



Un indicatore di esposizione della popolazione ai CEM generati da SRB: analisi, validazione e primi risultati

Elena Fusillo¹, Chiara Pedrolì², Sara Adda², Enrica Caputo², Alessandro Bonino², Giuseppe Baldazzi³

¹Arpae Emilia-Romagna, Servizio Sistemi Ambientali - Unità Coordinamento CEM Area Est, Via Settembrini 17/D, Rimini (RN)

²Arpa Piemonte, Dipartimento Rischi Fisici e Tecnologici, via Jervis 30, Ivrea (TO)

³Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia "Augusto Righi", Viale Bertini Pichat 6/2, Bologna (BO)

efusillo@arpae.it, c.pedroli@arpa.piemonte.it

INTRODUZIONE

L'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici a radiofrequenza generati da stazioni radiobase è un fattore di interesse in relazione sia alla definizione dell'effettivo impatto di tali sorgenti sul territorio, sia ai possibili effetti sulla salute, da indagare anche tramite studi epidemiologici.

La stima dell'esposizione tramite misure ha una significatività limitata nel tempo e nello spazio, per cui non costituisce un metodo ottimale in relazione alle finalità degli studi epidemiologici (Bhatt et al., 2022 - Boussad et al., 2022 - Chiaramello et al., 2019 - Kurnaz et al., 2020), che richiedono di poter caratterizzare i livelli di esposizione in aree ampie e per periodi prolungati (anche indietro nel tempo rispetto a quando gli effetti sulla salute vengono registrati). Per i motivi sopra illustrati, un indicatore basato sul calcolo dell'esposizione a partire dai dati tecnici delle sorgenti (contenuti in un catasto), costituisce uno strumento più flessibile e adattabile a differenti obiettivi.

Il calcolo teorico delle emissioni di sorgenti per telecomunicazioni costituisce quindi un'utile sorgente di informazione sui livelli di emissione, da sovrapporre poi ai dati sulla popolazione possibilmente esposta nelle aree di interesse. L'indicatore ottenuto in questo modo, rappresentando la percentuale di popolazione esposta a determinati valori di campo elettrico, è in grado di fornire un'informazione sintetica, utile per tutti gli obiettivi sopra descritti.

Il lavoro qui illustrato è stato orientato all'analisi dei fattori che, nella procedura per il popolamento dell'indicatore, possono influire sulla rappresentatività del dato ottenuto rispetto alle reali condizioni di esposizione. Inoltre, particolare cura è stata posta alla definizione delle modalità di rappresentazione del dato che permettano di garantire una corretta comunicazione, a ricercatori e cittadini, di come questo indicatore varia sul territorio.

METODI

SCELTA DEL MODELLO E DEI PUNTI DI CALCOLO

Per poter popolare l'indicatore, è sicuramente necessario stimare innanzitutto i valori di campo elettrico generato dalle stazioni radio base che insistono sul territorio, ancor prima di effettuare considerazioni sulla distribuzione della popolazione.

I valori di campo elettrico sono stati calcolati applicando il modello di *campo libero* ovvero non considerando l'interazione della radiazione elettromagnetica con gli ostacoli presenti (es. edifici) e di *campo lontano* così da avere un rapporto costante tra campo elettrico e campo magnetico e poter quindi descrivere completamente la radiazione mediante un unico valore.

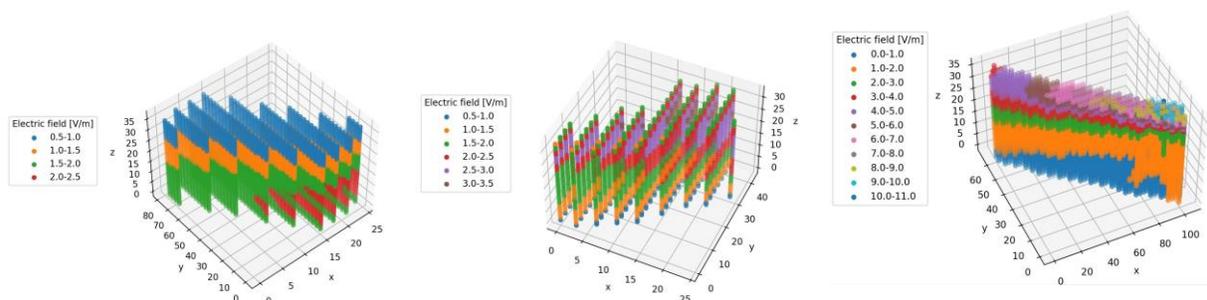
La scelta del modello di campo libero e lontano è dettata da fattori quali la relativa semplicità e la disponibilità dei dati di input necessari (sia a livello di sorgenti che di ambiente di propagazione) e le risorse di calcolo meno onerose rispetto ad algoritmi più complessi (quali ray-tracing), che rendono fattibile il calcolo su scala vasta.

La difficoltà risiede nell'identificare e giustificare un valore di campo elettrico che possa soddisfare i criteri di *significatività* e *rappresentatività* dell'esposizione della popolazione, dove questo in prima analisi può anche essere un valore sovrastimato, cioè *prudente* secondo il principio di precauzione adottato nelle valutazioni preventive sull'esposizione ai campi elettromagnetici.

Operativamente, nei software di simulazione è necessario decidere il numero e la collocazione dei punti di calcolo sul territorio considerato. Tale scelta va effettuata cercando di bilanciare la necessità di avere la massima rappresentatività dell'esposizione possibile, unitamente ad avere un criterio facilmente scalabile e snello per poter estendere il calcolo dell'indicatore su scale sempre più ampie. Questo perché un indicatore, per sua natura, deve essere agevolmente popolabile e replicabile a tutte le scale in cui esso mantiene il suo significato.

Un approccio di simulazione di elevato livello di dettaglio è quello di considerare i valori simulati di campo elettrico su griglie tridimensionali di punti corrispondenti al volume degli edifici dell'area considerata, con maglie di 3 metri x 3 metri x 1 metro in altezza (fig. 1). Da un'analisi di queste distribuzioni di campo elettrico simulato su grigliato 3D, ricavate in alcune aree di studio nella città di Torino, si nota come siano presenti casi anche molto diversi tra loro.

Figura 1 - Valori di campo elettrico simulato all'interno del grigliato tridimensionale 3m*3m*1m



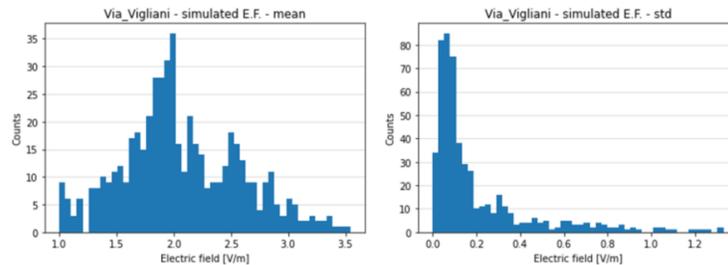
A - Maggiore esposizione ai piani inferiori

B - Caso standard, maggiore esposizione ai piani superiori

C - Edificio sede di installazione SRB, ampia variabilità verticale

Si è quindi cercato di descrivere la variabilità del campo elettrico simulato all'interno dei volumi degli edifici dell'area di studio calcolando, per ciascuno di essi, i principali indicatori statistici (i.e. media e deviazione standard). Considerando la moltitudine di edifici presenti in un'area di studio, è stato possibile mostrare la distribuzione di tali statistiche tramite gli istogrammi in fig. 2.

