Università degli Studi di Torino

Facoltà di Economia

Corso di Laurea in Economia e Commercio

TESI DI LAUREA

Reti sociali, informazione e impresa: un modello ad automi cellulari

Relatore: Prof. Pietro Terna

Correlatore: Prof. Sergio Conti

Candidato:

Daniele Ietri

Indice

Introduzione

Nelle scienze economiche è comune l'impiego di modelli matematici: si costruisce un modello rappresentando con equazioni i vari segmenti della realtà per poi osservare come ciascuna parte si comporti in seguito alle variazioni delle altre. Per rappresentare i fenomeni sociali sono necessarie equazioni tanto "complicate" da risultare difficilmente trattabili dal punto di vista analitico: per ovviare a questo inconveniente occorre imporre al modello restrizioni semplificatrici[1]. Il risultato sono modelli rigorosi ed "eleganti", da cui si assume di poter desumere le dinamiche proprie dell'economia reale: si vorrebbe cioè che i modelli economici fossero verificati empiricamente così come lo sono i modelli utilizzati per descrivere i fenomeni fisici.

Con Hahn (1994),

> ... nessuna teoria economica è mai stata falsificata in modo definitivo da esperimenti, figuriamoci poi dall'inferenza statistica. Invocare il fatto che vi sono teorie apparentemente paradossali come la meccanica quantistica accettate perché funzionano, sarà giustificato quando la teoria degli economisti permetterà di fare previsioni corrette fino all'ottava cifra decimale, come fa la teoria quantistica. Fino ad allora, la diretta plausibilità delle nostre ipotesi resta un test che una teoria applicata al mondo "reale" deve superare.

Una possibile alternativa è studiare l'economia come un fenomeno complesso, ipotizzando che gli agenti siano molto più semplici di quelli proposti

[1] Tra queste le assunzioni di razionalità e di perfetta informazione o l'uso delle tecniche di ottimizzazione, con l'obiettivo di approssimare il comportamento reale dei soggetti (la costruzione *as if*)

dai modelli matematici e che sia al contrario complesso il risultato delle loro interazioni (Terna, 2002c). Si trasferisce così la complessità **dagli** agenti all'economia nel suo insieme, che risulta essere il risultato (complesso) di interazioni tra soggetti con proprietà e regole di comportamento molto semplici.

Wolfram (2002) pone grande enfasi sull'importanza di considerare la realtà come il risultato di regole semplici: alla base della maggior parte dei fenomeni studiati da tutte le discipline (dalla fisica alle scienze sociali, dalla biologia all'informatica) ci sarebbero in realtà poche regole di inaspettata semplicità.

Lo studio dell'economia come un fenomeno complesso ha le sue prime radici nel pensiero di Hayek (1945):

> I am convinced that if it [the price system] were the result of deliberate human design, and if the people guided by the price changes understood that their decisions have significance far beyond their immediate aim, this mechanism would have been acclaimed as one of the greatest triumphs of the human mind. Its misfortune is the double one that it is not the product of human design and that the people guided by it usually do not know why they are made to do what they do.

L'economia nel suo complesso può essere considerata come un fenomeno che va al di là delle capacità di pianificazione e intelligibilità dei singoli individui ed è altrettanto capace di raggiungere una condizione di equilibrio grazie alla sola interazione tra i soggetti. L'analogia con gli studi sulla complessità può essere individuata (Kilpatrick, 2002) nel concetto di auto-organizzazione, con cui si indica la proprietà dei sistemi complessi di reagire agli stimoli provenienti dall'esterno modificando la struttura interna senza pregiudicare la coerenza dell'insieme.

I metodi tradizionali della scienza prevedono la scomposizione del fenomeno in parti e la comprensione delle medesime: questo è probabilmente sufficiente per analizzare i fenomeni semplici, mentre per i fenomeni complessi è opportuno ricorrere ai modelli di simulazione.

Con Parisi (2001):

> Le simulazioni seguono la via della sintesi della realtà, dove sintesi vuole dire partire dalle componenti per studiare cosa emerge quando queste componenti vengono messe insieme e fatte interagire. Una simulazione prende le mosse da un insieme di componenti di un sistema e, girando nel computer, mostra come le diverse componenti interagendo tra di loro producono il sistema complessivo con le sue proprietà specifiche. Le simulazioni si basano sulla assunzione che la realtà non può essere conosciuta solo analizzandola nelle sue componenti ma è necessario ricrearla a partire dalle sue componenti.

I modelli di simulazione possono essere proposti come una metodologia per comprendere la realtà a metà strada tra i modelli che fanno uso del linguaggio e quelli espressi con i simboli matematici. I modelli matematici appaiono troppo rigidi poiché non permettono di evidenziare adeguatamente il comportamento delle parti che compongono il modello senza attribuire ad esse caratteristiche e regole di eccessiva complessità. I modelli verbali si prestano a essere più flessibili, ma non sono adatti a fornire risultati quantificabili: pur trascendendo la rigidità propria dei modelli matematici, essi risultano inequivocabilmente assai meno rigorosi.

Un modello di simulazione non utilizza parole o simboli matematici: l'oggetto di osservazione viene descritto con un linguaggio formale comprensibile dal computer, che riproduce i fenomeni che si intendono spiegare. Il computer esegue i calcoli e fornisce i risultati dell'esperimento: si presta così ad essere una sorta di laboratorio virtuale attraverso il quale verificare le ipotesi formulate, manipolare variabili e condizioni del modello ed osservare i risultati, lasciando che il computer esegua i calcoli e fornisca i risultati dell'esperimento.

I modelli proposti nel prosieguo della trattazione, presentati inizialmente in forma verbale, vengono messi alla prova con le simulazioni: vengono descritte attraverso i linguaggi di programmazione le regole delle parti che compongono il modello, si osserva e si confronta con le ipotesi il risultato d'insieme fornito dal computer.

Nel primo capitolo sono presentati gli automi cellulari, un esempio di come regole semplici possano portare a risultati complessi: gli automi saranno la base logica su cui verranno costruiti i modelli presentati nei successivi capitoli.

Il secondo capitolo affronta il tema della complessità, nell'ambito della teoria sistemica dell'economia e delle scienze del territorio.

Nel terzo capitolo gli automi cellulari diventano protagonisti di programmi per computer studiati appositamente per trattarli, che saranno utilizzati per esaminare alcune regole di particolare interesse. Sarà sottolineato il fatto che gli esempi (l'evoluzione delle regole di automi cellulari ed il loro significato) non possono essere affrontati se non grazie alle simulazioni, che mettono a disposizione una capacità di calcolo senza la quale il lavoro di analisi sarebbe troppo oneroso.

Il quarto capitolo è dedicato al fenomeno dei "piccoli mondi": le caratteristiche che riguardano la prossimità e l'interazione viste nei precedenti tre capitoli sono utilizzate per indagare come si formino e funzionino le relazioni tra i soggetti. In particolare sarà analizzata (con modelli di simulazione) l'importanza delle relazioni di prossimità spaziale e a-spaziale nella diffusione delle informazioni.

Nel quinto capitolo si procede all'analisi delle reti sociali, ancora con riferimento ai fenomeni di diffusione, applicati alle decisioni di scelta di adozione di un'innovazione (un nuovo prodotto, per esempio): l'ipotesi fondamentale sottostante al modello prevede che la scelta di ciascun soggetto dipenda strettamente dalle scelte dei soggetti che ne compongono il vicinato. Nello stesso capitolo si esamina cosa accade allorché le relazioni tra i soggetti esistono solo potenzialmente; si analizzeranno inoltre i benefici che possono derivare, per la rete nel suo complesso, dalla effettiva formazione di legami particolarmente strategici.

Nel sesto e ultimo capitolo gli strumenti (teorici e analitici) dei capitoli precedenti vengono utilizzati per formulare alcune ipotesi nell'ambito della teoria dell'impresa, in particolare sulle condizioni che ne favoriscono la nascita. Protagonisti del modello proposto saranno l'imprenditore *à la* Kirzner e le relazioni tra i soggetti.

Capitolo 1

Automi cellulari

1.1 Introduzione

Un automa è un oggetto che associa ad un *input* dato sempre lo stesso *output*, detto "stato dell'automa". Per determinare questo processo, ha al suo interno regole definite che gli permettono di associare *input* e *output*. Intorno al 1950 von Neumann (Chopard et al., 2001) fece uso di automi per studiare i meccanismi di auto-riproduzione degli organismi biologici: si trattava di creare un sistema che, attraverso precise regole e utilizzando solo le sue proprie risorse, fosse in grado di riprodurre esattamente se stesso. Con l'aiuto di S. Ulam, von Neumann formalizzò il problema utilizzando un universo discreto composto da celle con caratteristiche di automi. In particolare caratterizzò tutte le celle-automi con la stessa regola, funzione degli stati delle celle-automi vicine: se immaginiamo infatti le celle su un piano[1], ognuna di esse presenta un vicinato composto dalle celle che le sono più prossime. Ci si riferisce ad un sistema così definito con il termine *automa cellulare*.

[1] si pensi ad un foglio a quadretti...

Dopo von Neumann molti studiosi si sono occupati di automi cellulari, in particolare per studiare i sistemi complessi: tra loro il matematico Conway, che propose il gioco "Life" negli anni settanta, ed il fisico Wolfram negli anni ottanta. Nei paragrafi seguenti si farà spesso riferimento al lavoro di questi autori, in particolare quando si presenteranno esempi di regole a più dimensioni. Con Wolfram (1983):

> Models based on cellular automata provide an alternative approach, involving discrete coordinates and variables as well as discrete time steps. They exhibit complicate behavior analogous to that found with differential equations or iterated mappings, but by virtue of their simpler construction are potentially amenable to a more detailed and complete analysis.

1.2 Definizioni

Per ben definire cosa siano gli automi cellulari, si possono individuare quattro caratteristiche chiave:

- cella;
- vicinato;
- tempo discreto;
- sincronismo.

Un automa cellulare è infatti definibile come una griglia regolare, con una variabile discreta in ogni sito o cella. L'automa evolve in intervalli di tempo discreti, con regole che sono funzione dei valori delle variabili in ogni cella e dei valori delle variabili del suo vicinato. Al tempo t lo stato di ogni cella sarà funzione dello stato al tempo $t-1$ della cella stessa e delle celle adiacenti. Gli stati di tutte le celle che compongono l'automa sono calcolati ed aggiornati in modo sincrono, nel senso che tutte le celle applicano la regola contemporaneamente al tempo t, al tempo $t+1$ e così via.

Automi cellulari elementari

Prendiamo in considerazione solo automi cellulari a una dimensione: data una cella, il suo vicinato è costituito solo dalla cella stessa e dalle celle direttamente adiacenti alla sua destra e alla sua sinistra. Se consideriamo inoltre automi con soltanto due possibili stati per ogni cella (0 e 1) abbiamo ristretto il campo di indagine a quelli che vengono detti automi cellulari elementari. Dato il vicinato uni-dimensionale, come sopra definito, vi possono essere solo $2^3 = 8$ possibili combinazioni di celle, considerate tre alla volta:

1 1 1	1 1 0	1 0 1	1 0 0	0 1 1	0 1 0	0 0 1	0 0 0

Ogni numero binario di otto cifre definisce una regola per un automa cellulare elementare: di conseguenza vi sono $2^8 = 256$ possibili regole di questo genere. Per identificare la regola si può usare indistintamente sia il numero binario che il suo equivalente decimale. Ad esempio possiamo applicare la seguente regola, detta "regola 90" alle combinazioni di celle considerate sopra.

1 1 1	1 1 0	1 0 1	1 0 0	0 1 1	0 1 0	0 0 1	0 0 0
0	1	0	1	1	0	1	0

Il valore di una cella in ogni unità di tempo è dato dal resto della divisione per due della somma dei valori delle due celle che compongono il vicinato nell'unità di tempo precedente. Si può notare che 01011010 = 90: si spiega così il nome di questa e delle altre regole. La regola 90, così come le altre regole elementari, può essere applicata indifferentemente a qualsiasi configurazione iniziale degli stati delle celle.

Solitamente vengono imposte ulteriori restrizioni a queste regole:

- uno stato iniziale nullo (o quiescente), quindi composto da sole celle con valore zero, deve rimanere inalterato;
- le regole devono essere simmetriche: ad esempio da 110 e da 011 si deve ottenere il medesimo risultato.

Queste restrizioni portano a 32 il numero di regole ammissibili per gli automi elementari: queste leggi "superstiti" sono dette *legali*.

Qualche formalizzazione

Sia ${a_i}^{(t)}$ il valore al tempo t di una cella i di un automa cellulare. I valori delle celle evolvono secondo l'espressione:

$${a_i}^{(t)} = F\left[{a_{(i-r)}}^{(t-1)}, {a_{(i-r+1)}}^{(t-1)}, \ldots, {a_i}^{(t-1)}, \ldots, {a_{(1+r)}}^{(t-1)}\right]$$

dove F è la funzione che specifica la regola dell'automa cellulare. Il parametro r indica la dimensione del vicinato di cui si tiene conto per l'evoluzione dell'automa: di conseguenza, per ogni intervallo di tempo t, i fenomeni di propagazione coinvolgono al massimo un numero r di celle. Il valore di ogni cella è un intero e può variare da 0 a s, a seconda dei possibili stati che può assumere: di conseguenza gli automi cellulari elementari sopra definiti avranno i parametri s ed r entrambi unitari.

Le proprietà degli automi elementari con leggi *legali*, come definite in precedenza, possono essere formalizzate.
La proprietà di quiescenza implica che $F[0, 0, 0, \ldots, 0] = 0$
La proprietà di simmetria può essere così presentata:

$$F\left[a_{i-r}, \ldots, a_{i+r}\right] = F\left[a_{i+r}, \ldots, a_{i-r}\right]$$

Gli stati dell'automa

Finora abbiamo preso in considerazione solo automi cellulari a due stati, 0 ed 1, caratterizzati dal valore unitario del parametro s. Tuttavia gli stati dell'automa possono essere più numerosi: con l'aumentare degli stati dell'automa, aumenterà anche il numero delle possibili regole. Se consideriamo ancora gli automi elementari (quelli il cui vicinato utile è composto dalle sole celle immediatamente adiacenti), dato s il numero di stati, il numero di regole possibili diventa $s^{(s^3)}$. Il numero di regole si riduce in parte imponendo le condizioni di quiescenza e simmetria, ma ad esempio per un automa con $s = 10$ stati, il numero di regole sarà 10^{549} (Wolfram, 1983).

Automi cellulari a n dimensioni

Per dimensione dell'automa cellulare si intende l'ampiezza (e la disposizione nello spazio) del suo vicinato.
Gli automi uni-dimensionali possono essere rappresentati su una linea retta (fig. 1.1).

Il valore a_i di una cella in un automa uni-dimensionale è determinato dalla

$$a_i^{t+1} = F\left[a_{i-1}^{(t)}, a_i^{(t)}, a_{i+1}^{(t)}\right]$$

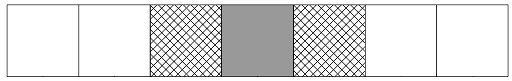

Figura 1.1: Automa cellulare uni-dimensionale

Se invece consideriamo automi cellulari a due dimensioni avremo la rappresentazione in figura 1.2, se utilizziamo un vicinato da 5 celle: questa configurazione è anche detta *intorno di von Neumann*.

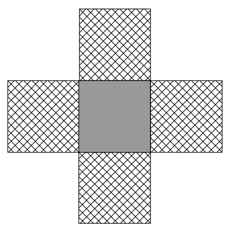

Figura 1.2: Automa cellulare con intorno di von Neumann

Nell'evoluzione dell'automa, la cella centrale si aggiorna secondo una regola che dipende dallo stato delle quattro celle adiacenti, oltre che dal suo stato.
In questo caso la funzione che rappresenta l'evoluzione dell'automa sarà:

$$a_{i,j}{}^{t+1} = F\left[a^{(t)}_{i,j}, a^{(t)}_{i,j+1}, a^{(t)}_{i+1,j}, a^{(t)}_{i,j-1}, a^{(t)}_{i-1,j}\right]$$

Se utilizziamo un vicinato di 9 celle, avremo quello che viene detto *intorno di Moore* (fig. 1.3).

1.3 Esempi di regole a una dimensione

Gli automi cellulari, nonostante la semplicità della loro costruzione, presentano spesso comportamenti molto complicati. L'analisi matematica non è

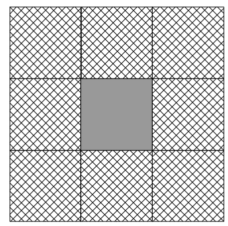

Figura 1.3: Automa cellulare con intorno di Moore

quasi mai utile nel spiegare le loro proprietà: per un'analisi approfondita si può utilmente ricorrere ai metodi computazionali. Di seguito vengono quindi presentate alcune regole uni-dimensionali,

Nella figura 1.4 si vede come evolve un automa cellulare uni-dimensionale: si tratta della regola 90 descritta nel paragrafo 1.2[2]. L'evoluzione dell'automa è calcolata per 100 passi, partendo da una condizione iniziale nulla (quiescente) fatta eccezione per la cella centrale: dall'alto verso il basso lo stato dell'automa è descritto da una riga per ogni unità di tempo. Si nota come da una singola cella con stato 1 evolva una configurazione non banale, in cui si possono riconoscere anche particolari ciclicità.

La regola 150 fa ancora parte delle cosiddette "regole legali"; si può schematizzare come segue.

1 1 1	1 1 0	1 0 1	1 0 0	0 1 1	0 1 0	0 0 1	0 0 0
1	0	0	1	0	1	1	0

L'evoluzione dell'automa per 100 passi è riportata in figura 1.5.

Le regole 90 e 150[3], partendo da una cella iniziale con stato 1,

[2]Il software utilizzato per questi esempi è Mathematica 2.2, Wolfram Research

[3]ed altre ancora, ad esempio: 18, 22, 126, 146, 182, 210 tra quelle legali

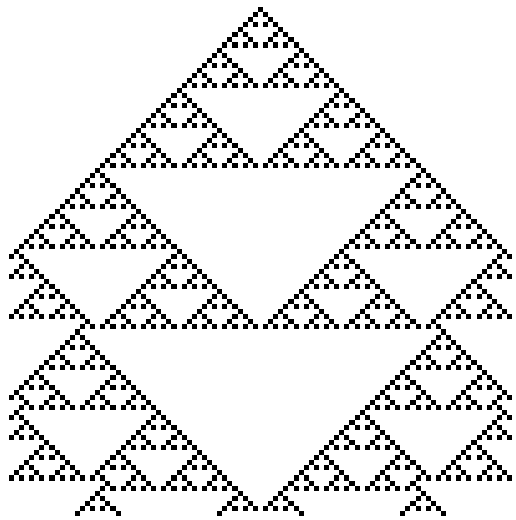

Figura 1.4: Regola 90, 100 passi

si sviluppano in *pattern* non banali: queste regole vengono chiamate “complesse”.

In altri casi la cella 1 iniziale si espande in tutte le direzioni: questo accade, ad esempio, nel caso della regola 50.

1 1 1	1 1 0	1 0 1	1 0 0	0 1 1	0 1 0	0 0 1	0 0 0
0	0	1	1	0	0	1	0

L’evoluzione dell’automa per 100 passi è riportata in figura 1.6.

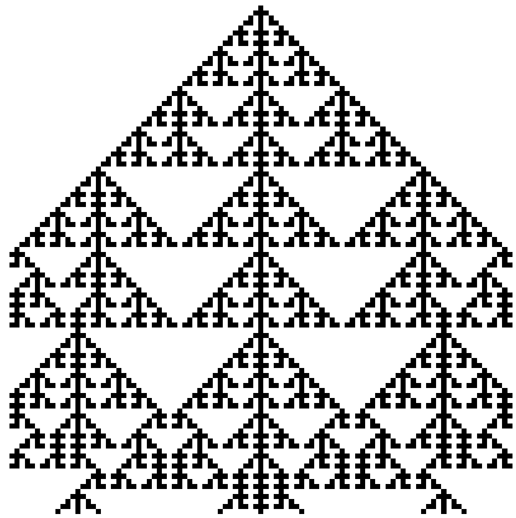

Figura 1.5: Regola 150, 100 passi

Vi sono, infine, alcune regole per cui la cella iniziale con stato 1 diventa nulla (regola 160, figura 1.7) o resta immutata (regola 4, figura 1.8). Le regole di questo tipo sono contraddistinte dalla presenza delle regole locali

1 0 0	e	0 0 1
0		0

che impediscono qualsiasi propagazione della cella con stato 1 iniziale.

