti:

- da una parte la disponibilità del “dato attività” considera se i dati sono disponibili, stimati e accurati e se il sistema di registrazione necessita miglioramenti. La procedura definita dalle norme prevede di assegnare valori su una scala da 1 a 3 come segue: dati non disponibili (1); dati stimati (2); dati calcolati accuratamente o misurati in modo affidabile (3);
- dall’altra, l’affidabilità del “fattore di emissione” tiene in considerazione se il fattore risulta da una fonte attendibile quale, ad esempio, un’organizzazione nazionale o internazionale, oppure un gruppo indipendente; anche in questo caso la scala di riferimento va da 1 a 3 come segue: assenza di fattori di emissione (1); fattori di emissione riportati in riviste o database scientifici, ma non completamente rappresentativi delle condizioni del sito (2); fattori di emissione riportati da organizzazioni nazionali o internazionali o misurati in accordo con gli standard internazionali, e completamente rappresentativi delle condizioni del sito (3).

Ne risulta che la qualità della valutazione dipende dal grado di disponibilità del “Dato attività” e dall’affidabilità del “Fattore di emissione”. Più il punteggio conseguito sarà alto, più alto sarà il grado di affidabilità.

Soluzioni che influiscono sulla riduzione del GWP

In letteratura sono disponibili numerosi studi su metodologie e buone pratiche per la rimozione della CO₂ e/o dei GHG dall’atmosfera: si va dalle soluzioni di geo-ingegneria per la cattura e lo stoccaggio del carbonio nel sottosuolo, al rimboschimento diffuso, sino alla possibilità di utilizzare particolari tecnologie chimico/fisiche, come per esempio le basse temperature.

Williamson (2016) fornisce una sintesi di queste tecnologie, ponendo il tema fondamentale della valutazione della loro efficacia in rapporto alla scala di applicazione.

Nei contesti di rigenerazione urbana sostenibile e resiliente, le NBS (piantumazioni, bio-bacini di infiltrazione e ritenzione, prati, tetti e muri verdi) costituiscono una delle soluzioni più efficaci per l’assimilazione della CO₂ presente in atmosfera e per la riduzione di GHG. I benefici ecologico ambientali prodotti dall’uso di tali soluzioni non sono solo quelli diretti (assimilazione della CO₂, cattura degli inquinanti aerei, inclusi il GHG e l’NO₂), ma anche quelli che contribuiscono alla riduzione della CF di organizzazione e di prodotto (minori emissioni per la gestione delle acque nei sistemi idrici integrati e per la climatizzazione degli edifici).

I benefici ambientali connessi alla riduzione della CO₂eq da parte delle NBS, in ogni caso, possono variare - anche considerevolmente - in ragione delle condizioni climatiche e botaniche, e anche delle modalità di realizzazione dei sistemi naturali di infiltrazione (biobacini e tetti verdi).

sured data (3);

- on the other, the reliability of the “Emission factor” takes into account whether the factor is from a reliable source such as, for example, a national or international organization, or an independent group; also in this case the reference scale goes from 1 to 3 as follows: absence of emission factors (1); emission factors reported in scientific journals or databases, but not completely representative of the site conditions (2); emission factors reported by national or international organizations or measured in accordance with international standards, and fully representative of the site conditions (3).

As a result, the quality of the assessment depends on the degree of availability of the “Activity data” and on the reliability of the “Emission factor”. The higher the score, the higher the degree of reliability.

Solutions that affect GWP reduction

In literature, numerous studies are available on methodologies and good practices for removing CO₂ and / or GHG from the atmosphere: ranging from geoengineering solutions for the capture and storage of carbon in the subsoil, to widespread reforestation, up to possibility of using particular chemical/physical technologies, such as low temperatures.

Williamson (2016) provides an interesting summary of these technologies, placing the fundamental theme of evaluating their effectiveness and impact in relation to the scale of application.

In contexts of sustainable and resilient urban regeneration, NBS (plantations, bio-infiltration and retention basins, lawns, roofs and green walls) constitute one of the most effective solutions for the assimilation of the CO₂ present in the atmosphere and for the reduction of GHG.

The ecological environmental benefits produced by the use of these solutions are not only direct (assimilation of CO₂, capture of air pollutants, including GHG and NO₂), but also those that contribute to the reduction of the organization and product CF (lower emissions for water management in integrated water systems and for building air conditioning).

The environmental benefits associated with the reduction of CO₂eq by the NBS, in any case, can vary - also considerably - due to the climatic and botanical conditions, as well as to the methods of realization of the natural infiltration systems (bio-basins and green roofs).

7 Il “Dato attività” è la quantità, generata o utilizzata, che descrive l’attività, espressa in termini di energia (J o MWh, massa (kg) o volume (mc o l)).

8 Il “Fattore di emissione” è il fattore che può trasformare la quantità nella conseguente emissione di GHG, espressa in CO₂ emessa per unità di dato attività.