Figura 2 - Istogrammi degli indicatori statistici dei valori simulati di campo elettrico nel grigliato tridimensionale di tutti gli edifici dell'area di studio



A sinistra: istogramma delle medie per edificio; a destra: istogramma dei valori di deviazione standard per edificio

Ogni valore mostrato negli istogrammi è il risultato dell'aggregazione di tutti i valori simulati del campo elettrico appartenenti a ogni singolo edificio. Pertanto, la distribuzione delle deviazioni standard assume un'importanza significativa poiché descrive la variabilità dei valori del campo elettrico simulato all'interno dei singoli edifici in ciascuna area di interesse. Essa è piccata su valori bassi, inferiori a circa 0.5 V/m. Ciò significa che, per la maggior parte, il campo elettrico simulato all'interno di ogni edificio ha una bassa variabilità. Infatti, i casi in cui c'è una variabilità significativa nel campo elettrico sono quelli in cui, come illustrato nella fig. 1C, l'edificio ospita l'installazione della stazione base o è molto vicino ad essa (grande variabilità verticale - caso di installazione SRB). Questi casi possono, quindi, essere limitati a un piccolo numero di edifici rispetto a tutti gli edifici che vengono considerati.

Da questo approccio dettagliato, è ragionevole pensare che il valore medio di campo elettrico dei punti simulati nel volume di ogni edificio sia rappresentativo dell'esposizione nell'intero edificio, a meno di piccole variazioni.

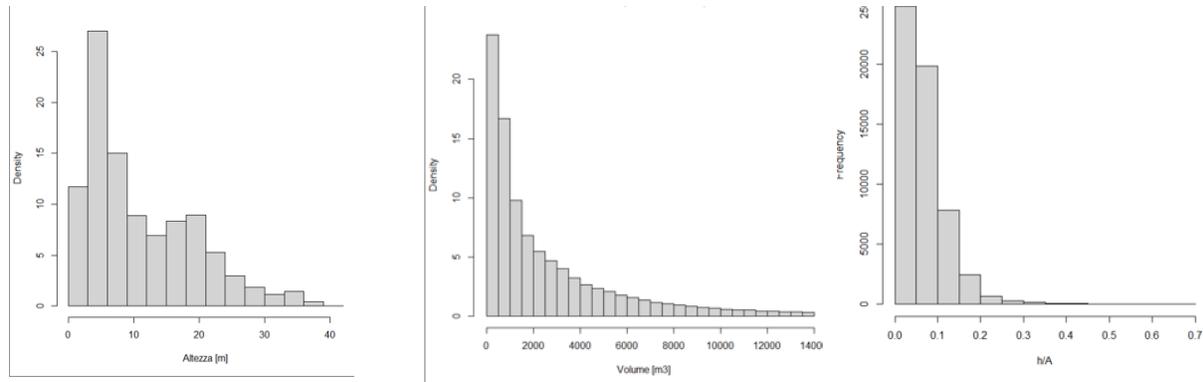
Questo primo approccio diventa però svantaggioso se si deve gestire una grande quantità di dati del campo elettrico quando si estende il calcolo dell'indicatore a grandi scale territoriali.

Una possibile soluzione, con l'obiettivo di semplificare e consentire una più facile scalabilità del metodo, consiste nel considerare il valore del campo elettrico simulato in un singolo punto all'interno del volume occupato da ciascun edificio. Poiché esiste un solo punto per ciascun edificio, deve avere tre coordinate spaziali ben giustificate.

Orizzontalmente (cioè per le coordinate X, Y), è ragionevole considerare il centroide come la posizione più adatta per rappresentare un edificio. Tuttavia, permane l'incertezza sulla coordinata Z di questo punto, ossia l'altezza di valutazione rispetto al suolo. Per chiarire questa incertezza, si è condotto uno studio in merito alla distribuzione delle altezze degli edifici per la Città metropolitana di Torino.

L'analisi dell'edificato è stata effettuata selezionando gli edifici in cui è possibile la permanenza di persone (si è scelto di individuare quelli con altezza della gronda inferiore a 40m e con area di base maggiore di 50m², escludendo le destinazioni d'uso che esplicitamente non rimandano a possibile permanenza prolungata), studiando quindi le distribuzioni di altezze, volumi e del parametro pesato determinato come altezza/area. La finalità è stata di cercare un'altezza che fosse rappresentativa della permanenza prolungata di un'elevata percentuale di popolazione.

Figura 3 - istogrammi dei parametri relativi all'edificato della città di Torino



A - Distribuzione altezze

B - Distribuzione volumi

C - Distribuzione altezze pesate

Dalle distribuzioni riportate in fig. 3 è stato possibile dedurre che, per la città di Torino, l'altezza più significativa varia, a seconda del parametro analizzato, tra i 5.0 ed i 7.5m s.l.s., corrispondente al secondo o terzo piano fuori terra.

Per poter decidere quale delle due altezze utilizzare in maniera standardizzata, si è riscontrato che, per singola area di interesse, i valori più frequenti nelle distribuzioni di campo elettrico simulato nei soli punti centroidi alle due altezze non variano significativamente tra loro. Inoltre, dalla comparazione di queste distribuzioni con la distribuzione dei valori medi di campo elettrico dei punti simulati per l'intero volume di ciascun edificio considerato, si evince che esse sono confrontabili.

Si ritiene quindi soddisfacente assumere la quota di 5.0 m s.l.s. come preferibile per la stima puntuale del campo elettrico nei centroidi, così da poter garantire anche continuità con gli studi precedenti in cui erano presenti dati di popolazione con maggior dettaglio (Canal et al., 2024).

L'utilizzo di un approccio di simulazione puntuale ad un'altezza prestabilita permette, oltre che di ridurre le risorse di calcolo necessarie, di sganciarsi dalla necessità di avere a disposizione una cartografia tridimensionale dell'edificato (*shapefile*), aumentando l'accessibilità del metodo.

ANALISI DEI DATI DI CAMPO ELETTRICO NELLE SEZIONI DI CENSIMENTO

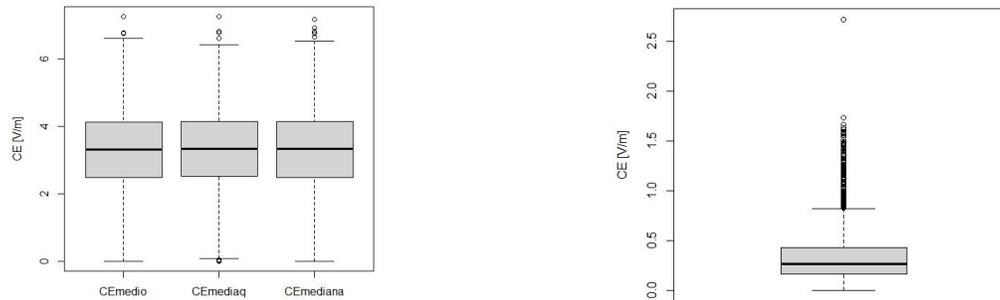
Una volta definito il metodo per il calcolo dell'esposizione, è necessario lavorare sulla sovrapposizione del dato con le informazioni relative alla distribuzione della popolazione sul territorio.