Fin'ora sono state presentate regole "legali", come definite nel paragrafo 1.2, che soddisfano quindi le proprietà di simmetria e quiescenza. La regola 2, ad esempio, viola la simmetria:

1 1 1	1 1 0	1 0 1	1 0 0	0 1 1	0 1 0	0 0 1	0 0 0
0	0	0	0	0	0	1	0

L'evoluzione della regola 2 (figura 1.9) presenta l'unica cella "attiva" che si sposta, per ogni intervallo di tempo, nella cella adiacente.

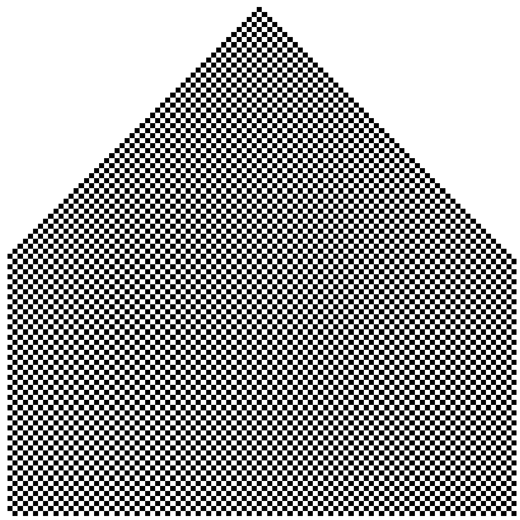

Figura 1.6: Regola 50, 100 passi

La regola 1 viola, invece, la proprietà che abbiamo definito di "quiescenza":

1 1 1	1 1 0	1 0 1	1 0 0	0 1 1	0 1 0	0 0 1	0 0 0
0	0	0	0	0	0	0	1

La sua evoluzione (figura 1.10) presenza l'alternarsi dello stato 1 e dello stato 0 per tutte le celle. Per rendere più evidente questo comportamento, l'automa è presentato in figura con un evoluzione di 20 passi, anziché di 100 passi come negli esempi precedenti[4].

La regola 225, infine, viola entrambe le proprietà:

1 1 1	1 1 0	1 0 1	1 0 0	0 1 1	0 1 0	0 0 1	0 0 0
1	1	1	0	0	0	0	1

La sua evoluzione per 100 passi è riportata in figura 1.11.

[4]in ogni caso il comportamento della regola 1 resta il medesimo per qualsiasi numero di passi

Figura 1.7: Regola 160, 100 passi

Automi cellulari e auto-organizzazione

Gli automi cellulari fin qui esaminati hanno in comune lo stato iniziale: prendono tutti origine da 100 celle disposte in linea retta, tutte con stato 0 eccetto la cella centrale con stato 1. Per studiare ancora una proprietà degli automi si possono applicare le regole già viste ad una condizione iniziale di 100 celle, lo stato delle quali sia però determinato in modo casuale. Wolfram si riferisce a questa condizione come ad uno "stato iniziale disordinato". Nella figura 1.12 si vede come evolve l'ormai nota regola 90, nella figura 1.13 la regola 122 e nella figura 1.14 la regola 150. Nonostante lo stato iniziale sia casuale, l'evoluzione delle regole presenta regolarità anche dopo pochi passi: questo, ad esempio, è particolarmante evidente per i "triangoli" che si formano con l'evoluzione della regola 122. Gli automi cellulari presentano quindi capacità di auto-organizzazione: uno stato iniziale casuale può evolvere in stati caratterizzati da correlazioni e strutture ricorrenti. Le basi dei triangoli della regola 122 non sono altro che sequenze di celle aventi lo stesso stato, che si

Figura 1.8: Regola 4, 100 passi

ridimensionano di una o due celle per ogni intervallo di tempo, dando così origine alla forma triangolare caratteristica.

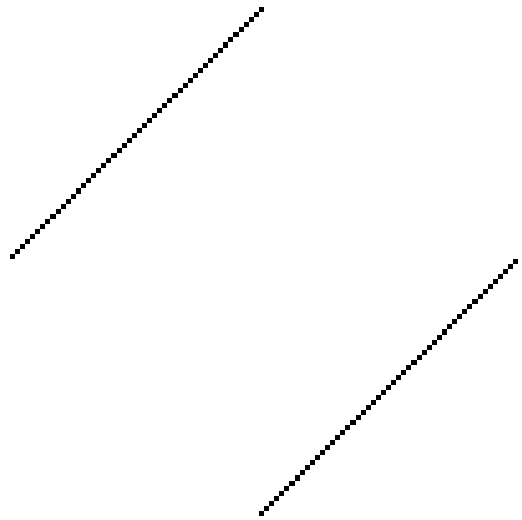

Figura 1.9: Regola 2, 100 passi

1.4 Un gioco sorprendente

All'inizio del 1970 J. Conway, un matematico dell'Università di Cambridge, ideò un automa cellulare con regole molto semplici che chiamò *Game of Life* (Gardner, 1970). Lo "spazio" del gioco è una griglia: ogni cella che la compone può essere "viva" (stato 1) oppure "morta" (stato 0). All'inizio il giocatore può scegliere quali tra le celle debbano essere vive: lo stato dell'automa quindi evolve in base a regole che coinvolgono vicinati composti da tutte le otto celle adiacenti a quella in considerazione. Le regole valide per ogni cella sono:

- se una cella viva (1) ha due o tre celle del vicinato vive sopravvive (1);
- se una cella viva (1) ha meno di due o più di tre celle vicine vive, non sopravvive (0);
- se una cella morta (0) ha tre celle vicine vive, "nasce" (1).

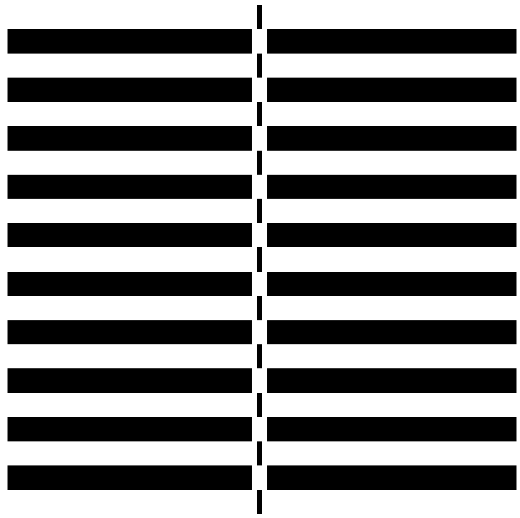

Figura 1.10: Regola 1, 20 passi

Ad ogni passo gli stati di tutte le celle della griglia vengono aggiornati, come è stato descritto negli esempi di regole a una dimensione.

Se, per un primo esempio, si fa evolvere il "gioco" da una configurazione come quella in figura 1.15 ne risulterà una sorta di stato stazionario: nelle successive generazioni, infatti, non vi sarà alcun cambiamento. Ogni cella "viva" ha esattamente tre celle vicine nello stesso stato: nessuna, invece, tra le celle morte ha le tre celle vicine vive necessarie per poter cambiare stato.

Scegliendo bene la configurazione iniziale si possono creare automi con caratteristiche cicliche, come "l'orologio" delle figure 1.16, 1.17, 1.18, 1.19.

Esistono inoltre particolari configurazioni che sono in grado di "spostarsi" sulla griglia dell'automa, riproducendosi all'infinito: tra questi l'esempio più classico è l'aliante (figure 1.20, 1.21, 1.22, 1.23 e 1.24).

Per permettere all'automa di evolvere all'infinito sarebbe necessario disporre di una griglia di dimensioni illimitate: per ovviare a questo inconve-

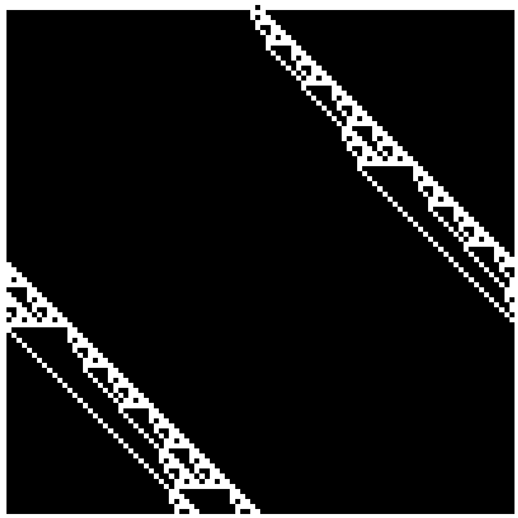

Figura 1.11: Regola 225, 100 passi

niente si immagina che la griglia non sia piana, ma invece disposta su un toroide. In questo modo l'aliante, ad esempio, quando scompare in alto a sinistra riappare sulla griglia nell'opposto angolo in basso a destra.

Il gioco *life* ha le proprietà di una macchina a computazione universale, per cui cambiamenti del solo *input* permettono di eseguire qualsiasi computazione senza alcun cambiamento nella struttura interna. I computer universali possono simulare le operazioni di qualsiasi altro computer e sono conosciuti come Macchine di Turing, dal nome del logico che ne formulò la teoria negli anni Trenta (Chopard et al., 2001).

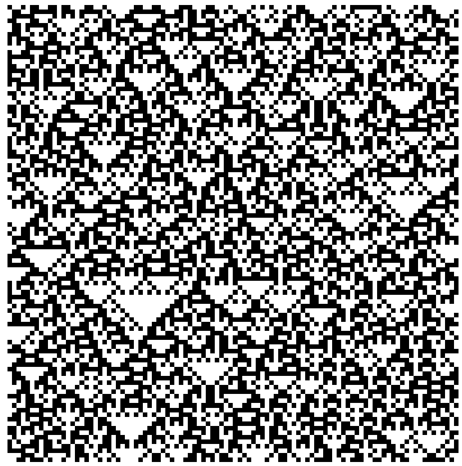

Figura 1.12: Regola 90, 100 passi, stato iniziale disordinato

1.5 Classi di automi cellulari

Secondo Wolfram (1985) tutti i possibili comportamenti degli automi cellulari si possono riassumere in quattro classi.

- Classe 1: si tratta degli automi che evolvono verso condizioni finali omogenee, tra cui la più banale è lo stato nullo.
- Classe 2: sono automi cellulari che evolvono da uno stato iniziale disordinato in diverse strutture separate, caratterizzate da stabilità o da oscillazioni. Secondo Wolfram la regola dell'automa agisce come un filtro, mantenendo solo alcune caratteristiche dello stato iniziale.
- Classe 3: comprende gli automi che mostrano comportamenti caotici e portano a strutture non periodiche. Un piccolo cambiamento dello stato iniziale ha effetti che crescono con l'evolvere dell'automa.
- Classe 4: si tratta di automi con strutture capaci di auto-propagazione.

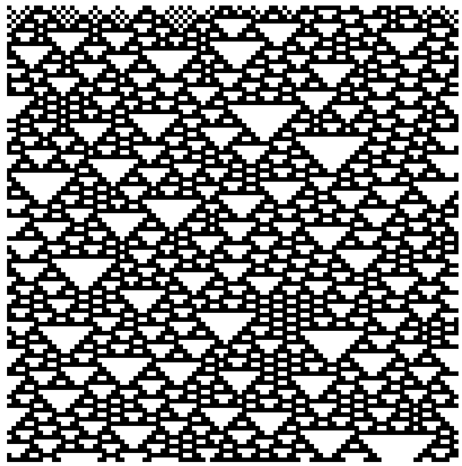

Figura 1.13: Regola 122, 100 passi, stato iniziale disordinato

Tra questi il gioco *life* e gli automi cellulari capaci di computazione universale.

Interpretando in termini probabilistici l'evoluzione delle celle degli automi cellulari, Langton[5] notò che, fissata la probabilità che le celle "sopravvivessero" nelle successive generazioni, al variare di tale parametro venivano spontaneamente formandosi automi prima di Classe 1, quindi di Classe 2 e di Classe 4, infine di Classe 3. In analogia con i sistemi dinamici si tratta secondo Langton di un passaggio tra *ordine*, *complessità* e *caos*: in effetti se le regole di Classe 1 e 2 dimostrano comportamenti omogenei e le regole di Classe 3 evolvono nel caos, le regole di Classe 4 hanno interessanti proprietà di auto-organizzazione e di auto-riproduzione che possono essere propriamente definite *complesse*.

[5]in Waldrop (1995)

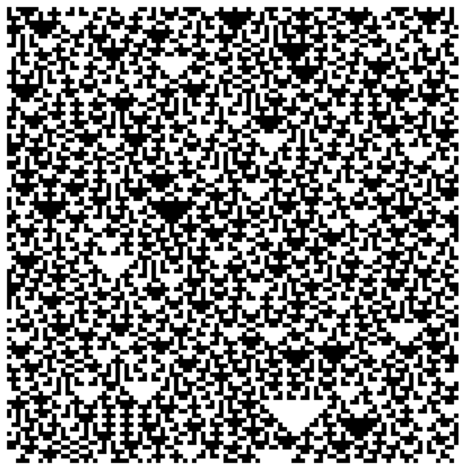

Figura 1.14: Regola 150, 100 passi, stato iniziale disordinato

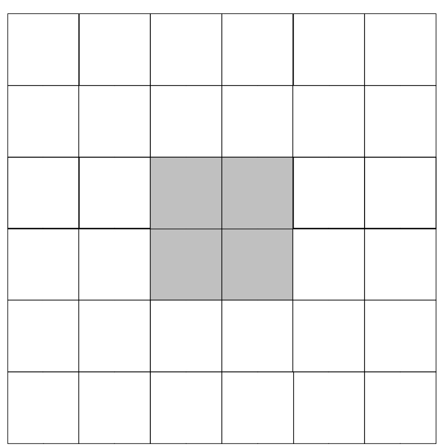

Figura 1.15: Life: uno stato stazionario

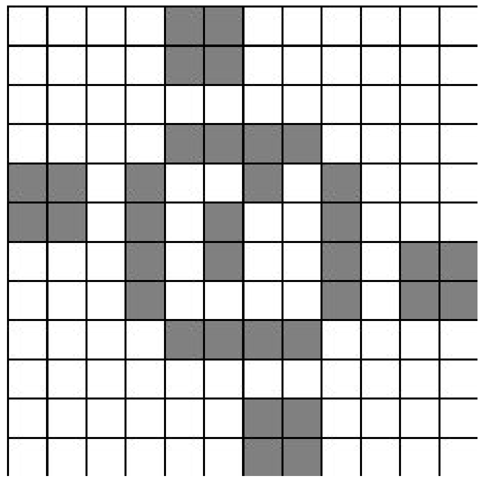

Figura 1.16: L'orologio: prima generazione

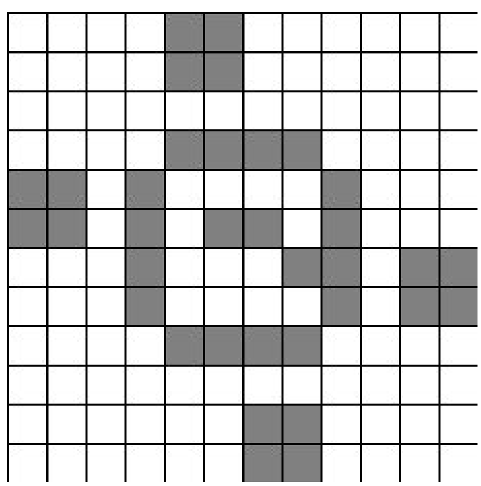

Figura 1.17: L'orologio: seconda generazione

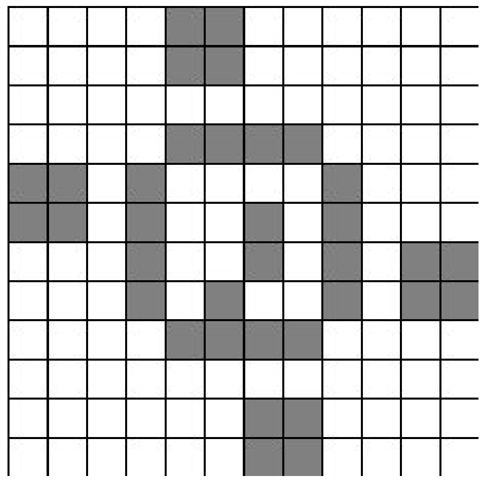

Figura 1.18: L'orologio: terza generazione

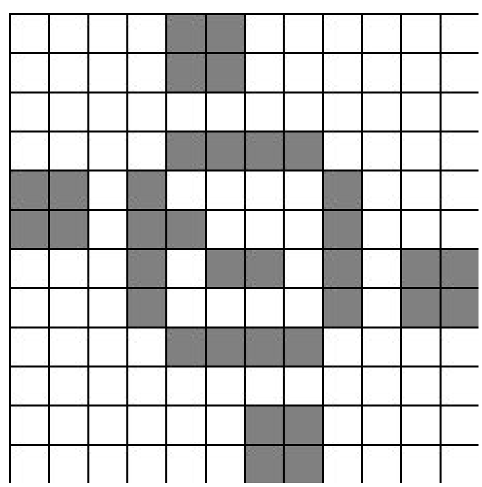

Figura 1.19: L'orologio: quarta generazione

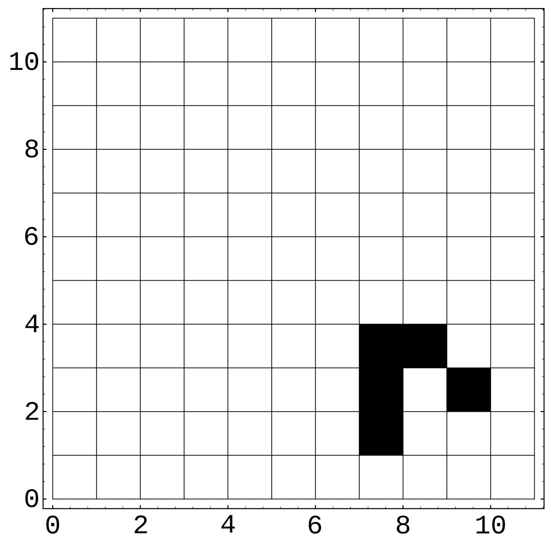

Figura 1.20: Aliante: un esempio di configurazione iniziale

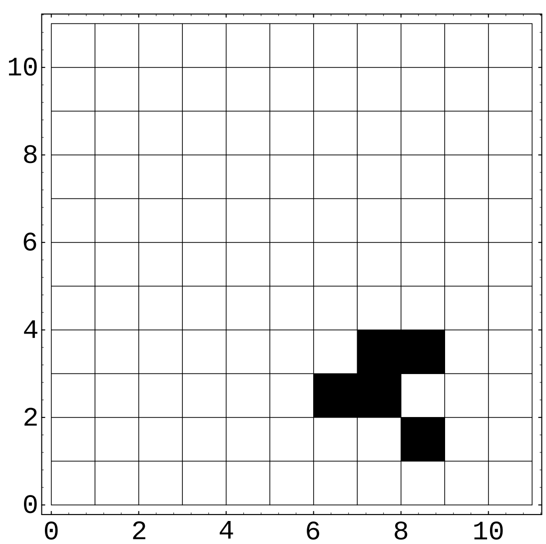

Figura 1.21: Aliante: primo passo (o prima generazione)

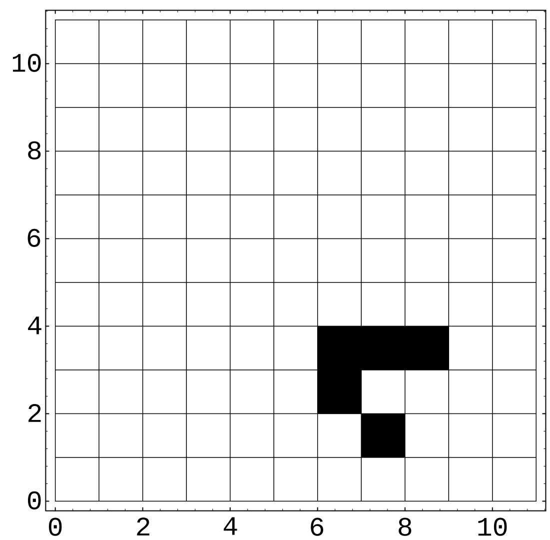

Figura 1.22: Aliante: secondo passo (o seconda generazione)

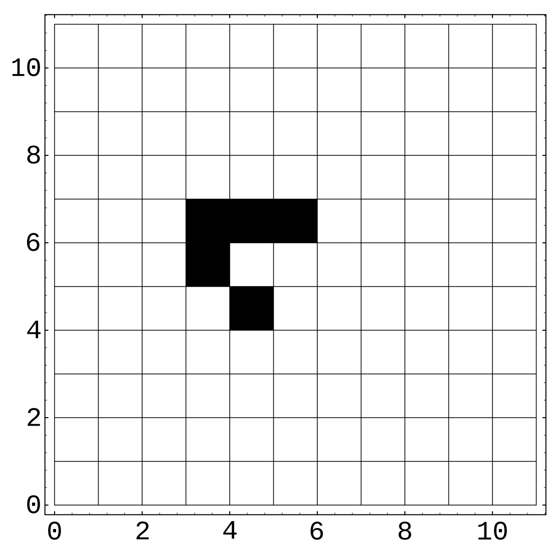

Figura 1.23: Aliante: dopo 15 passi (o generazioni)

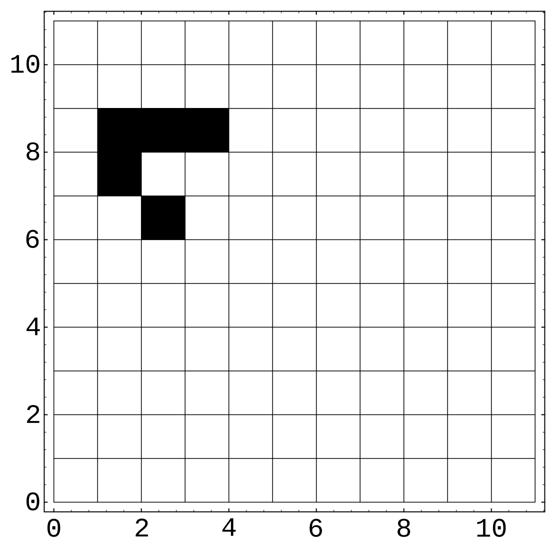

Figura 1.24: Aliante: dopo 23 passi (o generazioni)

Capitolo 2

Territorio sistema complesso

Gli automi cellulari sono uno strumento di indagine dei fenomeni complessi. In questo capitolo si analizzano alcuni studi su complessità, in particolare con un richiamo alla teoria dei sistemi (par. 2.2) ed agli studi sulla complessità in generale (par. 2.3).

