

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

The wave train of COVID-19 infections

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/1845201> since 2022-03-02T17:32:36Z

Published version:

DOI:10.19191/EP21.6.121

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)

Il treno di onde dei contagi

Maria Teresa Giraudo¹, Manuele Falcone², Cesare Cislighi³

1 - Dipartimento di Matematica “Giuseppe Peano”, Università di Torino, Torino; Gruppo MADE AIE

2 – Azienda Regionale di Sanità della Toscana, Firenze; Gruppo MADE AIE

3 – Epieconomista, Roma; Gruppo MADE AIE

Abstract

Molti studi a carattere clinico sono già stati effettuati relativamente ai casi di contagio da Covid-19 in Italia a partire dall'insorgere dell'epidemia. Risulta però di interesse anche considerare l'andamento dell'incidenza nei vari periodi che si sono susseguiti, in particolare dopo il termine della prima ondata e quindi dalla fine dell'estate 2020. In questo lavoro si analizza la curva epidemica del Covid-19 in Italia tra settembre 2020 e metà giugno 2021 in termini di *poussées*, ovvero di ondate, successive. La pandemia è ovviamente una sola, sebbene il virus si sia diffuso nella forma di diverse varianti, ma l'andamento dell'incidenza giornaliera può essere letto anche in termini di sovrapposizione di eventi diversi tra di loro o comunque indotti da fenomeni vari. Si può ipotizzare che si sia generata in questo modo la successione delle varie ondate, che vengono qui modellizzate utilizzando opportune curve di adattamento impiegate nello studio di dati epidemici. Ogni curva corrisponde approssimativamente alla situazione che si sarebbe verificata se nessun elemento fosse intervenuto a impedire la decrescita dei contagi dopo il picco relativo, mentre per descrivere gli incrementi successivi se ne considera la sovrapposizione. Tale interpolazione non ha uno scopo predittivo, ma puramente descrittivo limitatamente alla finestra temporale presa in esame. Vengono quindi anche messe in evidenza le discrepanze tra la sovrapposizione delle curve modellizzanti e la curva epidemica reale soprattutto nei periodi di transizione tra le varie *poussées*. L'analisi effettuata consente di mettere in corrispondenza l'andamento dell'epidemia nel periodo considerato con la serie di eventi da un lato e di misure di contenimento adottate dall'altro che possono avere determinato la successione di incrementi e decrementi verificatisi nell'incidenza dei contagi.

Many clinical studies have already been carried out in relation to incidence cases from Covid-19 in Italy since the onset of the epidemic. However, it is also of interest to consider the trend of the incidence in the various periods that have followed the end of the first wave and therefore from the end of Summer 2020. This work studies the epidemic curve of Covid-19 in Italy between September 2020 and mid-June 2021 in terms of *poussées*, that is successive waves. There is obviously only one pandemic, although the virus has spread in the form of several variants, but the daily incidence trend can also be read in terms of overlapping of events that are different from each other or in any case induced by various phenomena. It can be hypothesized that in this way a succession of various waves was generated, which are modeled here using appropriate adaptation curves used in the study of epidemic data. Each curve corresponds approximately to the situation that would have occurred if no element had intervened to prevent the decrease of infections after the relative peak, while to describe the subsequent increases their overlap is considered. This interpolation has no predictive purpose, being purely descriptive over the time window under consideration. The discrepancies between the superposition of the modeling curves and the real

epidemic curve are therefore also highlighted, especially in the transition periods between the various *poussées*. Finally, the analysis carried out allows to match the trend of the epidemic in the period considered with the series of events on the one hand and containment measures adopted on the other which may have determined the succession of increases and decreases in the incidence. of infections.

BOX

COSA SI SAPEVA GIA'

- Dallo scorso settembre la situazione dovuta al protrarsi dell'epidemia di Covid-19 ha richiesto di continuare a monitorare con attenzione i dati rilasciati giornalmente sulle frequenze dei nuovi positivi in Italia; il quadro è risultato diverso rispetto a quello presentatosi nei mesi precedenti dello scorso anno, a partire dall'insorgere dell'epidemia nel mese di febbraio fino perlomeno alla prima metà del mese di agosto.
- L'andamento dell'incidenza può corrispondere approssimativamente ad una curva la cui espressione analitica sia nota o alla sovrapposizione di più curve; in questo modo è possibile ipotizzare che si susseguano più spinte di accelerazione ovvero di ripresa del contagio, che possono dare origine a quelle che vengono riconosciute come vere e proprie ondate oppure a semplici oscillazioni.
- La pandemia risulta ovviamente una sola, essendo generata dallo stesso virus sebbene diffusosi anche sotto forma di varianti, ma la lettura della curva epidemica può essere condotta anche in termini di sovrapposizione di eventi diversi tra di loro o comunque generati da fenomeni vari, diversamente originatisi.

COSA SI AGGIUNGE

- I dati dei nuovi positivi giornalieri nel periodo preso in esame possono essere interpolati tramite la sovrapposizione di tre curve unimodali appartenenti alla stessa famiglia, a sua volta di varia natura, originate in corrispondenza di periodi temporali successivi; in questo modo si può modellizzare la presenza di più picchi nella curva epidemica risultante.
- Lo scopo di tale interpolazione non è predittivo, ma descrittivo limitatamente alla finestra temporale presa in esame; ogni curva modella approssimativamente la situazione che si sarebbe verificata se nessun nuovo elemento fosse intervenuto a impedire la decrescita dei contagi a seguito del raggiungimento del picco relativo, mentre la sovrapposizione di più curve permette invece di descrivere anche gli incrementi successivi.
- La rilettura della curva epidemica da Covid-19 in Italia tra settembre 2020 e metà giugno 2021 in termini di *poussées* successive consente di mettere agevolmente in corrispondenza l'andamento dell'epidemia in tale periodo con la serie di eventi da un lato e di misure di contenimento adottate dall'altro che possono averne determinato sia gli incrementi che i decrementi.