In riferimento alla popolazione, sono stati richiesti all'Istat i dati più aggiornati, ricevendo il dato di popolazione censita al 2021, aggregata per le sezioni di censimento del 2011. La scelta del metodo di costruzione dell'indicatore ha tenuto conto anche della disponibilità dei dati, poiché ad esempio non risulta disponibile il numero di residenti distribuiti per edificio e tantomeno per piano. Si è quindi definito di procedere alla caratterizzazione dell'esposizione a livello di sezioni di censimento.

Un'ulteriore valutazione ha riguardato la scelta del valore di campo elettrico rappresentativo di ogni sezione di censimento. A questo scopo si è effettuata l'analisi dei principali indici statistici della distribuzione dei valori di campo per ogni sezione di censimento, nell'intero comune di

Torino. In fig. 4A si riportano i boxplot di campo elettrico, considerando la media, la media quadratica, la mediana. Come si osserva dal grafico, le distribuzioni dei tre indici statistici sono confrontabili. Inoltre, in fig. 4B è riportato il boxplot della deviazione standard, da cui risulta come nelle sezioni di censimento non ci sia generalmente una grande dispersione dei valori di campo negli edifici.

Figura 4 - Boxplot dei principali indici statistici della distribuzione di campo elettrico nelle sezioni di censimento



A - Distribuzione campo elettrico: media lineare, media quadratica, mediana

B - Distribuzione della deviazione standard

Poiché i diversi indici statistici sono confrontabili, per comodità si è scelto di assegnare alla popolazione residente in ciascuna sezione di censimento Istat 2011 la *media* dei valori di campo elettrico simulati nei punti centroidi degli edifici di tale sezione, valutati alla quota di 5.0m s.l.s..

VALIDAZIONE TRAMITE MISURE

Allo scopo di effettuare una prima validazione del metodo messo a punto, si è proceduto con un confronto tra i risultati del modello di calcolo e le misure effettuate in campo nella stessa area di test. A questo scopo, le valutazioni teoriche sono state effettuate considerando i parametri radioelettrici e i fattori di riduzione degli impianti autorizzati, ottenendo così la stima del massimo campo elettrico mediato su 24 ore. Le misure in campo considerate (datate 2022-2023) sono invece acquisite su periodi brevi (circa 6 minuti), sia outdoor che indoor, a varie altezze rispetto al suolo e per vari edifici all'interno di quattordici sezioni di censimento nell'area di test.

Sono quindi stati calcolati gli scarti tra i risultati del modello e i valori misurati. Indagando in particolare lo scarto che si ottiene considerando unicamente le misure outdoor, si riporta di seguito lo scarto relativo percentuale tra il valore di campo elettrico medio delle misure considerate ed il valore medio stimato, per ogni sezione di censimento (formula 1). Tale selezione è stata effettuata allo scopo di considerare le misure che fotografino le reali condizioni in campo, senza l'influenza delle possibili attenuazioni dovute delle pareti degli edifici.

$$\Delta_{EF^2} [\%] = \left(\frac{\mu_{EF}^2 \text{ misure outdoor} - \mu_{EF}^2 \text{ simulato centroidi}}{\mu_{EF}^2 \text{ simulato centroidi}} \cdot 100 \right)_{\forall \text{ sezione di censimento}} \quad (1)$$

Tabella 1 - Scarto relativo percentuale tra i valori di campo elettrico misurato e simulato per 14 sezioni di censimento. Media aritmetica di tali scarti.

	SEZ2011	Δ_{EF^2} w/ outdoor measurements [%]
1	12720000208	-96
2	12720000234	-73
3	12720000137	-71
4	12720000146	-89
5	12720000123	+27
6	12720000045	-82
7	127200003132	-70
8	12720000441	+27
9	12720000053	-45
10	12720000170	-99
11	12720000459	-25
12	12720000688	-77
13	12720000080	+4
14	12720001022	-73
	$\mu_{\Delta_{EF^2}}$ [%]:	-53

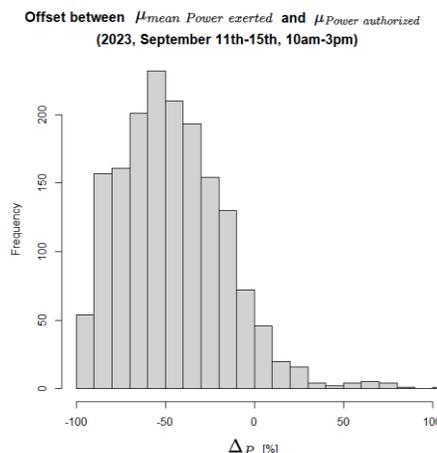
Calcolando lo scarto relativo percentuale Δ_{EF^2} per le quattordici diverse sezioni di censimento in cui si disponeva di misure outdoor, si è notato come mediamente esso si sia attestato attorno al -53% (tab. 1).

Da notare che la presenza del quadrato sui valori di campo elettrico nella formula (1) deriva dal rapporto quadratico che intercorre tra potenza e campo elettrico, così da poter correlare questo tipo di scarto (Δ_{EF^2} [%]) con lo scarto che è stato analizzato riguardo i valori di potenza (Δ_P [%]).

Infatti in maniera analoga, per gli impianti nell'area di simulazione è stato calcolato lo scarto relativo percentuale tra il valore medio di potenza media esercita dalle stazioni radio base ed il valore medio delle potenze autorizzate (formula 2). A tale scopo, sono stati considerati i contatori di potenza (Caputo et al., 2022) delle sole ore centrali (fascia oraria 10:00-15:00) di una settimana lavorativa tipo (da lunedì 11/09/2023 a venerdì 15/09/2023).

$$\Delta_P [\%] = \left(\frac{\mu_{potenza\ media\ esercita} - \mu_{potenza\ autorizzata}}{\mu_{potenza\ autorizzata}} \cdot 100 \right) \quad \forall\ ora\ considerata \quad (2)$$

Figura 5 - Distribuzione delle frequenze dello scarto relativo percentuale tra potenze esercite ed autorizzate delle Stazioni Radio Base nel 2023



Il risultato di tali considerazioni è mostrato in fig. 5, dove è riportata la distribuzione delle frequenze dello scarto relativo percentuale sulle potenze Δ_P . Si nota come la moda di tale distribuzione, cioè il valore che compare più frequentemente, ricada nell'intervallo tra il -60% ed il -50%.

Come anticipato, le formule 1 e 2 di questi scarti sono state costruite proprio per poter essere messe a confronto. Poiché la media dello scarto sulle misure in campo Δ_{EF^2} sembra ricadere all'interno dell'intervallo più frequente degli scarti sulle potenze degli impianti Δ_P , si può ipotizzare che essi siano tra loro dipendenti.