2.1 Territorio

Definiamo *spazio* un'estensione della superficie terrestre dotata di soli attributi fisici e *territorio* una porzione di spazio su cui l'uomo ha esercitato una sua azione, attraverso un processo di *territorializzazione*.

Con Turco (1988):

> [...] la territorializzazione è un esito dell'agire collettivo, e come tale accoglie, deposita, stratifica, connette lavoro socialmente mediato e quindi più o meno esplicitamente normato. Al tempo stesso, tuttavia, essa è una condizione ri-produttiva e come tale possiede le caratteristiche fondamentali della logica in cui è incorporata.

Se lo spazio è quindi considerato omogeneo e a-temporale, il territorio comprende invece l'azione territoriale dell'uomo che

- produce territorio,
- usa territorio,
- sviluppa relazioni con altri attori tramite il territorio.

Il territorio[1] ha quindi una organizzazione sociale, economica, infrastrutturale, giuridica tale da permettergli di durare nel tempo.

Organizzazione che, con Morin (1981), puè essere definita:

> (...) la sistematizzazione di relazioni fra componenti o individui che produce un'unità complessa o sistema, dotato di qualità ignote al livello dei componenti o individui. L'organizzazione connette in maniera interrelazionale, elementi, o eventi, o individui diversi che di conseguenza diventano componenti di un tutto. Essa garantisce una solidarietà e una solidità relativa a tali legami, e garantisce perciò al sistema una certa possibilità di durata nonostante le perturbazioni aleatorie. L'organizzazione dunque: trasforma, produce, connette, mantiene.

Si possono riscontrare in questa definizione di Morin le "azioni umane territorializzanti" appena viste: l'azione umana *trasforma* e *produce territorio* in quanto lo spazio incorpora valore antropico, non nel senso della sola apposizione di edifici ed infrastrutture, ma come riconfigurazione dello spazio

[1]oppure luogo, in questo caso

stesso. L'attività umana che *connette* gli individui si svolge attraverso le relazioni, che in qualche modo contribuiscono a *mantenere* nel tempo l'identità del territorio-luogo.

La definizione di Morin introduce alcuni concetti che vanno approfonditi con riferimento alla teoria dei sistemi.

2.2 Sistema

La tradizionale metodologia analitica è fondata sulla scomposizione della realtà in parti semplici, analizzabili separatamente dal tutto cui fanno parte. Parlando di sistema ci si riferisce invece ad elementi in interazione, che acquistano significatività solo se considerati nel loro insieme: caratteristica di un sistema sono quindi gli elementi che lo compongono e le relazioni tra gli stessi e con l'ambiente. Parlando di sistema ci si riferisce, inoltre, non solo al fenomeno ma anche al modo in cui lo stesso viene osservato e studiato.

2.2.1 Uno sguardo alle teorie sui sistemi

L'insieme degli elementi e delle relazioni fra gli stessi costituisce la *struttura* del sistema, che subisce continue modificazioni attraverso i processi, detti di retroazione, per cui un elemento influenza se stesso.

L'*organizzazione* descrive come le relazioni e i processi di retroazione dipendano gli uni dagli altri: inoltre conferisce una coerenza all'insieme del sistema

L'*ambiente* è rappresentato dagli altri sistemi, rispetto ai quali un sistema può essere aperto, se con essi interagisce, o chiuso se altrimenti ne è isolato.

L'*autonomia* del sistema si realizza quando i processi interni producono flussi rivolti verso il sistema stesso e verso la sua organizzazione, oltre che verso l'esterno.

Scriveva Cartesio, nel suo Discorso sul Metodo:

> [...] in luogo del gran numero di regole di cui si compone la logica, ritenni che mi sarebbero bastate le quattro seguenti, purché prendessi la ferma e costante decisione di non mancare neppure una volta di osservarle.
>
> La prima regola era di *non accettare mai nulla per vero, senza conoscerlo evidentemente come tale*[2]: cioè di evitare scrupolosamente la precipitazione e la prevenzione; e di non comprendere nei miei giudizi niente più di quanto si fosse presentato alla mia ragione tanto chiaramente e distintamente da non lasciarmi nessuna occasione di dubitarne.
>
> La seconda, di *dividere ogni problema preso in esame in tante parti* quanto fosse possibile e richiesto per risolverlo più agevolmente.
>
> La terza, di *condurre ordinatamente i miei pensieri* cominciando dalle cose più semplici e facili a conoscersi, per salire poco a poco, come per gradi, sino alla conoscenza delle più complesse; supponendo altresì un ordine tra quelle che non si precedono naturalmente l'un l'altra.
>
> E l'ultima, di fare in tutti i casi enumerazioni tanto perfette e rassegne tanto complete, da *essere sicuro di non omettere nulla*

La schematizzazione di Moigne (1977) contrappone alle regole di Cartesio altrettanti principi sistemici:

[2] corsivi miei

- Al primo precetto, detto dell'evidenza, si contrappone il principio della pertinenza: l'uomo osserva il mondo dal punto di vista che gli è imposto dal perseguimento dei propri fini. La conoscenza non è concepita come predeterminata, ma si sviluppa dall'interazione tra il soggetto e l'oggetto dell'indagine.

- Al precetto della scomposizione del problema nel maggior numero di parti possibile (riduzionismo) si contrappone il principio dell'olismo: l'oggetto di indagine va concepito globalmente, nel suo insieme.

- Al precetto di causalità, Le Moigne oppone il principio teleologico: il comportamento dell'oggetto viene posto al centro del processo conoscitivo, senza dover identificare a priori tale comportamento.

- All'ultima regola dettata da Cartesio, all'esaustività, si contrappone il principio di aggregazione: non si può pervenire ad una rappresentazione completa della realtà, ma è necessario raggruppare gli elementi ritenuti utili ai fini degli obiettivi dell'osservatore.

La teoria dei sistemi presenta una letteratura vastissima e numerose rielaborazioni: tra le opere più interessanti, solo a titolo d'esempio si rimanda a von Bertalanffy (1983) e Bateson (1984).

2.2.2 Sistemi e autopoiesi

Il concetto di autonomia del sistema introdotto al paragrafo 2.2.1, con cui si indica la proprietà del sistema di rivolgere flussi verso il suo interno e verso la sua organizzazione, è stato rielaborato da Maturana e Varela (1985). Gli autori hanno introdotto il concetto dell'autopoiesi, la capacità del sistema di riprodurre e progettare se stesso attraverso la riproduzione dei suoi componenti. Una macchina autopoietica viene quindi definita come (Maturana e Varela, 1987):

> (...) una macchina organizzata come una rete di processi di produzione (trasformazione e distruzione) di componenti che produce i componenti che: (1) attraverso le loro interazioni e trasformazioni continuamente rigenerano e realizzano la rete di processi (relazioni) che li producono; e (2) la costituiscono come una unità concreta nello spazio nel quale essi (i componenti) esistono specificando il dominio topologico della sua realizzazione in quella rete. Ne segue che una macchina autopoietica continuamente genera e specifica la sua propria organizzazione mediante il suo operare come sistema di produzione dei suoi propri componenti, e lo fa in un *turnover* senza fine di componenti in condizioni di continue perturbazioni e di compensazione di perturbazioni.

Viene sottolineata (1) la capacità di auto-organizzazione e di autoproduzione degli elementi del sistema ed in particolare delle relazioni tra gli stessi. Quindi (2) si specifica l'autonomia e la coerenza interna della macchina autopoietica, indipendente dal mondo esterno se non per quegli *input* (o meglio perturbazioni) che sono necessarie per l'auto-organizzazione e per l'auto-riproduzione.

Per l'importanza che assumerà nelle pagine seguenti è opportuno sottolineare un aspetto: la capacità di auto-organizzarsi dei sistemi autopoietici li configura come "macchine" in grado di apportare autonomamente cambiamenti su loro stessi e quindi in grado di addattarsi. Si può a questo punto intravvedere l'analogia con i sistemi sociali, nella misura in cui questi costituiscano sistemi auto-organizzati (Conti, 1996).

2.3 Complesso

Gli studi sulla complessità hanno coinvolto ricercatori in numerose discipline e con differenti finalità: anche per questo non esiste una definizione della complessità condivisa da tutti gli studiosi. Le considerazioni svolte di seguito non vogliono essere una esposizione dei diversi punti di vista, ma piuttosto un'analisi delle riflessioni più interessanti alla luce del resto del lavoro.

2.3.1 Perché è importante studiare la complessità

Per Langton (1992) uno degli aspetti fondamentali nella spiegazione delle dinamiche della vita è la distinzione tra sistemi lineari e sistemi non lineari. Nei primi il comportamento del sistema nel suo complesso corrisponde esattamente alla somma delle parti. Obbedendo ad un principio che Langton chiama di sovrapposizione, i sistemi lineari possono essere studiati con il metodo riduzionista proposto da Cartesio e sopra esaminato: un sistema lineare può quindi essere suddiviso in parti progressivamente più semplici. Raggiunta la comprensione di tutte le parti semplici che compongono il sistema, si può comprendere e studiare il funzionamento del sistema totale come somma del funzionamento delle sue parti. Per quanto di difficile comprensione sia il sistema e per quanto siano numerose le parti che lo compongono, se l'osservatore è in grado di comprenderle, il sistema in oggetto è "solo" *complicato*.

I sistemi non lineari, invece, non rispettano il principio di sovrapposizione: per quanto l'osservatore abbia compreso il funzionamento di tutte le parti di cui il sistema è composto, non sarà possibile trasferire la comprensione delle parti nella comprensione del tutto. Il sistema è *complesso*.

La fondamentale differenza da un sistema complicato è in un sistema complesso l'importanza assunta dalle relazioni tra le parti, relazioni che vengono meno quando le parti sono analizzate separatamente.

Vale la pena soffermarsi per una distinzione: le teorie[3] della complessità sono distinte dalla teoria del caos e per molti aspetti non ne sono evoluzioni o corollari. Le dinamiche caotiche sono processi deterministici, ben differenti dai processi stocastici e soprattutto dai comportamenti complessi, sebbene condividano con questi ultimi alcune caratteristiche tra cui l'importanza delle condizioni iniziali sull'evoluzione del sistema.

In effetti nella maggior parte dei sistemi complessi, piccole modificazioni degli stati iniziali delle parti possono determinare conseguenze notevoli sul comportamento del tutto, attraverso vie di propagazione non banali e difficilmente sondabili. Si ribadisce in questo modo la non linearità del rapporto tra parti e insieme, il cui comportamento non è a priori predicibile e subisce in modo determinante lo stato delle condizioni di partenza.

Di fronte ad un sistema con tali caratteristiche, il metodo d'indagine deve essere profondamente rivisto rispetto alla tradizione analitica: invece di partire dal sistema nel suo insieme e poi scomporlo per comprenderne le parti è opportuno "cominciare dalle parti costitutive e comporle allo scopo di sintetizzare il comportamento che ci interessa"(Langton, 1992).

Il sistema complesso presenta altre proprietà caratteristiche, tra cui l'e-

[3] il plurale è d'obbligo

mergenza. Si è detto che una volta definite le parti, con loro regole interne e di interazione, il risultato delle relazioni nel sistema totale può essere, sempre che si tratti di un sistema complesso, maggiore della somma delle parti. Tuttavia possono manifestarsi comportamenti "coerenti" del sistema che non sono stati in alcun modo definiti a priori, ma che appunto emergono spontaneamente dalla dinamica d'insieme. Una proprietà è detta quindi emergente se risulta evidente dal comportamento del sistema, ma non è stata definita a priori tra le regole delle parti.

L'esigenza di analizzare i sistemi complessi "dal basso" ha portato alla diffusione delle simulazioni al computer fondate su agenti, dove gli *agenti* sono in qualche modo assimilabili per costruzione a quelle che fino ad ora sono state definite "parti". Per un approfondimento sui metodi di simulazione fondata su agenti nelle scienze sociali, in particolare in economia, si rimanda a Gilbert e Terna (2000) e Tesfatsion (2002); per l'uso di strumenti informatici di simulazione, Terna (1998). Per una discussione sulle simulazioni in generale e sulle loro applicazioni alle scienze sociali: Parisi (2001).

2.3.2 Complessità ed economia

Uno dei centri di ricerca più attivi nello studio della complessità è l'Istituto di Santa Fe, negli Stati Uniti. Per una riflessione sulla nascita dell'Istituto ed in generale sullo studio della complessità si rimanda a Waldrop (1995).

Tra i programmi di ricerca dell'Istituto è quello di studi su complessità ed economia. Scrivono Arthur, Durlauf, e Lane (1997):

> To describe the complexity approach, we begin by pointing out

six features of an economy that together present difficulties for the traditional mathematics used in economics:

- **Dispersed Interaction**. What happens in the economy is determined by the interaction of many dispersed, possibly heterogeneous, agents acting in parallel. The action of any given agent depends upon the anticipated actions of a limited number of other agents and on the aggregate state these agents co-create.

- **No Global Controller**. No global entity controls interactions. Instead, controls are provided by mechanisms of competition and coordination between agents. Economic actions are mediated by legal institutions, assigned roles, and shifting associations. Nor is there a universal competitor – a single agent that can exploit all opportunities in the economy.

- **Cross-cutting Hierarchical Organization**. The economy has many levels of organization and interaction. Units at any given level – behaviors, actions, strategies, products – typically serve as “building blocks” for constructing units at the next higher level. The overall organization is more than hierarchical, with many sorts of tangling interactions (associations, channels of communication) across levels.

- **Continual Adaptation**. Behaviors, actions, strategies, and products are revised continually as the individual agents accumulate experience – the system constantly adapts.

- **Perpetual Novelty**. Niches are continually created by new markets, new technologies, new behaviors, new institutions. The very act of filling a niche may provide new niches. The result is ongoing, perpetual novelty.

- **Out-of-Equilibrium Dynamics**. Because new niches, new potentials, new possibilities, are continually created, the economy operates far from any optimum or global equilibrium. Improvements are always possible and indeed occour regulary.

Tra le questioni poste dagli autori, ritroviamo alcuni tra i concetti a cui si è già accennato.

- L'importanza delle relazioni tra gli agenti, che sono individuate come la causa fondamentale dei fatti economici, determinati dall'azione aggregata delle parti del sistema.

- L'assenza di un "controllore" e in sintesi l'assenza di gerarchie: si intravvede qui il ruolo della metafora dell'organizzazione reticolare, che negli studi sul territorio è stata utilizzata per descrivere diversi fenomeni, tra cui il distretto industriale.

- Il continuo rinnovarsi, adattarsi, organizzarsi del sistema: si torna a concetti esposti per i sistemi autopoietici, in cui si riscontra la capacità di auto-organizzazione.

- Infine, viene negata la necessità di un unico equlibrio: si possono concepire come pissibili continui miglioramenti e diverse soluzioni ottimali, con molteplici percorsi per raggiungerle.

2.3.3 Punti di vista

Sono state proposte molte definizioni di complessità; in questa sezione si riportano due di queste, la prima di J. L. Le Moigne, di portata generale, la seconda proposta da Turco, più legata allo studio del territorio.

Scrive Le Moigne[4]:

> La complessità è la proprietà di un sistema modellizzabile suscettibile di mostrare dei comportamenti che non siano tutti pre-determinabili (necessari) anche se potenzialmente anticipabili (possibili) da un osservatore intenzionale di questo sistema.

Si propone una "misura della complessità" di un sistema, attraverso il confronto tra il numero di comportamenti possibili con il numero di comportamenti certamente predeterminabili.

Con Turco (1988), si può interpretare la complessità in termini di opportunità di azione e in definitiva anche in termini di libertà di scelta. L'agire si realizza necessariamente in uno solo tra i tanti modi possibili: lo scarto tra l'agire in atto e l'agire in potenza e "la sovrabbondanza di possibilità che si dà all'esperienza vivente" è la complessità.

La complessità è soggetta a mutamenti qualitativi: rispetto ad un agire in atto, un diverso agire potenziale esiste di fronte a condizioni che possono presentarsi in modo diverso dal previsto. Inoltre la complessità è soggetta a mutamenti quantitativi: se il sistema aumenta la sua complessità si parla di *complessificazione*, se la diminuisce si parla di *decomplessificazione*. Gli atti territorializzanti (par. 2.1) sono processi di complessificazione e contemporaneamente di decomplessificazione della realtà.

[4]citato in Turco (1988)

2.4 Territorio sistema complesso

Gli atti territorializzanti, che producono e riducono complessità, possono essere riuniti sotto tre categorie: la denominazione, la reificazione, la strutturazione.

La *denominazione* è l'atto con cui viene conferito un nome ad una porzione della superficie terrestre, che in questo modo diventa *luogo*: si tratta di un prodotto della società, della cultura risultante dall'agire umano su quel determinato spazio. Nel momento in cui si dà un nome ad uno spazio lo si complessifica, perché assume un attributo che prima non aveva; inoltre, attraverso il nome, si vuole riassumere un numero di fenomeni legati al territorio. In questo modo si riduce la complessità, producendo informazione in una forma circoscritta ed immediatamente comprensibile all'osservatore.

La *reificazione* è il processo che trasforma la materia naturale in materia costruita dall'uomo, ma anche il processo che trasforma la stessa materialità prodotta dall'uomo. Con questo atto l'intervento umano si materializza in artefatti con precise funzioni dirette o di supporto per le relazioni sociali. Si tratta in prima analisi di un processo di riduzione della complessità, soprattutto nella misura in cui riduce l'aleatorietà dello spazio dandogli una forma razionale, intelleggibile ed in qualche modo replicabile. Contemporaneamente un atto reificante dilata il potenziale di azione dell'uomo sul territorio: in questo senso aumenta la complessità.

La *strutturazione* è la costituzione ed il funzionamento di strutture territoriali, contesti in cui si esprime il controllo "sensivo" dello spazio geografico. Dall'ambiente complesso si ricavano luoghi fisici, spazi operativi, con complessità ridotta e per questo a disposizione dell'uomo. Al luogo viene attribuita una finalità (serve a qualcosa) ed un campo operativo, in quanto sul territorio ed attraverso lo stesso gli agenti realizzano obiettivi precisi. Si possono rappresentare una serie di nodi su uno spazio, organizzati a rete con l'obiettivo di realizzare un programma; i nodi possono anche essere simbolici o corrispondere ad artefatti.

La strutturazione conferisce intelligibilità al territorio, essendo una forma ordinativa che garantisce livelli di coerenza nell'agire. L'ambiente, definito come complesso, non è tuttavia un caos incomprensibile: eccede le capacità comprensive di qualsiasi osservatore, ma si offre ad azioni di riduzione della complessità.

2.4.1 Complessità e sviluppo locale

I sistemi evolvono grazie alla loro struttura interna ed alle relazioni con altri sistemi: questo avviene attraverso la capacità del sistema di creare dalla propria organizzazione nuovi stati di complessità. Il sistema, per evolvere, sfrutta i flussi che arrivano dall'esterno per modificare la propria struttura e per diversificarsi: si attuano processi di complessificazione. Il sistema locale si complessifica, nel senso che i soggetti oltre ad interagire localmente, interagiscono anche con altri livelli: si tratta di una dinamica tra il locale ed il globale, concepiti come livelli non separabili dell'interazione tra i sistemi che sussistono su un territorio.

