

***La diffusione dell'innovazione:  
effetti di rete in Piemonte***

**Simona Cantono\* e Sorin Solomon<sup>+</sup>**

\* Dipartimento di Economia “S. Cogneetti de Martiis”, Università di Torino

<sup>+</sup> Racah Institute of Physics, Hebrew University of Jerusalem

Desideriamo ringraziare tutti coloro che hanno collaborato alla realizzazione di questo lavoro. In particolare, siamo riconoscenti a Riccardo Boero per aver fornito l'intera base di dati che è ha contribuito in modo significativo alla qualità scientifica della nostra analisi. Inoltre, desideriamo ringraziare i coordinatori scientifici della Ricerca Rota 2010, Giuseppe Russo e Pietro Terna, senza il sostegno dei quali questa ricerca non sarebbe stata possibile. Infine, siamo grati a tutti gli enti finanziatori per il prezioso contributo economico.

## **I. Introduzione**

Il progresso tecnologico, i suoi effetti ed il modo di favorirlo sono tra i temi più scottanti della scienza economica ormai da molto tempo. Da sempre considerata uno dei motori della crescita economica, l'innovazione è stata oggetto di attento scrutinio da parte di molti economisti. Ma, nonostante l'elevata rilevanza di una diffusa adozione di nuove tecnologie sulla crescita economica, la maggior parte degli sforzi scientifici sono confinati all'analisi dell'effetto delle spese in ricerca e sviluppo (Jaffe and Stavins, 1995; Stoneman, 2002; Soderholm and Klaassen, 2007). La ragione che essenzialmente muove gli animi di costoro risiede nel credere che il mercato operi la selezione migliore tra le possibili tecnologie disponibili e che, se una tecnologia non si diffonde, è perché non è compatibile all'ambiente che avrebbe dovuto ospitarla. Ciò non significa che il meccanismo di mercato sia il migliore in termini assoluti, bensì che sia il migliore relativamente a quelli alternativi, come ad esempio il meccanismo decisionale pubblico. In realtà, ci sono degli ostacoli alla diffusione dell'innovazione che spesso non sono frutto dell' inferiorità "economica" che la contraddistingue, ma conseguenza dell'esistenza di popolazioni di potenziali fruitori non connesse, non comunicanti, eterogenee (Karshenas and Stoneman, 1995).

Un articolato fondamentale che ha indicato la via a successivi contributi scientifici sullo studio della diffusione dell'innovazione è quello scritto da Griliches (1957) (e successivamente quello di Mansfield, 1961). Griliches si interessò particolarmente all'evidenza empirica riguardante la coltivazione dei cereali ibridi negli Stati Uniti. In particolare, volle spiegare perché l'iniziale resistenza a quel tipo di coltivazione fu successivamente rimpiazzata da un consenso geograficamente diffuso e pressoché totale. A questo scopo applicò l'equazione logistica alle serie empiriche che aveva a disposizione assumendo che la diffusione dei cereali ibridi segua una dinamica del tipo epidemico: in altre parole Griliches dedusse che il tasso di adozione è proporzionale al numero cumulato di fruitori (analogo al numero di individui infetti) moltiplicato per il numero di potenziali fruitori rimasto sul mercato (analogo al numero di individui predisposti al contagio). L'obiettivo di Griliches fu sia quello di analizzare la posizione di equilibrio, che il cammino intrapreso per raggiungere l'equilibrio stesso. Ciò nonostante, il suo modello non poteva spiegare il caso in cui l'equilibrio ideale non è raggiunto. Infatti Griliches non affrontò il problema di innovazioni commerciabili ma di fatto fallimentari nella conquista del mercato. Come precedentemente accennato (Karshenas e Stoneman, 1995), le cause d'insuccesso sono spesso da ricercare nella composizione individuale della struttura di mercato, la quale rivelerebbe gli ostacoli "microscopici" che si oppongono alla propagazione e che sono trascurati dai "macroscopici" modelli epidemici. A causa di questi ostacoli, il processo di adozione è sospeso in uno stato inefficiente relativamente allo stato di equilibrio in cui ogni fruitore potenziale adotta la tecnologia;

è intrappolato da comunità di fruitori isolate dal resto del mercato potenzialmente conquistabile; è circondato da popolazioni resistenti alla sua propagazione.

Difficile pensare di rappresentare questo genere di processi assumendo una popolazione omogenea (strada seguita dai modelli epidemici). Caratterizzare i potenziali fruitori, ad uno ad uno, è essenziale non solo al fine di riprodurre dinamiche realistiche di adozione, ma anche al fine di introdurre uno degli elementi distintivi dell'analisi strettamente economica, e cioè la scelta individuale. L'innovazione non è un'onda che travolge nuotatori inconsci. Al contrario è l'onda che consciamente si sceglie di cavalcare. I c.d. *rank models*, o *probit models*, che considerano esplicitamente la scelta economica, fanno capo ad un articolo scritto da Davies (1979). In questi modelli, il potenziale fruitore diventa fruitore a tutti gli effetti soltanto dopo aver accertato che il beneficio atteso dall'adozione della tecnologia sia superiore al costo d'adozione. D'altro canto, l'assunzione implicita dei *rank models* è che la diffusione sia simultanea.

Riassumendo sia i modelli epidemici che i *rank models* raccontano episodi di una storia, ma non la storia per intero. Sarà proprio l'obiettivo di questa ricerca, quello di costruire un modello di propagazione dell'innovazione che incorpori i pregi di entrambi e che, contemporaneamente, si liberi dei difetti. La via che intraprendiamo è la seguente: la connessione tra potenziali fruitori è rappresentata dai legami di una rete i cui nodi sono i potenziali fruitori stessi. Il processo di adozione si diffonde solo tra vicini e solo se almeno uno di essi ha già adottato la tecnologia. Ogni nodo della rete è caratterizzato da una certa disponibilità a pagare per adottare la tecnologia :un potenziale fruitore diventa fruitore solo se il beneficio atteso conseguente all'adozione è superiore al costo. In altre parole, studiamo la diffusione dell'innovazione attraverso l'applicazione della teoria della percolazione (Antonelli, 1996; Solomon et. al, 2000; Frenken et al., 2008; Honhisch et al., 2008) e proponiamo interventi di politica economica a suo sostegno (Cantono e Silverberg, 2009). Nel nostro formalismo l'effetto degli ostacoli "microscopici" che si oppongono alla propagazione, si traducono nella fase di transizione della percolazione: per densità inferiori alla densità critica di percolazione, la diffusione della tecnologia non si propaga al sistema per intero, ma solo ad una trascurabile parte di esso. Inoltre, a differenza dei *rank models* (i quali riproducono dinamiche artificiali), proponiamo di aggiungere un meccanismo, detto di bottom-up, secondo il quale all'aumentare del numero cumulato di fruitori segue un miglioramento delle condizioni di mercato (cioè una riduzione del costo di adozione). Questo meccanismo dà vita ad un'iterazione autocatalitica nel processo di diffusione (Cantono e Solomon, 2010): ad un dato costo iniziale una certa frazione di individui adottano la tecnologia, la quale si ridurrà di costo a conseguenza delle economie di apprendimento, fatto che incrementerà il numero di potenziali fruitori che si tradurrà nell'aumento del numero di fruitori, il quale ridurrà ulteriormente il costo e così via. Analizzeremo

le dinamiche di diffusione su una rete reale, la rete commerciale delle industrie piemontesi (Boero, 2006). Date certe combinazioni dei parametri, il nostro modello dimostra come la propagazione si estenda a tutto il sistema o come il processo sia confinato ad una porzione trascurabile di esso. La fase di transizione è di primo ordine e, nel secondo caso, ci sono interessanti interventi di politica economica che potrebbero indebolire gli ostacoli che si oppongono alla diffusione e permettere alla propagazione di raggiungere il sistema intero. Non soltanto: politiche iniziali atte a facilitare l'iniziale adozione della tecnologia per un certo numero d'individui permettono a tecnologie confinate al fallimento a causa dell'elevato costo iniziale di avere successo.

