

UN MODELLO DINAMICO SU UN APPROCCIO BIG-DATA ALLA MOBILITÀ PER LO STUDIO DELLA DIFFUSIONE DEL COVID-19 NEL NORD ITALIA

Davide Micheli, Giuliano Muratore, Aldo Vannelli, Giuseppe Sola

La teoria dei Sistemi Dinamici ha proposto molti modelli per la diffusione delle epidemie e il recente sviluppo della Fisica dei Sistemi Complessi ha mostrato come le complesse reti di trasporto abbiano un ruolo fondamentale nella diffusione a scala planetaria delle epidemie stesse. Tuttavia, le caratteristiche della pandemia da COVID-19 hanno messo in evidenza come la peculiarità della mobilità microscopica in aree con diverse caratteristiche di antropizzazione potrebbero avere profondamente influenzato la sua diffusione. I dati relativi al traffico telefonico radiomobile, essendo statisticamente correlabili con la mobilità della popolazione, sono attualmente un asset informativo importante un po' in tutto il mondo, e sono oggi utilizzati a supporto di molte

decisioni, siano esse di tipo amministrativo o commerciale. La diffusione dei dispositivi mobili offre la possibilità di raccogliere grandi quantità di dati su un campione significativo della popolazione. In questo studio si è sviluppata la possibilità di utilizzare i dati relativi al traffico radiomobile TIM del mese di Febbraio 2020 in sinergia con un modello dinamico SEIR messo a punto sui dati disponibili dell'epidemia da COVID-19 nella Lombardia e nel Veneto.

Introduzione

In questo studio sono state utilizzate le cosiddette Matrici Origine-Destinazione, che permettono di ricostruire gli spostamenti in Italia tra le 9862 Aree Censuarie (ACE) con le quali l'ISTAT suddivide il territorio italiano.

Tale base informativa sfrutta in forma anonima e aggregata, come previsto dalle Normative vigenti in termini di Privacy, sia i dati di tassazione (o "cartellini" di traffico telefonico) sia i dati di segnalazione legati al traffico radiomobile sulla rete TIM.

Il mese di febbraio 2020 risulta particolarmente significativo per lo studio della diffusione del COVID-19 in

Italia, in quanto evidenzia un periodo di possibile diffusione del virus ancor prima dell'individuazione di un focolaio d'epidemia.

Lo studio affronta in primis un'analisi statistica (utilizzando il Tool Open Source R Studio [1]) della mobilità specifica che caratterizzava Codogno e Vo', prima dell'evidenza epidemiologica, al fine di isolarne le caratteristiche di mobilità utili nell'analisi epidemiologica.

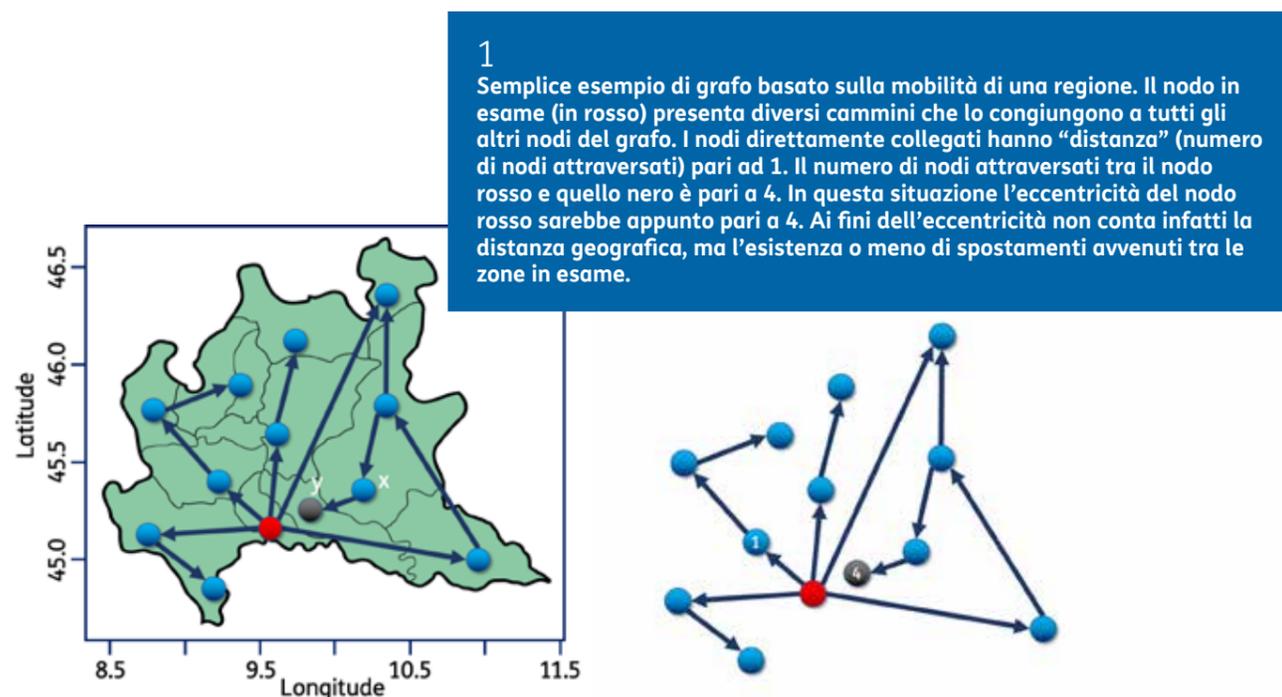
Nell'articolo viene poi presentato uno studio che, incorporando dati di mobilità specifica in Lombardia e Veneto, adatta i modelli di diffusione del virus al caso specifico del nord Italia, disegnandone anche le possibili evoluzioni.

Mobilità e Grafi

La Lombardia e il Veneto rappresentano due regioni economicamente importanti in Italia, interessate da una grande mobilità interna (oltre che internazionale), sia di persone che di merci.

Favoriscono la mobilità regionale anche ragioni orografiche, come l'ampiezza della pianura Padana ed il fatto che tale pianura sia innervata da grandi strutture di comunicazione, stradali e ferroviarie.

Per valutare gli effetti della mobilità nell'ambito della diffusione del COVID-19 occorre però fissare criteri oggettivi di valutazione della mobilità di una regione, per procedere anche a confronti con zone differenti.



Un aiuto in tal senso arriva dalla Teoria dei Grafi, sviluppata per l'analisi di strutture composte da nodi e connessioni tra gli stessi.

È noto innanzitutto che la trasmissione dei virus viaggi con le persone, e possa quindi insediarsi in ambiti differenti da quello d'origine per tramite di una successione di passaggi da persona a persona. Ciò che è significativo per la diffusione del virus è quindi stabilire se esistono connessioni (cioè mobilità di persone) tra una zona ed un'altra.

La mobilità del virus può infatti concretizzarsi in una nuova zona se portato da uno o più soggetti già infettati.

Successivamente il virus può essere nuovamente trasportato altrove, anche da altre persone della nuova zona, se nel frattempo sono state contagiate. Questa catena di passaggi finisce per essere assimilabile ad un grafo (vedi Figura 1), ed il maggiore o minore numero di connessioni (passaggi di persone) tra le diverse zone può concretamente contribuire al manifestarsi di crescite, anche esponenziali, dei contagi.