Con globale non si intende un attributo di estensione fisica: si tratta, invece, di una dimensione relazionale non definibile se non in termini di relazioni che si sviluppano tra i sistemi a livello locale.

Quest'ultimo non va allo stesso modo inteso come un'area delimitata da confini amministrativi (un comune, una provincia ecc.), ma piuttosto un sistema dotato di una propria identità che lo distingue da altri sistemi e dall'ambiente.

Le interazioni tra il locale ed il globale non sono scindibili: gli agenti del sistema operano contemporaneamente a livello locale ed a livello globale, determinando quindi relazioni e dinamiche particolarmente complesse. Per descrivere questo genere di interazioni si è affermato il concetto di rete.

Con i presupposti fin qui delineati, lo sviluppo non è più concepito attraverso variabili quantitative, ma in termini più complessi, che coinvolgono processi economici e sociali: questo implica dover considerare una molteplicità di modelli di sviluppo diversi e quindi specificità ed irripetibilità di ciascuno di essi. La realtà che si presenta sotto forma di fenomeni complessi, non è più riducibile a schemi interpretativi di portata generale.

Capitolo 3

Gli automi al lavoro: alcuni applicativi

Gli esempi di automi cellulari del primo capitolo sono stati realizzati con Mathematica, un software con grandissime potenzialità sviluppato da Wolfram Research[1], che comprende alcuni stumenti per lo sviluppo di automi cellulari, ma che è studiato per essere potenzialmente applicato a qualsiasi problema matematico.

Esistono invece molti applicativi specificamente realizzati per gli automi: alcuni sono analizzati in questo capitolo, ampliando gli esempi e le applicazioni del primo capitolo.

I programmi presentati nelle sezioni 3.1 e 3.2 sono stati costruiti per lo sviluppo di automi cellulari: si vedrà che questo rappresenta il loro principale punto di forza ed allo stesso tempo il loro limite. Nella sezione 3.3 viene analizzato StarLogo, che si propone come un programma completo per simulare le dinamiche di sistemi complessi, al di là quindi dei soli automi

[1] www.wolfram.com

cellulari. Nella medesima sezione, come esempio d'uso del programma, sarà descritto il comportamento di un automa cellulare "sorprendente", la formica di Langton.

3.1 DDLab

DDLab, acronimo per Discrete Dynamics Lab, è un programma realizzato da Andrew Wuensche del Santa Fe Institute. Il software è scaricabile gratuitamente, assieme ad un ottimo manuale, dal sito www.santafe.edu/wuensch/ddlab.html ed è disponibile in versioni per Windows o per Linux.

Scrive Wuensche nell'introduzione al manuale di DDLab:

> DDLab is an interactive graphics program for researching the dynamics of finite binary networks, from Cellular Automata to random Boolean networks and beyond, including their attractor basins. The program is relevant to the study of complexity, emergent phenomena, neural computation and aspects of theoretical biology such as modeling gene regulatory networks, and to the study of discrete dynamical networks in general in a variety of fields.

Il programma comprende tutte le funzioni necessarie per lo sviluppo degli automi: per questo motivo non è necessario conoscerne il linguaggio, come si vedrà con altri applicativi o come è necessario per sviluppare automi in Mathematica. Se questo è il vantaggio di DDLab, allo stesso tempo ne è il principale limite, nel senso che il software può essere utilizzato solo nell'ambito delle funzioni previste.

Le istruzioni vengono introdotte dall'utente in modo interattivo: il programma richiede infatti di specificare una per una le caratteristiche dell'automa che si vuole costruire. Se da un lato questo rende i primi tentativi di utilizzo piuttosto "ostici", dall'altro permette di controllare passo passo quello che si sta richiedendo alla macchina.

3.1.1 Ancora qualche automa ad una dimensione

DDLab si è prestato molto bene per costruire alcuni esempi per approfondire quanto detto nel par. 1.5 sulle classi di automi cellulari.

Gli automi della Classe 1 sono quelli che, a partire da uno stato iniziale disordinato, pervengono ad una configurazione stabile. Tra queste in DDLab si possono calcolare regole come la 4 e la 16 (par. 1.3), con le seguenti caratteristiche:

– un automa composto da 300 celle: nell'output a video ogni pixel corrisponde ad una cella;

– regola di vicinato con $k = 5$ (intorno di von Neumann);

– stato iniziale con celle di stato 1 e 0 distribuite casualmente con probabilità 0.5;

– regola 4 impostata in formato binario: 000100;

– regola 16 impostata in formato binario: 010000.

Non si riporta l'output a video del programma, perché gli automi di Classe 1 passano allo stato nullo dopo solo pochi passi.

Gli automi di Classe 2 evolvono in strutture stabili: nella figura 3.1 è riportato l'output a video della regola 24, impostata in formato binario come 011000 e con caratteristiche analoghe a quelle sopra descritte.

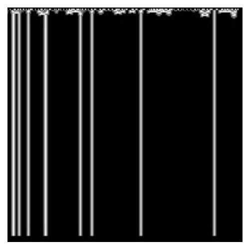

Figura 3.1: DDLab: evoluzione della regola 24

Gli automi di classe 3 evolvono in modo caotico: tra questi la regola 10 (001010) della figura 3.2 e la regola 12 (001100) della figura 3.3.

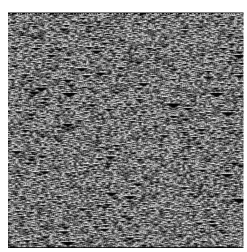

Figura 3.2: DDLab: evoluzione della regola 10

Gli automi di classe 4 presentano strutture complesse con fenomeni di stabilità locale: tra questi la regola 20 (010100) in figura 3.4 e la regola 52 (110010) in figura 3.5.

Nella figura 3.6 è riportata l'evoluzione della regola 90, così come viene presentata a video da DDLab: sulla parte destra dello schermo sono indicati i comandi con i quali è possibile intervenire interattivamente sull'evoluzione

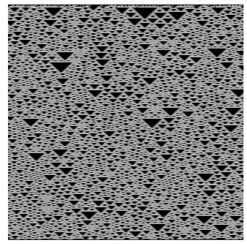

Figura 3.3: DDLab: evoluzione della regola 12

Figura 3.4: DDLab: evoluzione della regola 20

dell'automa. Sono possibili diverse operazioni, che vanno dalla modifica dello stato di una singola cella alla definizione di una diversa regola "in corso d'opera". I grafici forniscono misure di frequenza degli stati delle celle e delle interazioni di vicinato.

3.1.2 Il gioco *life*

Il gioco *life*, come si è visto al par. 1.4, è un automa cellulare a due dimensioni: può essere calcolato da DDlab definendo un vicinato di 8 celle ($k = 9$). La regola di *life* è già definita dal programma e può essere selezionata dai successivi comandi quando il software chiede di specificare la regola di evoluzione.

Nella figura 3.7 è riportato l'output a video di DDlab dell'evoluzione dopo circa 100 passi di un automa con le seguenti caratteristiche:

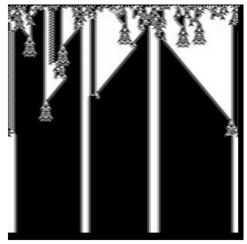

Figura 3.5: DDLab: evoluzione della regola 52

– vicinato composto da 8 celle ($k = 9$);

– regola di evoluzione *life*;

– griglia di dimensione 70 x 70;

– stato iniziale delle celle 0 o 1 definito casualmente con probabilità 0.5;

– 100 generazioni.

Nella figura, indicate da frecce, si possono riconoscere strutture stabili o con precise periodicità: le quattro celle "vive" disposte a quadrato formano, ad esempio, una condizione di stabilità perché ogni cella ha esattamente 3 celle adiacenti vive e nessuna delle celle "morte" ha le tre celle vive nel vicinato necessarie per determinare il cambiamento di stato. Inoltre, dopo poche generazioni, si sono formati diversi "alianti", le figure che percorrono lo spazio dell'automa già viste nel par. 1.4; nella figura sono indicati anche altri gruppi di celle con comportamenti regolari, tra cui quelli composti da tre celle "vive" disposte in linea retta che, ad ogni generazione, cambiano disposizione da orizzontale a verticale e viceversa.

Alla luce di quanto detto nel capitolo precedente, questo automa cellulare fornisce un esempio di comportamento complesso: dallo stato iniziale

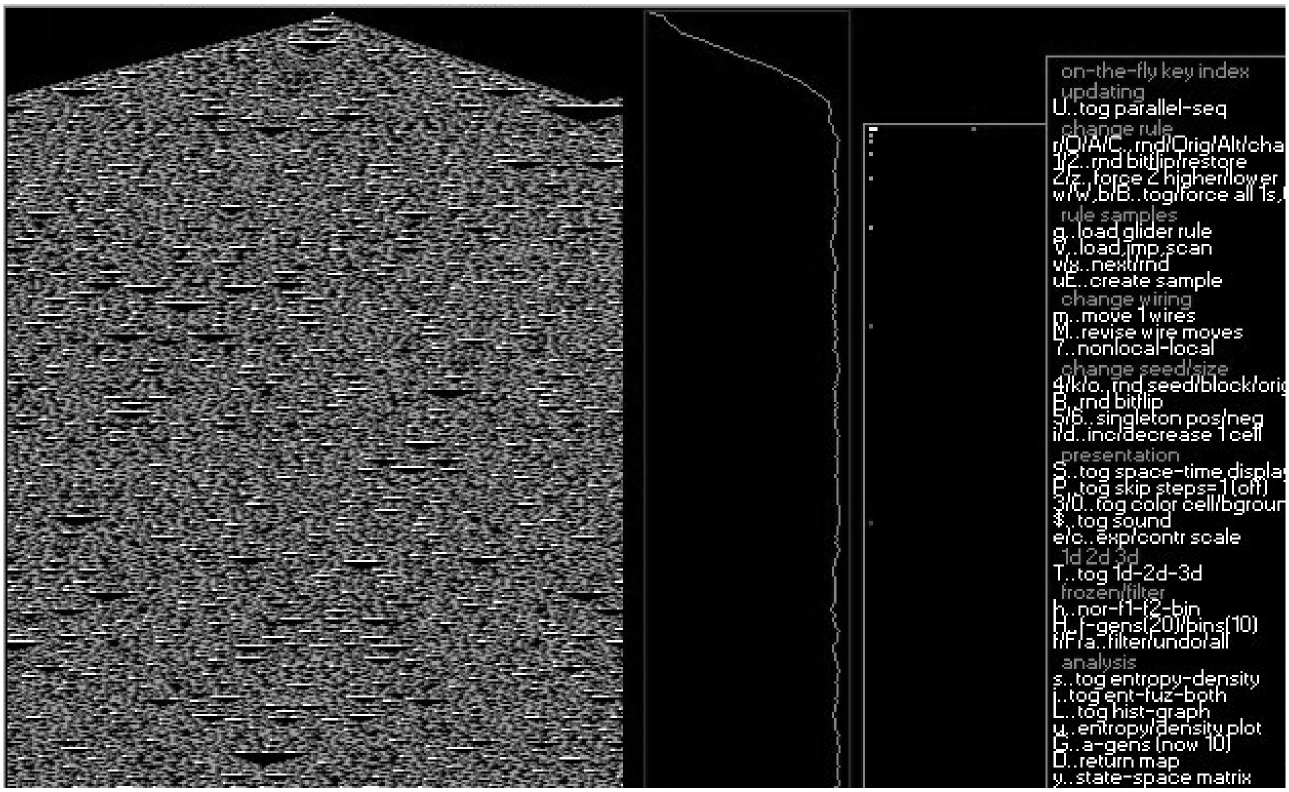

Figura 3.6: DDLab: evoluzione della regola 90 e riepilogo dei comandi interattivi

composto da celle disposte a caso, emergono con l'applicazione di una regola semplice strutture dotate di stabilità o di capacità autoriproduttive, capaci insomma di comportamenti non prevedibili e non inclusi a priori tra le loro regole. In particolare gli "alianti" hanno spesso un ruolo di portatori di informazione, perché sono in grado di spostarsi autonomamente nello spazio degli automi.

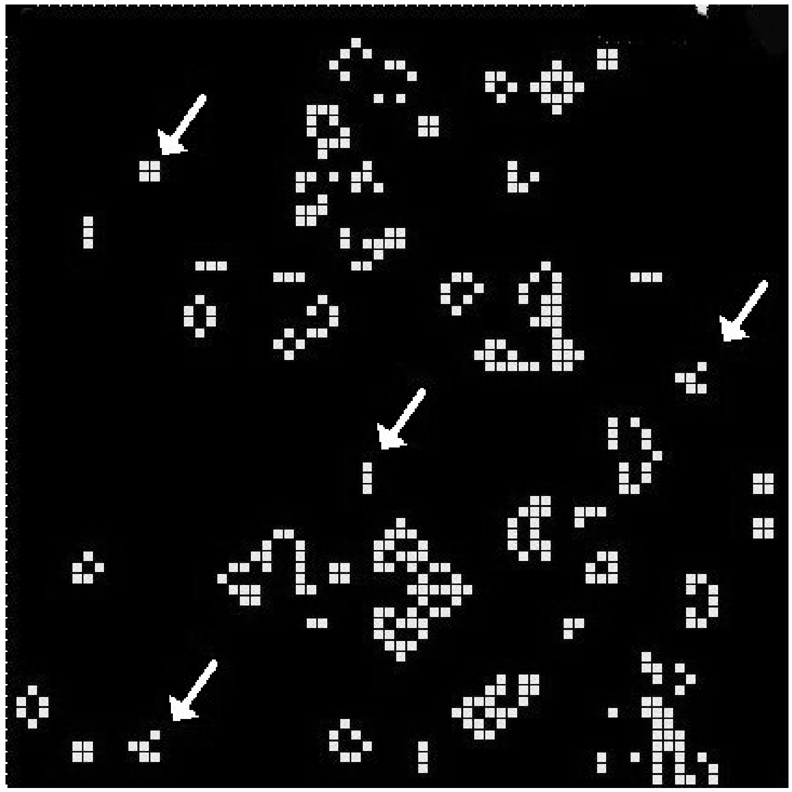

Figura 3.7: DDLab: evoluzione della regola life

3.1.3 Il bianco e il nero

In questa sezione si prende in esame un tipo particolare di regola di evoluzione di automi cellulari, detta “regola di maggioranza”. Ciascun automa aggiorna il proprio stato a 0 oppure ad 1 considerando gli stati delle celle del suo vicinato di Moore che comprende le 8 celle adiacenti e la cella stessa (par. 1.2). La cella in questione avrà nell'unità di tempo successiva $(t+1)$ lo stato che caratterizza nell'unità di tempo corrente (t) la maggioranza delle celle del vicinato: si tratta di contare il numero delle celle che compongno il vicinato che hanno stato 1 e determinare se sono o meno in maggioranza[2].

In questo caso, però, si prende in considerazione una modifica proposta da G. Vichniac[3]: ciascuna cella considera il proprio vicinato e determina il numero di celle con stato 1. Trattandosi di un intorno di Moore, si può trattare di un numero compreso tra 0 e 9. L'automa aggiorna quindi il proprio stato secondo lo schema seguente.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	1	0	1	1	1	1

Nella prima riga vi sono i possibili risultati della somma degli stati delle celle nel vicinato al tempo t e nella seconda riga i possibili conseguenti stati dell'automa nel tempo $t + 1$.

Rispetto ad una regola di maggioranza semplice, quella proposta da Vichniac inverte gli esiti per il tempo $t+1$ nel caso in cui il risultato della somma sia 4 oppure 5. Di conseguenza, se vi è una leggera maggioranza di 1 nel vicinato, lo stato della cella sarà 0, se vi è una leggera maggioranza di 0 sarà 1.

Come in altri esempi precedenti la regola di maggioranza può essere applicata in DDLab ad un "mondo" di automi cellulari di dimensioni 250 x 250, con celle di stato 0 oppure 1 distribuite casualmente con probabilità 0.5.

Nelle figure 3.8 e 3.9 sono riportati gli output a video dell'evoluzione della regola di maggioranza rispettivamente dopo 15 e 264 generazioni. Si nota come le zone caratterizzate dai diversi stati si separino a velocità decrescente,

[2] Le regole che prevedono di considerare il risultato della somma degli stati di celle che compongono un vicinato di Moore, sono dette regole totalistiche.

[3] citato in Chopard et al. (2001)

non senza la presenza di aree in cui piccole concentrazioni di celle con stato 1 persistano entro aree più grandi di soli 0 o viceversa.

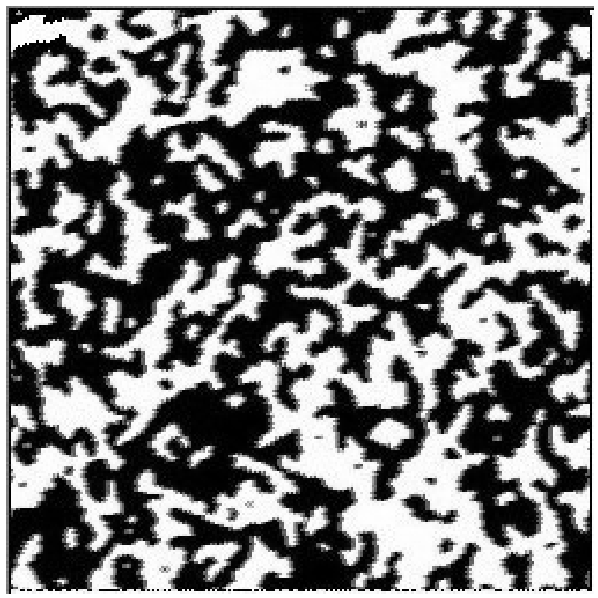

Figura 3.8: DDLab: evoluzione della regola di maggioranza dopo 15 generazioni

3.1.4 Altre funzioni

Oltre a quanto presentato, il programma offre molte altre funzionalità particolarmente importanti se si vuole analizzare il comportamento degli automi cellulari da un punto di vista statistico. Esistono, ad esempio, funzioni in grado di individuare i fenomeni per cui durante l'evoluzione di un automa si formano strutture stabili a partire da percorsi caotici.

Non si può invece dire che DDLab possa essere utilizzato come strumento di simulazione, scopo che sembra non essere comunque nelle intenzioni del-

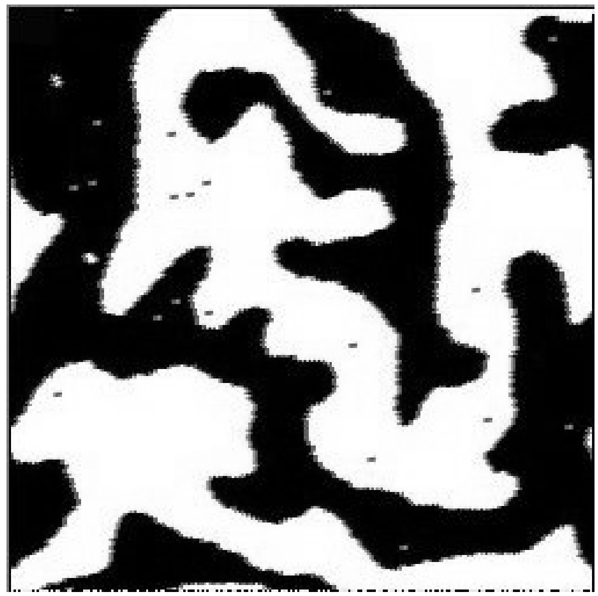

Figura 3.9: DDLab: evoluzione della regola di maggioranza dopo 264 generazioni

l'autore che ha voluto fornire uno strumento di calcolo di automi cellulari e di reti, piuttosto che di indagine di una realtà simulata nel computer.

3.2 CelLab

CelLab (Cellular Automata Laboratory) è stato scritto a partire da una prima versione per DOS nel 1985 da Rudy Rucker, un professore di matematica autore di numerosi libri di divulgazione e da John Walker, il fondatore di Autodesk. La versione corrente, da cui sono stati tratti gli esempi che seguiranno, è per i sistemi Windows e può essere scaricata all'indirizzo www.fourmilab.ch/cellab[4].

[4] E' consigliabile comunque una visita al sito www.fourmilab.ch, ricco di software e documenti interessanti e curiosi

3.2.1 Ancora sulle regole di maggioranza

La regola totalistica di maggioranza vista nel par. 3.1.3 è quella modificata secondo la proposta di Vichniac. La regola di maggioranza semplice ha invece il seguente schema:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

La regola può essere sviluppata in CelLab semplicemente impostando il programma attraverso il codice binario 992: il software, infatti, è in grado di definire internamente le regole totalistiche a partire dal loro codice binario.