INTRODUZIONE

L'Italia è stata uno dei Paesi europei ad essere più precocemente e significativamente colpiti dall'epidemia causata dal virus SARS-CoV-2. I casi accertati di Covid-19 sono ad ora più di 4,5 milioni e si è verificato un numero di decessi vicino ai 130000. Molti studi sono già stati e verranno

effettuati sugli aspetti clinici della malattia, ma risulta di interesse anche analizzare l'andamento dell'incidenza dei contagi nei vari periodi che si sono susseguiti, in particolare dopo la prima ondata a partire dalla fine dell'estate 2020. La motivazione di questo studio risiede quindi nel voler contribuire all'analisi statistica dell'incidenza di Covid-19 in Italia in tale periodo prendendo in considerazione in particolare il fatto che non ci sia stato un unico picco di contagi, ma se ne siano succeduti almeno tre importanti. A tale scopo verranno utilizzati dei metodi di adattamento di curve che possono venire impiegate nella modellizzazione dei dati epidemici. Il loro uso verrà descritto in dettaglio e verranno espone le considerazioni che se ne possono trarre relativamente alla corrispondenza dell'andamento della curva globale risultante con i fenomeni che si sono verificati e le misure che sono state intraprese per il contenimento dell'epidemia. Si sono utilizzati per le analisi i dati pubblici rilasciati giornalmente sul sito della Protezione Civile. Il software impiegato è R [1] release 4.0.3 (2020-10-10).

Obiettivi

Si intende modellizzare l'andamento giornaliero dell'incidenza dei contagi in Italia tenendo conto dei periodi di crescita e di decrescita che si sono avvicendati nelle settimane dal 25.09.2020 al 15.06.2021. Le frequenze dei contagi da Covid-19 diagnosticati dall'insorgere dell'epidemia mostrano un andamento con una costante ciclicità settimanale dovuta ai ritmi dell'attività diagnostica e delle relative notifiche. Si rileva infatti come il numero di contagi giornalieri diagnosticati tenda a diminuire nel fine settimana per tornare a incrementarsi nei primi giorni della settimana e assumere un valore massimo settimanale in corrispondenza dei giorni centrali. È quindi opportuna la trasformazione dei valori giornalieri rilevati con le rispettive medie mobili centrate a sette elementi, che consentono di assorbire la ciclicità settimanale. Nella Figura 1 sono rappresentati i grafici dell'andamento dei casi giornalieri rilevati e delle loro medie mobili a 7 giorni per il periodo considerato.

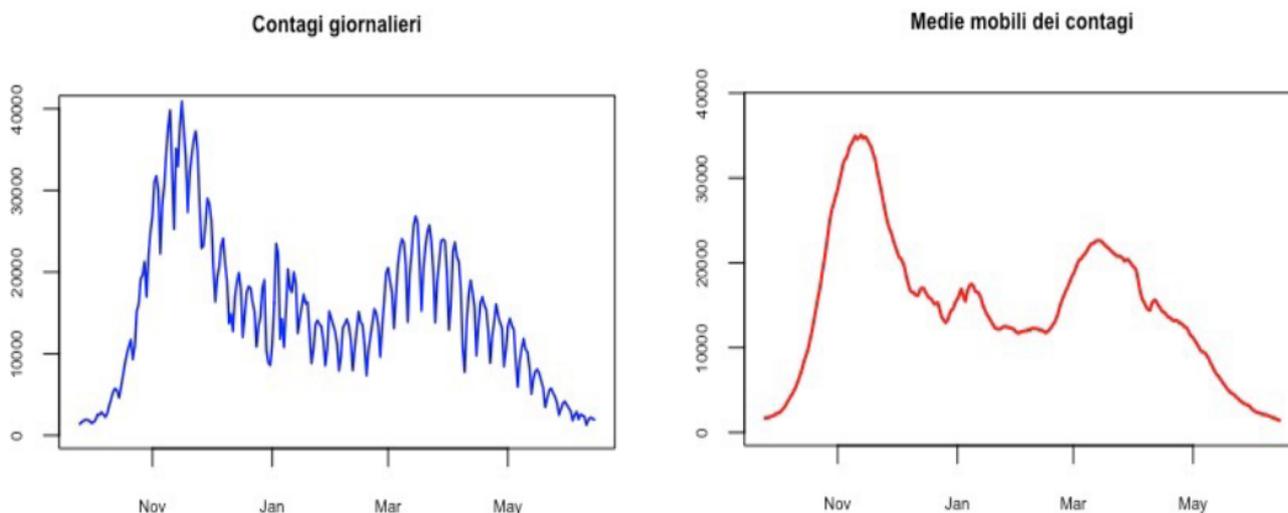


Figura 1: Andamento dei contagi giornalieri e della loro media mobile settimanale nel periodo dal 25.09.2020 al 15.06.2021

Come è evidente dai grafici, si riscontrano nella curva epidemica per il periodo analizzato tre massimi principali, corrispondenti a periodi di crescita più o meno marcata seguiti da periodi di decrescita, che rendono multimodale l'andamento globale della curva. Nel linguaggio

epidemiologico corrente la presenza di tali picchi, perlomeno di quelli di entità più rilevante, viene letta in termini di ondate successive della diffusione del virus nella popolazione.

Scopo del presente lavoro è di capire se si possa ritenere che l'andamento dei contagi sia o meno la somma di diverse singole ondate tra di loro per lo più indipendenti. Se così fosse si potrebbe cercare di individuare le situazioni che possono ipoteticamente averle determinate. In caso contrario si dovrebbe invece ritenere che l'andamento multimodale sia dovuto ad un singolo fattore determinante, che a sua volta potrebbe non aver avuto sempre la stessa intensità.

A questo scopo è necessario innanzitutto ipotizzare la forma che potrebbe assumere l'andamento di una singola ondata partendo dall'ipotesi che la forza del contagio sia molto intensa al suo inizio e successivamente in costante e progressivo decremento. Per fare ciò, si consideri a titolo esemplificativo uno scenario del tutto ipotetico in cui, a partire da un numero iniziale di casi, l'indice di trasmissibilità R_0 (o di riproduzione diagnostica RD_0 , cfr. [2] e il sito MADE [3]) si riduca dello 0.4% ogni giorno e contemporaneamente vengano assunte delle misure di contenimento che consentano di ridurre il numero di contagi che si verificherebbero giornalmente in loro assenza del 2%. La curva epidemica risultante in corrispondenza di un periodo temporale di 200 giorni è rappresentata nella Figura 2.