L'esposizione dell'analisi è articolata nei paragrafi che seguono: nel secondo presenteremo il modello e le implicazioni di politica economica; nel terzo illustreremo la base di dati utilizzata; nel quarto elencheremo i risultati; concluderemo nel quinto.

## **II. Descrizione del modello e delle implicazioni di politica economica**

Uno dei fatti stilizzati che riguarda la diffusione dell'innovazione è la sua dinamica ritardata, il fatto cioè che bassi tassi di adozione permangono per lungo tempo fino a che, improvvisamente, crescono in modo sproporzionato. La spiegazione di questi effetti ritardati e disarmonici si affida all'analisi delle barriere ad una completa diffusione, dovute alla micro e macro struttura del sistema, così come alle diverse iterazioni autocatalitiche tra le diverse scale. Una tecnologia potenzialmente commerciabile, potrebbe non raggiungere mai tutti coloro disposti ad adottarla poiché la sua propagazione potrebbe giacere a lungo, pur in uno stato di non-equilibrio, intrappolata da comunità isolate. Il sistema potrebbe opporre resistenza: l'ostilità dell'ambiente ospitante dipende sia dall'interazione tra il sistema e le sue componenti, che dall'interazione tra le componenti. Alcuni concetti essenziali al fine di comprendere questo genere di fenomeni di massa, come "word-of-mouth", "domino failures" e "viral products", sono già stati introdotti (Goldenberg et al 2000, Solomon et al 2000, Weisbuch et al 2001, Aleksiejuk and Holyst 2001, Bornholdt 2001, Erez et al 2005, Goldenberg et al 2005, Yaari et al 2006, Erez et al 2007, Hohnisch et al 2008, Siczka and Holyst 2009, Lorenz et al 2009). In particolare, Antonelli (1996), Solomon et al 2000, Weisbuch et al (2001), Frenken et al (2008) and Hohnisch et al (2008) hanno studiato con successo la propagazione di nuovi prodotti, opinioni e informazioni in reti economiche e sociali applicando la teoria della percolazione. Ma per descrivere i sistemi reali il modello originario della percolazione deve essere esteso all'analisi di fatti empirici ignorati dai modelli di ispirazione fisica: in particolare, al contrario dei modelli originari i quali si concentrano essenzialmente sulle interazioni tra le componenti del sistema ("peer-to-peer"), è necessario considerare anche l'interazione tra il sistema e le sue componenti. Sono due infatti gli ulteriori meccanismi che caratterizzano

realisticamente i sistemi economici e sociali: il meccanismo di bottom-up e quello di top-down (Cantono e Silverberg, 2009). In questa ricerca noi presentiamo un modello che integra i precedenti tentativi di successo (Cantono e Solomon, 2010) e proponiamo l'applicazione ad un sistema economico reale, quello della rete commerciale delle industrie piemontesi (i cui dati sono disponibili grazie allo studio sviluppato da Boero, 2006).

Nel testo che segue riconduciamo la terminologia formale del modello al caso della diffusione di una nuova tecnologia. Il sistema è caratterizzato dal costo della tecnologia  $c$ , il quale si trova ad un livello iniziale  $c = c_0$  nel momento in cui la tecnologia appare sul mercato o, in altre parole, nel momento in cui vi il primo fruitore. L'insieme delle imprese che costituiscono il sistema economico analizzato è classificato da  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ . Ogni impresa è caratterizzata da un beneficio atteso  $b_i$ . Ogni impresa  $i$  è connessa a partners commerciali, o "vicini",  $j$ . I legami  $(i, j)$  formano una rete con una certa geometria. La geometria della rete caratterizza le interazioni tra le imprese, cioè il meccanismo di peer-to-peer. Definiamo come potenziale fruitore della tecnologia quell'impresa il cui beneficio atteso è superiore al costo della tecnologia  $c$ . Più precisamente un'impresa è un fruitore potenziale se e solo se:

- A. uno dei suoi partners commerciali è già un fruitore della tecnologia;
- B. il suo beneficio atteso è maggiore del costo,  $b_i > c$ .

In altre parole, finché il costo della tecnologia  $c > b_i$ , l'impresa non adotterà anche qualora uno dei suoi partners commerciali lo facesse. Altrimenti, se il costo della tecnologia scende al di sotto della soglia  $b_i$ ,  $c < b_i$ , l'impresa diventa un potenziale fruitore: non appena l'onda dell'innovazione la raggiungerà, sarà pronta a cavalcarla. Le condizioni A e B caratterizzano la propagazione *autonoma*, cioè quella che, a seguito della comparsa della tecnologia sul mercato ( $N_0$ ), si diffonde a tutto il sistema senza la necessità di interventi esterni. Se la diffusione raggiunge valori dell'ordine di  $M$ , diciamo che la tecnologia è *percolata*.

In modo più formale, le dinamiche riprodotte dal nostro modello sono governate dalle equazioni seguenti. Il beneficio atteso di ogni impresa, costante nel tempo, è distribuito secondo una distribuzione di probabilità paretiana:

$$P(c > b) = b^{-\mu} \text{ per } b > 1 \text{ e } P(c > b) = 1 \text{ per } b < 1$$

La scelta del tipo di distribuzione è giustificata dall'evidenza empirica legata alla misurazione delle prestazioni d'impresa (Axtell, 2001; Fujiwara, 2004; Delli Gatti et. Al, 2004), evidenza che dimostra come tali prestazioni esibiscano una distribuzione esponenziale (Pareto). Il tipo di

distribuzione determina la densità delle imprese potenzialmente fruibili che sono presenti sul mercato ad ogni livello del costo della tecnologia, il quale aumenterà al ridursi di tale costo:

$$\rho(c) = c^{-\mu} \text{ per } c > 1 \text{ e } \rho(c) = 1 \text{ per } c < 1, \quad [1]$$

e implicitamente determina il valore critico di percolazione,  $c_c = \rho_c^{-1/\mu}$ . Abbiamo così definito il secondo importante meccanismo del modello, cioè il meccanismo di top-down (eq. 1).