Il “mondo” di CelLab è composto dalla usuale scacchiera, in questo caso di dimensioni 320 x 200, con la possibilità di scegliere se unire o meno i bordi in modo tale che lo spazio dell’automa sia continuo al di là delle possibilità dello schermo. In questi esempi lo stato delle celle è sempre definito casualmente tra 0 e 1 con la probabilità del 50 per cento.

Dall’evoluzione a partire da uno stato casuale della regola di maggioranza semplice si ottiene, dopo 46 generazioni, una situazione stabile, come riportata in figura 3.10

La regola modificata da Vichniac vista nel paragrafo 3.1.3 presenta maggiore instabilità nelle zone di confine tra i gruppi di celle con stati diversi. Per confronto si riporta in figura 3.11 l’evoluzione di tale regola (con codice binario 976) per i primi 46 passi: la configurazione è in questo caso ancora instabile, infatti si perviene ad una situazione in qualche modo stabile solo dopo circa 25000 generazioni (fig. 3.12). In altri casi può accadere che le celle di uno stato prendano il sopravvento su quelle dell’altro per occupare

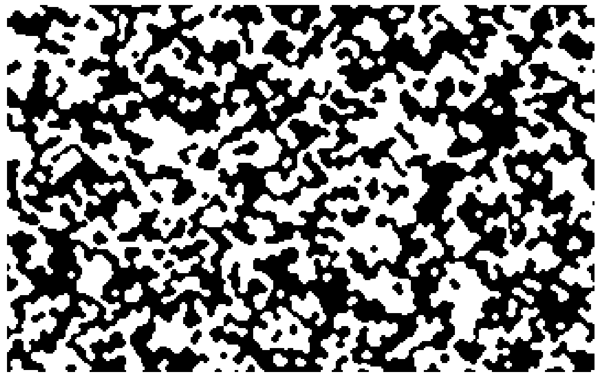

Figura 3.10: CelLab: evoluzione della regola di maggioranza semplice dopo 46 generazioni

tutto lo spazio: tuttavia, analogamente a quanto si può notare nella figura 3.12, all'interno di vaste zone di celle del medesimo stato possono formarsi piccoli gruppi stabili di celle con lo stato opposto, che sembrano resistere in tale condizione per molte generazioni.

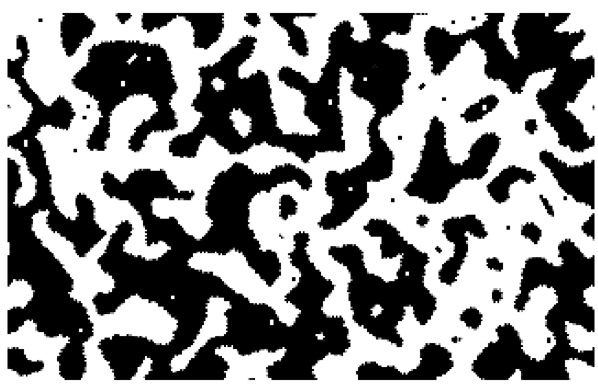

Figura 3.11: CelLab: evoluzione della regola di maggioranza modificata dopo 46 generazioni

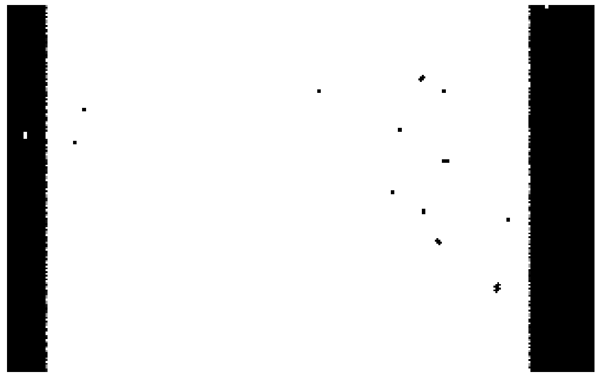

Figura 3.12: CelLab: evoluzione della regola di maggioranza modificata dopo circa 25000 generazioni

3.2.2 Auto-riproduzione

Quando Langton (Waldrop, 1995) iniziò ad occuparsi nella sua tesi di dottorato di automi cellulari, era interessato soprattutto alle regole che permettessero all'automa non solo di riporodurre se stesso, ma nel contempo anche di trasferire al nuovo nato le informazioni necessarie affinché questo potesse riprodursi a sua volta. La regola di Langton per un automa capace di auto-riprodursi prevede che ogni cella abbia 8 stati e che il vicinato sia definito come un intorno di Von Neumann in cui sono prese in considerazione le 4 celle immediatamente adiacenti oltre che la cella stessa.

L'automa di Langton si presenta con la forma di una Q, i cui contorni sono coperti da una sorta di membrana di celle entro la quale circolano portatori di informazione, in analogia con il DNA delle cellule (fig. 3.13). Dopo 132 generazioni, sviluppandosi lungo la "coda" della configurazione di partenza, l'automa ha riprodotto esattamente se stesso (fig. 3.14): il nuovo anello contiene le informazioni necessarie per l'auto-riproduzione. I "nuovi nati" continueranno a riprodursi: nella figura 3.15 dopo 651 generazioni si possono distinguere (al centro) gli anelli che si sono già riprodotti due volte e non avendo più spazio per espandersi raggiungono una configurazione stabile.

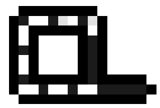

Figura 3.13: CelLab: stato iniziale dell'automa di Langton

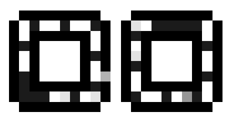

Figura 3.14: CelLab: evoluzione dell'automa di Langton dopo 132 generazioni

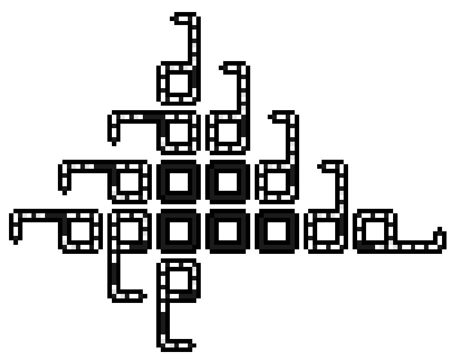

Figura 3.15: CelLab: evoluzione dell'automa di Langton dopo 651 generazioni

3.2.3 Alcune considerazioni

CelLab è un software che, rispetto a DDLab, presenta alcuni vantaggi in termini di facilità d'uso e di integrazione con il sistema operativo: questa permette, ad esempio, di riprodurre ed utilizzare gli *output* a video con maggiore facilità. Inoltre CelLab si presenta all'utente con un'interfaccia composta da *menù* e finestre, con la quale un utilizzatore abituato a programmi per sistemi Windows o Mac OS si trova in minore difficoltà, rispetto all'interfaccia di DDLab che ricorda i "vecchi" programmi per MS-DOS che potevano sfruttare poche capacità grafiche del sistema operativo.

CelLab presenta comuque altre interessanti capacità, in questo caso un po' "nascoste": è possibile infatti definire le proprie regole scrivendole indifferentemente in linguaggi come BASIC, Pascal, C, Java, oltre che in un codice proprietario. Il programma tradurrà quindi la regola descritta dall'utente in un codice utilizzabile internamente.

3.3 StarLogo

Nelle sezioni precedenti sono stati analizzati applicativi sviluppati con preciso riferimento agli automi cellulari. Nel caso di StarLogo siamo invece di fronte ad un vero e proprio programma di simulazione, *"a programmable modeling environment designed to help you model and explore the workings of decentralized systems, such as bird flocks, traffic jams, and market economies"*[5].

La finestra principale del programma presenta il "mondo" di Starlogo, in cui vengono visualizzati graficamente i risultati delle simulazioni: si tratta di una scacchiera composta da automi cellulari su cui operano le "tartarughe", gli agenti della simulazione in StarLogo, dotati di regole proprie. E' possibile disegnare bottoni e strumenti per controllare interattivamente il funziona-

[5] http://www.media.mit.edu/starlogo

mento della simulazione, permettendone l'uso da parte di altri utenti, senza che questi debbano necessariamente conoscere il codice[6].

Il linguaggio di programmazione di StarLogo è completamente descritto, comando per comando, dalla documentazione fornita assieme al programma; inoltre sono disponibili numerosi esempi sul sito http://www.media.mit.edu/starlogo.

3.3.1 In viaggio con una formica

Un tipo di automa cellulare molto particolare è la formica di Langton, così chiamata dal nome dello studioso che per primo l'ha "scoperta" e presentata: si tratta di un esempio di come poche regole molto semplici possano generare risultati complessi e inaspettati.

La formica si muove su un piano suddiviso in celle caratterizzate da due soli stati: bianco (0) o nero (1). Il moto della formica è definito da queste leggi:

- se la formica si trova su una cella nera, la colora di bianco, ruota di 90 gradi a destra e si sposta in avanti di una cella;
- se si trova su una cella bianca, la colora di nero, ruota di 90 gradi a sinistra e si sposta in avanti di una cella.

Nell'esempio (par. 3.3.2) la formica "nasce" al centro della scacchiera e compie il suo primo passo in avanti verso la destra dello schermo: qui trova una cella nera, che colora di bianco. L'animaletto gira quindi a destra di 90 gradi e procede, trovando un'altra casella nera che colorerà di bianco:

[6] la didattica è tra gli scopi dichiarati dal gruppo di sviluppatori di StarLogo

al quinto passo, dopo aver disegnato un quadrato bianco di 2 celle di lato, troverà per la prima volta una cella bianca che colorerà di nero, procedendo dopo una rotazione di 90 gradi, questa volta verso sinistra. Nella figura 3.16 è riportata la "traccia" lasciata dai primi venti passi del viaggio della formica.

Se si applicano queste semplici regole su una griglia di celle tutte del medesimo stato, per i primi 10.000 passi circa la formica avrà un comportamento (apparentemente) caotico: formerà sul piano una nuvola di punti bianchi e neri senza accennare a dimostrare alcuna regolarità (fig. 3.17). Improvvisamente la nostra formica inizierà a seguire una sequenza regolare di 104 passi, che è stata definita "costruzione dell'autostrada" (Propp, 1993): infatti con il suo cammino disegnerà sul piano una sorta di striscia diagonale, la cui direzione dipende dalla direzione del primo passo (fig. 3.18).

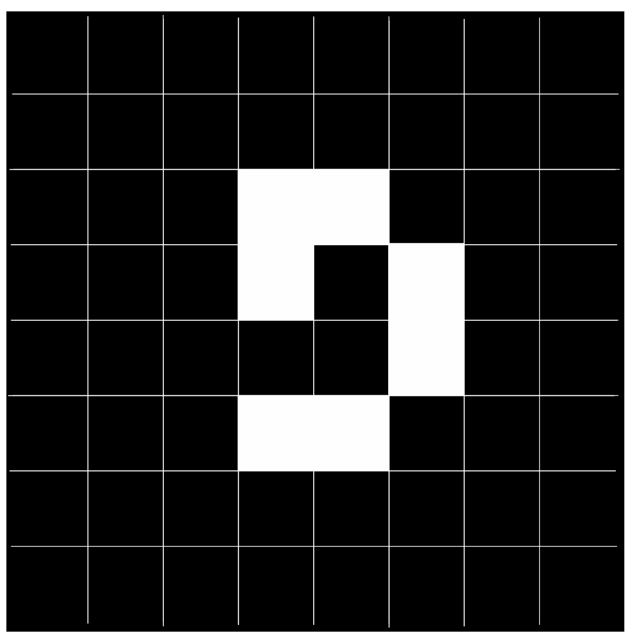

Figura 3.16: Evoluzione della formica di Langton dopo 20 passi

L'esperimento si fa ancora più interessante se facciamo agire la formica

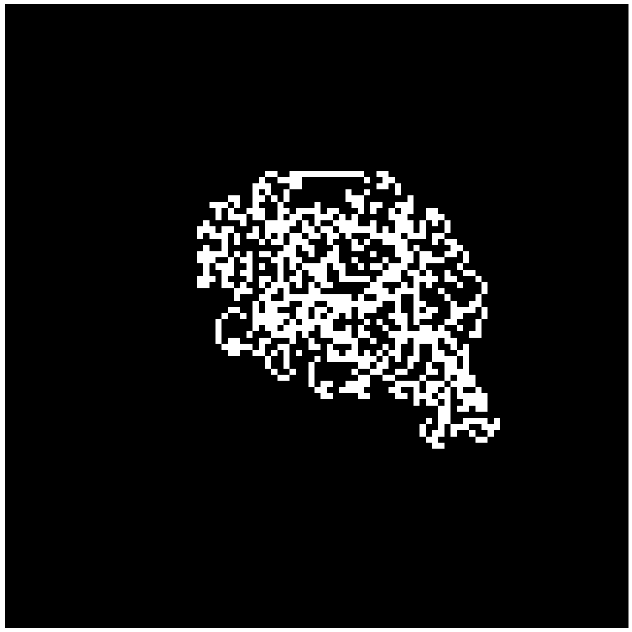

Figura 3.17: StarLogo: evoluzione della formica di Langton dopo 10036 passi

su una griglia con alcune celle bianche sparse a caso invece che su una superficie tutta nera: dopo un numero variabile di passi caotici, ancora una volta l'animaletto seguirà in diagonale una delle quattro direzioni possibili costruendo un'autostrada. Tutto ciò si verifica puntualmente con qualsiasi configurazione, purché finita, di quadratini bianchi; nessuno è stato in grado di dare una spiegazione soddisfacente del comportamento della formica di Langton, né nessuno, peraltro, è incappato in una smentita (Stewart, 1994).

La regola della formica è molto diversa dalle regole di automi cellulari fin'ora presi in considerazione: non si tratta di una regola **delle** celle, ma piuttosto di una regola applicata ad un oggetto che si muove **sulle** celle; la formica muove i suoi passi sulla scacchiera, ma i passi stessi dipendono strettamente (solamente) dalle caratteristiche dello spazio su cui vengono compiuti, dipendono insomma dalle condizioni della scacchiera. In ogni in-

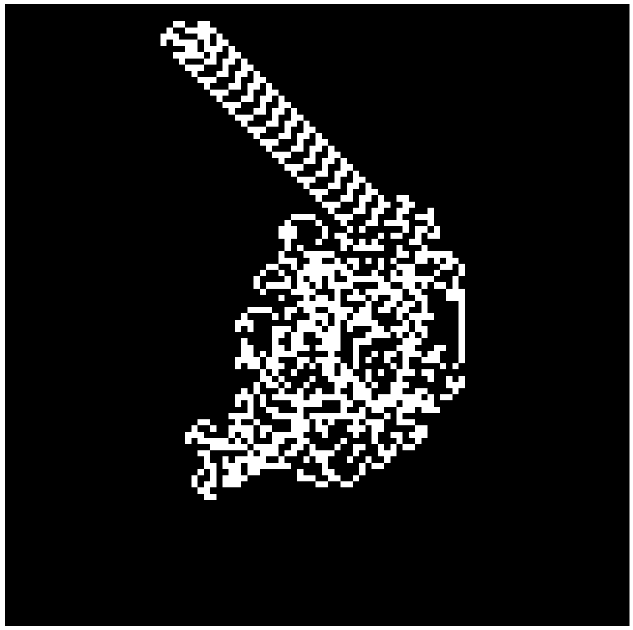

Figura 3.18: StarLogo: evoluzione della formica di Langton dopo 11513 passi

tervallo di tempo, la formica di Langton decide in che direzione muoversi e lo stato in cui lascia la cella in cui si trova, in base alle condizioni della cella medesima e delle celle del suo vicinato, quest'ultimo inteso come intorno di von Neumann (par. 1.2). Si prendono in considerazione:

1. la cella in cui si trovava la formica nell'intervallo di tempo precedente $(t-1)$;

2. la cella in cui si trova la formica nell'intervallo di tempo corrente (t);

3. la cella in cui si troverà la formica nell'intervallo di tempo successivo $(t+1)$.

Tenuto conto del fatto che la formica può muoversi in direzione orizzontale o verticale, ma mai in diagonale, le tre celle oggetto di attenzione indicate sopra sono sempre in un vicinato di 5 celle di von Neumann.

Se la formica di Langton è un automa cellulare "atipico", tuttavia rappresenta un esempio "tipico" di fenomeno complesso: come si è visto (par. 2.3) è definibile come complesso un sistema che, tra l'altro, presenta non linearità e proprietà emergenti.

Un sistema è non lineare quando, note le proprietà delle parti che lo compongono, non è possibile conoscere le proprietà del sistema nel suo insieme: nel caso della formica, le regole che ne descrivono il movimento sono note[7], ma non siamo in grado di spiegare per quale motivo la formica costruisce l'autostrada, né tantomeno saremmo stati in grado di prevedere tale comportamento.

La costruzione dell'autostrada è allo stesso tempo una proprietà emergente del nostro sistema: si manifesta in modo evidente dal comportamento del sistema, ma non è stata definita a priori tra le regole della formica.

Si impone anche in questo caso l'analisi "dal basso", che prende il via dalle parti costitutive del sistema per studiare il comportamento del "tutto": per scoprire che percorso farà la formica l'unica strada finora possibile è percorrere assieme a lei qualche migliaio di passi, magari iniziando da celle diverse, cambiando direzione, "sporcando" la scacchiera di celle bianche o nere con diverse probabilità. Se si volesse provare con un foglio di carta ed una matita sarebbe un'impresa lunghissima ed insidiosa, anche perché si potrebbe incappare in molti errori: il computer ed i programmi di simulazione risolvono questo problema, mettendo a nostra disposizione un "laboratorio virtuale" in cui costruire e far muovere il nostro insetto. A questo scopo è dedicata la sezione che segue.

[7]le abbiamo definite proprio noi!

3.3.2 Come la tartaruga si trasformò in formica

In questa sezione si spiega come sia possibile creare la propria formica di Langton utilizzando StarLogo.

Il programma viene eseguito in una finestra, che potremmo chiamare "principale", dove viene visualizzato l'output grafico e dove si possono disegnare e definire i bottoni e gli altri strumenti utili per controllare la simulazione. Vi è inoltre una seconda finestra dove si scrive il codice, che in questo caso descrive il comportamento della formica: i comandi sono separati in comandi propri delle tartarughe (*turtles*) e dell'ambiente (*observer*).

Per quanto riguarda la finestra principale è opportuno notare che:

- la scacchiera su cui si muove la formica è già definita da StarLogo;
- è sempre necessario creare un bottone *setup* ed un bottone *start*: il primo costrurà l'ambiente della simulazione ed il secondo la metterà in funzione;
- si possono inserire strumenti per permettere all'utente di definire il valore di alcune variabili senza modificare il codice: in questo esempio si possono modificare la posizione iniziale della formica, il numero di formiche presenti sulla scacchiera e di celle bianche disposte casualmente;
- si possono definire *monitor* in cui siano visualizzati i valori di determinate variabili: in questo esempio è stato inserito un *monitor* che mostra il numero di passi della formica.

Il codice della simulazione, per quanto riguarda la sezione *observer* è:

```
globals [contatore]


to setup
ca
crt number
ask-turtles [setup]
end
```

- *globals*: tra parentesi quadre sono indicate le variabili dell'ambiente;
- *to setup*: definisce il nome della procedura, che comprende tutti i comandi che seguono, fino a *end*;
- *ca*: pulisce la scacchiera e imposta a zero tutte le variabili;
- *crt*: crea *number* tartarughe, dove *number* è una variabile selezionata dall'utente sulla finestra principale;
- *ask-turtles*: "chiede" a tutte le tartarughe di eseguire tutti i comandi tra parentesi quadre. In questo caso rimanda, di fatto, alla procedura *setup* nella sezione *turtle*.

Il codice, per quanto riguarda la sezione *turtle*, è il seguente:

```
to setup
repeat RandomWhiteCells
[stamp-at random screen-width random screen-height white]
seth 90
setc white
setxy x1 y1
```

```
set contatore 0
end


to go
wait 0.01
set contatore contatore + 1
fd 1
ifelse pc = black
 [stamp color
  rt 90]
 [stamp black
  lt 90]
end
```

Per la procedura *setup*:

– *repeat*: ripete *RandomWhiteCells* volte i comandi tra parentesi quadre. La variabile *RandomWhiteCells* è definita dall'utente sulla finestra principale;

– *stamp-at random screen-width random screen-height white*: colora di bianco la cella con coordinate *random screen-width*, in ascissa, e *random screen-height* in ordinata. L'istruzione *random screen-width* restituisce un numero intero scelto casualmente tra 0 ed il valore corrispondente alla larghezza della scacchiera: le dimensioni del "mondo" di StarLogo possono essere modificate dall'utente selezionando la schermata e trascinandone i bordi con il mouse;

- *seth 90*: definisce la direzione del primo passo delle tartarughe/formiche: 90 corrisponde alla parte destra dello schermo;

- *setc white*: assegna alle tartarughe il colore bianco;

- *setxy x1 y1*: la formica si posiziona sulla scacchiera con coordinate *x1* e *y1*, definite dall'utente;

- *set contatore 0*: assegna il valore 0 alla variabile *contatore*, che servirà a contare i passi della formica e il cui valore sarà visualizzato sulla finestra principale.