Ciò potrebbe confermare l'ipotesi circa la significativa influenza delle potenze effettivamente impiegate in condizioni di esposizione reale rispetto a quelle autorizzate nel calcolo dell'indicatore. Al fine di confermare quanto ipotizzato e quantificare una correzione da applicare al risultato della simulazione per ottenere dati di esposizione più prossimi alle misure, si è quindi proceduto ad ulteriori approfondimenti, sia tramite misure effettuate allo scopo, sia tramite una più ampia analisi dei contatori di potenza.

Allo scopo di ampliare la validazione, in questa fase sono state individuate una serie di sezioni di censimento in diverse zone della città, per le quali erano disponibili misure adeguate alla validazione stessa.

In tab. 2 sono riportati gli scarti Δ_{EF^2} tra le misure e i valori teorici, ricavati con la formula (1).

Per ogni sezione di censimento, nelle prime colonne vengono riportati il numero di misure disponibili e il numero di centroidi nei quali è stato effettuato il calcolo teorico. Sono poi riportati il valore medio delle misure, il valor medio delle misure eseguite in esterno e il valore medio delle stime teoriche nei centroidi. Nella colonna a destra vi sono gli scarti percentuali tra il valore medio delle misure e la media dei valori teorici, considerando solamente le misure outdoor, così come calcolato per l'area di analisi (tab. 1).

Tabella 2 - Confronto tra campo elettrico medio misurato e simulato per 4 sezioni di censimento

Census_section	N_meas	N_cent	EF_mean_meas [V/m]	EF_mean_meas_out [V/m]	EF_mean_theo [V/m]	Δ_{EF^2}
12720001157	8	28	1.24	1.53	3.35	-79.27%
12720003021	5	68	1.71	2.30	1.43	158.00%
12720000208	9	18	1.19	1.09	3.43	-89.98%
12720000146	11	18	1.17	1.49	3.14	-77.39%

Per ogni sezione di censimento sono riportati: numero di misure, numero di centroidi degli edifici; media di campo elettrico nei punti di misura, media di campo elettrico per le misure outdoor; media di campo elettrico simulato nei centroidi; scarto relativo percentuale tra media di campo da misure outdoor e media di campo simulato

Come prima considerazione si osserva come vi sia una sezione con uno scarto percentuale positivo, che rappresenta il caso in cui il valore stimato risulta minore rispetto al misurato. Ciò è dovuto al fatto che il numero di misure non è sufficientemente significativo per il calcolo dell'esposizione media, soprattutto se rapportato alla media delle valutazioni teoriche, calcolata su un numero molto maggiore di punti. Ciò pone l'attenzione sull'importanza di avere un numero

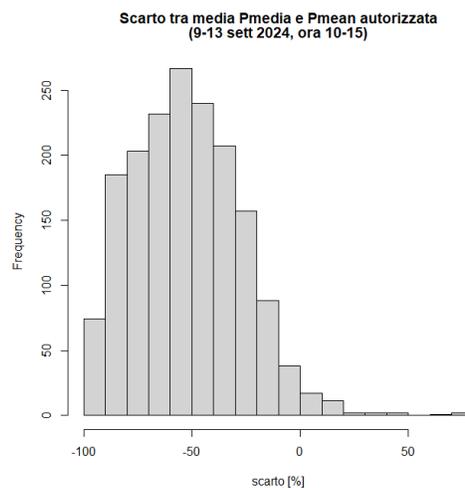
di misure e un numero di centroidi che non sia troppo diverso, né troppo al di sotto della decina, al fine di avere una buona statistica.

In riferimento alle altre sezioni di censimento, gli scarti risultano invece confrontabili, in un range tra il -77% e il -90%.

Così come per l'area di test, si è effettuata l'analisi della distribuzione degli scarti tra potenze medie esercite e potenze medie autorizzate per l'intero comune di Torino, considerando una settimana campione, identificata con la settimana 9-13 settembre 2024 e nella fascia oraria 10:00-15:00, in analogia all'analisi precedente. Dalla fig. 6 si evince come la distribuzione degli scarti delle potenze sull'intero territorio comunale corrisponda alla distribuzione dell'anno precedente e in un'area di test.

Infatti, anche in questo caso la classe a maggior frequenza è quella tra -50% e -60%. Questo scarto risulta discostarsi maggiormente da quelli ottenuti dalle misure rispetto a quanto ottenuto nell'area di test. A tale proposito, nei successivi paragrafi viene indagata l'influenza della non visibilità degli impianti rispetto ai punti di misura e/o valutazione.

Figura 6 - Distribuzione dello scarto relativo percentuale tra le potenze esercite ed autorizzate delle Stazioni Radio Base nel 2024



ANALISI DEI FATTORI CORRETTIVI

Data la volontà di avvicinare il più possibile l'indicatore ad una stima della *reale* esposizione della popolazione, si rende necessario considerare la potenziale applicazione di fattori correttivi per giustificare gli scarti evidenziati. Questi non possono essere basati solamente su misure di validazione in campo, le quali è inevitabile che siano influenzate dal periodo e dal luogo in cui vengono effettuate. Le considerazioni espone in questo paragrafo tendono a proporre una giustificazione per fattori correttivi possibilmente validi per la città di Torino.

Viste le analisi dei contatori di potenza riportate nel precedente paragrafo, e dato che gli scarti tra valutazioni e misure outdoor sembrano ben correlabili con l'effettivo esercizio della potenza delle SRB, si deduce che un primo fattore di correzione può venire proprio dall'analisi dei contatori.

In particolare, per ragioni di significatività statistica, si ritiene che sia opportuno considerare come fattore di correzione la moda della distribuzione degli scarti di potenza (fig. 5 e fig. 6), che sia nel

2023 che nel 2024 era nell'intervallo tra -50% e -60%. Per il popolamento dell'indicatore su Torino, si è quindi scelto di applicare un primo fattore di correzione pari alla radice del valore dello scarto (-55%).

Come ulteriore approfondimento, in alcune sezioni di censimento si è calcolato il rapporto tra i valori medi misurati e il valore teorico medio dei baricentri, prendendo in considerazione in un primo step le sole misure outdoor e in seguito le misure indoor.

I risultati sono riportati nella tabella seguente, dove sono evidenziate in grigio le colonne riferite alle misure outdoor e in azzurro quanto riferito alle misure indoor.

Tabella 3 - Confronto tra campo elettrico medio misurato e simulato - distinzione misure outdoor e indoor

Census_section	N_meas	N_centri	EF_mean_meas [V/m]	EF_mean_meas_out [V/m]	EF_mean_meas_in [V/m]	EF_mean_theo [V/m]	meas_out/theo	meas_in/theo
12720001157	8	28	1.24	1.53	0.77	3.35	45.53%	22.98%
12720003021	5	68	1.71	2.30	0.83	1.43	160.62%	57.62%
12720000208	9	18	1.19	1.09	1.30	3.43	31.66%	38.02%
12720000146	11	18	1.17	1.49	0.78	3.14	47.55%	24.80%

Dai valori riportati in tab. 3 si osserva come la percentuale del valore misurato outdoor rispetto al valore stimato ricada in un range tra il 30% e il 50%, eccetto per la sezione n. 3021 che si differenzia rispetto alle altre, come visto nell'analisi degli scarti descritta nel paragrafo precedente (tab. 2). Come ci si attende, per le misure indoor risulta una maggiore riduzione (tab. 3, ultima colonna), presumibilmente dovuta alle attenuazioni delle pareti degli edifici o in generale la condizione di non visibilità.