Considerando allora come ambito d'analisi la singola regione italiana, considerando come nodo del grafo su cui porre l'attenzione una specifica zona (Area Censuarie ISTAT [2]), ed infine considerando come connessione tra due nodi l'esistenza di spostamenti tra le due zone (Aree

Censuarie) in questione, otteniamo una rappresentazione schematica delle possibili vie attraverso le quali potrebbe spostarsi un virus dentro quella regione.

Avendo trasformato le Aree Censuarie di una regione in nodi, ed avendo definito come connessione tra i nodi il fatto che ci siano stati spostamenti tra due Aree Censuarie, possiamo utilizzare i dati di mobilità tra le ACE di quella regione come il modo per verificare effettivamente quali Aree Censuarie sono state oggetto di mobilità, ed anche quando ciò è avvenuto.

Si può quindi, con le Matrici Origine-Destinazione, passare da un astratto concetto di Grafo di una regione italiana, al Grafo che corrisponde proprio alla situazione reale di mobilità in quella regione, in un dato periodo. Il cammino sul grafo non sarà altro che la sequenza di spostamenti [nota 1] che sono stati registrati nelle Matrici Origine-Destinazione, prima per passare da un nodo A ad un nodo B, e poi per passare dal nodo B al nodo C, e così via. Più lungo sarà il cammino e più nodi saranno quindi stati attraversati [nota 2].

A questo punto dalla Teoria dei Grafi si può prendere in prestito il concetto di "eccentricità" di un nodo di un grafo. Il nodo che esamineremo sarà quello di Codogno (per il caso della Lombardia), e di Vo' Euganeo (per il caso del Veneto), misurando

l'eccentricità di Codogno (e poi di Vo') rispetto al grafo della regione Lombardia (e poi Veneto). L'eccentricità di un nodo di un grafo è (dalla Teoria dei Grafi) definito come la misura del più lungo dei cammini più brevi che connettono quello specifico nodo a qualsiasi altro nodo del grafo.

L'Eccentricità misura così quanto un nodo risulti tendenzialmente isolato (alta eccentricità), piuttosto che fortemente centrale (bassa eccentricità), rispetto ai flussi di mobilità della sua regione.

Passando al caso concreto viene valutata l'eccentricità di Codogno (e poi di Vo'), misurando il più lungo dei cammini (più brevi) che connettono il nodo-ACE di Codogno (poi di Vo') a qualsiasi altro nodo-ACE della Lombardia (del Veneto). Per il calcolo dell'eccentricità di Codogno non ha quindi rilievo quale specifico percorso sia stato effettivamente seguito per lo spostamento di persone tra un'ACE all'altro, ma solo il fatto che tale mobilità sia avvenuta o non sia avvenuta nel periodo in esame.

Quanto maggiore risulterà l'eccentricità di un nodo di una regione, tanto più quel nodo risulterà isolato, perché i cammini risulteranno più lunghi, e quindi quel nodo sarà meno predisposto alla diffusione di un virus.

Viceversa, tanto minore risulterà l'eccentricità di un nodo, tanto più quel nodo sarà predisposto alla dif-

fusione del virus, a causa appunto di una elevata mobilità di quella zona, mobilità capace di creare molte connessioni con le altre zone della regione [nota 3].

I risultati delle analisi sui dati di mobilità territoriale di Lombardia e Veneto mostrano alcune somiglianze tra lo scenario di Codogno (in provincia di Lodi) e quello di Vo' (in provincia di Padova).

Per Codogno si misura un'eccentricità pari a 4, cioè risultano quindi necessari al più 4 passaggi, affinché dall'ACE di Codogno si tocchino tutte le altre zone (ACE) della Lombardia, composta da ben 1793 ACE. Le ACE a distanza unitaria da Codogno sono circa il 22% circa del totale delle ACE della Lombardia. Per queste

ACE si registrano quindi spostamenti diretti di persone da Codogno.

Nel caso di Vo' sono invece sufficienti al più 3 passaggi, affinché dall'ACE di Vo' si possano toccare tutte le altre 675 ACE del Veneto, ed inoltre le ACE oggetto di spostamenti diretti da Vo' risultano circa il 29% del totale delle ACE del Veneto.

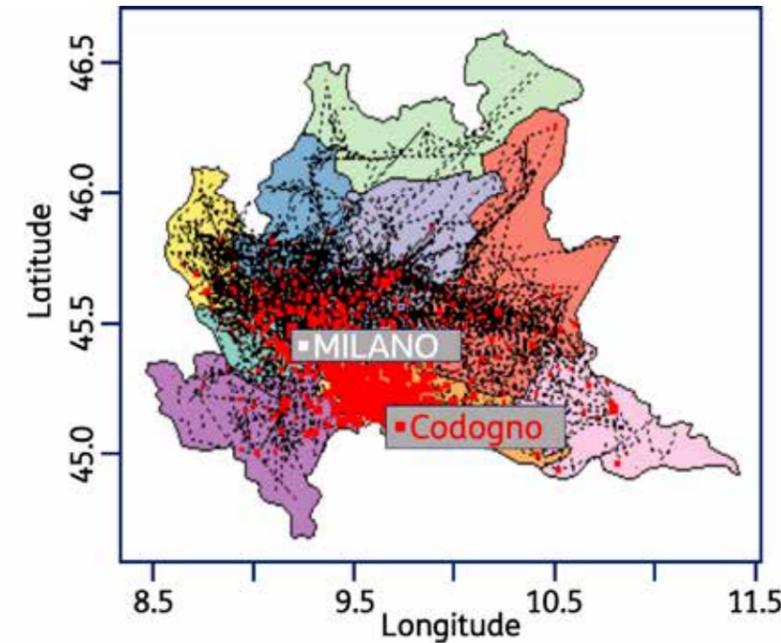
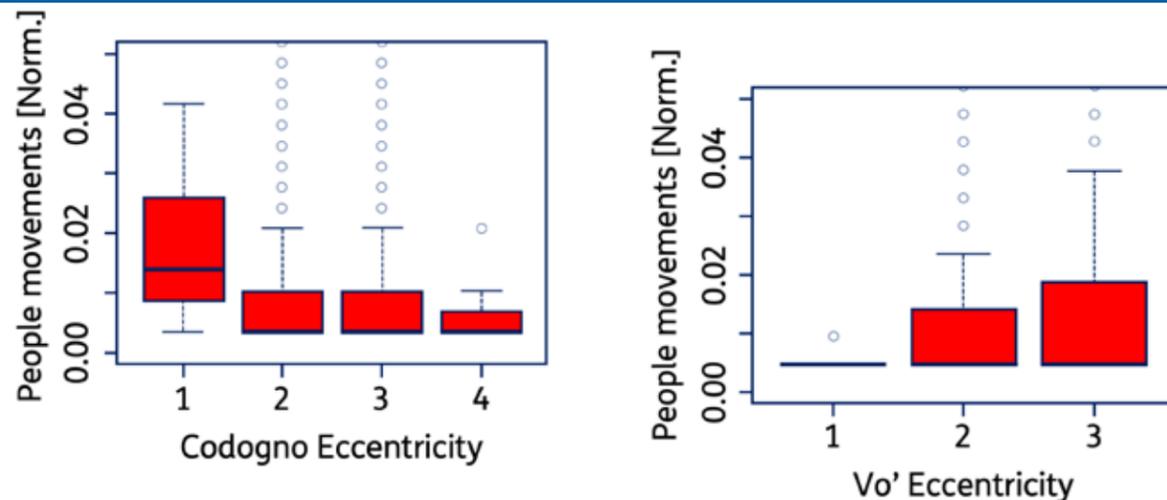
Siccome i passaggi da una ACE all'altra riguardano movimenti di persone che si sono appunto spostate tra quelle ACE, si potrebbe presumere che Vo' si trovasse in una situazione di maggiore predisposizione alla diffusione del virus, dovendo il virus seguire un minor numero di "salti" per raggiungere tutte le altre ACE venete, e contando Vo' più casi di Codogno (29% vs