Il costo della tecnologia diminuisce all'aumentare del numero cumulato  $N$  di fruitori secondo:

$$c(N) = c_0 N^{-\alpha}, \quad [2]$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di apprendimento, cioè il tasso al quale il costo della tecnologia si riduce all'aumentare delle unità prodotte. L'eq. 2 definisce il terzo meccanismo del modello, quello di bottom-up: al crescere del numero cumulato di fruitori, il costo della tecnologia si riduce. Questo meccanismo è essenziale poiché in sua assenza le dinamiche del modello si ridurrebbero alla ricerca del valore di  $c_0$  tale che  $c_0 < c_c$ . Invece, l'introduzione del meccanismo di bottom-up implica la ricerca del nuovo valore critico  $c_{0,c}$  che separa la fase di propagazione isolata e trascurabile da quella di diffusione totale. Inoltre la fase di transizione a  $c_{0,c}$  è discontinua.

Dopo la descrizione dei meccanismi che governano le dinamiche del nostro modello, passiamo ora alla descrizione delle dinamiche stesse e alle implicazioni di politica economica. Come già precedentemente anticipato, le dinamiche di propagazione sono innescate da un iniziale numero di fruitori  $N_0$ , il quale insieme a  $c_0, \alpha, \mu$ , e  $M$ , completa l'insieme dei parametri del modello. All'insorgere della tecnologia sul mercato, la propagazione procede seguendo due possibili traiettorie:

- o quella autonoma che soddisfa le fasi A e B;
- o quella forzata, costituita dalla fase A accompagnata da una fase B-modificata. La fase B-modificata è la fase in cui la propagazione è forzata fino ad un punto che definiamo di "non ritorno", il punto dopo il quale più nessun ostacolo potrà opporsi all'onda tecnologica.

Le simulazioni numeriche dimostrano come questa fase di transizione sia discontinua e, oltre un certo valore di  $\alpha$ , di primo ordine. Illusteremo soprattutto la fase di transizione sul piano  $c_0, \alpha$ . Dimostreremo come, per valori di  $c_0 < c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$ , il processo di diffusione innescato dagli  $N_0$  fruitori raggiunga livelli macroscopici, cioè si propaghi e conquisti tutto il sistema. Per valori di  $c_0$  che sono appena inferiori a  $c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$ , il processo si espande prima velocemente, poi lentamente e infine raggiunge tutto il sistema. Per valori di  $c_0 > c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$ , l'iniziale numero di fruitori  $N_0$

non è sufficiente a trascinare il processo di diffusione fino al punto di non ritorno. Intrappolata da aree/comunità locali isolate dal resto del sistema, l'onda tecnologica si espanderà solo se assistita nel suo cammino. Un intervento pubblico volto ad accrescere il numero di fruitori fino al punto di non ritorno è necessario e sufficiente a permettere una diffusione a livello macroscopico

Infatti, lo scopo di analizzare le dinamiche della fase B-modificata è quello di riprodurre un possibile intervento pubblico a sostegno della diffusione di una tecnologia che, già presente sul mercato, ha raggiunto un equilibrio instabile non "ottimo"<sup>1</sup>.

Riassumendo, gli interventi di politica economica che analizziamo sono i seguenti:

- descriviamo il caso in cui una commissione pubblica locale debba selezionare un certo numero di progetti innovativi da subsidiare. L'insieme  $N_0$  delle imprese candidate appartiene allo stesso settore economico. Lo confrontiamo al caso in cui le  $N_0$  imprese sono estratte casualmente dall'insieme di nodi / imprese della rete industriale. I risultati dimostrano che il tipo di iniziali fruitori non ha un effetto significativo sulla fase di transizione. Il valore critico del costo,  $c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$ , non dipende dalla composizione e/o posizione delle imprese destinate ad innescare l'onda di diffusione;
- data la distribuzione dei benefici attesi, analizziamo il cammino ottimo (cioè meno costoso) di un intervento pubblico volto a sostenere l'onda di propagazione fino al punto di non ritorno, quando l'ambiente è relativamente troppo ostile ad una diffusione autonoma della tecnologia. Se i fruitori iniziali non sono sufficienti ad innescare un processo di propagazione autonoma, il processo stesso deve essere sostenuto fino al punto in cui nulla potrà più opporsi alla completa diffusione della tecnologia.

### III. Descrizione dei dati

Verificheremo i risultati attesi del modello sulla rete geografica delle industrie piemontesi fornito dal modello PAREI (Boero, 2006). Nella rete ogni impresa è un nodo ed i legami con le altre imprese rappresentano le partnerships commerciali che ogni impresa intraprende all'interno della rete piemontese. La rete non fornisce informazioni riguardo ai legami tra le imprese piemontesi e il resto del mondo (cioè le restanti regioni italiane e l'estero). Certamente tali informazioni sarebbero utili a determinare l'influenza che quelle aree hanno sull'attività economica del Piemonte. Si pensi

---

<sup>1</sup> Come accennato nell'introduzione, il dibattito sull'efficienza dell'intervento pubblico a sostegno della diffusione di una certa tecnologia è aperto. Il nostro articolo non si propone di porre a confronto le due posizioni scientifiche attuali, né di gettar luce sul dibattito. Infatti noi assumiamo che la diffusione della tecnologia in questione sia desiderabile. Si pensi ad esempio al caso delle tecnologie rinnovabili: la diffusione di queste tecnologie è spesso confinata a piccole aree/comunità isolate a causa, in particolare, dell'elevato costo iniziale che le rende relativamente meno appetibili a confronto di altri sostituti già presenti sul mercato e decisamente meno costosi. Assumendo che la loro diffusione riduca il livello di inquinamento (che sia quindi desiderabile), un intervento pubblico volto al superamento degli ostacoli che impediscono la propagazione certamente faciliterebbe il raggiungimento dell'obiettivo.