Per la procedura *go*:

- *wait 0.001*: prima di eseguire i comandi che seguono, la tartaruga attende 0.001 secondi; questo comando è necessario per rallentare la velocità del movimento della tartaruga-formica sulla scacchiera in modo che il suo movimento sia ben osservabile;

- *set contatore contatore + 1*: incrementa la variabile *contatore* di una unità;

- *fd 1*: la tartaruga fa un passo in avanti nella direzione definita;

- *ifelse pc = black*: se la casella in cui si trova la tartaruga è nera vengono eseguiti i comandi tra le prime parentesi quadre, altrimenti vengono eseguiti i comandi tra le seconde parentesi quadre;

- *stamp color*: il colore della cella su cui si trova la tartaruga viene impostato al colore definito (bianco);

- *rt 90*: la tartaruga cambia direzione verso destra di 90 gradi;

– *stamp black*: il colore della cella su cui si trova la tartaruga diventa nero;

– *lt 90*: la tartaruga cambia direzione verso sinistra di 90 gradi.

I risultati che si ottengono in StarLogo sono quelli attesi: le figure 3.17 e 3.18 riportano l'*output* del programma. Si possono modificare numerosi parametri, direttamente dalla finestra principale o nel codice: ad esempio, modificando il numero che segue l'istruzione *seth* si può scegliere in che direzione la formica deve muovere il suo primo passo. Il valore impostato a 90 farà costruire alla formica l'autostrada come in figura 3.18; con *seth 0* invece la formica sceglierà di andare in basso a sinistra e così via per i valori 180 e 270.

Con la variabile *RandomWhiteCells* si può scegliere di distribuire a caso sulla scacchiera un numero di celle bianche predefinite: con un numero non troppo grande[8] si può notare che la formica, dopo un numero in questo caso variabile di passi caotici, costruisce sempre l'autostrada in una delle quattro direzioni.

[8]in relazione alle dimensioni della scacchiera

Capitolo 4

Piccoli mondi

In questo capitolo viene introdotto teoricamente ed empiricamente il fenomeno dei piccoli mondi e viene proposta una applicazione in termini di diffusione dell'informazione. Gran parte dell'introduzione teorica prende spunto dal lavoro di Watts (1998).

4.1 L'oracolo di Bacon

Kevin Bacon è un attore diventato famoso non soltanto per la sua attività di recitazione, ma piuttosto per il fatto di essere stato parte del *cast* di moltissimi film, mai nel ruolo di protagonista. La sua consacrazione è arrivata non tanto dal cinema, ma piuttosto dal lavoro di Brett Tjaden dell'Università della Virginia che ha proposto il *Kevin Bacon Game* ipotizzando che l'attore fosse in qualche modo al centro del mondo del cinema. Il gioco è molto semplice. Si deve anzitutto scegliere un qualsiasi attore: se ha lavorato in un film con Kevin Bacon ne è separato da solo un passaggio e diremo che ha un *Bacon Number* di uno. Se l'attore o l'attrice che abbiamo scelto non è stato mai direttamente con Bacon, ma ha lavorato con qualcuno che a sua volta ha partecipato ad un film con Kevin Bacon, diremo che ha un *Bacon Number* di due. Ad esempio Marcello Mastroianni ha un *Bacon Number* di 2, perché[1]:

```
Marcello Mastroianni was in Luchino Visconti (1999)
with Vittorio Gassman
Vittorio Gassman was in Sleepers (1996) with Kevin Bacon
```

Brett Tjaden ha dimostrato che nessun attore americano ha un *Bacon Number* maggiore di 4 ed in seguito, utilizzando gli archivi dell'Internet Movie Database, ha provato che nessun attore di qualsiasi nazionalità ha un *Bacon Number* maggiore di 10. Sul sito dell'Oracolo di Bacon (http://oracleofbacon.org/) sono riepilogate le frequenze dei *Bacon Number* per tutti gli attori del *database*:

Bacon Number	# of People	Bacon Number	# of People
0	1	6	729
1	1614	7	134
2	122988	8	24
3	316970	9	1
4	73111	10	1
5	5553		

Si può calcolare un *Bacon Number* medio, che è pari a 2.925. Analogamente si può calcolare un *number* per qualsiasi attore e si può scoprire che alcuni sono al centro del mondo del cinema più di quanto lo sia Kevin Bacon: ad esempio il migliore è Christopher Lee con un *Lee Number* medio di

[1] dal sito http://oracleofbacon.org

2.622940.[2] La "centralità" di un attore è quindi la sua particolare posizione nell'ambito delle relazioni di compartecipazione ad un film che gli permette di essere mediamente vicino, in termini di passaggi diretti o indiretti, a qualsiasi altro attore preso in considerazione.

Il nostro interesse si concentra proprio su questi passaggi, sul numero di contatti che collegano due soggetti che eventualmente non sono collegati direttamente. Queste forme di "distanza" sono state definite "Gradi di separazione" e si possono calcolare sia per gli attori del cinema sia, in estensione, per qualsiasi popolazione.

Una prima ricerca venne condotta a partire da Paul Erdos, un matematico che è stato autore o co-autore di circa 14 mila pubblicazioni: grazie a questa sua prolifica attività si può, attraverso i passaggi tra co-autori, calcolare il numero di Erdos di un autore. Chi ha pubblicato direttamente con Erdos avrà un numero di Erdos di uno, chi non ha pubblicato direttamente con Paul Erdos potrebbe aver pubblicato assieme a qualcuno con numero di Erdos uno ed avere quindi numero di Erdos 2... e così via.

Tornando ai gradi di separazione si tratta di dare spiegazione al detto comune che ciascuno è distante da chiunque altro non più di sei gradi di separazione[3]: prese due qualsiasi persone si potrebbe quindi ricostruire una catena di conoscenze che li collega in non più di sei passaggi.

[2] Tra i migliori abbiamo anche Sean Connery (12° posto, con 2.681795); il primo attore italiano è Franco Nero (97°, con 2.761643), segue subito Vittorio Gassman (105°, con 2.769870).

[3] Su questo l'articolo di L. Cohen e A. Varzi "Dalla signora in rosso al Papa, in tre passaggi" su "La Stampa" del 9/5/2002

Negli anni sessanta Stanley Milgram condusse uno studio empirico negli Stati Uniti, inviando alcune lettere a due persone residenti a Boston fornendo solo alcune informazioni sui destinatari (età, professione) e permettendo ai mittenti di inviare le lettere a soggetti conosciuti per nome e che potessero essere in qualche modo "vicini" al destinatario finale. Milgram tracciò il percorso delle lettere ed arrivò ad una lunghezza media del percorso di sei passaggi, avvallando la teoria dei sei gradi di separazione.

Questi esperimenti sono parte degli studi sul fenomeno dei piccoli mondi ("Small Worlds"): anche questa definizione deriva da un modo di dire, che spesso si usa quando si incontra uno sconosciuto e si scopre di avere qualche conoscenza in comune.

4.2 Reti sociali

Il fenomeno dei piccoli mondi è una delle caratteristiche dei sistemi sociali che concorre a distinguerli dai sistemi fisici. Essi si distinguono anzitutto per il fatto che le reti sociali violano la proprietà dei sistemi fisici per cui presi tre punti qualsiasi, questi possano essere uniti formando i tre lati di un triangolo, con la condizione che la somma delle lunghezze di due lati sia maggiore della lunghezza del terzo lato. Nelle relazioni tra le persone, invece, un soggetto può essere ugualmente molto "vicino" ad altri due soggetti che invece non hanno nulla a che fare tra loro, oppure può far parte di distinti gruppi di conoscenze tra i quali non vi siano relazioni dirette.

La teoria delle reti sociali si è concentrata nel tempo sull'analisi delle interconnessioni tra le strutture locali delle reti e sui percorsi delle relazioni tra i diversi livelli: locale (ad esempio i *cluster*) e non locale (ad esempio i legami deboli). Nessuna parte della teoria è stata verificata su reti di grandi dimensioni e con connessioni diffuse, in quanto le difficoltà di analisi aumentano con l'aumentare della popolazione; inoltre le reti sociali mostrano proprietà soprattutto non locali ed è quindi impossibile analizzare le proprietà globali con la sola analisi locale. Inoltre non sono state trattate le proprietà di famiglie di reti le cui proprietà varino nel continuo tra due estremi per verificare se vi siano transizioni; le cose sono infine complicate dal fatto che non è semplice determinare in quale tipo di spazio esistano le reti e quale sia la metrica corretta per studiarle (Watts, 1998).

Non si deve trascurare che l'analisi empirica è resa difficoltosa dal fatto che le persone difficilmente sono in grado di tenere conto dei propri contatti, se non con metodi che richiedono tempo e lavoro, contatti che tra l'altro tendono a modificarsi numericamente e qualitativamente nel tempo. Ogni ricerca è infine particolarmente condizionata dalla definizione che viene data di amico o conoscente, che può variare dalla semplice conoscenza per nome ai rapporti che implicano la reciproca fiducia.

4.3 Teoria dei grafi

Per rappresentare le reti sociali e in particolare i Piccoli Mondi, Watts introduce nella sua esposizione alcuni concetti di teoria dei grafi: di seguito sono riportate solo alcune definizioni necessarie per questo lavoro.

Anzitutto si può definire grafo un insieme qualsiasi di punti (vertici) collegati in qualche modo tra loro attraverso linee (ponti). Il numero di vertici definisce l'ordine del grafo, mentre il numero di collegamenti ne definisce la dimensione.

Le proprietà dei grafi più interessanti per gli scopi di questo lavoro sono:

- l'accessibilità L (per Watts *Characteristic path lenght*), che è la mediana della media dei percorsi più brevi che collegano ogni vertice a tutti gli altri: presi due soggetti a caso della rete sociale, ci potremmo aspettare che il percorso più breve che li separa abbia una lunghezza pari a L;

- la coesione γ, in termini di probabilità che due vertici legati ad un terzo siano legati a loro volta[4]. Watts definisce questa proprietà *clustering coefficient*, calcolabile come rapporto tra il numero di ponti nel vicinato di un vertice ed il numero totale di ponti possibili in tale vicinato. Si tratta di una misura in grado di prevedere la tendenza in un grafo alla formazione di *cluster*, di sotto-gruppi di vertici.

Utilizzando i grafi si possono rappresentare le due condizioni opposte, locale e globale, di cui si è accennato al par. 4.2.

Il primo caso è quello di un grafo in cui i vertici siano collegati in modo determinato dalle sole condizioni di vicinato, con ogni vertice legato ai suoi quattro vertici adiacenti in una configurazione analoga a quella vista per gli intorni di Moore degli automi cellulari (par. 1.2): in figura 4.1 è presentata una possibile rappresentazione. Una efficace alternativa è stata proposta da Watts, che ha ordinato i vertici in una struttura circolare in modo da rappresentare i vertici e i ponti senza soluzione di continuità. L'autore propone espressioni analitiche per l'accessibilità

$$L = \frac{n(n+k-2)}{2k(n-1)}$$

[4] "Gli amici dei miei amici sono miei amici" (Zimmermann, 2001)

e per la coesione

$$\gamma = \frac{3(k-2)}{4(k-1)}$$

All'aumentare del numero di vertici n aumenta il livello di accessibilità L, che è invece inversamente proporzionale all'ampiezza k del vicinato.

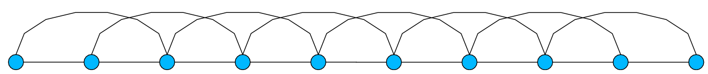

Figura 4.1: Small Worlds: grafo a una dimensione

E' possibile rappresentare lo stesso tipo di struttura, con legami "locali" e determinati, in una grigia a due dimensioni come in figura 4.2: anche in questo caso è opportuno considerare la figura nel continuo, in modo tale che ad esempio l'ultima colonna di vertici a destra sia collegata con la prima a sinistra.

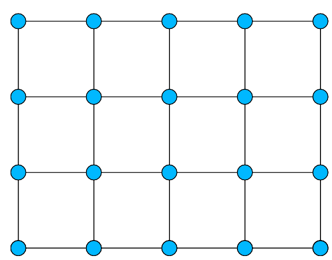

Figura 4.2: Small Worlds: grafo a due dimensioni

Se invece i legami tra i vertici di un grafo sono determinati casualmente si ottiene un grafo casuale (globale), che può essere ad esempio rappresentato a una dimensione come in figura 4.3.

Se immaginiamo i vertici come agenti e i grafi formati da vertici e legami come reti sociali, si giustifica l'uso dei termini locale e globale. Su una struttura come quella del grafo regolare, ogni vertice (agente) è in grado di

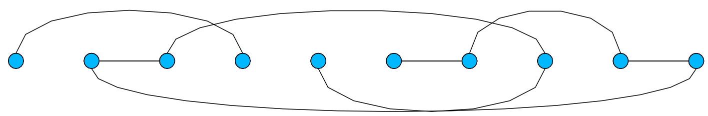

Figura 4.3: Small Worlds: grafo con legami determinati casualmente

interagire solo con i k agenti del suo immediato vicinato: lo spazio determina le possibilità di interazione dell'agente in questione, che può agire solamente in un contesto locale. Gli agenti che interagiscono dando forma ad un grafo casuale instaurano relazioni che prescindono dalla dimensione spaziale del loro vicinato: proseguendo nell'analogia, si tratta di attori puramente globali.

4.4 Tra ordine e caos

Aver definito i due estremi delle possibili configurazioni dei grafi, da un lato strutture uni dimensionali perfettamente correlate e dall'altro strutture pluri dimensionali perfettamente incorrelate, permette di esplorare con Watts (1998) le configurazioni intermedie alla ricerca dei "Piccoli mondi": grafi caratterizzati da alti livelli sia di accessibilità sia di coesione.

Valgono anzitutto le seguenti assunzioni:

– la rete può essere rappresentata attraverso le sole connessioni tra gli elementi, senza necessità di definire uno spazio o una metrica;

– le relazioni sono simmetriche, quindi se un primo soggetto A è legato ad un soggetto B anche quest'ultimo è legato ad A;

– l'evoluzione nel tempo della configurazione della rete e le nuove connessioni che vengono create dipendono dalla situazione pre-esistente.

Quest'ultima condizione è importante perché buona parte del'indagine si concentra proprio su come le relazioni esistenti determinino le nuove relazioni nel mondo reale delle reti sociali che si suppone si trovi in qualche modo a metà strada tra i due estremi descritti in precedenza.

Per esplorare le possibili configurazioni tra questi estremi si prende in considerazione, prescindendo da considerazioni sul significato sociologico della rete, una struttura circolare che col variare di un parametro β si trasforma gradualmente da un grafo determinato ad un grafo completamente casuale.

Il modello di Watts[5] non è altro che una struttura ad anello ad una dimensione in cui ogni vertice è legato inizialmente ai suoi k vicini, per poi ridefinire i collegamenti con il seguente algoritmo:

1. si considera un vertice i alla volta, con il ponte che lo collega al vertice adiacente in senso orario: si definisce tale collegamento con l'espressione $(i, i+1)$;

2. si genera casualmente un parametro p, tale che $0 \leq p \leq 1$: se $p \geq \beta$ il legame resta invariato, altrimenti se $p < \beta$ il ponte $(i, i+1)$ viene cancellato e ricostruito collegando il vertice i ad un altro vertice scelto casualmente tra tutti gli altri vertici;

3. quando sono stati considerati tutti i vertici si ripete la procedura per i legami che collegano ogni vertice al suo vicino prossimo, quindi per

[5] β-model, Watts (1998)

ogni $(i, i+2)$, e così via finchè tutti i ponti esistenti non siano stati considerati.

Si parte da un grafo perfettamente ordinato dalle proprietà note con $\beta = 0$, per finire ad un grafo casuale con $\beta = 1$ (fig. 4.4).

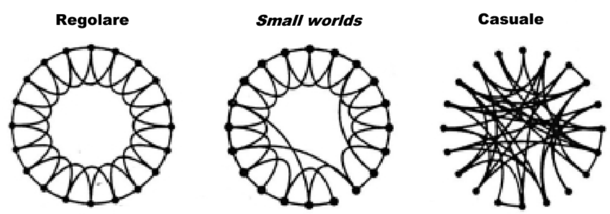

Figura 4.4: Grafo regolare, Small World e casuale (da Watts (1998))

Se si prendono in considerazione le proprietà dei grafi di cui si è accennato al par. 4.3 si può verificare che la configurazione locale ($\beta = 0$) è caratterizzata da scarsa accessibilità (*characteristic path lenght*) ed elevata coesione (*clustering coefficient*), mentre la configurazione globale presenta scarsa coesione ed elevata accessibilità.

Poiché l'accessibilità rappresenta il grado di unità della rete a livello globale e la coesione misura la tendenza alla formazione di *cluster* e quindi il grado di unità della rete a livello locale, siamo alla ricerca di un eventuale livello intermedio in cui si ottengano contemporaneamente buona coesione e buona accessibilità, per trarre i benefici dati dalla combinazione degli effetti di prossimità e a-spazialità presenti in una rete che abbia caratteristiche contemporaneamente locali e globali.

Watts (1998) presenta i risultati ottenuti dall'applicazione dell'algoritmo sopra descritto in relazione alla *characteristic path lenght* e al *clustering coefficient*: per bassi livelli di β ($\beta = 0.01$) la prima passa immediatamente a valori molto bassi, mentre il *coefficient* diminuisce solo a livelli più alti di β ($\beta = 0.1$). Esiste quindi un intervallo ($0.01 \leq \beta \leq 0.1$) per cui il grafo presenta contemporaneamente accessibilità e coesione: la famiglia di grafi caratterizzati da un coefficiente β compreso in tale intervallo sono i Piccoli Mondi che stavamo cercando.

Il motivo del miglioramento dell'accessibilità della rete al crescere del parametro che caratterizza la casualità va ricercato nella maniera in cui si modificano i legami: infatti, se il numero di connessioni k resta invariato, al crescere di β la dispersione dei legami tende invece ad aumentare. L'algoritmo di definizione dei legami fa sì che questi, per bassi livelli di β, continuino a collegare due vertici che già condividono vicinato e collegamento con un terzo, formando nella maggioranza dei casi un triangolo e riducendo solo di poco il cammino minimo tra due vertici (in figura 4.5 da u, w, v a u, v). All'aumentare del parametro β i nuovi legami tenderanno invece a collegare vertici "distanti" che non condividono alcun altro vertice: in questo modo non solo collegheranno tra loro i due vertici in questione, ma in generale collegheranno gruppi di vertici, con il risultato di ridurre notevolmente il cammino medio di tutto il sistema[6] (in figura u e v collegano due gruppi di vertici w).

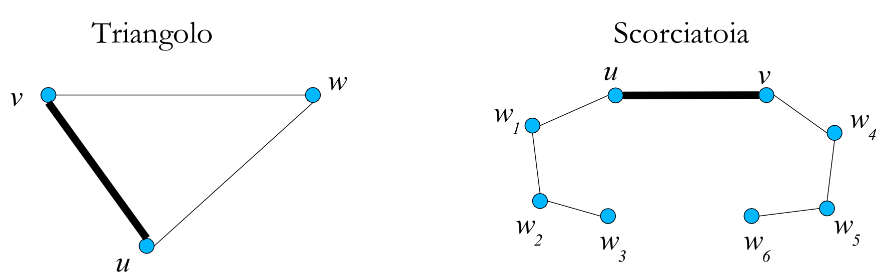

Figura 4.5: Triangoli e scorciatoie

[6] Questo tipo di legame è definito da Watts "scorciatoia"

Proprio per questa loro proprietà di collegare gruppi di vertici del grafico in precedenza completamente separati sono sufficienti poche scorciatoie per ridurre notevolmente il cammino medio L del grafo migliorandone l'accessibilità: si spiega così il fatto che il cammino medio L diminuisca immediatamente per bassi livelli di β, mantenendosi contemporaneamente ancora elevata la coesione. Per lo stesso motivo all'aumentare del numero di scorciatoie l'effetto sull'accessibilità di una scorciatoia aggiuntiva tende a diminuire: questo determina il progressivo stabilizzarsi del parametro L.

4.5 Un esempio per un'economia fondata sulla conoscenza

Nella sua metafora economica, la rete è un tipo di organizzazione che si distingue dal mercato e dalla gerarchia perché:

- presenta relazioni stabili e di contenuti diversi, a differenza del mercato in cui le relazioni sono instabili ed esclusivamente di carattere mercantile;
- si contrappone alla rigidità della gerarchia per la sua apertura all'esterno e flessibilità.