22%) nella percentuale di ACE coinvolte in spostamenti diretti.

La situazione oggettiva è però quasi opposta, e ciò si può desumere (vedi Figura 2), osservando come siano distribuite le quantità di spostamenti di persone da Codogno e da Vo', in funzione delle diverse eccentricità dei relativi spostamenti tra ACE della regione. Nel caso di Codogno sono molto più popolati gli spostamenti diretti, che sono quelli a maggior probabilità di contagio (considerando Codogno l'epicentro), mentre risultano via via meno popolati gli spostamenti indiretti.

Nel caso di Vo' invece le connessioni dirette verso altre ACE risultano tante, ma si tratta di connessioni effettuate nel complesso da poche

2 In figura è mostrata la notevole differenza che emerge tra la mobilità di Codogno e quella di Vo', normalizzando ad 1 il numero totale di spostamenti per una migliore confrontabilità. Anche se Codogno ha una eccentricità maggiore di Vo', è maggiore per Codogno l'incidenza degli spostamenti diretti dal focolaio del contagio rispetto a quelli indiretti (più lunga catena dei contagio). Di conseguenza una diffusione del contagio tra persone della stessa regione vede in partenza più critica la situazione di Codogno, rispetto a quella di Vo'.



3 Mobilità diretta (evidenziata in rosso) ed indiretta (evidenziata dalle linee nere tratteggiate) da Codogno. Si nota la differenza tra la minore mobilità periferica (linee nere più rade) e l'elevata concentrazione di mobilità regionale che attraversa la zona a Nord di Milano, in corrispondenza dell'asse viario padana da Torino a Venezia. Si nota altresì che la mobilità diretta da Codogno rimane in Lombardia prevalentemente sviluppata (quadrantini rossi) lungo la congiungente con Milano. La dimensione dei quadratini, maggiore in prossimità di Codogno e minore in zone più lontane, descrive graficamente la maggiore numerosità di persone con mobilità diretta di corto raggio, rispetto alla minore numerosità di persone con mobilità diretta che raggiunge anche zone più lontane.

persone, mentre risultano più popolati i casi successivi, quelli per i quali le probabilità di contagio da Vo' (considerando Vo' l'epicentro) risultano via via più basse.

La diversa distribuzione della numerosità di spostamenti alle diverse eccentricità, rende quindi lo scenario di Codogno in partenza più critico rispetto a quello di Vo'.

Pur non affrontato in questo articolo, focalizzato sul tema epidemiologico di Codogno e Vo', l'applicazione del concetto di eccentricità appena espresso per queste due località si può considerare generalizzabile. Infatti, calcolando l'eccentricità per tutte le ACE di una regione si arriva a stimare il Coefficiente di Mobilità Regionale (CMR), semplicemente come valore medio dell'eccentricità delle ACE di cui è composta quella

regione. La sinteticità di questo indicatore (eccentricità media in una regione) può infatti risultare utile anche per i confronti di mobilità su piccola scala tra differenti zone d'Italia (o in generale del mondo).

Mobilità in Lombardia

L'analisi dei dati telefonici della Lombardia a febbraio 2020, prima dell'istituzione della Zona Rossa (DPCM 23/02/2020 [3]), ci fornisce un quadro d'insieme della mobilità delle persone in una regione, elemento che influenza la diffusione di un virus.

Osservando (vedi Figura 3) gli spostamenti effettuati da Codogno nella prima ventina di giorni del

mezzo di febbraio, in un periodo cioè durante il quale il virus poteva spostarsi con le persone, non essendo ancora entrate in vigore le misure di contenimento della mobilità, si può notare che la mobilità diretta da Codogno interessa in prevalenza la direttrice verso Milano, anche se la dispersione lungo il territorio lombardo della mobilità diretta da Codogno coinvolge comunque un'area abbastanza vasta. La mobilità indiretta (linee tratteggiate nere) ha maggiore concentrazione proprio lungo la direttrice che attraversa la Lombardia (asse Torino-Venezia). La mobilità indiretta si estende a tutto il territorio lombardo, anche se ovviamente risulta inferiore in alcune zone periferiche (es. quelle alpine a Nord) per evidenti vincoli orografici.

UN MODELLO EPIDEMIOLOGICO INTEGRATO CON DATI DI MOBILITÀ TELEFONICA ORIGINE-DESTINAZIONE A PICCOLA SCALA SPAZIALE

Il modello proposto nell'ambito di una collaborazione tra TIM e l'Università di Bologna si basa sulla possibilità di raccogliere dati di mobilità attraverso l'attività di telefonia mobile alla scala delle aree censuarie (ACE) con frequenza oraria, per integrare tali informazioni entro modelli matematici di dinamica di popolazione e così simulare la diffusione di un'epidemia.

L'Università di Bologna ha quindi realizzato un sistema dinamico su grafo i cui nodi sono rappresentati dalle ACE georeferenziate nel territorio italiano con connettività pesata in proporzione alla mobilità Origine-Destinazione tra i nodi, mobilità inferita utilizzando dati, anonimi ed aggregati, delle Matrici Origine-Destinazione (MOD) di telefonia mobile.