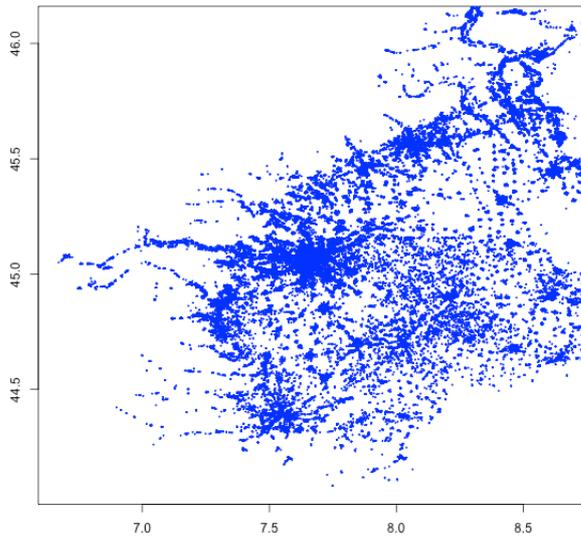
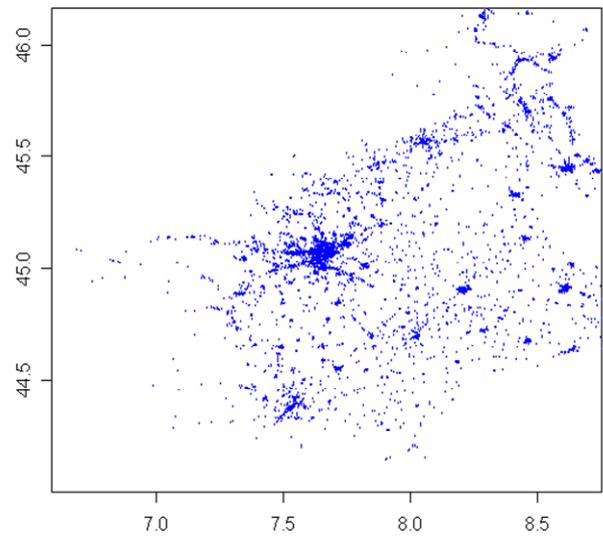
ad esempio come sarebbe essenziale averle rappresentate da una rete la cui analisi serva allo scopo di studiare il contributo del commercio internazionale alla diffusione dell'innovazione (Keller, 2004). Purtroppo non abbiamo a disposizione una tale fonte di dati e, di conseguenza, assumeremo che la tecnologia oggetto d'indagine sia già sul mercato piemontese. In altre parole, l'affermazione precedente si traduce nell'assumere il numero iniziale di fruitori  $N_0$  come parametro del modello.

Nel dettaglio, la nostra rete è costituita da imprese indicizzate  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ , dove  $M$  sta per dimensioni della rete. Il numero di nodi fornito dal modello PAREI è pari a 372.718, pari cioè a tutte le imprese presenti sul territorio piemontese (il settore della pubblica amministrazione non è contemplato). Ogni impresa  $i$  è connessa a partners commerciali, o "vicini",  $j$ . I legami  $(i, j)$  sono il risultato sia delle relazioni commerciali fornite dalla matrice input-output regionale riferita all'anno 2006, sia della prossimità geografica tra le imprese. I coefficienti di input-output restituiscono le relazioni commerciali tra i diversi settori economici piemontesi, ma è la prossimità geografica che determina il legame  $(i, j)$  tra l'impresa  $i$  e quella  $j$  appartenenti ai settori evidenziati dalle connessioni di input-output. La struttura della rete è ora chiara ma resta da spiegare il significato dei flussi commerciali che scorrono attraverso i legami della rete. Infatti solo grazie ai flussi commerciali è possibile scorgere la rete industriale: i flussi commerciali necessari a soddisfare una data domanda finale, nella classica terminologia di input-output, sono quelli che attivano i nodi della rete. Abbiamo a disposizione diversi campioni di rete che sono il risultato di una domanda finale pari al 5% del PIL piemontese nel 2006, percentuale distribuita su tutti i settori. Perché la rete sia attivata, è necessario estrarre casualmente alcune imprese dall'insieme di imprese situate alla fine della catena di produzione necessaria a soddisfare la domanda finale di un dato settore. Dato il numero totale di imprese piemontesi, solo il 20% delle unità produttive sono attivate dall'ammontare di domanda finale scelto (percentuale valida in modo approssimato per tutte le reti a disposizione). Di questo campione molto grande (Figura 1a), noi estrarremo una porzione di rete pari a 10.000 nodi<sup>2</sup>. Estrarremo a caso un nodo tra quelli attivati da una domanda finale del 5% del PIL e, da quel nodo, costruiremo la rete per legami successivi fino a raggiungere una dimensione (cioè un numero di nodi) pari a 10.000 (Figura 1b).

Con diversi campioni di rete a disposizione, siamo ora pronti a esporre i risultati del modello e le sue implicazioni di politica economica.

---

<sup>2</sup>Il fatto che la rete non sia infinita potrebbe ripercuotersi sull'affidabilità dei risultati numerici. Ciò nonostante una dimensione  $M = 10.000$  è grande abbastanza da far valere quei risultati (Cantono e Solomon, 2010)

**1a****1b**

**Figura 1: illustrazione grafica della rete reale di tutte le imprese piemontesi (a) e illustrazione del campione di rete analizzato (b)**

#### **IV. Risultati**

L'iterazione autocatalitica innescata dai meccanismi di top-down e bottom-up, così come descritte nel modello (eq. 1 e 2), cambiano radicalmente il carattere usuale della transizione di percolazione e rendono le dinamiche del sistema discontinue, soggette alle condizioni iniziali e irreversibili. Il problema si riduce alla ricerca di quei valori critici del costo iniziale, dati i parametri del modello, che conducono alla propagazione autonoma e incontrastata dell'onda di diffusione tecnologica. Descriviamo, nel testo che segue, le simulazioni numeriche che realizzano il nostro modello di percolazione autocatalitica.

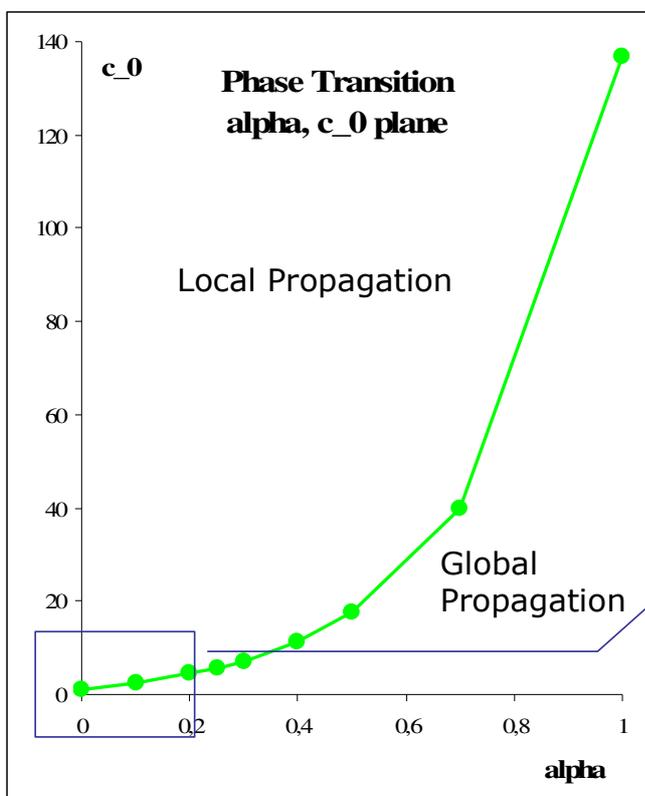
Grazie ad alcune simmetrie del sistema analizzato (Cantono e Solomon, 2010), solo due dei quattro parametri sono indipendenti: gli effetti discontinui dovuti alla variazione di  $\mu$  e  $N_0$  possono essere ricondotti agli effetti conseguenti a variazioni in  $\alpha$  e  $c_0$ . Abbiamo scelto di presentare i risultati sul piano  $\alpha, c_0$  ( $\mu = 5/2$  e  $N_0 = 40$ ).