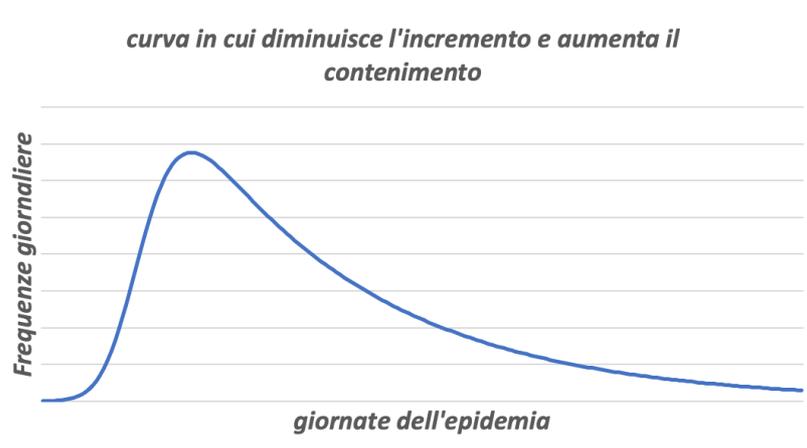


Figura 2: Andamento ipotetico delle frequenze giornaliere di contagi nel caso in cui l'incremento sia decrescente e aumenti l'effetto delle misure di contenimento

L'andamento della curva è asimmetrico, con una fase crescente che consente di raggiungere il massimo dei contagi abbastanza velocemente per poi dare adito a una fase di decrescita più lenta e con una coda di abbattimento della frequenza giornaliera relativamente lunga. Questo comportamento delle curve epidemiche è piuttosto comune e corrisponde a quanto riscontrato anche nella cosiddetta prima ondata dell'epidemia da SARS-CoV-2 in Italia e in altri Paesi a partire dal mese di febbraio 2020 fino al mese di giugno dello stesso anno. Da quest'ultimo periodo fino ai primi giorni del mese di agosto il numero di nuovi casi diagnosticati giornalmente si è infatti assestato su valori piuttosto bassi, dell'ordine di poche centinaia (303 il 15 giugno, 412 l'11 agosto per fare un esempio).

Per questo motivo si è pensato di adattare allo sviluppo dei contagi nelle tre ondate principali dell'epidemia per il periodo preso in esame delle curve che corrispondessero ai requisiti esposti per verificare se fosse possibile separarne il contributo e ipotizzare quindi quali fattori possano avere eventualmente determinato l'andamento globale risultante.

METODI

I modelli utilizzati per descrivere le curve epidemiche sono molteplici, ma possono essere classificati essenzialmente come basati su dinamiche di trasmissione o di tipo fenomenologico. I modelli basati sulle dinamiche di trasmissione richiedono di conoscere e descrivere tramite opportuni formalismi i meccanismi biologici, di dinamica sociale e sanitaria alla base dell'insorgenza, della diffusione e del contenimento di una malattia. Si rivelano certamente molto utili per la comprensione del comportamento delle epidemie e degli effetti dei vari interventi che vengono messi in atto, ma presentano una grande difficoltà inerente l'individuazione del numero elevato di parametri necessari e la relativa implementazione. In alternativa, si possono impiegare dei modelli di tipo fenomenologico, adatti ad una pura descrizione dell'andamento delle curve epidemiche, che si basano su un numero limitato di parametri individuabili tramite procedure standard di adattamento dei dati disponibili. Non hanno quindi come scopo la comprensione dei meccanismi all'origine delle dinamiche dell'epidemia e, pur presentando molte limitazioni, possono fornire delle utili indicazioni sul suo sviluppo e sono stati già applicati con successo per descrivere precedenti epidemie.

L'insorgere di un'epidemia è caratterizzato da un andamento di tipo genericamente esponenziale, con una forte crescita iniziale guidata da una legge di crescita proporzionale con ragione uguale al cosiddetto numero di riproduzione R_0 . Nella fase successiva, il tasso di crescita si riduce a seguito della diminuzione della frazione di popolazione effettivamente suscettibile all'infezione e delle misure di contenimento introdotte per impedire la trasmissione del virus. Vengono spesso utilizzati per questa fase modelli di tipo logistico, mentre un modello esponenziale con parametri aggiornati può continuare eventualmente a fornire un'indicazione dello scenario peggiore che si potrebbe verificare nell'ipotesi che non ci siano flessioni. Tuttavia, dal momento che nell'evoluzione di un'epidemia intervengono i fenomeni descritti sopra, la curva del numero cumulativo di casi presenta un punto di flesso in corrispondenza del quale la curva dell'incidenza assume un valore massimo a partire dal quale inizia una fase decrescente. I modelli esponenziale e logistico costituiscono quindi in termini tecnici le approssimazioni del primo e del secondo ordine alla fase di crescita di una curva epidemica come descritta dal noto modello SIR ampiamente impiegato per la modellizzazione epidemica.

L'andamento crescente e quindi decrescente della curva epidemica in ogni singola *poussée* può essere modellizzato anche tramite curve parametriche specifiche note per il loro impiego in ambito probabilistico e statistico. Prenderemo in considerazione in particolare le curve gaussiane (o normali), le curve lognormali e le curve di tipo Gamma (si veda p.es. [4]). Il tempo misurato in giorni viene mappato sulla funzione descritta dalla curva specifica e per adattare i dati disponibili e determinare i parametri del modello viene utilizzata una procedura dei minimi quadrati non lineare. Una volta eseguito il *fit*, i parametri stimati per la singola curva vengono utilizzati per visualizzarne graficamente l'andamento e sovrapporlo a quello dei dati reali. I valori assunti dalla curva così ottenuta vengono calcolati in corrispondenza di tutto il periodo di monitoraggio considerato, quindi vengono sottratti dai dati della curva epidemica in modo da poter modellizzare le *poussées* successive come indipendenti dalle precedenti. Dal momento che si sono individuati tre picchi principali, questa procedura viene ripetuta due volte.