La dinamica di popolazione all'interno di ciascuna ACE è simulata da un modello tipo SEIR (Susceptible, Exposed, Infectious, Removed) [4, 5], con la possibilità di specificare alcuni parametri in funzione delle caratteristiche sociali e del tessuto urbano dell'area. In particolare, le equazioni di evoluzione del modello epidemiologico per il nodo k-esimo al passo temporale Δt risultano essere:

$$\begin{aligned} S_k(t + \Delta t) &= S_k(t) + \mu_{S,k}^{\Delta t}(t) - \phi_{S \rightarrow E,k}^{\Delta t}(t) \\ E_k(t + \Delta t) &= E_k(t) + \mu_{E,k}^{\Delta t}(t) + \phi_{S \rightarrow E,k}^{\Delta t}(t) - \phi_{E \rightarrow I,k}^{\Delta t}(t) - \phi_{E \rightarrow A,k}^{\Delta t}(t) \\ I_k(t + \Delta t) &= I_k(t) + \mu_{I,k}^{\Delta t}(t) + \phi_{E \rightarrow I,k}^{\Delta t}(t) - \phi_{I \rightarrow R,k}^{\Delta t}(t) \\ A_k(t + \Delta t) &= A_k(t) + \mu_{A,k}^{\Delta t}(t) + \phi_{E \rightarrow A,k}^{\Delta t}(t) - \phi_{A \rightarrow G,k}^{\Delta t}(t) \\ R_{T,k}(t + \Delta t) &= R_{T,k}(t) + \phi_{I \rightarrow R_{T,k}}^{\Delta t}(t) - \phi_{R_{T,k} \rightarrow G,k}^{\Delta t}(t) \\ R_{H,k}(t + \Delta t) &= R_{H,k}(t) + \phi_{I \rightarrow R_{H,k}}^{\Delta t}(t) - \phi_{R_{H,k} \rightarrow G,k}^{\Delta t}(t) \\ G_k(t + \Delta t) &= G_k(t) + \mu_{G,k}^{\Delta t}(t) + \phi_{A \rightarrow G,k}^{\Delta t}(t) + \phi_{R \rightarrow G,k}^{\Delta t}(t) \end{aligned}$$

I modelli dividono la popolazione nelle diverse categorie: Suscettibili "S", Esposti "E", Infetti "I", Asintomatici "A", Ricoverati in ospedale (o in altre strutture) e in terapia intensiva "R_{H,T}", ed infine Guariti "G".

La dinamica delle popolazioni dipende dai flussi di scambio $\Phi_{X \rightarrow Y}$ introdotti secondo lo schema riportato in figura A.

Tali flussi dipendono dai parametri e dalle diverse scale temporali legate ai meccanismi del contagio, dell'incubazione, dello sviluppo dell'infezione e della guarigione.

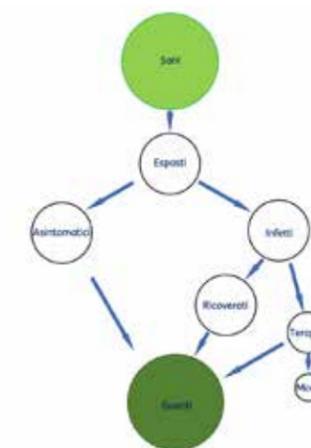
Nello specifico, la definizione dei flussi tra le diverse categorie avviene secondo due schemi: la transizione tra suscettibili ed esposti è definita in base alla formula

$$\Phi_{S \rightarrow E,k}^{\Delta t}(t) = [\beta_I \cdot I_k(t) + \beta_A \cdot A_k(t)] \cdot (m_k \cdot \Delta t) \cdot \frac{S_k(t)}{P_k(t)},$$

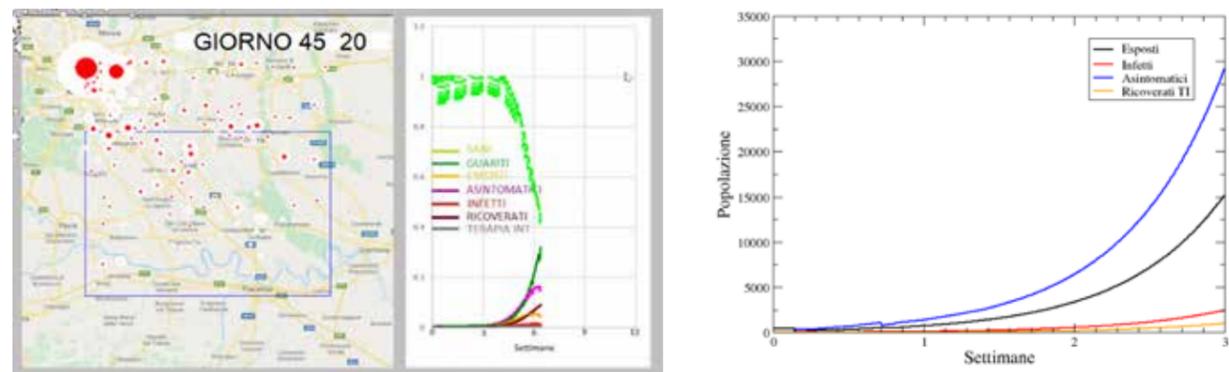
dove si evidenzia la dipendenza dai parametri β_I e β_A che definiscono la probabilità di avere un contagio quando un individuo sano incontra un infetto o un asintomatico, rispettivamente, e il numero m_k che definisce il numero medio di incontri con persone diverse per unità di tempo che un individuo effettua nell'ACE considerata (tale numero può tenere conto dell'attività sociale e della presenza di luoghi di incontro nell'area). La probabilità di un incontro è calcolata come il prodotto tra la popolazione suscettibile con la frazione di infetti o asintomatici presente nella popolazione. La presenza di una popolazione di esposti, per quanto piccola,

può innescare la diffusione dell'epidemia, se il numero medio di contagiati per individuo infetto o asintomatico è superiore all'unità e la crescita è di tipo esponenziale. Solo la riduzione dell'attività sociale locale (ovvero del parametro m_k) e la riduzione del numero degli individui suscettibili (perché la popolazione dei guariti è cresciuta a sufficienza) può ridurre il flusso e permettere di raggiungere un massimo nella popolazione degli esposti dopo il quale l'epidemia comincia a regredire (cfr. Fig C). Tuttavia, affinché la regressione sia efficace, la riduzione dell'attività sociale (ovvero la restrizione alla mobilità individuale attuata dal decreto '#io resto a casa') deve essere mantenuta fino a che la popolazione degli infettati si riduca a zero, altrimenti la diffusione ricomincia fino al raggiungimento dell'immunità di gregge, ovvero quando il numero dei guariti sarà così elevato da rendere improbabile che un infetto incontri persone da contagiare. Quest'ultima situazione è il solo equilibrio dinamico stabile che protegge la popolazione da un'eventuale nascita di futuri focolai di infezione. Resta anche possibile un cambiamento nel tempo dei parametri β_I e β_A per una diminuzione della virulenza dell'epidemia, che favorirebbe un'immunità di gregge con un numero totale di infettati inferiore durante l'epidemia stessa. Gli altri flussi definiti nel modello sono illustrati dalla transizione tra Esposti e Infetti:

$$\Phi_{E \rightarrow I,k}^{\Delta t}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } t < T_E \\ \alpha \cdot \Phi_{S \rightarrow E,k}^{\Delta t}(t - T_E) & \text{altrimenti} \end{cases},$$



A
Schema dei Flussi di scambio



B Layout dell'interfaccia grafica del software per la simulazione del modello nell'area metropolitana a sud di Milano; l'evoluzione è in grado di assimilare i dati di una matrice OD per le aree ACE a scala oraria. A destra si riporta l'evoluzione delle categorie Esposti, Asintomatici, Infetti e Ricoverati in terapia intensiva prevista dal modello durante le prime 3 settimane di febbraio.