Le reti socio-economiche devono condividere almeno quattro caratteristiche fondamentali: la reciprocità, l'interdipendenza, l'accoppiamento mobile, la gestione del potere[7].

[7] appunti dal corso di Geografia Economica tenuto nell'A.A. 2000/2001 dal Prof. Conti alla Facoltà di Economia dell'Università di Torino

La *reciprocità* si riferisce al fatto che all'interno della rete deve esserci equilibrio nello scambio di benefici tra gli attori: tale equilibrio può non realizzarsi in ogni singola transazione, ma deve riequilibrarsi nell'ambito dell'intera relazione.

L'*interdipendenza* è tipica della rete, in quanto gerarchia e mercato implicano dipendenza. Essa comporta l'esistenza di conoscenza interpersonale tra gli attori, su cui si fonda la comunicazione e la soluzione dei problemi.

L'*accoppiamento mobile* (o *loose coupling*) permette ai partecipanti della rete di mantenere un certo grado di autonomia nel prendere le decisioni senza perdere i benefici della reciprocità e dell'interdipendenza; rappresenta il punto di equilibrio della rete tra gerarchia e mercato.

Il *potere* è infine essenziale allo sfruttamento delle interdipendenze all'interno della rete. Le caratteristiche sopra descritte non implicano simmetria nelle relazioni, ma indicano piuttosto forme di coesistenza.

In questo contesto assume un ruolo fondamentale la conoscenza, non nella concezione neoclassica per cui è considerata uno stock, ma considerando invece il suo processo di formazione, l'apprendimento. La produzione di sapere è identificata come un processo dialettico tra conoscenza tacita e conoscenza esplicita, così come definite da Polanyi (1967).

Polanyi sottolinea la natura duale della conoscenza, scindendola in due sfere distinte:

– conoscenza esplicita, trasferibile e accessibile a chiunque ne conosca il codice: è vendibile, brevettabile, mobile;

– conoscenza tacita (o contestuale), è legata alle tradizioni, la trasmissione avviene attraverso il rapporto personale; è un tipo di conoscenza

> locale, trasferibile con difficoltà; ha al centro un individuo che la detiene, un'impresa, un intorno locale ristretto, non è mobile, si trasforma ed ha confini meno definiti. Radicata nell'azione degli attori, essa mantiene il suo significato e la sua validità soltanto nel contesto locale o aziendale che l'ha originata.

Gli studi cognitivi di Polanyi sono stati adattati alla gestione aziendale da Nonaka (1995), che ha individuato i processi che mettono in relazione la conoscenza tacita e la conoscenza codificata.

Nelle reti locali la conoscenza tacita diventa collettiva attraverso un processo di socializzazione: si tratta di una forma di apprendimento collettivo che sfrutta le relazioni interpersonali come le relazioni fra maestro e apprendista, la tradizione familiare ecc. La codificazione, grazie alla quale la conoscenza contestuale diviene trasferibile all'esterno del sistema, avviene attraverso la commercializzazione dei beni prodotti localmente: non sarebbe possibile trasferire diversamente la conoscenza tacita, in quanto non è codificabile per mezzo di manuali e brevetti. La combinazione, l'incontro di conoscenza tacita e codificata, avviene attraverso le relazioni fra utilizzatore e produttore, che fanno sì che conoscenza esplicita e tacita si combinino rendendo possibile l'internalizzazione della conoscenza codificata da parte dei soggetti locali.

Cowan e Jonard (1999) si concentrano sulle forme di diffusione della conoscenza attraverso i rapporti faccia a faccia e le interazioni che si svolgono sulle strutture a rete come quelle fin qui descritte. Si suppone che i soggetti, inseriti nel contesto reticolare, detengano conoscenza di diverse tipologie ed in quantità differenti. Nel modello proposto ad ogni periodo di tempo uno dei legami della rete viene scelto a caso e i due vertici da esso collegati in seguito all'incontro confrontano le loro dotazioni di conoscenza e procedono ad un vero e proprio scambio, nell'ipotesi che il soggetto i abbia dotazione superiore di un primo tipo di conoscenza ed il secondo soggetto j sia dotato di maggiore conoscenza di un altro tipo. Il parametro del modello è la probabilità p che un legame (i, j) sia cancellato e sia ricostruito a partire dallo stesso vertice i verso un qualsiasi altro vertice k scelto casualmente, passando da una configurazione completamente regolare ($p = 0$) ad una configurazione aleatoria ($p = 1$). Vengono inoltre calcolate le consuete misure di accessibilità (*path lenght*) e coesione (*cliquishness*) per i diversi valori di p: in figura 4.6 si può notare come per p compreso tra 0.005 e 0.1 le due misure divergano (la curva superiore misura la coesione, la curva inferiore misura il percorso medio) creando le caratteristiche dei piccoli mondi descritti da Watts (1998).

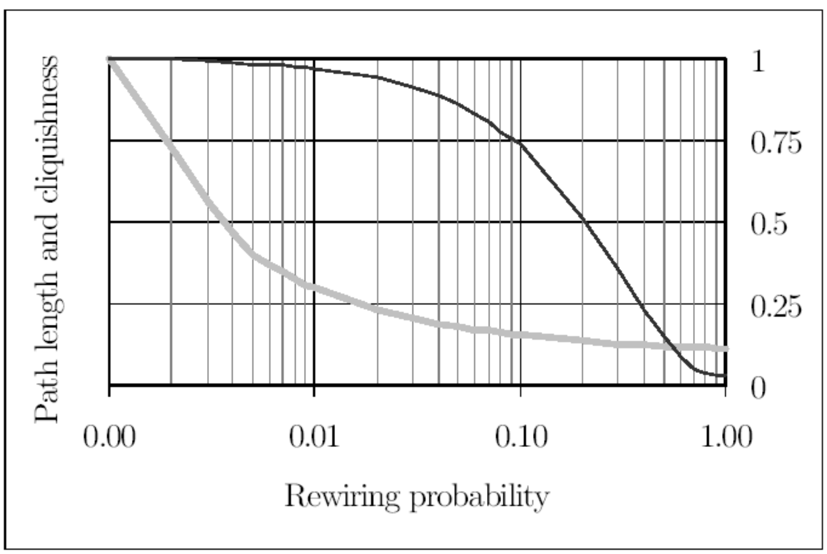

Figura 4.6: Cammino medio e coesione per i diversi valori di p. (Fonte: Cowan e Jonard (1999))

La conoscenza di ogni agente è misurata da Cowan e Jonard (1999) attraverso un vettore $V_i(t) = (V_{i,k}(t); k = 1, \ldots, K)$ che viene utilizzato per determinare gli scambi di conoscenza ed il livello medio detenuto da un agente:

$$\overline{\mu_i}(t) = \frac{\Sigma_k V_{i,k}(t)}{K}$$

La variabile oggetto di osservazione è infine il livello medio di conoscenza dell'economia, definita con:

$$\overline{\mu}(t) = \frac{1}{N}\Sigma\mu_i(t)$$

Il lavoro di Cowan e Jonard (1999) mostra (fig. 4.7) che il livello medio di conoscenza $\overline{\mu}$ è funzione non monotona di p e presenta un picco evidente nella zona evidenziata come caratteristica dei piccoli mondi ($0.005 \leq p \leq 0.1$) con un massimo in $p = 0.06$. Si può affermare con gli autori che il cammino medio e la coesione agiscono in sensi opposti: la coesione è causa di una veloce diffusione a livello locale, mentre il cammino medio misura la capacità dell'informazione di diffondersi in zone della rete distanti dal punto in cui si è originata.

4.6 Piccoli mondi in StarLogo

In questa sezione vengono presentati tre modelli in StarLogo costruiti per mettere in pratica quanto esposto finora e verificare alcune proprietà. Ci si concentra esclusivamente sulla diffusione (di un'informazione, di un'innovazione, ma anche di un'infezione o di una forma di energia) su strutture reticolari a due dimensioni che si suppongono omogenee.

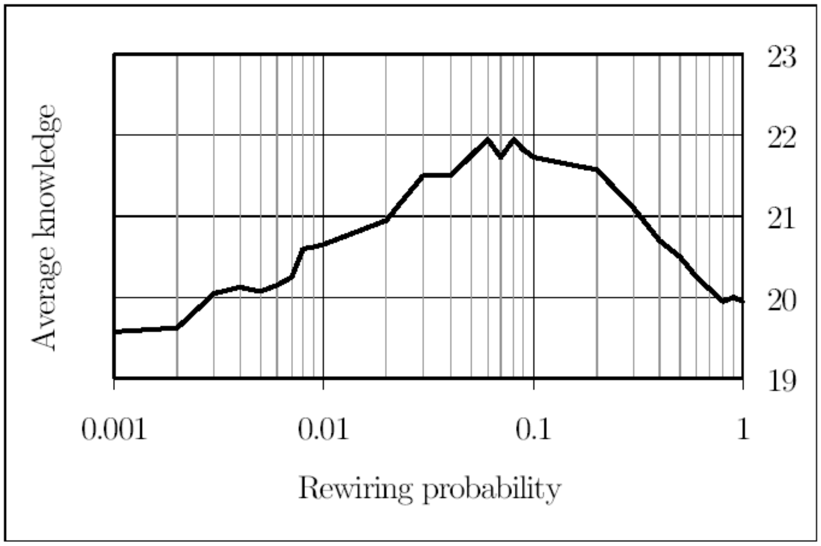

Figura 4.7: Il livello medio di conoscenza nell'economia come funzione del parametro p. (Fonte: Cowan e Jonard (1999))

Tutti i modelli hanno in comune alcune caratteristiche, che coincidono in larga parte con le peculiarità di StarLogo[8]:

- l'ambiente è una scacchiera di dimensione definibile, composta da caselle caratterizzabili per alcune variabili o per il colore (in tutti gli esempi la scacchiera è un quadrato con lato pari a 101 caselle);
- sulla scacchiera si muovono gli agenti, nel linguaggio del programma "tartarughe", che nei primi due modelli presentati sono gli artefici della diffusione dell'informazione;
- un parametro modificabile dall'utente (beta) corrisponde al parametro β di Watts (1998) e al parametro p di Cowan e Jonard (1999).

[8] per l'introduzione al programma si rimanda al par. 3.3

4.6.1 ***SmallWorldsPatches***

Nel primo modello (*SmallWorldsPatches*) la presenza o meno dell'informazione è una caratteristica delle caselle della scacchiera (*patches*): se essa è presente, la casella sarà di colore blu e avrà stato 1, altrimenti la casella sarà nera e avrà stato 0. Gli agenti-tartarughe si muovono con direzione e passo determinato casualmente e possono essere di due tipi:

– attori locali (nel programma "*turtles*" di colore bianco);

– attori globali o a-spaziali (nel programma "*frogs*" di colore verde[9]).

La porzione di attori globali è definita dall'utente attraverso il parametro *beta*: posto fisso il numero di agenti totali (1000) il numero di attori locali è determinato per differenza $(1000 - \beta)$. Per ogni unità di tempo ogni agente, tartaruga o rana, dopo essersi mosso interagisce con la scacchiera secondo il seguente algoritmo:

– se si tratta di una tartaruga e quindi di un attore locale, verificherà lo stato delle celle che compongono il suo vicinato di Von Neumann (in orizzontale e verticale, ma non in diagonale) in quell'istante: se una delle celle ha stato 1 (è di colore blu) modificherà lo stato della cella su cui si trova in 1 (la colorerà di blu);

– se si tratta di una rana e quindi di un attore globale, verificherà lo stato del vicinato di Von Neumann non della cella su cui si trova, ma di una cella qualsiasi della scacchiera determinata casualmente: se una delle celle del vicinato così individuato ha stato 1, la rana modificherà in 1 lo stato della cella su cui si trova.

[9] con molta fantasia

Una volta che l'informazione è stata "immessa" in una cella non può essere più rimossa[10]. La posizione degli agenti, locali o globali, e del punto di origine dell'informazione sono determinati casualmente all'inizio di ogni esecuzione del programma: questo rende i risultati della simulazione in qualche modo sensibili alle condizioni iniziali, sebbene sia emerso dalle ripetute applicazioni che con l'aumentare del numero di agenti tale correlazione tende a scomparire.

In analogia con gli studi sui piccoli mondi si può passare da una configurazione di soli attori locali ($\beta = 0$) ad una di soli attori globali ($\beta = 1$), attraverso tutte le possibili condizioni intermedie.

Nel primo caso (con $\beta = 0$) l'informazione prende origine da una casella e viene diffusa dagli agenti nel resto della scacchiera attraverso i processi di solo vicinato che abbiamo definito locali. Utilizzando un esempio concreto, in cui la casella blu si trova in coordinate $(-21, -1)$[11] definite casualmente, le caselle vengono via via "dipinte di blu" allontanandosi progressivamente dal centro, si potrebbe dire diffondendosi "a macchia d'olio" (fig. 4.8). Il programma si ferma quando il numero di caselle blu è superiore a 10000: in realtà una diffusione completa comporterebbe 10201 caselle blu, ma attendere che l'informazione abbia raggiunto tutte le caselle rende il risultato finale ancora più sensibile alle condizioni iniziali perché spesso sono necessari molti passi prima che un agente incontri una cella specifica.

[10] Probabilmente si tratta di una restrizione piuttosto irrealistica, in quanto si potrebbe anche ipotizzare una qualche forma di dissipazione: tuttavia l'intenzione esplicita è quella di concentrarsi esclusivamente sulla dinamica del processo di diffusione dell'informazione, senza preoccuparsi del suo mantenimento.

[11] Le coordinate sulla scacchiera di StarLogo sono definite considerando un piano cartesiano con origine nel centro della griglia.

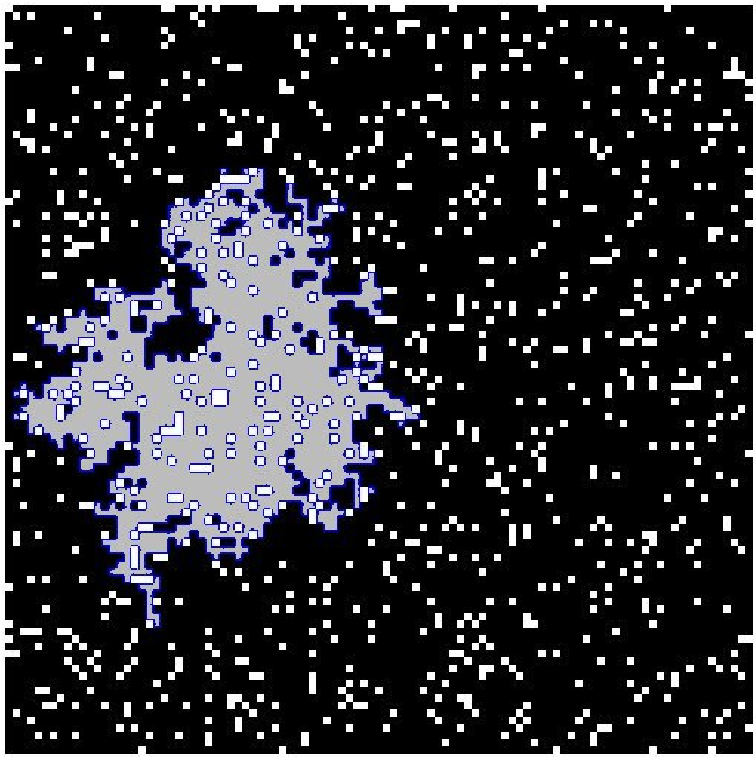

Figura 4.8: StarLogo: *SmallWorldsPatches* dopo 195 passi

Con $\beta = 0$ gli agenti diffondono l'informazione in 10000 celle in un numero di passi di poco maggiore o minore di 520: precisamente, su 50 prove, il risultato varia tra un minimo di 508 passi e un massimo di 555 passi. Utilizzando le funzioni *Plot* di StarLogo si può costruire un grafico per il numero di caselle in cui l'informazione è presente rispetto al tempo (fig. 4.9).

L'introduzione di 10 agenti di tipo globale ($\beta = 10$) mette in moto quei processi che, dopo pochi passi, trasmettono l'informazione in posti lontani da quelli in cui si è originata: migliora così la capacità del sistema di trasferire i segnali in quanto agiscono gli attori globali che riducono lo spazio da percorrere e gli attori locali che diffondono l'informazione localmente creando i *cluster*. Nell'esempio in figura 4.10 l'informazione ha origine nella parte

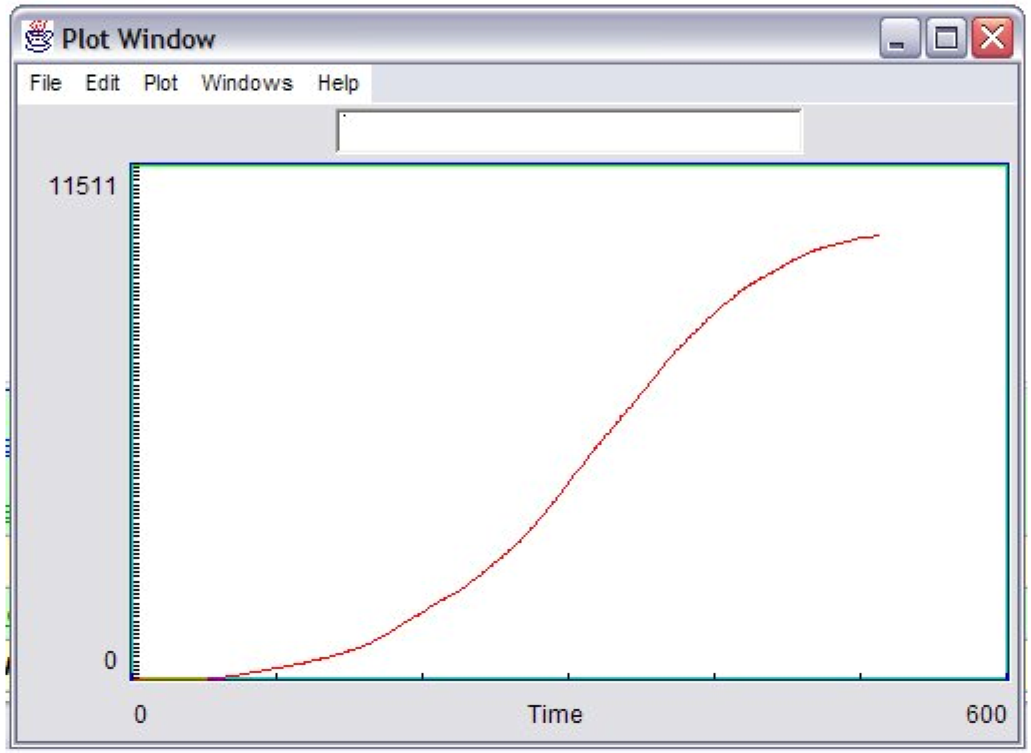

Figura 4.9: StarLogo: *SmallWorldsPatches*, numero di caselle blu rispetto al tempo

centrale della scacchiera: dopo circa 100 passi le caselle blu (grigie in figura) sono comparse in zone distanti dal centro e gli agenti hanno potuto procedere alla diffusione locale del segnale. Con $\beta = 10(1\%)$ gli agenti diffondono l'informazione in 10000 celle in un numero di passi compreso, su 50 prove, tra 327 e 358.

4.6.2 *SmallWorldsTurtles*

Questo secondo modello esclude dall'interazione la scacchiera, se non nella misura in cui è supporto per il movimento degli agenti. L'informazione si diffonde tra i soli agenti, che possono essere portatori o meno dell'informa-

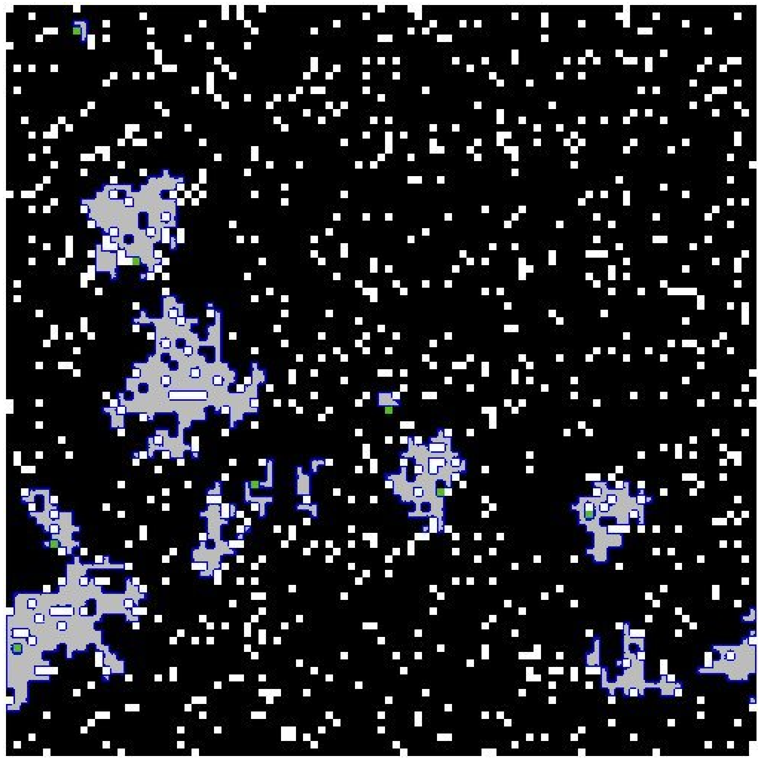

Figura 4.10: StarLogo: *SmallWorldsPatches*, $\beta = 10$, 109 passi

zione sia che si trattino di attori locali oppure di attori globali. Il numero totale di agenti è definibile dall'utente e per gli esempi che seguono è 5000: così definita, l'entità della popolazione sembra sufficiente per minimizzare l'effetto delle condizioni iniziali sull'evoluzione del sistema.