Il primo modello considerato, il modello di Gauss o normale, è caratterizzato dalla simmetria della curva rispetto al suo massimo e prevede quindi un andamento di decrescita speculare rispetto a quello di crescita. Sebbene questa caratteristica sia riduttiva, si può comunque motivare l'utilizzo del modello gaussiano, la cui espressione analitica è più semplice, come una prima approssimazione giustificata anche dal fatto che in alcuni casi studiati in letteratura l'andamento dei contagi giornalieri ha in effetti assunto una forma assimilabile a una campana (cf. [5]).

Esaminando i dati disponibili appare tuttavia evidente come le fasi crescenti e decrescenti della curva del numero dei contagi giornalieri da Covid-19 non abbiano in generale un andamento simmetrico nel tempo. Dopo aver raggiunto il valore di picco relativo, si osserva una fase discendente meno ripida di quella ascendente pur tenendo conto della sovrapposizione di effetti che non consente di separare rigorosamente le diverse *poussées*. Si può quindi pensare di ottenere un adattamento migliore delle curve stimate ai dati reali utilizzando funzioni asimmetriche. In particolare, si è considerato un adattamento della curva con una funzione lognormale, già utilizzata per la modellizzazione dei dati della pandemia in altri contesti (si veda p.es. [6]).

Accanto alla funzione lognormale è possibile impiegare anche la funzione Gamma (cf. p.es. [7]), che è legata alla famiglia di distribuzioni Gamma generalizzate e, pur non essendo di per sé utilizzata per le curve epidemiche, gioca un ruolo essenziale nella modellizzazione collegata dei tempi di trasmissione del contagio da SARS-Cov-2 ([8]).

RISULTATI

Confronto dei fit ottenuti con le diverse curve

Curve normali

Iniziamo col modellizzare l'andamento giornaliero del numero di nuovi contagi diagnosticati tramite delle funzioni gaussiane dipendenti dal tempo, a priori indipendenti, indicate con $G_i(t)$, $i=1,2,3$. La variabile temporale t corrisponde alla numerazione dei giorni a partire da $t=1$, il primo giorno disponibile per il set di dati in media mobile, 28.09.2020, fino a $t = 257$, ultimo giorno delle rilevazioni in media mobile, 11.06.2021.

Le curve gaussiane a campana ottenute dai *fit* sui dati effettuati come descritto nel paragrafo precedente sono rappresentate nel pannello di sinistra della Figura 3, dove sono utilizzati colori diversi per le tre *poussées* individuate. Ogni curva è caratterizzata da tre parametri, in modo indipendente le une dalle altre: uno legato all'altezza massima della curva, uno al valore in cui raggiunge il massimo e uno alla larghezza a metà altezza. Si ricordi che i *fit* per la seconda e per la terza curva sono effettuati sulla differenza tra i dati reali e i valori della somme delle curve precedenti. Considerando le *poussées* come indipendenti tra loro, si tiene conto in questo modo del fatto che l'emergere di una nuova fase crescente di contagi si innesta sulla coda decrescente di quella precedente. Vale la pena puntualizzare che un ulteriore argomento a favore dell'uso di modelli gaussiani in questo contesto può risiedere nel fatto che corrispondano in modo naturale all'andamento sigmoidale del processo di saturazione degli infetti nelle pandemie, anche se sono possibili anche modelli asimmetrici. Il metodo numerico impiegato per la stima dei parametri delle curve risulta inoltre particolarmente stabile.

La forma generale di una curva normale o gaussiana, che in forma normalizzata corrisponde alla densità della variabile aleatoria omonima, è la seguente:

$$f_N(t) = C e^{-\frac{(t-m)^2}{2s^2}},$$

dove m e s rappresentano i parametri e C è una costante la cui modulazione consente di adattare l'altezza della curva.

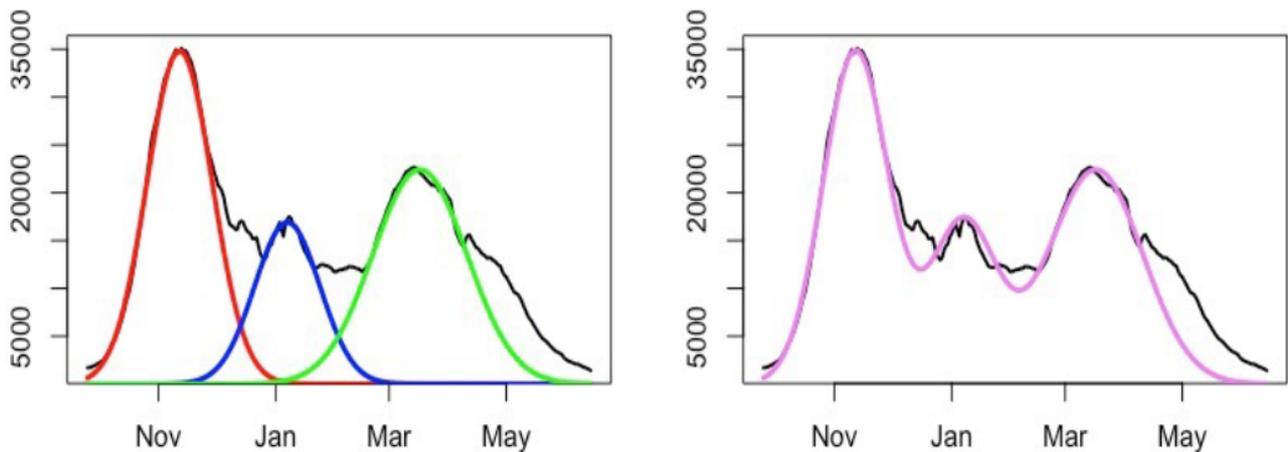


Figura 3: Adattamento di curve normali (grafico a sinistra) e della loro somma (grafico a destra) alla curva epidemica nel periodo considerato

Nel pannello di destra della Figura 3 la curva risultante dalla somma dei *fit* per le tre ondate su tutto il periodo di rilevazione è sovrapposta alla curva ottenuta dai dati reali. Si osserva un ottimo adattamento in corrispondenza delle fasi crescenti e dei picchi, mentre nelle fasi decrescenti lo scostamento tra le due curve è decisamente maggiore. Si può attribuire tale discrepanza alla dissimmetria insita nelle curve epidemiche, ma in parte anche ad un fenomeno che risulterà presente anche negli altri *fit*, ovvero la comparsa di un surplus di contagi tra una *poussée* e la successiva non spiegabile con la loro pura sovrapposizione.