Per indagare questo aspetto si è proceduto ad effettuare l'analisi di visibilità (Bogo et al., 2023) degli impianti più vicini (250 metri di distanza dai punti) rispetto ai punti di misura e ai centroidi degli edifici.

In tab. 4, nelle ultime due colonne sono riportate, per i punti di misura e per i centroidi, la media della percentuale di impianti non visibili.

Tabella 4 - Analisi di visibilità

Census_section	N_meas	N_centri	EF_mean_meas [V/m]	EF_mean_meas_out [V/m]	EF_mean_meas_in [V/m]	EF_mean_theo [V/m]	meas_out/theo	meas_in/theo	Non visibility BSs (from measuring points)	Non visibility BSs (from centroids)
12720001157	8	28	1.24	1.53	0.77	3.35	45.53%	22.98%	66%	100%
12720003021	5	68	1.71	2.30	0.83	1.43	160.62%	57.62%		
12720000208	9	18	1.19	1.09	1.30	3.43	31.66%	38.02%	40%	100%
12720000146	11	18	1.17	1.49	0.78	3.14	47.55%	24.80%	72%	100%

Nelle ultime due colonne, analisi di visibilità: media in percentuale del numero di impianti non visibili rispetto ai punti di misura (colonna 10) e rispetto ai centroidi (colonna 11)

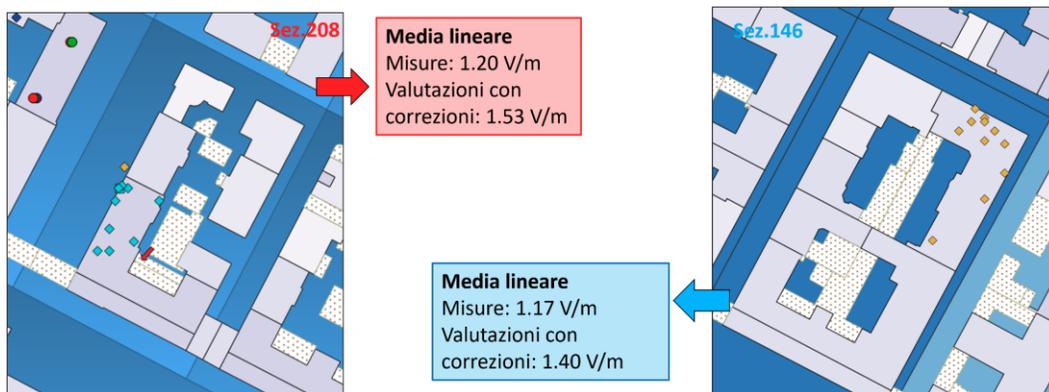
I risultati mostrano come, rispetto ai baricentri, gli impianti considerati risultino tutti in condizione di non visibilità, e che rispetto ai punti di misura risultino comunque alcuni impianti non in visibilità.

Alla luce delle analisi sopra esposte, si ritiene ragionevole considerare che, in un contesto urbano di condizione simile a quello analizzato, vi sia almeno un ostacolo (una parete) tra le persone esposte e le sorgenti, sia nei luoghi outdoor che indoor. Per questo, è stato scelto di applicare al campo calcolato in spazio libero un ulteriore fattore di correzione, rappresentativo dell'attenuazione introdotta da una parete.

Sulla base di un'analisi della letteratura sui dati di attenuazione delle pareti (Stone W. NISTIR 6055 - Rudd et al., 2014 - ITU-R, 2021 - NIST, 1997 - Suchanski et al., 2012 - ITU-P, 2019, e appendice D della guida CEI 211-10), è stato scelto di introdurre un fattore di attenuazione pari a 4 dB, che è il dato applicabile per i segnali sotto i 3 GHz.

Applicando entrambi i fattori di correzione, e tornando a confrontare la media di valutazione teorica e misure nelle sezioni di censimento sopra analizzate, è emerso che gli scarti si riducono significativamente, come visibile negli esempi di fig. 7.

Figura 7 - Esempio in due sezioni di censimento: confronto tra valore medio misurato e valore medio stimato con l'applicazione dei fattori di attenuazione



RISULTATI

Sulla base degli aspetti metodologici sopra descritti, sono stati messi a punto la procedura di popolamento dell'indicatore, gli strumenti per l'automatizzazione del calcolo (script R) ed infine le modalità di rappresentazione del dato.

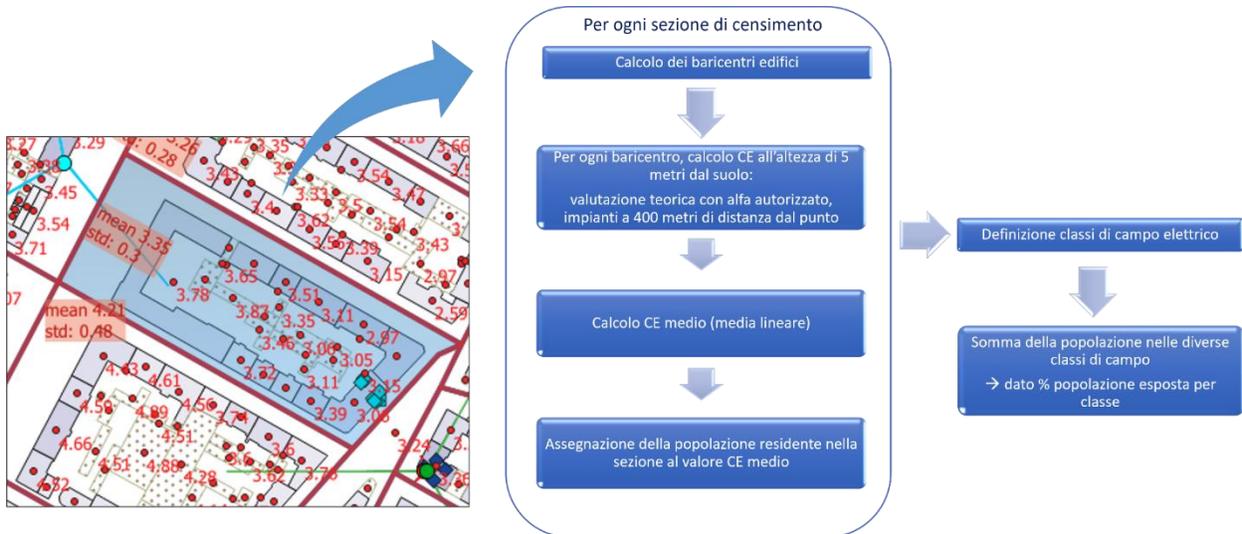
In particolare, ai fini del calcolo dell'esposizione è stato deciso di considerare, per ciascun punto, il contributo degli impianti nel raggio di 400 m. Questa scelta permette di non rendere il calcolo troppo oneroso, ma di considerare comunque i contributi più significativi all'esposizione (vedere anche par.8.2.1 della guida CEI 211-10).