Vediamo come tale formula dipenda dalla scala di tempo di incubazione T_E della malattia per cui gli individui che esposti al tempo $t-T_E$ (che sono contati nel flusso $S \rightarrow E$ calcolato in quel momento), transitano nella categoria degli infetti in una percentuale α definita dal rapporto statistico tra infetti e asintomatici nella popolazione (per il COVID-19 tale rapporto sembra essere piccolo facendo sì che il contagio sia principalmente diffuso dagli asintomatici).

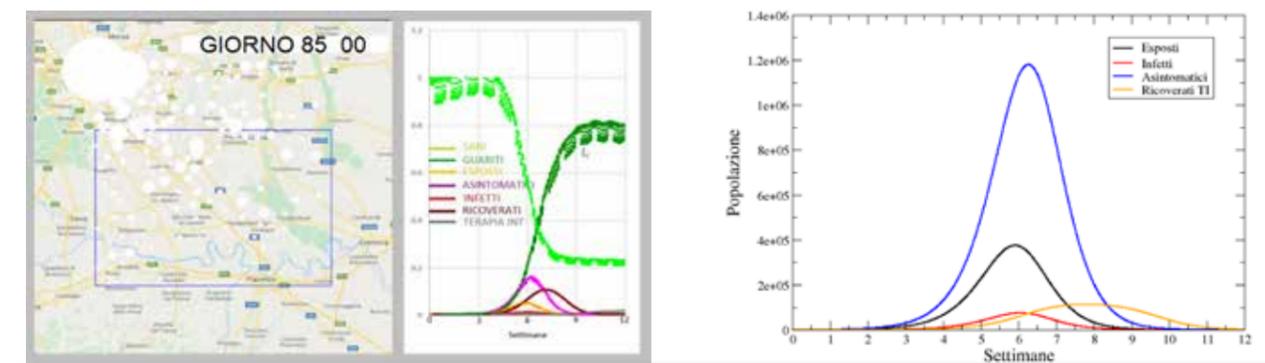
Avremo quindi una definizione analoga per il flusso tra Esposti e Asintomatici con una percentuale complementare $1-\alpha$. In modo simile vengono trattate le altre transizioni: ad esempio, gli individui Infetti vengono ricoverati o vanno in terapia intensiva dopo un tempo caratteristico T_i di sviluppo dei sintomi veri e propri dell'infezione. Il modello matematico si rappresenta mediante equazioni differenziali con ritardi che tengono conto delle varie scale di tempo necessarie per l'evoluzione del contagio e dell'infezione e la guarigione finale.

Da questo punto di vista stiamo parlando di un modello fisico-matematico adattabile a diverse tipologie di epidemia che potrebbe mettere in evidenza diverse caratteristiche dinamiche a seconda del valore attribuito ai vari parametri. Il modello si integra con dati della Matrice Origine-Destinazione (MOD) tra le varie ACE (Aree Censuarie ISTAT) mediante la definizione

dei flussi di mobilità μ_X delle varie categorie considerate, nelle dovute proporzioni secondo le equazioni qui di seguito riportate:

$$\mu_{X \rightarrow k}^{\Delta t}(t) = \sum_{j \neq k} [X_{j \rightarrow k}^{\Delta t}(t) - X_{k \rightarrow j}^{\Delta t}(t)] \quad X_{j \rightarrow k}^{\Delta t}(t) = P_{j \rightarrow k}^{\Delta t}(t) \frac{X_j(t)}{P_j(t)}$$

La prima equazione definisce μ_X come bilancio tra il flusso entrante ed uscente della categoria X nell'ACE k -esimo da e verso gli altri ACE connessi, essendo $P_{j \rightarrow k}$ l'elemento della MOD corrispondente. I valori dei flussi $\mu_{X,k}$ possono essere stimati dai dati di mobilità da telefonia mobile e determinano il meccanismo di diffusione dovuta alla mobilità nell'area considerata. La complessa struttura del territorio urbanizzato in aree come la Pianura Padana definisce un network di mobilità complesso che regola la diffusione dell'epidemia da scala locale (ACE) a quella globale. Il modello simulato risulta quindi una sovrapposizione di una dinamica locale, in cui il contagio si diffonde tra la popolazione per le attività sociali in ciascuna ACE (modello compartimentale SEIR) in funzioni di parametri caratteristici del virus e una dinamica di interazione tra ACE dovuta alla domanda di mobilità per le attività insediate nell'area considerata, che introduce uno scambio tra le popolazioni nei vari ACE secondo una struttura a network complesso. Politiche di isolamento di specifiche sotto-aree possono essere efficaci solo se adattate alla struttura del network di mobilità sottostante. Il risultato è un modello dinamico che simula la diffusione dell'epi-



C Lo stesso che nella Fig. B per un tempo t di evoluzione di 12 settimane supponendo che nessuna politica di restrizione della mobilità venisse introdotta. A destra si riporta l'evoluzione delle categorie Esposti, Asintomatici, Infetti e Ricoverati in terapia intensiva prevista dal modello evidenziando come si potesse prevedere un picco di 100000 persone ricoverate dopo 9 settimane.

demia tenendo conto della mobilità e dell'attività sociale degli individui contagiosi (asintomatici ed infetti). L'integrazione tra le dinamiche di diffusione dell'epidemia con dati di mobilità di telefonia mobile a piccola scala spaziale risulta un approccio innovativo nel campo della modellizzazione epidemiologica.

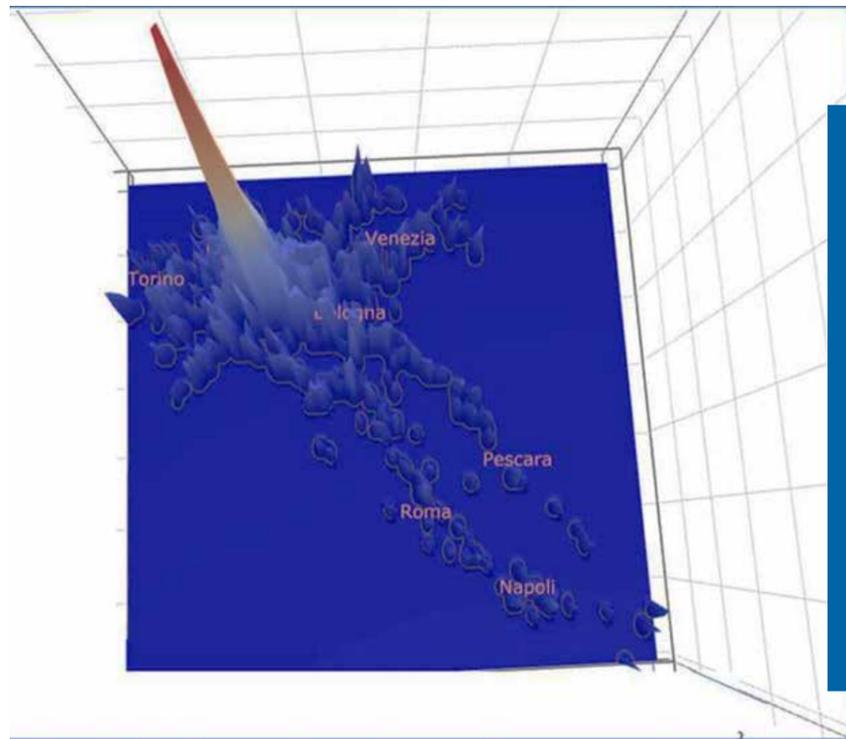
Il modello implementato in un pacchetto software per la simulazione ha consentito di realizzare uno strumento che consente un'analisi dello stato di fatto della diffusione dell'epidemia nel Nord Italia, basandosi sulle ipotesi che i focolai iniziali siano stati nella zona di Lodi-Codogno e Vo' Euganeo (PD) e considerando la prevedibilità dell'evoluzione delle varie popolazioni, in particolare della domanda di ospedalizzazione dovuta agli infetti con sintomi gravi. Inoltre, il modello implementato consente di studiare gli scenari possibili per comprendere gli effetti a lungo termine delle politiche di contenimento della mobilità individuale. Le caratteristiche di un tale strumento sono illustrate nelle figure B e C. I parametri utilizzati dal modello sono stati fissati in base agli andamenti osservati e ai dati riportati in letteratura [6].