Curve lognormali

Le curve ottenute dai *fit* con modelli lognormali sono rappresentate nel pannello di sinistra della Figura 4. La curva lognormale, che ha il suo corrispettivo nella distribuzione statistica lognormale, è asimmetrica e consente quindi un migliore adattamento dei dati rispetto alle funzioni simmetriche. Anche in questo caso ogni curva è caratterizzata da tre parametri, in modo indipendente le une dalle altre.

La forma generale di una curva lognormale, la cui forma normalizzata fornisce la densità della variabile aleatoria omonima, è la seguente:

$$f_L(t) = \frac{K}{\sigma t} e^{-\frac{(\log(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

dove μ e σ rappresentano i parametri e K è una costante essenzialmente di scala che consente di modulare l'altezza della curva.

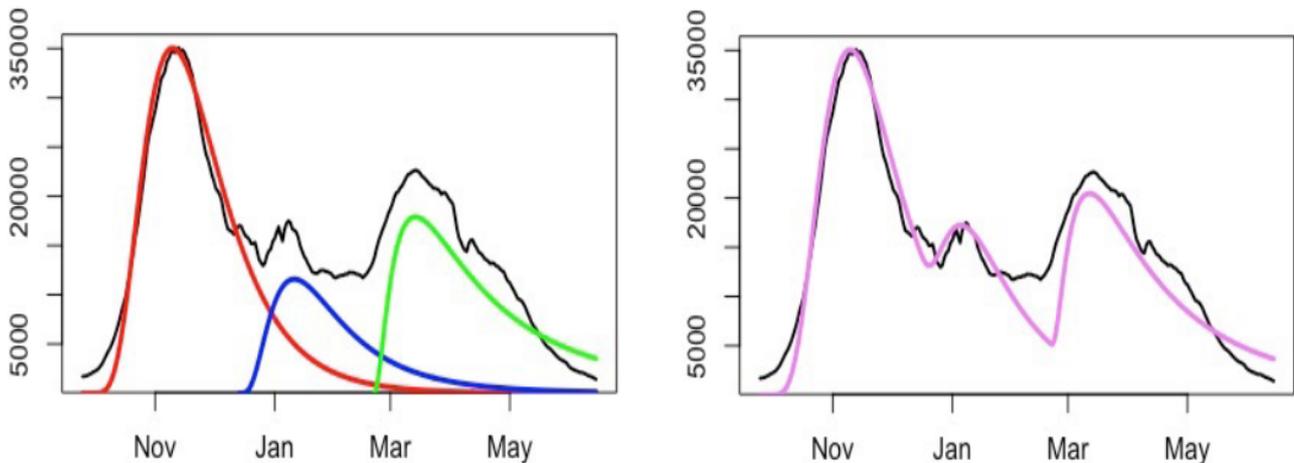


Figura 4: Adattamento di curve lognormali (grafico a sinistra) e della loro somma (grafico a destra) alla curva epidemica nel periodo considerato

La maggior entità della parte decrescente della prima e della seconda curva fa sì che, contrariamente al caso del *fit* gaussiano, i picchi successivi al primo vengano sottostimati dalle relative curve di modellizzazione. Tale sottostima permane anche per il terzo picco quando si considera nel pannello di destra della Figura 4 il *fit* globale ottenuto dalla somma delle tre singole curve estese a tutto il periodo di monitoraggio.

Curve Gamma

Le curve ottenute dai *fit* con modelli Gamma sono rappresentate nel pannello di sinistra della Figura 5. Anche la curva Gamma, legata alla distribuzione statistica omonima, è asimmetrica e consente quindi di ottenere un buon adattamento globale ai dati. E' caratterizzata ancora da tre parametri, la cui interpretazione non è però immediata in termini di valori legati alla forma della curva.

La forma generale di una curva di tipo Gamma, che è definita solo per valori positivi dell'argomento, in questo caso il tempo t espresso in giorni, e la cui normalizzazione corrisponde alla densità della variabile aleatoria omonima, è la seguente:

$$f_G(t) = W t^{\alpha-1} e^{-\beta t},$$

dove α e β rappresentano i parametri cosiddetti di forma e di scala rispettivamente e W è il parametro che consente di modulare l'altezza della curva.