La propagazione procede secondo le condizioni A e B. L'algoritmo prevede di aggiornare il costo ogni volta che l'onda di diffusione, conseguente al livello di costo corrente, si esaurisce (anche altri algoritmi potrebbero essere usati con successo). Definiamo l'algoritmo che governa le dinamiche del nostro sistema, secondo le condizioni A e B, *algoritmo mesoscopico*.

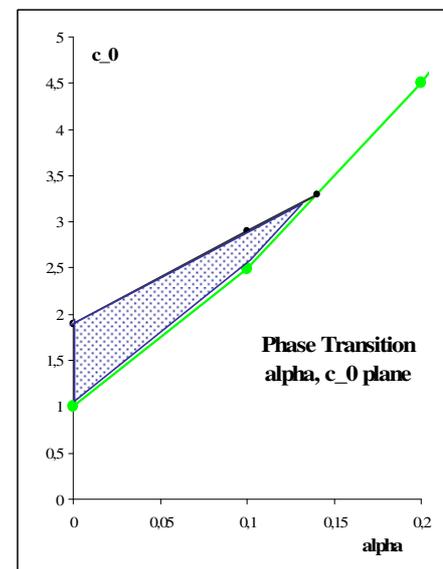
La Figura 2 paragona i valori dei parametri che separano la regione di stagnazione dell'onda di propagazione (area in basso a destra delle Figura 2a) da quella in cui la diffusione della tecnologia

conquista l'intero sistema (area in alto a sinistra della Figura 2a). La fase di transizione che separa le due regioni è di primo ordine da un certo valore di  $\alpha$  in poi (di secondo ordine prima, come mostrato dalla Figura 2b). Per ogni combinazione dei parametri  $\alpha$ ,  $\mu$  e  $N_0$  esiste un valore critico di  $c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$  tale che per valori di  $c_0 < c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$  il processo diverge a valori di  $N$  paragonabili alle dimensioni del sistema  $M$ . Abbiamo trovato i valori di  $c_{0,c}$  attraverso gli esperimenti numerici registrando il più alto valore di  $c_0$  che permette la diffusione della tecnologia a tutto il sistema. Per valori di  $c_0 > c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$  il processo si ferma: la tecnologia non si diffonde.

2a



2b

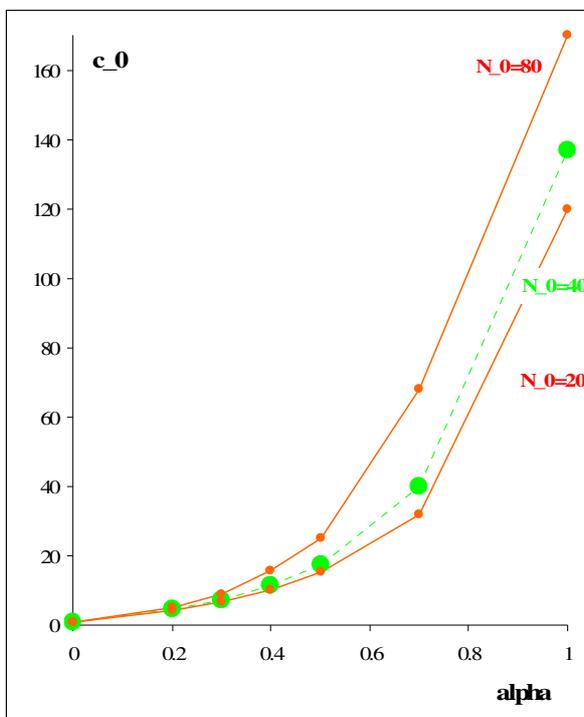


**Figura 2: fase di transizione sul piano  $\alpha$ ,  $c_0$ ; i fruitori iniziali sono scelti casualmente, indipendentemente dalle loro caratteristiche individuali**

La scelta del numero e del genere dei fruitori iniziali è, in questa fase, molto rilevante, o almeno si è portati a pensarlo visto i risultati. In realtà, l'affermazione precedente è vera solo in parte. La Figura 3a mostra cosa succede alla fase di transizione quando si fa variare  $N_0(\mu)$ . Date le combinazioni sul piano  $\alpha, c_0$ , un aumento di  $N_0$  sposta la fase di transizione verso l'alto determinando un'espansione dell'area di diffusione totale (viceversa se  $N_0$  si riduce). Infatti qualora il costo iniziale della tecnologia fosse maggiore del costo critico,  $c_0 > c_{0,c}$ , un intervento pubblico volto a

sussidiare il numero iniziale di fruitori necessario, sarebbe sufficiente ad innescare un processo di propagazione autonomo. Ma quali sono le imprese da subsidiare? Quali sono i criteri guida di una commissione locale chiamata a selezionare tali fruitori? I risultati del nostro modello dimostrano che, data la rete e i parametri scelti<sup>3</sup>, non è importante quali imprese scegliere. La Figura 3b mostra ad esempio come una selezione in base al settore poco cambierebbe le sorti della diffusione della tecnologia rispetto ad una selezione puramente casuale. Infatti, come dimostrato in Cantono e Solomon (2010), la particolare caratteristica di “causalità distribuita” del sistema di percolazione autocatalitica fa sì che alcune proprietà aggregate del sistema, come la fase di transizione il concetto di punto di non ritorno, non dipendano dalle singolarità delle sue componenti. Ciò non significa che l’eterogeneità delle imprese non influenzi le dinamiche di propagazione.

3a



3b

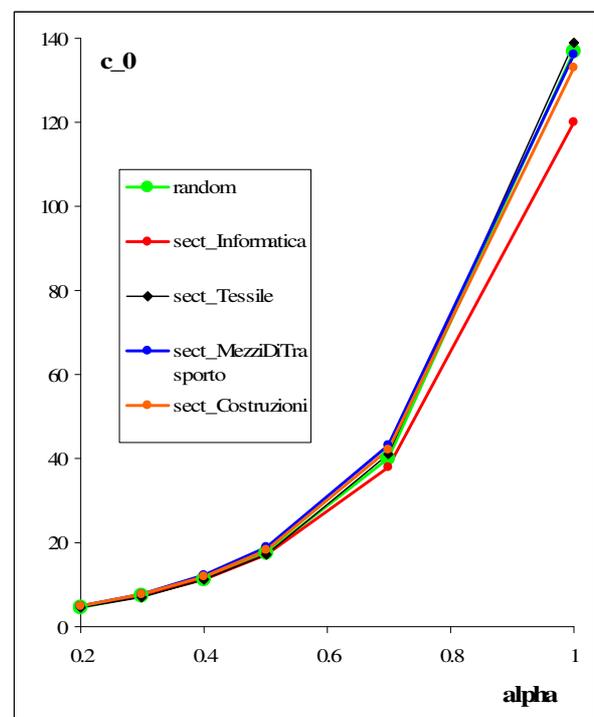


Figura 3: a - per valori di  $N_0 = 40$  si ha la stessa illustrazione della figura 2 b - effetti di politiche settoriali

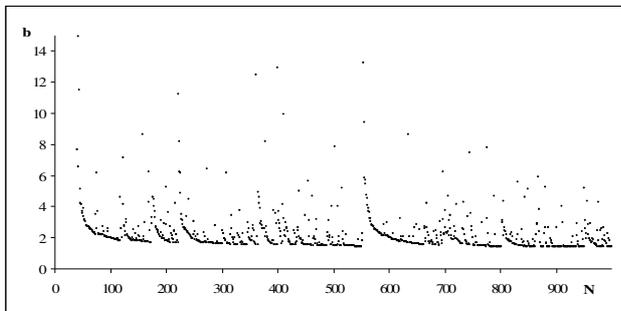
Infatti l’eterogeneità dei nodi, che ad uno ad uno permettono / ostacolano la propagazione, è responsabile della variabilità dei risultati.