Nel primo caso in Figura B si vede come un'area comprendente la provincia di Lodi e Milano possa essere stata soggetta ad una rapida diffusione del virus nelle prime due settimane di Febbraio 2020 per la stretta interconnessione dell'area dovuta all'intensa mobilità nella Pianura Pa-

dana il cui tessuto urbano non ha soluzione di continuità. Nella seconda figura mostriamo un'ipotesi di evoluzione delle popolazioni nella stessa area qualora non si fosse intervenuti con misure di contenimento della mobilità. In particolare, si evidenziano gli andamenti previsti per le classi degli infetti e ricoverati in terapia intensiva in un arco temporale di 12 settimane. Si nota un picco previsto di 10^5 individui che necessitano di una terapia intensiva dopo 9 settimane.

armando.bazzani@unibo.it (1)
sandro.rambaldi@unibo.it (1)
enrico.lunedei@unibo.it (1)
daniel.remondini@unibo.it (1)
francesco.durazzi2@unibo.it (1)
gastone.castellani@unibo.it (2)

(1) Dipartimento di Fisica e Astronomia - UNIBO
(2) Dipartimento di Medicina Specialistica, Diagnostica e Sperimentale - UNIBO



4 Estensione nazionale della mobilità da Codogno durante il mese di Febbraio, prima dell'istituzione della Zona Rossa. L'asse verticale rappresenta la maggiore/minore intensità degli spostamenti (normalizzata in scala logaritmica per motivi grafici). Il picco maggiore rappresenta Codogno, cioè spostamenti interni al comune in esame, ma si notano anche una moltitudine di spostamenti da Codogno che arrivano ad abbracciare un po' tutta la pianura padana, e si ramificano poi lungo le due dorsali, tirrenica e adriatica, anche se per numerosità questi ultimi due rami di spostamenti da Codogno risultano inferiori a quelli registrati entro la pianura padana.

La mobilità da Codogno in Lombardia presenta quindi una chiara impronta regionale, con numerosità di spostamenti maggiore nelle zone intorno a Codogno.

Considerata però l'estensione nazionale dell'epidemia, può risultare interessante dedicare un veloce sguardo anche all'osservazione della mobilità diretta da Codogno verso tutte le destinazioni italiane.

Questo fenomeno di mobilità diretta complessiva da Codogno può essere sinteticamente osservato nella Figura 4, la quale da un lato conferma quanto la mobilità diretta risulti prevalentemente regionale, ma dall'altro fa intuire anche l'esistenza di casi che si estendono verso la

pianura padana, da Torino a Venezia, a cui si aggiungono due rivioli di mobilità che ricalcano le due dorsali italiane, quella adriatica e quella tirrenica.

La grande mobilità che interessa l'Italia, ed i relativi riflessi in termini di potenziale estensione del contagio, si vede quindi riflessa anche in questo fugace esempio, relativo alle tre settimane precedenti l'istituzione della zona rossa a Codogno.

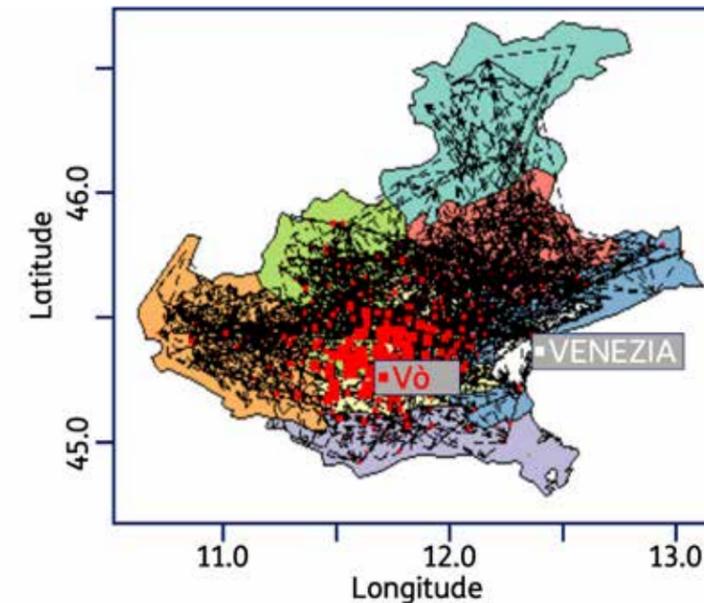
Mobilità in Veneto

L'analisi dei dati telefonici in Veneto a febbraio 2020, prima dell'isti-

tuzione della Zona Rossa (DPCM 23/02/2020), ci fornisce un quadro d'insieme della mobilità delle persone in una regione, elemento che influenza la diffusione di un virus.

Osservando (vedi Figura 5) gli spostamenti effettuati da Vo' nella prima ventina di giorni del mese di febbraio, in un periodo cioè durante il quale il virus poteva spostarsi con le persone, non essendo ancora entrate in vigore le misure di contenimento della mobilità, si può notare che la mobilità diretta da Vo' intercetta solo marginalmente le principali direttrici (linee nere tratteggiate) del Veneto.

Queste ultime interessano prevalentemente il grande asse di comu-



5 Mobilità diretta (evidenziata in rosso) ed indiretta (evidenziata dalle linee nere tratteggiate) da Vo'. Si nota la differenza tra la minore mobilità periferica (linee nere più rade) e la maggiore concentrazione di mobilità lungo le direttrici che convergono su Venezia (ad ovest da Torino-Milano, e a sud da Padova). Si nota altresì che la mobilità diretta da Vo' (quadrantini rossi) rimane circoscritta alle zone limitrofe e solo marginalmente intercetta gli assi di mobilità del Veneto (linee nere tratteggiate, più dense dove la mobilità risulta maggiore). La dimensione dei quadratini rossi descrive graficamente la maggiore o minore numerosità di persone con mobilità diretta in quella specifica zona.

nica padana che va da Torino a Venezia. La mobilità in Veneto si estende comunque a tutto il territorio, anche se ovviamente risulta inferiore in alcune zone periferiche (es. quelle alpine a Nord) per evidenti vincoli orografici.