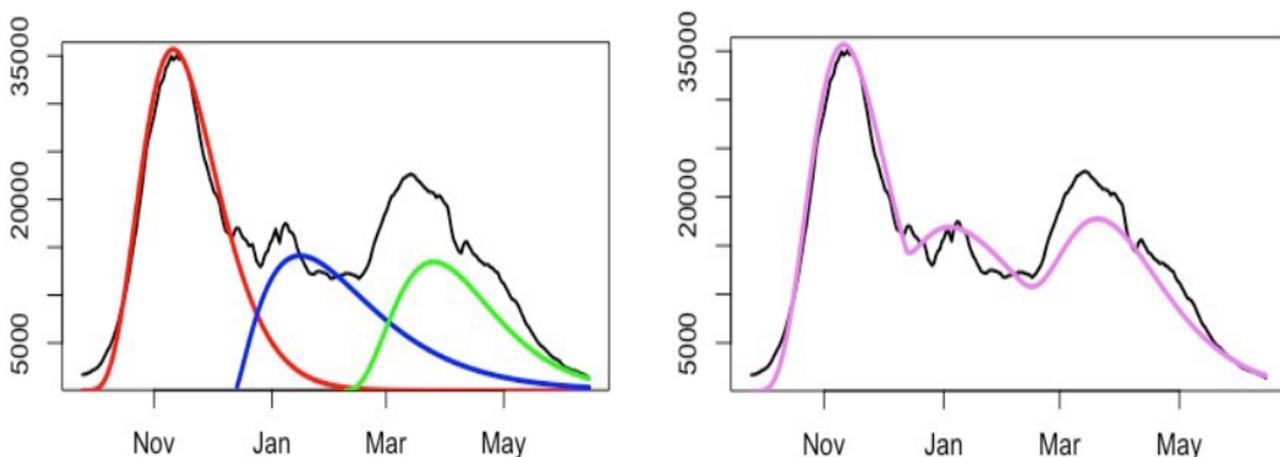


Figura 5: Adattamento di curve Gamma (grafico a sinistra) e della loro somma (grafico a destra) alla curva epidemica nel periodo considerato

Si può notare anche in questo caso come i picchi successivi al primo risultino sottostimati. La particolare forma della curva Gamma fa sì inoltre che il secondo picco nei dati, poco rilevato e di larghezza ridotta, consenta un *fit* soltanto approssimativo. Il *fit* globale ottenuto dalla somma delle tre singole curve riportato nel pannello di destra della Figura 5 rivela quindi, oltre che una sottostima del terzo picco, una stima poco precisa della seconda *poussée*; risulta tuttavia meglio modellizzata la fase decrescente conclusiva.

Andamento dei residui

Come è evidente dai pannelli di destra delle Figure 3, 4 e 5, le curve globali ottenute dalla somma delle tre curve adattate secondo i vari modelli non solo come è ovvio non si adattano perfettamente ai dati, ma presentano delle discrepanze rilevanti rispetto ad essi in corrispondenza dei periodi intercorrenti tra le fasi di discesa e di ascesa successiva. Nella figura 6 vengono riportate la curva epidemica dei contagi giornalieri insieme alla curva del modello globale e a quella dei residui assoluti per i tre *fit*, ovvero della differenza in ogni giorno tra le due a cui viene assegnato sempre un valore positivo.

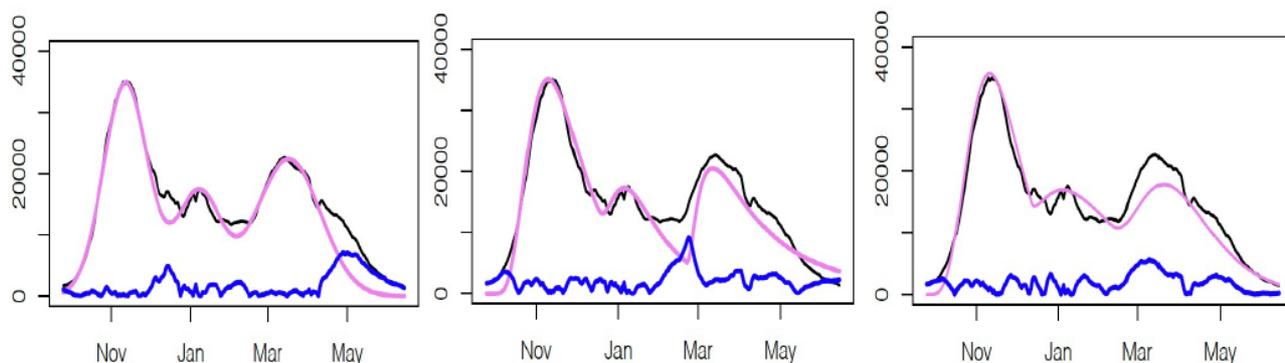


Figura 6: Curva epidemica dei contagi giornalieri (linea nera), curva globale ottenuta dalla somma delle tre singole curve (linea viola) e residui assoluti (differenza tra le due curve presa sempre con

segno positivo, linea blu) per i tre fit normale (a sinistra), lognormale (in centro) e Gamma (a destra).

Nei periodi di transizione tra una fase discendente e la successiva fase ascendente la discrepanza tra la curva epidemica e quella del modello tenda ad aumentare anche notevolmente, come risulta dai picchi nei valori assunti dai residui assoluti. Questo comportamento è maggiormente evidente se si considerano i modelli normale e lognormale. Nel caso del modello normale la curva epidemica si discosta molto da quella fittata anche nel periodo terminale del monitoraggio, dal momento che l'andamento decrescente dell'incidenza in tale fase si è allontanato in modo particolarmente evidente dalla simmetria rispetto alla fase ascendente che l'ha preceduto. Nel caso del modello Gamma la curva fittata sovrastima la seconda ondata e sottostima notevolmente il terzo picco dell'incidenza; ciò è dovuto alla difficoltà di adattare curve di tipo Gamma all'andamento dei dati rilevati.

DISCUSSIONE

L'analisi qui presentata evidenzia come sia possibile scomporre algebricamente la "storia" dell'epidemia in diverse *poussées* tra loro potenzialmente indipendenti. E' allora necessario chiedersi se sia più credibile che l'evoluzione dell'epidemia sia un andamento unico pur con momenti più alti e altri più bassi, ovvero se sia invece correttamente ipotizzabile che sia costituito da episodi tra loro quasi indipendenti.

Bisogna considerare ciò che fa crescere e ciò che fa diminuire il numero di contagi: tra i fattori di crescita il primo certamente è la contagiosità dell'agente infettivo, il virus SARS-CoV-2 con tutte le sue possibili varianti. La misura della contagiosità è data dal numero di contagi che ogni infetto in condizioni di assenza di misure preventive può produrre e l'indice che esprime questa capacità è il famoso R_0 , l'"erre con zero". La capacità di contagio dipende però anche da altre condizioni: dal numero di contatti che ogni contagiato può avere e dalle misure precauzionali adottate durante i contatti stessi. Inoltre si può ritenere che vi siano fattori ambientali che possono favorire il mantenimento del virus, sia nell'aria ad esempio di locali chiusi sia su superfici.