Il campo elettrico viene calcolato come campo medio sulle 24 ore (applicazione del fattore α_{24} ove presente, o comunque dei fattori di riduzione della potenza dichiarati in fase autorizzativa), ed ai valori calcolati può venire applicato il fattore di correzione opportuno.

Il dato di popolazione residente viene poi aggregato per intervalli definiti di valori di campo elettrico, sommando i residenti delle sezioni a cui è associato un valore di campo elettrico medio ricadente in un determinato intervallo.

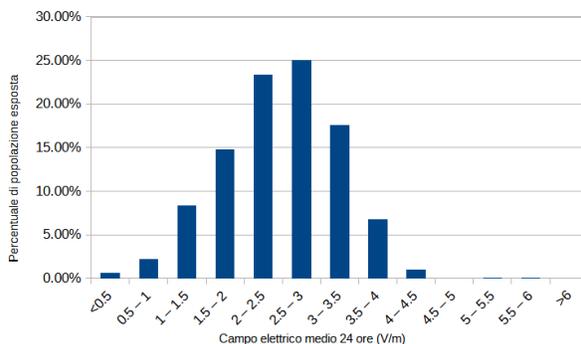
In fig. 8 è dettagliato l'intero procedimento.

Figura 8 - Procedura di popolamento dell'indicatore

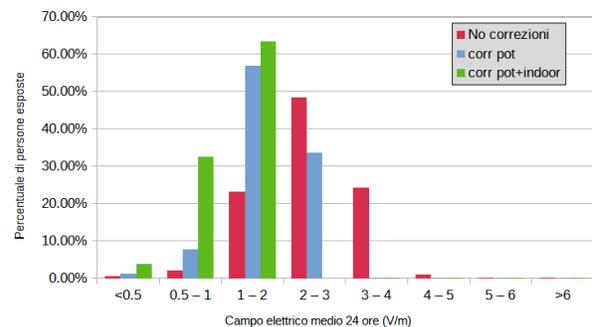


Il primo popolamento dell'indicatore è stato effettuato per la città di Torino tenendo conto della situazione degli impianti a catasto ad aprile 2024, e della popolazione totale residente in città nel 2021. Nella fig. 9 è possibile vedere il risultato in termini di percentuale di popolazione esposta ai vari livelli, prendendo in considerazione diverse ampiezze degli intervalli di campo elettrico, e applicando o meno le correzioni individuate.

Figura 9 - Popolamento dell'indicatore - Torino, aprile 2024



Popolamento dell'indicatore con intervalli di campo elettrico di 0.5 V/m (dato senza correzioni).



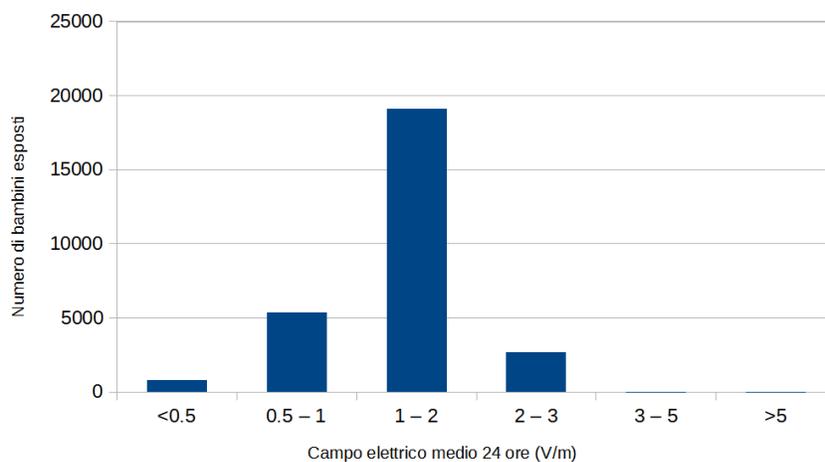
Popolamento indicatore con intervalli di campo elettrico più ampi e con applicazione successiva dei due fattori di correzione individuati.

Dalla fig. 9 è possibile vedere come siano caratterizzabili gli andamenti delle distribuzioni della popolazione nei vari intervalli di esposizione. Gli intervalli di ampiezza 0.5 V/m (valore compatibile con la dispersione del dato di campo elettrico all'interno di ciascuna sezione di censimento) permettono una più raffinata analisi statistica dell'indicatore, ma ai fini della comunicazione

sintetica del dato di esposizione, anche gli intervalli più ampi (fino ad 1 V/m) risultano significativi. Con tali intervalli è possibile comunque distinguere chiaramente l'influenza dell'applicazione dei fattori di correzione sulla forma delle distribuzioni.

Il metodo messo a punto ha poi permesso di ricavare informazioni su specifiche situazioni di esposizione. Ad esempio, è stato possibile verificare la situazione della popolazione infantile esposta a campi elettromagnetici (ad es., popolazione sotto i 5 anni nel 2021, oggi in età scolare). In fig. 10 è riportato il risultato di questa analisi, ricavato con i dati di valutazione di luglio 2024, e considerando il contributo delle correzioni.

Figura 10 - Distribuzione del numero di bambini residenti a Torino nelle diverse classi di esposizione



Numero di bambini (al di sotto dei 5 anni da censimento 2021) esposti ai valori di campo elettrico calcolati a luglio 2024, considerando il contributo delle correzioni (esposizione realistica)

RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI

La rappresentazione dei risultati del popolamento dell'indicatore è un fattore rilevante per la comunicazione dell'informazione associata, che dipende anche dall'obiettivo che si vuole raggiungere.

Parlando ad esempio dell'uso dei dati nell'ambito di studi epidemiologici, può essere di interesse che l'informazione sia fornita in termini di numero di persone esposte a determinati livelli di campo elettrico, nelle diverse aree indagate dallo studio.

Se invece l'indicatore deve essere utilizzato per finalità di analisi dell'andamento nel tempo dei livelli globali di esposizione, oppure per ragioni di pianificazione territoriale o delle attività di monitoraggio e controllo da parte delle agenzie, può essere più utile una rappresentazione della percentuale di popolazione esposta (sfruttando quindi un dato normalizzato, che rende più semplici i confronti tra diversi periodi o diverse aree territoriali).

Per questo motivo, sono state testate diverse modalità di rappresentazione del dato, che vengono di seguito descritte.