Comprendiamo meglio come le micro peculiarità del sistema rendano le dinamiche non completamente prevedibili. E’ giunto il momento di introdurre brevemente (poiché esaurientemente

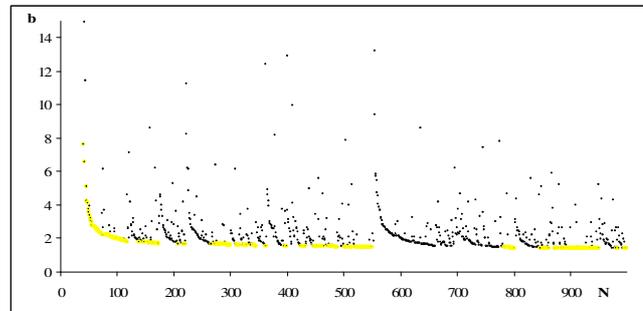
<sup>3</sup> I risultati sono generalizzabili, data la rete, a tutte le combinazioni di parametri (Cantono e Solomon, 2010). Inoltre, vista la validità dei risultati sia su una rete quadrata bidimensionale sia sulla rete reale che abbiamo a disposizione – non regolare – non sarebbe del tutto insensato sperare sulla validità dei risultati anche per altre reti.

trattato in Cantono e Solomon, 2010) il concetto di *lower envelope* (Figura 4) e di discutere il significato del punto di non ritorno e le conseguenti implicazioni di politica economica (Figura 5, 6). Ad ogni configurazione della rete, cioè ad ogni generazione della distribuzione di benefici attesi, corrisponde un cammino efficiente di propagazione, cioè il meno costoso possibile. Abbiamo ottenuto questo cammino forzando il processo di contagio dagli iniziali  $N_0$  fruitori fino a  $M$ . Più precisamente, partendo dai partners commerciali delle imprese che esogenamente adottano la tecnologia, scegliamo ad ogni passo quell'impresa (potenziale fruitore, cioè appartenente alla frontiera dell'insieme di fruitori) dal beneficio atteso maggiore la quale adotterà la tecnologia indipendentemente dal rapporto tra il costo e il suo beneficio atteso. Definiamo la procedura appena descritta *algoritmo avido* (fase B-modificata).

4a



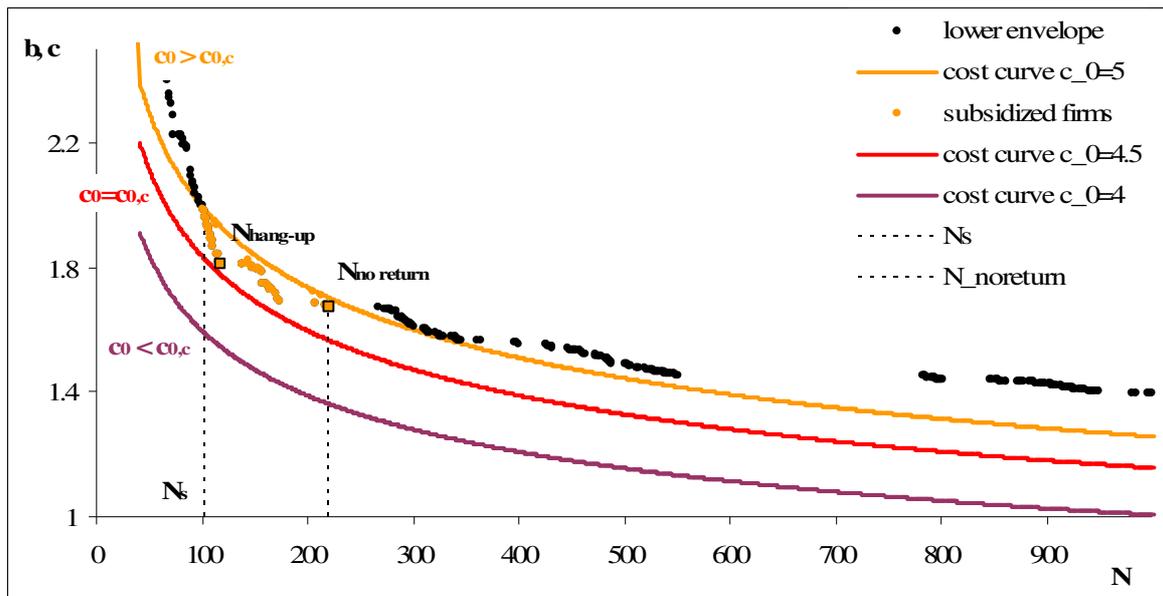
4b



**Figura 4: Configurazione dei benefici attesi (a); lower envelope, punti gialli (b). Per ragioni di leggibilità, mostriamo la configurazione fino a  $N=1000$ .**

Quel che otteniamo è una serie molto sparsa di  $b_i$  (serie di punti neri nella Figura 4a) dalla quale, successivamente ad un'opportuna rielaborazione (Cantono e Solomon, 2010), si ottiene una serie discreta<sup>4</sup> di punti che rappresentano le dinamiche di  $N$  al variare di  $c$  (serie di punti gialli, Figura 4b). Solo queste sono le imprese eventualmente responsabili della stagnazione del processo di propagazione, cioè quelle caratterizzate dai benefici attesi più bassi relativamente ai benefici attesi dell'insieme delle imprese che adottano la tecnologia (cioè quelle selezionate dall'algoritmo avido). La loro posizione nella rete, la posizione relativa nel processo di propagazione, le loro connessioni e il loro beneficio atteso per la tecnologia sono determinanti alla propagazione / stagnazione dell'onda di diffusione. Nel mondo reale queste peculiarità sono essenziali al raggiungimento dell'obiettivo della completa diffusione. Prendiamo il caso illustrato dalla Figura 5.