UBICAZIONE E CARATTERISTICHE					INDICATORI									
	Ubicazione in Progetto	Numero	Impianto	Emissione VOC	Minor consumo kWh (*)		Rimozione inquinanti aerei (**)				CO2 (***)		Deflusso acque meteoriche evitato dalle chiome (****)	
U.M.		Nr.	m		KWh/albero*anno	Kg CO2eq.*albero/anno	Kg.*albero/anno				Kg CO2eq.*albero/anno	Kg CO2*albero/anno	l/albero*anno	KgCO2eq./mc*anno
			Altezza albero al momento dell'impianto				O3	PM10	SO2	NO2	Equivalente	Assimilata		
Celtis Australis	Via Serio lato Sud	21	8/10	Bassa	136	66,4904	0,130	0,143	0,265	0,186	55,428	325	2150	0,5418
Liriodendron Tulipifera	Via Ampola	6	8/10	Media	136	66,4904	0,25	0,21	0,425	0,32	95,36	430	1570	0,39564
Liquidambar styraciflua	Via Ampola	6	8/10	Media	136	66,4904	0,13	0,127	0,35	0,11	32,78	320	1450	0,3654
Fraxinus Hornus	Giardino Sud	8	4-6	Bassa	48	23,4672	0,35	0,125	0,05	0,1	29,8	59	625	0,1575
Pyrus calleryana	Giardino Nord	4	4-6	Medio-Bassa	67	32,7563	0,05	0,05	0,1	0,05	14,9	84	200	0,0504
Tilia platyphyllos	Giardino Nord e Sud	10	16-20	Bassa	136	66,4904	0,3	0,152	0,32	0,6	178,8	231	2000	0,504
Ligustrum lucidum	Via Ampola- Via Serio- Giardino Nord-Est	100	1,5	Bassa			0,08	0,05	0,1	0,09	26,82	23		
Photinia red Robin	Via Ampola- Via Serio- Giardino Nord-Est	80	1,8	Bassa			0,08	0,05	0,1	0,09	26,82	23		
(*)	Valori di riduzione desunti da bibliografia (CNT, 2010, McPherson E., et Al., 2006). Valore di produzione di CO2eq. per kWh prodotto è assunto pari a 0,4889 Kg (ISPRA 2017)													
(**)	I valori unitari sono stati desunti dal database qualiviva e dalla simulazione fatta con il software I-Tree eco v.6 sull'area di progetto. Per la determinazione della CO2 equivalente il valore assunto è di 298 Kg di CO2 eq. per Kg di NO2 rimosso (IPCC,2007)													
(***)	I valori unitari di CO2 assimilata per anno sono stati desunti dal database qualiviva e mediati dalla simulazione fatta con il software I-Tree eco v.6 sull'area di progetto													
(****)	I valori unitari sono stati desunti dalla simulazione fatta con il software I-Tree eco v.6 sull'area di progetto e riportati alla media di piovosità decennale (1086 mm di pioggia/anno) misurata dalla centralina ARPA via Juvara, Milano ID stazione 502. Per il calcolo della CO2 equivalente il valore di 0.252 Kg/mc*anno è stato desunto dall'analisi dell'impronta di carbonio della società CAP Holding SPA per gli anni 2016 e 2017 (CAP Holding, bilancio ambientale), riferita all'attività di trattamento delle acque meteoriche (reti e depuratori).													

Tab. 4 - Esempio di conversione in CO₂eq dei benefici ecologico ambientali derivanti da piantumazione nel contesto di Milano / *Example of conversion in CO₂eq of the ecological environmental benefits deriving from planting in Milan* (Source: Progetto Proxima, bando C40 - elaboration by Davide Cerati).

References

- Carbon Footprint of Nations, available at: <http://carbonfootprintofnations.com/>
- Cerati, D. (2019), *Nature-based Solutions and open spaces regeneration. Methods, tools and indicators for environmental design and assessment*, Tesi di Dottorato, Politecnico di Milano, XXXI ciclo, Relatore: prof. Andrea Tartaglia, Tutor: prof. Elena Mussinelli.
- De Groot, R. (2010), *Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation*, TEEB, pp. 9-40.
- European Commission, Joint Research Center (2007), *Carbon Footprint - what it is and how to measure it*
- Gohar, L. & Shine, K. (2007), "Equivalent CO₂ and its use in understanding the climate effects of increased greenhouse gas concentrations", *Weather*, Nov 2007, pp. 307-311
- Heggermont, H. (2015), "Nature-based Solutions: New Influence for Environmental Management and Research in Europe", *GAIA - Eco. Persp. on Science and Society*, 24(4), pp. 243 - 248
- Hertwich, E. & Peters, G. (2009), "Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis". *Environ. Sci. Technol.*, 43(16), pp. 6414–6420.
- Luciani, R., Masoni, P., Santino D. (2011), "Indicatori di sostenibilità ambientale: la carbon footprint", *Energia, Ambiente e Innovazioni*, vol. 3.
- Pernigotti, D. (2007), *Come affrontare i cambiamenti climatici*, Il Sole 24 Ore, MilanWo.
- Pernigotti, D. (2011), *Carbon Footprint – Calcolare e comunicare l'impatto dei prodotti sul clima*. Edizioni Ambiente.
- United Nations Environment Program, Climate Change, available at: <http://www.unep.org/climatechange/>
- Williamson P. (2016), "Emission reduction: Scrutinize CO₂ removal methods, Nature", *Inter. weekly Journal of Science*, 530(7589), pp. 153-155.

Websites

- <https://climatepolicyinfohub.eu/glossary/co2eq>
- <https://www.minambiente.it/pagina/la-storia-degli-accordi-internazionali-sul-clima>
- <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-6/assessment/#fieldsetlegend-a1683190941e4d41adef1c04b99599ae-0>