Cosa può far diminuire invece la probabilità che un infetto contagi altre persone? Innanzitutto l'isolamento dei contagiati, quindi la riduzione dei contatti, l'aumento delle precauzioni quali ad esempio le mascherine o l'igiene delle mani, la diminuzione della percentuale dei suscettibili a seguito di pregressa infezione o di vaccinazione e, cosa forse meno probabile, anche una riduzione della contagiosità del virus.

L'andamento dell'epidemia quindi è la conseguenza dell'equilibrio tra ciò che fa crescere e ciò che fa diminuire la frequenza dei contagi. Si può ipotizzare che questo equilibrio riesca a far raggiungere in un determinato contesto la completa o quasi assenza di contagi e quindi che la *poussée* si arresti ed invece i contagi risorgano altrove per uno sviluppo (un focolaio) di casi inizialmente non individuati e quindi non controllati.

Settimane	Numero nuovi contagi ($R_0=2$)	
	1	1
2	2	20
3	4	40
4	8	80
5	16	160
6	32	320
7	64	640
8	128	1280
9	256	2560
10	512	5120
11	1024	10240
12	2048	20480

Tabella 1: Esempio di progressione dei contagi a partire da pochi casi iniziali

Lo sviluppo dei contagi avviene in modo moltiplicativo e se ad esempio vi fosse un raddoppio ogni settimana ($R_0 = 2$), a partire da un unico caso iniziale i casi diventerebbero mille in undici settimane e ci vorrebbero comunque sempre due mesi per passare dai dieci casi iniziali a più di mille, come è esemplificato nella Tabella 1 riportata sopra.

E' quindi possibile ipotizzare che si sia riusciti in qualche modo a contenere e a estinguere i contagi di un'ondata, ma che alcuni casi di questa non siano stati individuati perché ad esempio non diagnosticati in quanto asintomatici ed abbiano quindi attivato altrove una nuova ondata poi controllata a sua volta nei tempi necessari. Naturalmente i casi "sfuggiti" al controllo e capaci di riattivare un nuovo sviluppo dell'epidemia possono essere stati determinati anche da un abbassamento delle misure di contenimento che spesso avvengono quando si crede che il virus, come purtroppo hanno sostenuto alcuni illustri clinici, sia morto o per lo meno sia andato in letargo. Può essere che il virus abbia perso o abbia invece acquisito nel corso dell'epidemia capacità di contagiare, come si dice sia capitato a causa delle mutazioni nelle varianti Alpha e Delta, ma è difficile nell'analisi dei dati separare l'effetto della contagiosità del virus dalle mutate condizioni di contatto e di precauzioni adottate.

Facendo delle considerazioni puramente qualitative, i movimenti di incremento e decremento della curva epidemica in Italia possono essere messi approssimativamente in relazione allo sviluppo temporale come indicato nella Figura 7 sottostante (cf. per esempio [9], [10]). I periodi in cui è iniziata la fase incrementale dei contagi, indicati dalle frecce rosse, si possono individuare nella seconda metà di settembre (1.), nella prima metà di gennaio (3.) e nella prima metà di marzo (5.) e corrispondono al momento della riapertura delle scuole e di altre attività, all'allentamento di alcune misure di contenimento in occasione delle vacanze natalizie e al nuovo allentamento delle misure in alcune Regioni. I periodi di decrescita della curva, il cui inizio approssimativo è indicato con le frecce verdi, si possono invece mettere in corrispondenza anche con l'introduzione di misure più severe quali il coprifuoco e la chiusura almeno parziale delle scuole (2.), le restrizioni sugli spostamenti (4.) e l'abrogazione della zona gialla (6.).

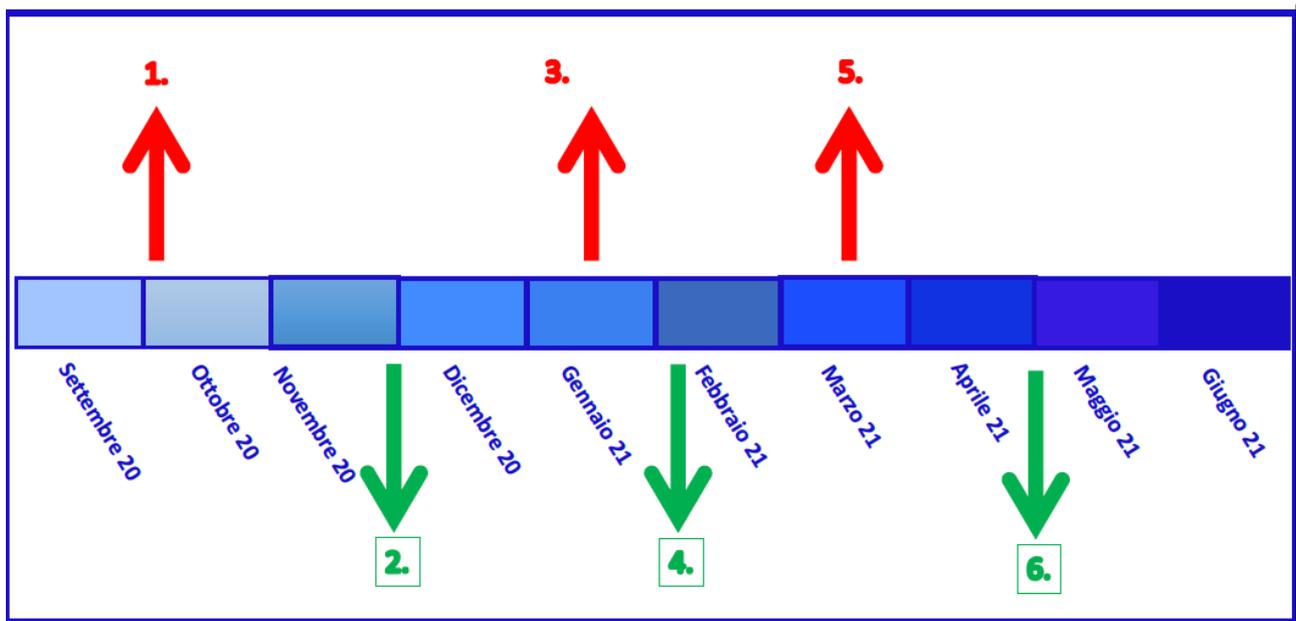


Figura 7: Sviluppo temporale delle fasi di incremento (frecce rosse) e decremento (frecce verdi) della curva epidemica nel periodo da settembre 2020 a giugno 2021