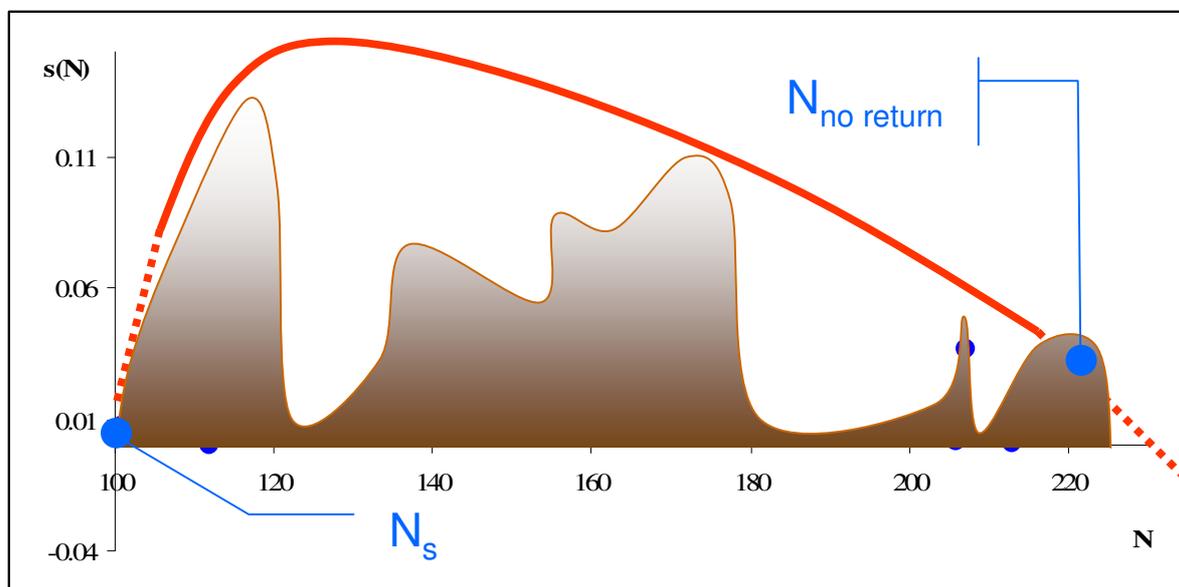
<sup>4</sup> Il carattere discreto della lower envelope è responsabile della variabilità dei risultati. La distribuzione degli intervalli vuoti è essenziale nel determinare quando la curva del costo incontrerà un punto esistente della lower envelope.



**Figura 5:** la serie di punti neri rappresenta la lower envelope della configurazione oggetto di analisi; le curve arancione, rossa e viola sono le curve di costo per  $c_0 > c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$ ,  $c_0 < c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$  e  $c_0 = c_{0,c}$  rispettivamente

Per valori di  $c_0 < c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$  (curva rossa nella Figura 5), l'onda di adozione innescata dai fruitori iniziali  $N_0$  si propaga autonomamente ad un numero macroscopico di imprese; in particolare, se  $c_0$  è appena al di sotto di  $c_{0,c}$ , l'onda prima si espande velocemente, ma rallenta attorno al punto  $N_{hang-up}$ . Dopo aver superato tale punto, l'onda diverge a livelli macroscopici. Per valori di  $c_0 > c_{0,c}(\alpha, \mu, N_0)$  (curva arancione nella Figura 5), l'onda di propagazione è imprigionata da un apparente equilibrio stabile non ottimo, cioè la tecnologia è stata adottata da un numero insignificante d'imprese ( $N_s$  nella Figura 5). In questo caso, solo un intervento pubblico (più in generale "esogeno") volto a sostenere il processo di propagazione fino al punto di non ritorno può sollevare il destino della tecnologia (cioè un intervento che sostenga l'adozione dal punto  $N_s$  al punto  $N_{no return}$ ). I punti appartenenti alla lower envelope evidenziati in arancione nella Figura 5, sono le imprese che sarebbe necessario sostenere se il decisore pubblico volesse intervenire al fine di far diffondere la tecnologia; e l'ammontare di sussidi sarebbe il minimo possibile, cioè il più efficiente. E' chiaro adesso come una variazione, benché minima, dell'eterogeneità delle componenti del sistema, determini la variabilità di  $N_{hang-up}$ ,  $N_s$  e  $N_{no return}$ . In particolare, la minima variazione di  $N_{hang-up}$  può determinare il successo o il completo fallimento di una tecnologia. Oppure una politica che non accompagna l'onda tecnologica fino a  $N_{no return}$  non ha alcuna influenza sulle sorti della diffusione. Considerare con cautela l'effetto dell'eterogeneità rispetto a tale variabile diventa quindi di vitale importanza per il decisore politico il cui obiettivo è anche di

impiegare nel modo più efficiente i fondi a disposizione. Infatti l'obiettivo dell'intervento non ne determina anche il cammino (Figura 6). Per essere ottimo, l'intervento pubblico dovrebbe ammontare alla sommatoria delle differenze tra il costo della tecnologia e il beneficio atteso delle imprese che ostacolano la propagazione (punti blu nella Figura 6, risultato delle simulazioni numeriche con algoritmo avido). Solo l'insieme completo delle informazioni relative al sistema e alle sue componenti permetterebbe di calcolare l'ammontare ottimo di sussidi. Ma una buona approssimazione della curva dei sussidi (curva rossa nella Figura 6) potrebbe svolgere lo stesso compito limitando i danni. L'esistenza di  $N_{no\ return}$ , che è una proprietà emergente del sistema, facilita il compito del decisore il quale di fronte al continuo dilemma tra caso e generalizzazione, avrebbe uno strumento utile al suo fianco.



**Figura 6: il cammino ottimo della curva dei sussidi  $s(N)$ . La curva rossa è una curva fittizia che ha lo scopo di illustrare una possibile approssimazione di  $s(N)$ , alternativa costosa relativamente all'area scura che sottende la serie di punti blu. Infatti la serie di punti blu corrisponde al valore del sussidio necessario e sufficiente a sostenere il processo di diffusione da  $N_s \rightarrow N_{no\ return}$  (argomento descritto in altri termini dai punti in arancione della Figura 5)**

## V. Conclusioni

In questo articolo abbiamo applicato il modello di percolazione autocatalitica (Cantono e Solomon, 2010) all'analisi delle dinamiche di diffusione dell'innovazione e le sue implicazioni di politica economica. La teoria della percolazione è già stata applicata con successo (Antonelli, 1996; Solomon et. al, 2000; Frenken et al., 2008; Honhisch et al., 2008; Cantono e Silverberg, 2009) ma la sua applicazione ha da un lato mantenuto la tradizione di vedere il sistema economico come un sistema fisico (cioè concentrando l'attenzione sul meccanismo di peer-to-peer) e dall'altro fornito analisi per lo più numeriche e qualitative. Sulle basi dell'ultimo progresso analitico quantitativo

(Cantono e Solomon, 2010) abbiamo costruito un modello di simulazione basato sugli agenti e analizzato le dinamiche di propagazione dell'innovazione sulla rete delle imprese piemontesi (i cui dati sono disponibili grazie al modello sviluppato da Boero, 2006). L'integrazione dei meccanismi di bottom-up (secondo il quale all'aumentare della produzione segue una riduzione del costo di adozione dell'innovazione), di top-down (secondo il quale alla riduzione di costo segue un aumento delle dimensioni potenziali del mercato) e di peer-to-peer (rappresentato dalle dinamiche dell'interazione tra unità produttive eterogenee) nel processo ricorsivo del ciclo di percolazione autocatalitica porta ad una riconsiderazione della transizione di percolazione tradizionale. In particolare, nel nostro modello la diffusione della tecnologia è soggetta a transizioni discontinue tra diversi regimi possibili. Inoltre sono necessarie alcune riconsiderazioni relative agli interventi di politica economica. Sostenere la commercializzazione di una tecnologia desiderabile è determinante quando questa non si diffonda autonomamente. Poiché la causa non è l'incompatibilità tra la tecnologia e il sistema economico (o il mercato), bensì l'esistenza di popolazioni di potenziali fruitori non connesse, non comunicanti, eterogenee (Karshenas and Stoneman, 1995).