Valutazioni per i Modelli Epidemiologici

I dati di mobilità ricavati della Lombardia e del Veneto forniscono una misura degli spostamenti quotidiani durante il periodo di diffusione del COVID-19 nel nord Italia. Questi stessi dati quindi possono essere ulteriormente elaborati per diventare dati d'ingresso ad un modello in grado di descrivere il fenomeno di diffusione del contagio nel suo

complesso, affiancandosi alla molteplicità di dati epidemiologici e di contesto che sono necessari per sviluppare una tale applicazione.

Il modello di diffusione, sviluppato dall'Università di Bologna, è accuratamente descritto nel box che ne approfondisce anche gli aspetti matematici.

Ulteriori sviluppi

Nello studio presentato si è mostrato come le Matrici Origine-Destinazione consentano di stimare i flussi di mobilità tra le diverse celle della rete di accesso di telefonia mobile, calando gli studi sulla diffusione planetaria dell'epidemia COVID-19 nell'ambito nazionale di specifico interesse, in primis i focolai di Co-

dogno e Vo' con l'associata mobilità della Pianura Padana.

La profondità dell'analisi, arrivata fino al livello delle singole aree censuarie ISTAT in Italia, può traggere una vista ancora più fine.

Per l'affinamento occorre entrare nelle aree censuarie e stimarne i flussi di mobilità interna, in modo da valutare anche singole situazioni di maggiore o minore aggregazione delle persone (e relativo rischio di contagio).

Tale vista ulteriormente raffinata sarà attuabile sia ricorrendo all'integrazione nei modelli epidemiologici di informazioni posizionali (GPS) raccolte da varie App installabili sui terminali, sia facendo leva sulle misure radio (anche georeferenziate GPS) che tutti i terminali mobili in-

viano come measurement report, continuativamente, per consentire il funzionamento ottimale della rete di accesso radiomobile.

La funzionalità specifica che abbina le misure radio prodotte e periodicamente riportate dai terminali alla relativa posizione GPS è stata introdotta negli standard radiomobili 3GPP internazionali a partire dal 3G UMTS, poi evoluta nel 4G LTE ed ora nel 5G. Tale prestazione, nota con la sigla MDT (Minimization of Drive Test) [7], rende la raccolta di posizioni GPS indipendenti dalla presenza di App nei terminali mobili, ereditando i vantaggi tipici delle prestazioni standard. MDT può operare infatti anche per i milioni di terminali mobili che ogni anno dall'estero arrivano in Italia (roaming internazionale) e che potrebbero non avere disponibile l'App giusta nella propria lingua. Inoltre, le misure radio nascono negli standard internazionali e sono progettate in modo da ridurre al minimo possibile l'impatto sui vari modelli di terminale (anche in termini di consumo di batteria), rendendo possibile la generazione di amplissime quantità di misure radio senza mai intaccare i bundle di traffico a pagamento dei clienti (come invece succede con le App).

Lo studio della mobilità integrando le Matrici Origine Destinazione con le misure georeferenziate, tra cui i dati MDT, costituisce quindi la naturale evoluzione per i modelli epidemiologici presentati in questo articolo, grazie anche al livello di

diffusione della prestazione MDT sui terminali che rende robusta la relativa base statistica [8-14].

Conclusioni

La teoria dei Sistemi Dinamici ha proposto molti modelli per la diffusione delle epidemie e il recente sviluppo della Fisica dei Sistemi Complessi ha mostrato come le complesse reti di trasporto abbiano un ruolo fondamentale nella diffusione a scala planetaria delle epidemie stesse. Tuttavia, le caratteristiche della attuale epidemia da COVID-19 hanno messo in evidenza come la peculiarità della mobilità microscopica in aree con diverse caratteristiche di antropizzazione potrebbe avere profondamente influenzato la sua diffusione.

Lo studio presentato mostra l'applicabilità pratica di adattare i modelli per la diffusione delle epidemie a contesti di mobilità su piccola scala (regionale), avvalendosi di dati telefonici (Matrici Origine-Destinazione) e traguardando benefici anche delle relative evoluzioni.

I modelli di diffusione epidemiologica, integrati con la conoscenza della effettiva mobilità territoriale, possono risultare molto utili non solo nella gestione delle problematiche durante la diffusione di un'epidemia per supportare le decisioni degli stakeholders, avvalendosi di tutte le conoscenze disponibili in un dato momento, ma anche aiutare lo

sviluppo di politiche di prevenzione e gestione delle epidemie che facciano tesoro dell'esperienza vissuta. I benefici che possono derivare da una modellizzazione sempre più accurata dei fenomeni legati alla mobilità delle persone, saranno d'ausilio anche in futuro non solo nel contrasto sempre più efficace di scenari drammatici come quello indotto dal COVID-19, ma anche nelle auspiccate fasi di ripresa della vita nelle città e, in generale, per lo sviluppo economico della nazione ■