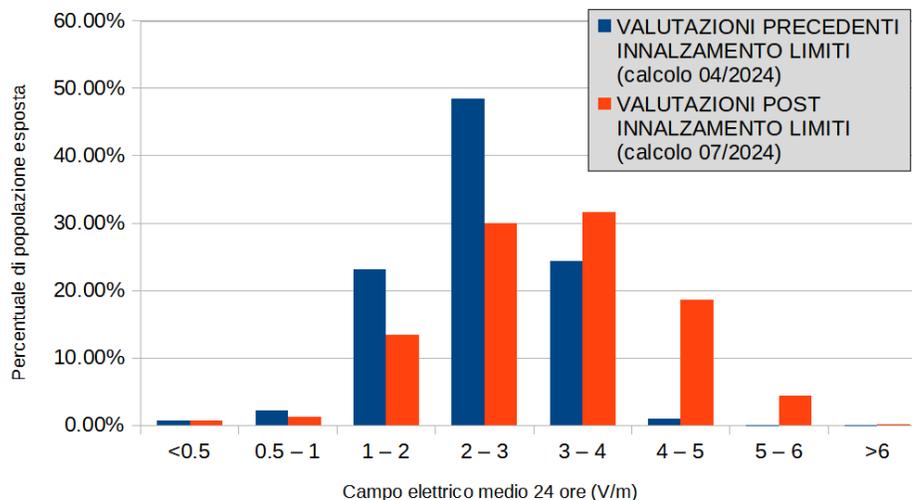
Rappresentazione in forma di istogramma

Il metodo dell'istogramma si presta bene sia a rappresentare il dato percentuale, sia quello assoluto di numero di persone esposte.

Il primo esempio è quello della comparazione dell'esposizione in due diversi periodi, che vede rappresentate in fig. 11 le distribuzioni della percentuale di popolazione esposta prima e dopo le recenti modifiche normative sui livelli di esposizione nella città di Torino. Il dato riportato è quello dei livelli di campo calcolati senza correzioni, con la finalità di dare un'indicazione dei massimi valori di esposizione potenzialmente raggiungibili.

L'immagine permette di evidenziare facilmente gli eventi che modificano le esposizioni, sintetizzando l'impatto di tali eventi, ad esempio in termini di variazione del valore più probabile dei livelli di campo elettrico a cui la popolazione può essere esposta, che in questo caso è passato dall'intervallo 2-3 V/m a quello 3-4 V/m.

Figura 11 - Confronto tra la percentuale di popolazione della città di Torino potenzialmente esposta in specifici intervalli di valori di campo elettrico prima e dopo le modifiche normative del 2024.

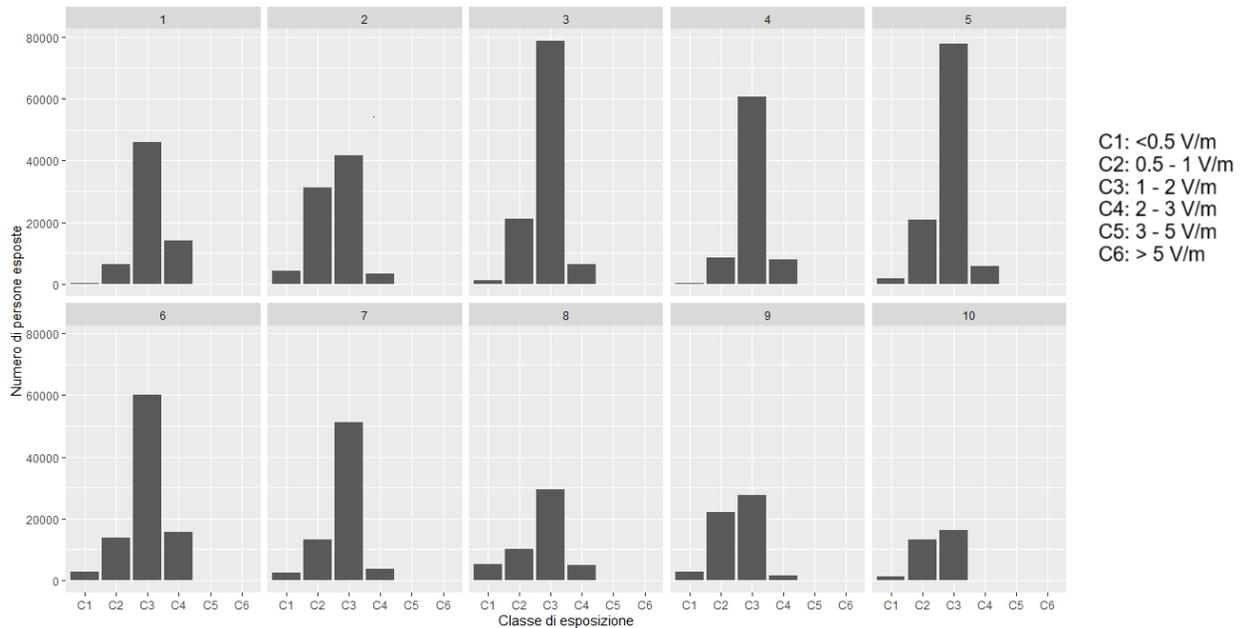


I livelli di campo elettrico sono stimati senza correzioni

La stessa rappresentazione ad istogramma può fornire anche una diversa informazione, utile ad esempio per la pianificazione di uno studio epidemiologico. In fig. 12, è riportata la rappresentazione delle distribuzioni del numero di persone esposte nelle 10 circoscrizioni della città di Torino. Il dato riportato è quello dei livelli di campo calcolati con le correzioni ricavate in questo lavoro, con la finalità di dare un'indicazione dei valori medi di esposizione effettiva della popolazione.

Da un'immagine di questo tipo è possibile ricavare l'informazione su quali delle circoscrizioni sono caratterizzate da un maggiore numero di persone esposte a livelli significativi, con una chiara indicazione di quali siano questi livelli, anche al fine di un'eventuale correlazione con patologie specifiche rilevate nelle aree indagate.

Figura 12 - Istogrammi del numero di persone esposte nelle classi di valori di campo elettrico per le 10 circoscrizioni della città di Torino



Ciascun istogramma è riferito alla circoscrizione con il numero riportato nel titolo del grafico. Le classi di esposizione corrispondono ai valori di campo elettrico calcolati a luglio 2024, considerando il contributo delle correzioni.