Dato il costo iniziale della tecnologia, i legami commerciali tra le imprese della rete industriale e la loro eterogeneità, l'onda di propagazione si placa lasciando il sistema soggiogato ai seguenti regimi:

- un sussidio iniziale rivolto ad un certo numero d'impres, indipendentemente dalle loro caratteristiche individuali, permette a tecnologie desiderabili di affrontare gli ostacoli e superarli, e di diffondersi poi autonomamente. In particolare, i risultati dell'analisi hanno dimostrato come politiche settoriali non influenzino le dinamiche di propagazione di una data tecnologia relativamente a politiche che selezionino gli iniziali fruitori casualmente;
- se l'onda innescata dall'adozione di iniziali fruitori ne raggiunge pochi altri, la commercializzazione della tecnologia può avere successo solo se sostenuta. Gli ostacoli alla propagazione dell'onda devono essere "rimossi" attraverso un sussidio rivolto alle imprese reticenti. Sussidi addizionali permetterebbero quindi al processo di diffusione di raggiungere una certa massa critica oltre la quale l'onda sarebbe libera di espandersi autonomamente.

Infine abbiamo svelato una caratteristica interessante del processo analizzato, cioè la peculiarità di non poter essere classificato né come sistema dinamico lineare né come sistema tipo per analisi di statistica meccanica. Nonostante il nostro sistema sia caratterizzato da proprietà aggregate valide in genere, il numero degli elementi chiave al successo della diffusione di una tecnologia è troppo limitato per essere trattato "mediamente". Grazie al modello di simulazione abbiamo esplorato numericamente lo spazio dei parametri e abbiamo scoperto quali peculiarità influenzano le dinamiche di propagazione.

Non possiamo affermare di fornire un modello che risolva il dilemma del decisore politico tra caso e generalizzazione. I risultati ottenuti ci permettono di compiere un passo in più verso una buona rappresentazione della realtà, ma il percorso non si esaurisce in questo passo. Infatti il modello gioverebbe di diversi sviluppi volti a migliorarlo sotto l'aspetto sia delle dinamiche individuali (ad esempio con uno studio di come le caratteristiche d'impresa influenzino il beneficio atteso dell'impresa stessa e di come questo cambi nel tempo) che di quelle aggregate (ad esempio investigando sugli effetti di una rete dinamica, in cui le imprese possano “nascere” e “morire”, oppure ingrandirsi o ridursi a piccole attività isolate).

## VI. Bibliografia

- Aleksiejuk A and Holyst J 2001 A simple model of bank bankruptcies *Physica A* 299 198-204
- Antonelli C 1996 Localized knowledge percolation processes and information networks *Journal of Evolutionary Economics* 6 281-295
- Axtell R L 2001 Zipf distribution of U.S. firm sizes *Science* 293 1818 – 1820
- Boero R 2006 *Un modello dell'economia piemontese come sistema complesso: interdipendenze economiche e territoriali tra centro e periferia*, in G. Russo e P. Terna (eds.) *Produrre a Torino: atti della conferenza Rota 2005*, Edizioni Otto, Torino
- Bornholdt S 2001 Expectation bubbles in a spin model of markets: intermittency from frustration across scales *International Journal of Modern Physics C* 12 667-674
- Cantono S e Silverberg G 2009 A percolation model of eco-innovation diffusion: The relationship between diffusion, learning economies and subsidies *Technological Forecasting and Social Change*, 76 487-496
- Cantono S e Solomon S 2010 When the collective acts on its components: economic crisis autocatalytic percolation *New Journal of Physics* 12 June
- Davies S 1979 *The diffusion of process innovations* Cambridge University Press Cambridge
- Delli Gatti D, Di Guilmi C, Gaffeo E e Gallegati M 2004 Bankruptcy as an exit mechanism for systems with a variable number of components *Physica A* 344 8-13.
- Erez T, Hohnisch M e Solomon S 2005 Statistical economics on multi layered variables in *Economics: complex windows*, eds. M. Salzano e A. Kirman, Springer
- Erez T, Moldovan S e Solomon S 2007, Social percolation and negative word of mouth, in *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economy and Management*, ed. Jean-Philippe Rennard, Rennard, France
- Frenken K, Silverberg G e Valente M 2008 A percolation model of the product lifecycle UNU-MERIT Working Paper 2008-073

- Fujiwara Y 2004 Zipf law in firms bankruptcy *Physica A* 337 219-230
- Goldenberg J, Libai B, Solomon S, Jan N e Stauffer D 2000 Marketing percolation *Physica A* 284 335-347
- Goldenberg J, Shavitt Y, Shir E e Solomon S 2005 Nature, distributive immunization of networks against viruses using the 'honey-pot' architecture *Nature Physics* 1 184 – 188
- Griliches Z 1957 Hybrid corn: an exploration in the economics of technological change *Econometrica* 25 501–522
- Hohnisch M, Pittnauer S. e Stauffer 2008 A percolation-based model explaining delayed takeoff in new-product diffusion *Industrial and Corporate Change* 17 1001-1017
- Jaffe A B. e Stavins R N 1995 Dynamic Incentives of Environmental Regulations: The Effects of Alternative Policy Instruments on Technology Diffusion *Journal of Environmental Economics and Management* 29(3)
- Karshenas M. and Stoneman P. 1995 *Technological Diffusion* in P. Stoneman (ed.), *A Handbook of the Economics of Innovation and Technological Change* Oxford Blackwell
- Keller W 2004 International technology diffusion *Journal of Economic Literature* 62 752-782
- Lorenz J, Battiston S e Schweitzer F 2009 Systemic risk in a unifying framework for cascading processes on networks *European Physical Journal B* 71 441-460
- Mansfield E 1961 Technical change and the rate of imitation *Econometrica* 29 741–766
- Sieczka P e Holyst J A 2009 Collective firm bankruptcies and phase transition in rating dynamics *European Physical Journal B* 71 461-466
- Soderholm P e Klaassen G 2007 Wind power in Europe a simultaneous diffusion-innovation model *Environmental and Resource Economics* 36 193-190
- Solomon S, Weisbuch G, de Arcangelis L, Jan N e Stauffer D 2000 Social percolation models *Physica A* 277 239 247
- Stoneman P 2002 *The Economics of Technological Diffusion* Oxford Blackwell Publishers
- Weisbuch G, Solomon S e Stauffer D 2001 Social percolators and self-organized criticality in *Economics with heterogeneous interacting agents*, eds A. Kirman and J.B. Zimmermann, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer
- Yaari G, Deissenberg C e Solomon S 2006 Advertising, negative word-of-mouth and product acceptance *European J. of Econ. and Social System*, 19 257-268