Bibliografia

1. RStudio: Integrated Development Environment for R, www.rstudio.com.
2. ISTAT - Istituto Nazionale di Statistica - Le Aree Censuarie sono costruite per somma delle unità minime di rilevazione su cui è organizzata la rilevazione censuaria. L'unità minima, la Sezione Censuaria, è costituita da un solo corpo delimitato da una linea spezzata chiusa. A partire dalle Sezioni di Censimento sono ricostruibili, per somma, le entità geografiche ed amministrative di livello superiore come le Aree Censuarie (località abitate, aree sub-comunali, collegi elettorali ed altre). Ciascuna Sezione di censimento è completamente contenuta all'interno di una ed una sola località. Il territorio comunale viene da ISTAT esaustivamente suddiviso in sezioni di censimento, in modo che la somma di tutte le sezioni di censimento ricostruisce l'intero territorio nazionale. www.istat.it.
3. DPCM 23/02/2020 - Disposizioni attuative del decreto-legge 23 febbraio 2020, n. 6, recante misure urgenti in materia di contenimento e gestione dell'emergenza epidemiologica da COVID-19. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/02/23/20A01228/sg>.
4. M. Chinazzi et al., Science The effect of travel restrictions on the spread of the 2019 novel coronavirus (COVID-19) outbreak [10.1126/science.aba9757](https://doi.org/10.1126/science.aba9757) (2020)
5. F. Brauer and C. Castillo-Chavez, Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology, Springer-Verlag. New York, (2001)
6. R. Li et al., Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2) [10.1126/science.abb3221](https://doi.org/10.1126/science.abb3221) (2020).
7. Reference Specification 37.320. Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio measurement collection for Minimization of Drive Tests (MDT); Overall description; Stage 2. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2602>
8. D. Micheli, G. Muratore, "Smartphones Reference Signal Received Power MDT Radio Measurement Statistical Analysis Reveals People Feelings during Music Events," Published in: 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). Date of Conference: 17-20 June 2019, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017606. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9017606>
9. Davide Micheli, Riccardo Diamanti, "Statistical Analysis of Interference in a Real LTE Access Network by Massive Collection of MDT Radio Measurement Data from Smartphones," Published in: 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). Date of Conference: 17-20 June 2019. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017353. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9017353>.
10. Andrea Scaloni, Pasquale Cirella, Mauro Sghezzi, Riccardo Diamanti, Davide Micheli. "Multipath and Doppler characterization of an electromagnetic environment by massive MDT measurements from 3g and 4g mobile terminals," Published in: IEEE Access (Volume: 7), 21 January 2019, Page(s): 13024 - 13034. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2892864. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8620498>
11. Chiara Mizzi, Alessandro Fabbri, Sandro Rambaldi, Flavio Bertini, Nico Curti, Stefano Sinigardi, Rachele Luzi, Giulia Venturi, Micheli Davide, Giuliano Muratore, Aldo Vannelli, Armando Bazzani, "Unraveling pedestrian mobility on a road network using ICTs data during great tourist events," EPJ Data Sci. (2018) 7: 44, Regular article, <https://doi.org/10.1140/epids/s13688-018-0168-2>.
12. Davide Micheli, Giuliano Muratore, Aldo Vannelli, "Clima, MDT e Machine Learning per osservare il comportamento delle città" Telecom Italia, Notiziario Tecnico n.2-2019. <https://www.telecomitalia.com/content/portal/it/notiziariotecnico/edizioni-2019/n-2-2019/N6-Clima-MDT-Machine-Learning-per-osservare-comportamento-citta.html>
13. Davide Micheli, Giuliano Muratore, Aldo Vannelli, "La mobilità di breve e lungo raggio con le innovative misure radiomobili e l'Intelligenza Artificiale" Telecom Italia, Notiziario Tecnico n.3-2018. <https://www.telecomitalia.com/content/portal/it/notiziariotecnico/edizioni-2018/n-3-2018/N8-La-mobilita-breve-lungo-raggio-innovative-misure-radiomobili-e-Intelligenza-Artificiale.html>
14. Davide Micheli, Giuliano Muratore, Aldo Vannelli, "Big Data georeferenziati MDT per servizi digitali nelle Smart Cities" Telecom Italia, Notiziario Tecnico n.1-2018. <https://www.telecomitalia.com/content/portal/it/notiziariotecnico/edizioni-2018/n-1-2018/N9-Big-Data-georeferenziati-MDT-per-servizi-digitali-Smart-Cities.html>

Note

1. Per la Teoria dei Grafi la sequenza di spostamenti tra un nodo e l'altro è detta cammino lungo i "rami" di un grafo, di conseguenza la lunghezza di un cammino è la somma dei rami attraversati.
2. Per la Teoria dei Grafi il risultato della trasformazione delle Matrici O/D è rappresentato da Grafi orientati (il verso della freccia indica se la mobilità è in uscita o in ingresso nel nodo specifico) e pesati (dove il peso che si attribuisce a ciascun ramo che interconnette due nodi è proporzionale agli eventi di mobilità osservati in un dato periodo).
3. In Teoria dei Grafi si utilizza il concetto di "grado di interconnessione" di un nodo rispetto ad un determinato network/grafico. Questo parametro indica quanto è innervata l'area (cluster o network) di cui il nodo di riferimento fa parte. Il grado di interconnessione è un parametro che si usa anche nella Social Media Analysis per capire quanto un cluster di utenti è interconnesso.



Davide Micheli davide.micheli@telecomitalia.it

Laureato in Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni e in Ingegneria Aerospaziale e Astronautica, è entrato in azienda nel 1989 dove si occupato fino al 2001 di Progettazione, Realizzazione impianti, Esercizio e Qualità nell'Area Territoriale di Ancona. Dal 2002 si è trasferito a Roma dove lavora tuttora nel settore di Ingegneria della Rete di Accesso Radio occupandosi di varie tematiche connesse con l'ingegnerizzazione della rete tra cui quelle legate allo studio della propagazione elettromagnetica. Negli ultimi anni, dopo aver conseguito un Dottorato di Ricerca in Ingegneria Aerospaziale, ha iniziato ad approfondire nell'ambito del suo lavoro le tecniche di machine Learning, in particolare, sui Big Data di tipo elettromagnetico statistico disponibili nella rete di accesso radio. È inoltre autore di numerosi articoli scientifici su riviste internazionali ■



Giuliano Muratore giuliano.muratore@telecomitalia.it

Laureato in Ingegneria Elettronica, è entrato in azienda nel 1987, ricoprendo responsabilità prima nel nascente mercato liberalizzato dei servizi di messaggistica interpersonale (1990) ed in seguito nello sviluppo della Rete e dei Servizi Radiomobili di TIM (1995), con incarichi nell'evoluzione del Piano di Numerazione Nazionale (1997) e nell'introduzione in Italia della Mobile Number Portability (2001), per poi seguire il Mobile Roaming business (2010) e successivamente progetti internazionali TIM in GSM. Negli ultimi anni ha messo la sua esperienza a disposizione della formazione Big Data e dello sviluppo delle tecniche di Machine Learning applicate a dati radiomobili ■



Giuseppe Sola giuseppe.sola@olivetti.com

Laureato in Scienze dell'Informazione, nel 1996 entra TIM dove nel corso degli anni ha ricoperto diversi ruoli sia ambito tecnologico che commerciale sviluppando competenze specifiche su sistemi, piattaforme e processi nell'ambito delle telecomunicazioni e dei servizi applicativi. Ha sempre seguito con interesse l'innovazione contribuendo alla costruzione prima e al lancio poi dei primi servizi a valore aggiunto di TIM e avviando la trasformazione digitale della Customer Interaction del Gruppo Telecom Italia. Nel 2013 passa in Telecom Italia Digital Solutions a capo della Linea di Business Web & Applications Services dedicata alle soluzioni di Customer Digital Management e Advanced Analytics. In Olivetti da Gennaio 2016 assume la responsabilità prima del Marketing&Sales della divisione Smart Retail e successivamente della Business Unit Data Monetization Solutions. Oggi a capo della direzione vendita Digital Services continua a seguire con interesse le evoluzioni tecnologiche e applicative in ambito Big Data Analytics & IoT ■



Aldo Vannelli aldo.vannelli@telecomitalia.it

Laureato in Fisica e in Ingegneria dell'Informazione, in azienda dal 1988. Dopo un'ampia esperienza nell'ambito dell'Ingegneria e dell'Innovazione delle Reti Dati (Frame Relay, ATM e IP), nel 2001 passa in TIM per occuparsi dello sviluppo e dell'innovazione di applicazioni e servizi multimediali su tecnologie 2.5G/3G. In questo ambito ha coordinato numerosi progetti riguardanti l'integrazione multiservizio di voce/video/dati su mobile e lo sviluppo di soluzioni per il Mobile Content Distribution. Dal 2012 lavora nella Direzione Business & TOP Clients dove si occupa dello sviluppo di iniziative e progetti innovativi per Aziende di rilevanza Nazionale. Da alcuni anni si interessa dello sviluppo di iniziative finalizzate alla realizzazione di Proof of Concept basati su tecniche Big Data Analytics & Machine Learning ■