RAPPRESENTAZIONE SU MAPPA

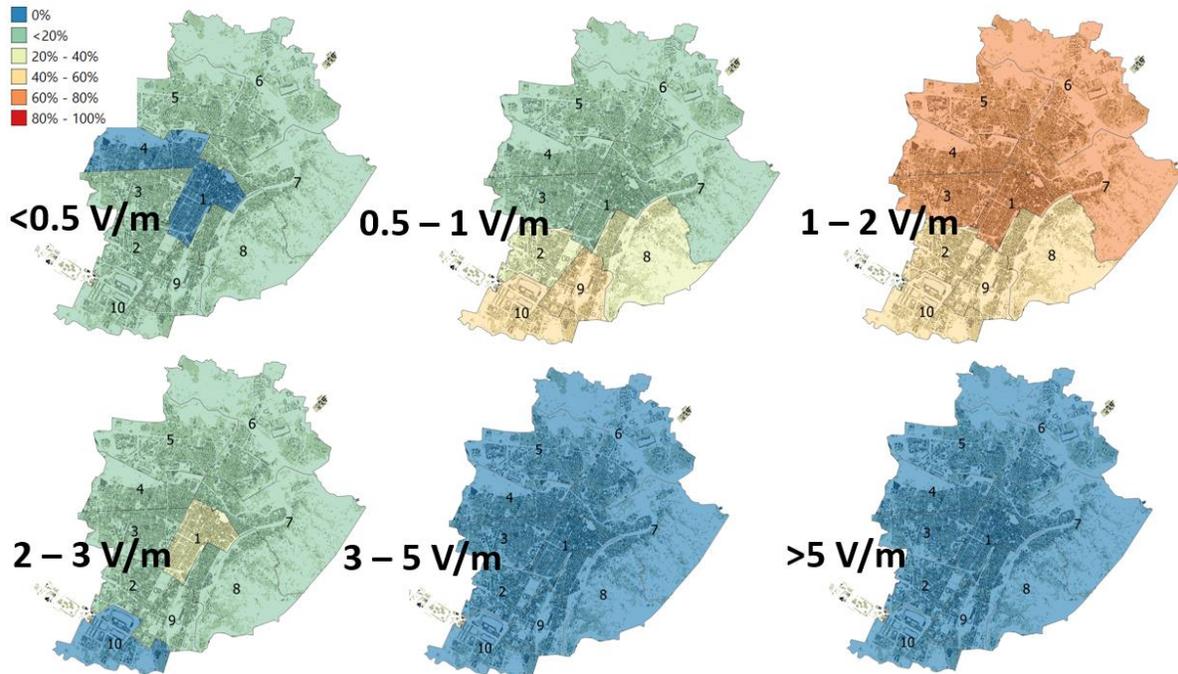
La rappresentazione geografica è uno strumento utile per il confronto tra aree diverse, ai fini ad esempio della pianificazione di azioni di monitoraggio e controllo, o di azioni politiche volte alla definizione di progetti per la minimizzazione dell'esposizione o di campagne di informazione della popolazione.

In fig. 13 la percentuale di popolazione esposta negli intervalli di campo elettrico fissati è riportata sulla mappa delle circoscrizioni della città di Torino (valori di campo elettrico calcolati tenendo conto delle correzioni prima individuate). Questa immagine permette di identificare in modo immediato ed intuitivo in quali zone della città la distribuzione dell'indicatore si sposta verso valori più elevati dei livelli di esposizione per una percentuale significativa della popolazione residente.

È importante evidenziare che la visualizzazione dell'indicatore su mappa fornisce un'informazione più completa rispetto alle classiche mappe con i livelli di campo elettrico, in quanto la sovrapposizione con il dato di popolazione permette una più immediata identificazione dell'impatto delle stazioni radiobase su un determinato territorio.

Ad esempio, le circoscrizioni 2 ed 8 sono caratterizzate da una distribuzione molto differente dei livelli di campo elettrico medi nelle varie sezioni di censimento (in genere più elevati nella sezione 2 rispetto alla 8), ma hanno distribuzioni della percentuale di popolazione esposta del tutto analoghe.

Figura 13 - Mappa della percentuale di popolazione esposta ai diversi intervalli di campo elettrico nelle 10 circoscrizioni della città di Torino



Il colore delle circoscrizioni è determinato dalla percentuale di popolazione esposta nella classe di campo elettrico riportata sopra ciascuna mappa

CONCLUSIONI

Il lavoro qui illustrato ha permesso di esplorare tutti i passaggi che portano alla definizione di un metodo per il popolamento di un indicatore di esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici generati da stazioni radiobase.

L'analisi svolta ha portato alla realizzazione di uno strumento facilmente applicabile su diverse scale e con differenti obiettivi, in grado di garantire una buona rappresentatività del dato ottenuto rispetto alle reali condizioni di esposizione. Inoltre, particolare cura è stata posta alla definizione delle modalità di rappresentazione del dato che permettano di garantire una corretta comunicazione, a ricercatori e cittadini, di come questo indicatore varia sul territorio.

I risultati così ottenuti forniscono quindi una fotografia dell'esposizione sulle 24 ore, in grado di seguire bene la variabilità spaziale e temporale del fenomeno. Tale dato può essere un utile input per gli studi epidemiologici, ma anche uno strumento di pianificazione per le attività di monitoraggio e controllo e di comunicazione del rischio.



Bibliografia

Bhatt CR, Henderson S, Brzozek C, Benke G. *Instruments to measure environmental and personal radiofrequency-electromagnetic field exposures: an update*. Phys Eng Sci Med. 2022 Sep;45(3):687-704. doi: 10.1007/s13246-022-01146-y. Epub 2022 Jun 23. PMID: 35737222; PMCID: PMC9448713. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9448713/>

Bogo F., Bonino A., Facta S., Vaccarone M., Pedroli C., Brandimarte L., Tagliaro G., *Metodo per la stima di campo elettromagnetico in condizioni di Non Line of Sight*, 2023, Atti del Convegno Nazionale Airp di Radioprotezione

Boussad Y, Chen XL, Legout A, Chaintreau A, Dabbous W. *Longitudinal study of exposure to radio frequencies at population scale*. Environment International 2022; Volume 162:107144. ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107144>

Canal L., Timis A., Poli S., Trotti F., Ugolini R., *Metodologia per il calcolo dell'esposizione della popolazione al campo elettrico prodotto dagli impianti di telefonia mobile attivi in Veneto*, Atti Convegno Nazionale Airp - Lucca, 25 - 27 settembre 2024

Caputo E., Adda S., Bellabarba G., Bogo F., Marsico G., Scaramella A., *Implementazione di un sistema nazionale di raccolta dati e controllo delle potenze medie per gli impianti di telefonia mobile*. Architettura del sistema e condivisione dei risultati con le Agenzie Regionali Per l'Ambiente, Atti del XXXVIII Congresso Nazionale Airp - Milano 2022

CEI 211-10, *Guida alla realizzazione di una stazione radiobase per rispettare i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici in alta frequenza*, 2024-06

Chiaranello, E.; Bonato, M.; Fiocchi, S.; Tognola, G.; Parazzini, M.; Ravazzani, P.; Wiart, J. *Radio Frequency Electromagnetic Fields Exposure Assessment in Indoor Environments: A Review*. Int. J. Environ. Res. Public Health 2019, 16, 955. <https://doi.org/10.3390/ijerph16060955>

Kurnaz, C., Mutlu, M. *Comprehensive radiofrequency electromagnetic field measurements and assessments: a city center example*. Environ Monit Assess 192, 334 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08312-3>

Recommendation ITU P.2109-1 – *Prediction of building entry loss* - 2019

Report ITU-R P.2346-4 (07/2021) – *Compilation of measurement data relating to building entry loss* – July 2021, <https://www.itu.int/pub/R-REP-P.2346-4-2021>

Rudd Richard, Craig Ken, Ganley Martin, Hartless Richard, *Building Materials and Propagation - Final Report*, Ofcom, 2604/BMEM/R/3/2.0, 14th September 2014

Stone, W. (1997), NIST Construction Automation Program, Report No. 3, *Electromagnetic signal attenuation in construction materials*, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6055, Gaithersburg, MD, October 1997, [online], <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6055>

Suchanski M., Kaniewski P., Matyszkiewicz R., Gajewski P., *Prediction of VHF and UHF Wave Attenuation In Urban Environment*, 2012 19th International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications, Warsaw, Poland, 2012, pp. 60-65, doi: 10.1109/MIKON.2012.6233496