CONCLUSIONI

Lo scopo di questo lavoro è stato di modellizzare l'andamento giornaliero dell'incidenza dei contagi in Italia tra la fine di settembre 2020 e la metà di giugno 2021 allo scopo di evidenziare il succedersi di almeno tre *poussées* successive potenzialmente indipendenti tra loro.

I modelli meccanicistici o strutturali per le epidemie (cf. per esempio [9]) hanno come scopo di studiare anche l'effetto di variabili quali politiche, sistema sanitario o fattori culturali sull'esito di una pandemia, e quindi di fornire previsioni che consentano di esprimere raccomandazioni più dettagliate per il contenimento e la gestione dei contagi. Altre analisi teoriche in cui la pandemia viene modellizzata come una serie di ondate epidemiche possono essere condotte utilizzando modelli matematici che fanno ricorso a vari metodi quali ad esempio le serie storiche e i modelli di tipo SIR (cf. a titolo di esempio [12]-[16]). In modo complementare, i modelli fenomenologici come quelli presentati in questo lavoro si collocano a livello puramente descrittivo. I risultati ottenuti hanno consentito di ipotizzare che l'andamento della curva epidemica non sia originato dallo sviluppo multimodale di un'unica ondata, ma sia piuttosto originato dal susseguirsi di più spinte di diffusione dei contagi.

Se i risultati ottenuti e le considerazioni che ne sono seguite corrispondono alla realtà significa allora che dovrebbero essere aumentati gli sforzi di contenimento non solo nei momenti di massimo dell'epidemia, ma ancor di più in quelli di minimo per evitare il riattivarsi subdolo di una nuova ondata. Va detto che questo crea però forti problemi di consenso nella popolazione, che comprensibilmente al diminuire dei casi e dei decessi non vede l'ora di poter riprendere la normalità della vita sociale ed economica.

Si può quindi affermare che, come un pendolo che continua il suo movimento alterno, così avviene nelle epidemie che si esauriscono lentamente dopo successive ondate. A differenza del pendolo, non è detto però che si manifestino sempre con energie decrescenti anche perché spesso i casi occulti da cui riparte un'ondata sono più numerosi di quelli dell'ondata precedente.

Concludendo, si auspica la massima attenzione delle istituzioni sanitarie nelle fasi finali decrescenti delle ondate nelle quali dovrebbe essere effettuato il numero maggiore possibile di test diagnostici per cercare di bloccare sul nascere ogni possibile nuovo focolaio prima che si espanda e diventi sempre più difficile contenerlo ulteriormente.

Conflitti di interesse dichiarati: nessuno

BIBLIOGRAFIA

- [1] R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. UR <https://www.R-project.org>.
- [2] Giraud M.T., Falcone M., Cadum E. et al., Rt or RDt, that is the question!. E&P 2020; 44 (5-6), 2-50.
- [3] <https://epiprev.it/apps/made.php>.
- [4] Johnson, N.L.; Kotz, S; Balakrishnan, N. Continuous Univariate Distributions, Volume 1., 2nd Edition. New York, John Wiley & Sons, 1994.
- [5] Schüttler J., Schlickeiser R., Schlickeiser F. and Kröger M. Covid-19 Predictions Using a Gauss Model, Based on Data from April 2. Physics 2020; 2, 197–212.
- [6] Valvo P.S. A Bimodal Lognormal Distribution Model for the Prediction of COVID-19 Deaths. Appl. Sci. 2020;10, 8500: 1-24.
- [7] Hawryluk I., Mellan T.A., Hoeltgebaum H. et al. Inference of COVID-19 epidemiological distributions from Brazilian hospital data. J. R. Soc. Interface 17: 20200596.
- [8] Cereda D., Tirani M., Rovida F. et al. The early phase of the Covid-19 outbreak in Lombardy, Italy. Disponibile all'indirizzo: <https://arxiv.org/abs/2003.09320>.
- [9] https://it.wikipedia.org/wiki/Gestione_della_pandemia_di_COVID-19_in_Italia.
- [10] https://it.wikipedia.org/wiki/Pandemia_di_COVID-19_in_Italia#Ottobre_2020_-_marzo_2021.
- [11] Lessler J. and Cummings D.A.T. Mechanistic Models of Infectious Disease and Their Impact on Public Health. Am J Epidemiol. 2016;183(5):415–422.
- [12] Abotaleb M. and Makarovskikh T. System for Forecasting COVID-19 Cases Using Time-Series and Neural Networks Models. Eng. Proc. 2021; 5, 46.
- [13] Ahmed H.M., Elbarkouky R.A., Omar O.A.M. and Ragusa M.A. Models for COVID-19 Daily Confirmed Cases in Different Countries. Mathematics 2021; 9, 659.
- [14] Kaxiras E. and Neofotistos G. Multiple Epidemic Wave Model of the COVID-19 Pandemic: Modeling Study. J Med Internet Res. 2020 Jul; 22(7): e20912.
- [15] Cacciapaglia G., Cot C and Sannino F. Multiwave pandemic dynamics explained: how to tame the next wave of infectious diseases. *Sci Rep.* 2021;11(1):6638.

[16] He D., Dushoff J., Day T., Ma J. And Earn D.J.D.. Inferring the causes of the three waves of the 1918 influenza pandemic in England and Wales. *Proc R Soc Lond B Biol Sci.* 2013; 280(1766):1-7.