Per $\beta = 0$ l'informazione raggiunge tutti gli agenti in un numero di passi compreso tra 89 e 94 (50 prove); in figura 4.11 è riportato il grafico con il numero di agenti che sono stati raggiunti dall'informazione rispetto al tempo.

Per $\beta = 1$ l'informazione raggiunge tutti gli agenti in un numero di passi compreso tra 45 e 53: in figura 4.12 si nota la dinamica della diffusione dopo i primi passi e in figura 4.13 è riportato il grafico che mostra come il numero di agenti "informati" presenti una brusca impennata dopo soli pochi passi.

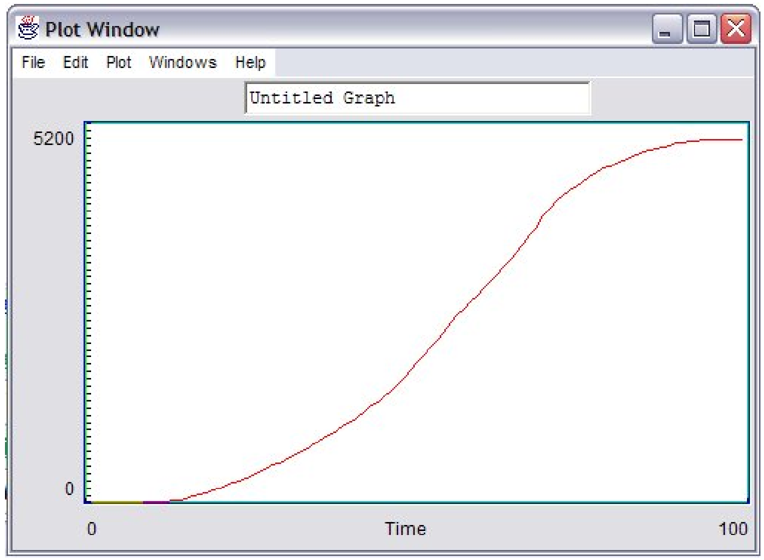

Figura 4.11: StarLogo: *SmallWorldsTurtles*, diffusione dell'informazione tra gli agenti rispetto al tempo

4.6.3 *SmallWorldsCA*

Per l'ultimo modello si utilizzano gli automi cellulari descritti nel primo e nel terzo capitolo: StarLogo permette di costruirli con i comandi propri dei *patches*, tutti richiamati dall'*observer* con il comando *ask-patches* per garantirne l'esecuzione in contemporanea per tutte le celle. L'informazione ha origine da più celle scelte casualmente, il cui numero è definito dall'utente. Il parametro β in questo caso indica la probabilità con la quale un passo dell'esecuzione attiva i legami globali piuttosto che locali: il programma prima di ogni passo determinerà casualmente un numero tra 0 e 100 e verificherà se questo è minore di β prima di procedere. Se la condizione non è verificata le caselle procederanno a contare il numero di celle blu nel loro intorno di von Neumann[12] per poi diventare blu a loro volta se tra le celle del vicinato

[12] le celle adiacenti in orizzontale e verticale, ma non in diagonale (par. 1.2)

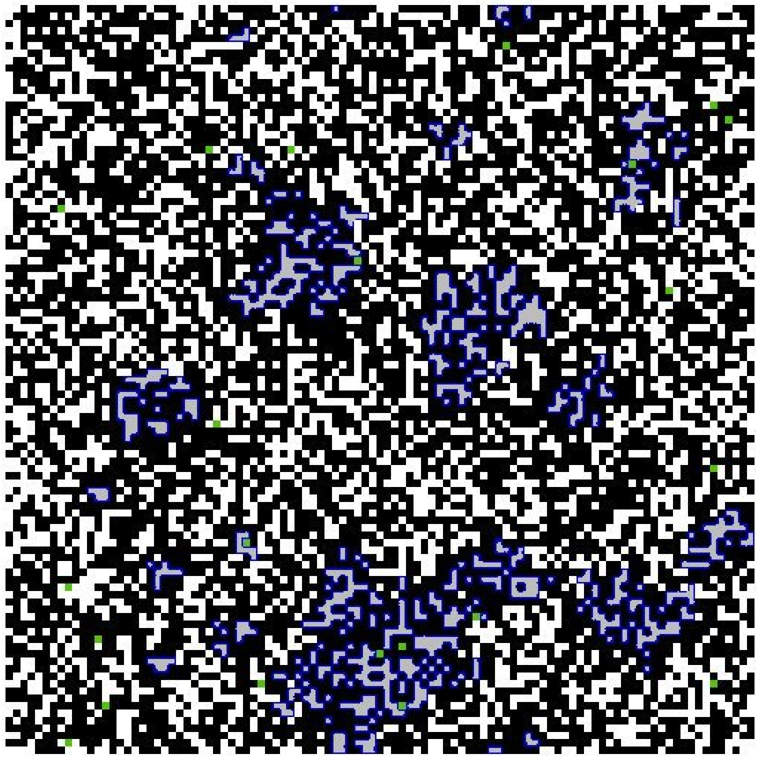

Figura 4.12: StarLogo: *SmallWorldsTurtles*, $\beta = 1$, 16 passi

ve ne sono almeno due blu; se il numero determinato casualmente è minore del parametro β vengono attivate casualmente un numero di celle pari a quello definito per il numero di celle da cui ha origine l'informazione ed in questo caso sarà sufficiente una sola cella blu nel vicinato per determinare il cambiamento di stato.

Come di consueto si possono esplorare tutte le possibili dinamiche che si creano al variare del parametro β. Se $\beta = 100$ la diffusione sarà posta in essere esclusivamente dalle celle scelte casualmente: riprendendo la metafora già vista in precedenza tutte le relazioni sono di tipo globale. Il risultato è un processo di diffusione che coinvolge sì tutte le celle, ma che richiede tempi lughi (quasi sempre maggiori di 700 passi) e che comunque dipende

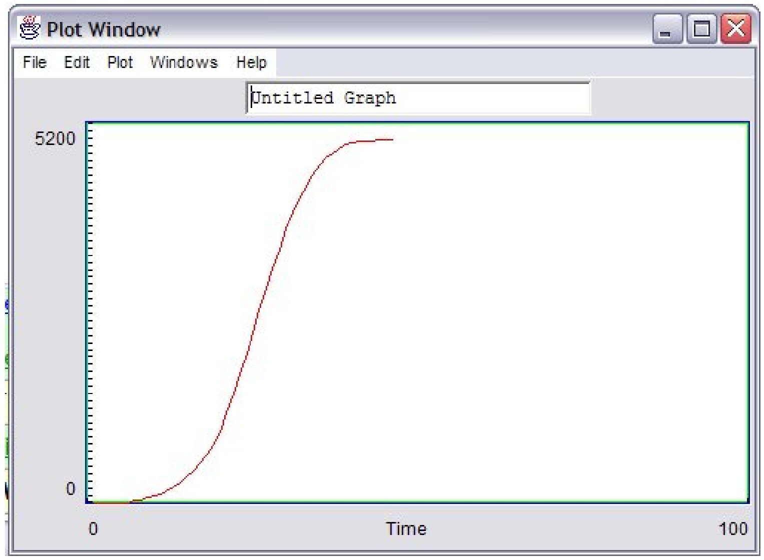

Figura 4.13: StarLogo: *SmallWorldsTurtles*, diffusione dell'informazione tra gli agenti rispetto al tempo con $\beta = 1$

strettamente dalle condizioni iniziali. Se invece $\beta = 0$ sono in funzione le sole relazioni locali e dopo due o tre passi si raggiunge uno stato stazionario in cui, esaurite le possibili strade di diffusione, nessuna nuova cella viene coinvolta; con questo tipo di modello si può dire che gli attori globali sono indispensabili per il propagarsi del segnale in tutto il sistema.

Basta infatti un piccolo valore del parametro ($\beta = 1$) perché la diffusione abbia luogo, sebbene con alcune particolarità. Ripetendo più volte la simulazione si osserva che per un buon numero di passi (anche un migliaio) le cose restano pressoché stabili, sebbene con fenomeni di diffusione globale che innescano piccoli fenomeni locali di formazione di *cluster* (fig. 4.14 e 4.15).

Nel giro di pochi passi la diffusione del segnale raggiunge invece una sorta di livello critico oltre il quale l'informazione si propaga a grande velocità in tutto il sistema (fig. 4.16): oltre ai consueti processi locali e globali agiscono

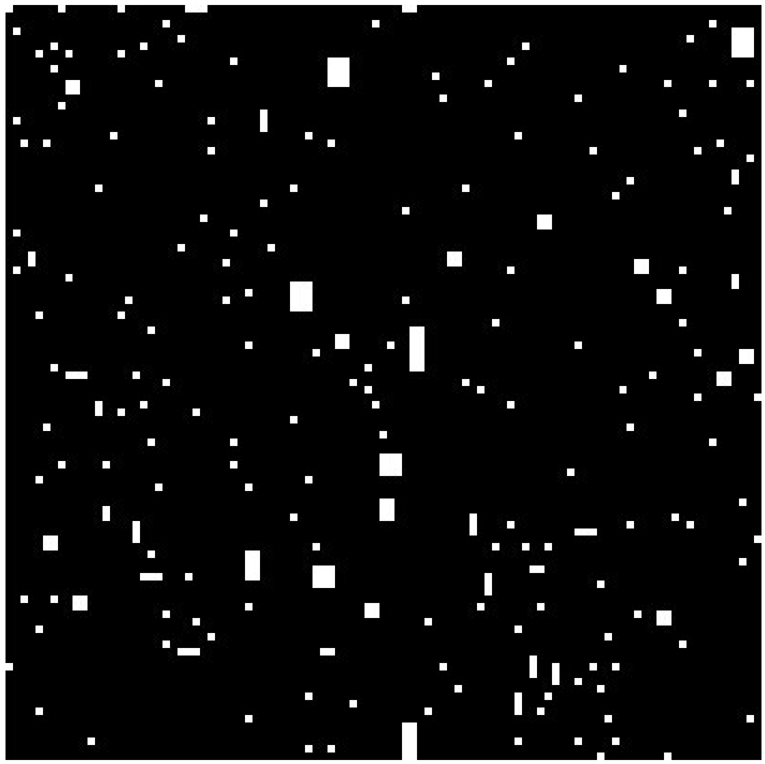

Figura 4.14: StarLogo: *SmallWorldsCA*, $\beta = 1$, 1215 passi

in questo caso proprietà specifiche degli automi cellulari che ricordano quelle delle regole di maggioranza (par. 3.1.3).

Con l'aumentare del parametro β tende a ripetersi il medesimo fenomeno, sebbene cambino i tempi della prima fase stazionaria e della successiva piena diffusione: per alti livelli di β (vicino a 100) sebbene si abbia una veloce soluzione della fase stazionaria, per la ridotta azione dei fenomeni locali occorrono molti passi prima che le ultime poche celle non raggiunte dal segnale siano infine raggiunte. Quando β è molto piccolo lo stato quasi-stazionario iniziale è invece di lunga durata, per l'opposta mancanza di quei processi globali che portano il segnale in zone distanti da quella in cui esso ha preso origine. In questa situazione sarebbe molto utile la presenza di un soggetto

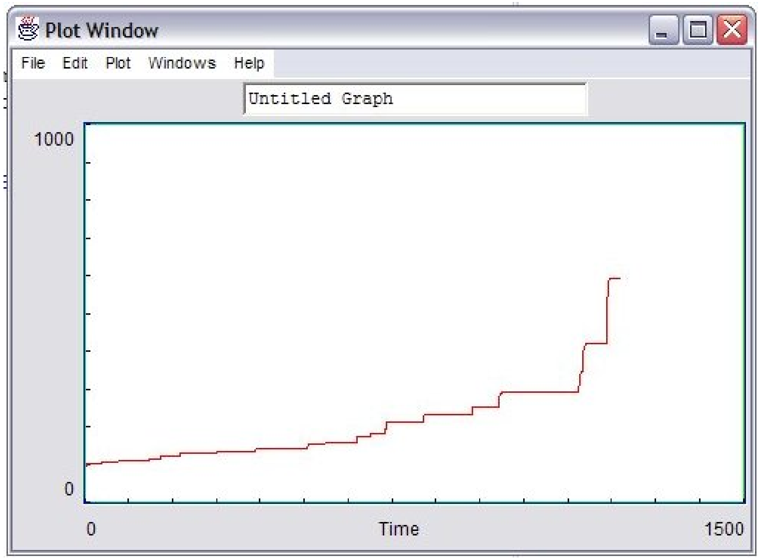

Figura 4.15: StarLogo: *SmallWorldsCA*, diffusione dell'informazione tra gli agenti rispetto al tempo con $\beta = 1$ dopo 1215 passi

che favorisce le interazioni tra le celle già coinvolte, anticipando quel processo che si manifesta al raggiungimento del livello critico: questo fenomeno sarà affrontato nel capitolo successivo.

In generale si ottengono i risultati migliori in termini di velocità di diffusione dell'informazione quando siano presenti contemporaneamente le interazioni locali e globali, anche se in diverse proporzioni.

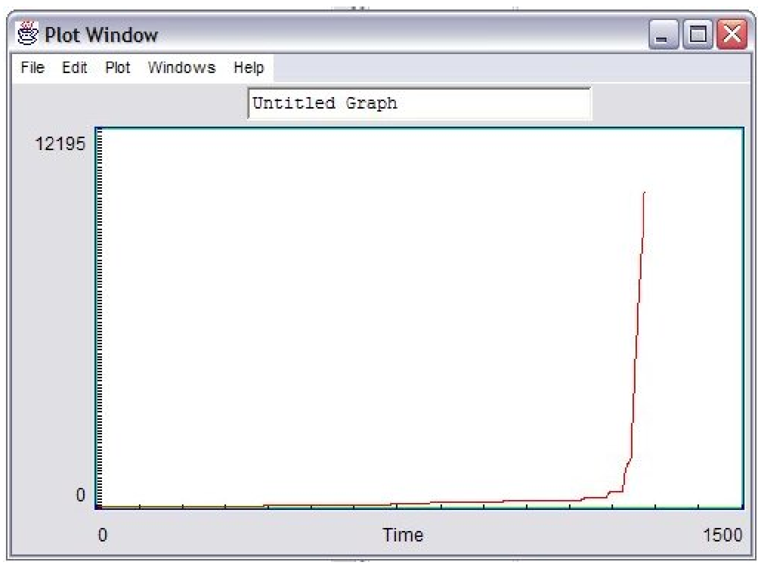

Figura 4.16: StarLogo: *SmallWorldsCA*, diffusione dell'informazione tra gli agenti rispetto al tempo con $\beta = 1$ dopo 1268 passi

Capitolo 5

L'importanza delle reti sociali

Immaginare le relazioni tra i soggetti inserite in un contesto reticolare permette di studiare fenomeni quali i piccoli mondi di cui si è trattato nel capitolo precedente. La letteratura sociologica e sull'economia dell'interazione riporta studi su altri fenomeni legati alle reti sociali: due tra questi sono esposti nelle sezioni seguenti e riguardano l'influenza delle scelte del vicinato di un soggetto sulle sue proprie scelte e l'importanza di poter stabilire nuovi legami tra soggetti non ancora in relazione.

5.1 La diffusione di un'innovazione

Il processo attraverso il quale si diffonde un'innovazione può essere studiato con modelli che possono fondarsi su presupposti diversi, ma sintetizzabili in due classi. La prima prende in considerazione ogni singolo agente, posto di fronte alla decisione di adottare o meno l'innovazione nel contesto della domanda e dell'offerta e in considerazione di un programma di massimizzazione di determinate caratteristiche. La seconda classe di modelli riguarda invece l'economia dell'interazione, che considera l'esistenza di relazioni di interdipendenza tra le decisioni dei diversi agenti: in questo contesto assume particolare importanza il ruolo degli innovatori, di coloro che per primi adottano l'innovazione.

La formalizzazione più semplice consiste nell'immaginare la possibilità di trasferire l'innovazione in un processo di diffusione del tipo visto nel par. 4.6: l'incontro tra un agente innovatore ed uno che non ha adottato l'innovazione dà luogo ad una trasmissione "faccia a faccia" del segnale, sotto l'ipotesi che non vi siano fenomeni di dissipazione. In questo modello la diffusione dell'innovazione dipende dalla probabilità degli incontri tra gli agenti adottatori e non adottatori; inoltre i nuovi soggetti innovatori diventano a loro volta "portatori" del segnale e contribuiscono così ulteriormente alla diffusione. Questi soggetti partecipano inoltre ad un processo di legittimazione dell'innovazione nell'ambiente sociale, alla costruzione di un suo riconoscimento sociale: il ruolo di questi fenomeni nella persuasione di un individuo posto di fronte alla scelta di adottare o non adottare sembra essere determinante (Zimmermann e Deroïan, 2001).

Nei modelli del par. 4.6 si poteva notare che il tasso di diffusione presentava, indipendentemente dai fenomeni dei piccoli mondi, una sorta di livello critico oltre al quale il numero di nuovi innovatori accelerava notevolmente: la diffusione inizia quindi lentamente, per poi decollare una volta che il numero di adottatori sia sufficiente per mettere in atto il processo di legittimazione. Tuttavia si è visto che i risultati possono cambiare notevolmente a seconda di come si definiscono le forme delle relazioni tra gli agenti: se sono o meno interconnessi in una forma di rete sociale, se i legami tra i soggetti sono deterministici o casuali, se le relazioni dominanti sono di tipo locale o globale. L'analisi deve dunque tenere conto del supporto delle interazioni e di come i soggetti si posizionino sul medesimo.

I legami tra i soggetti che partecipano ad una rete sociale sono responsabili di due generi di fenomeni:

- l'esposizione dell'agente ai fenomeni di influenza appena esaminati, in cui la capacità di persuasione è fortemente correlata con il livello di conoscenza diretta tra gli individui;
- la capacità del soggetto di accrescere il volume di informazione a cui può accedere, sfruttando i benefici dei "legami deboli" studiati da Granovetter (1973).

5.1.1 Un modello di diffusione dell'innovazione

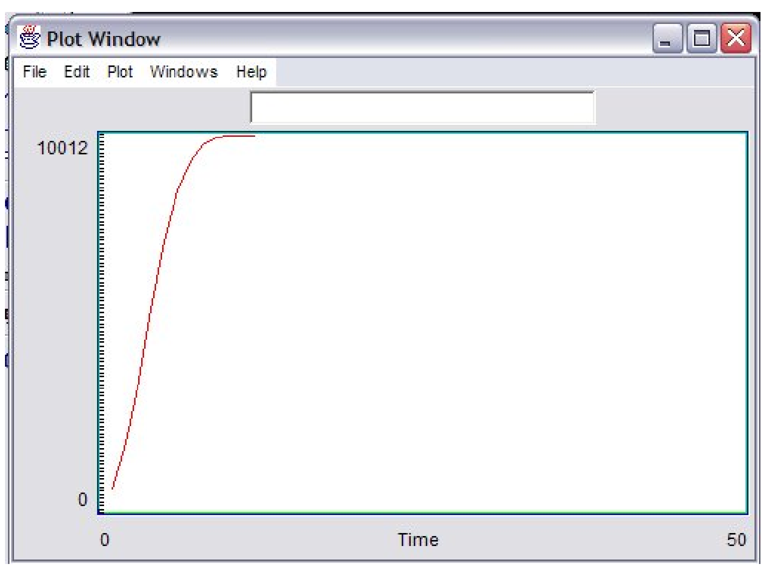

Figura 5.1: StarLogo: diffusione dell'innovazione, $\phi = 1$

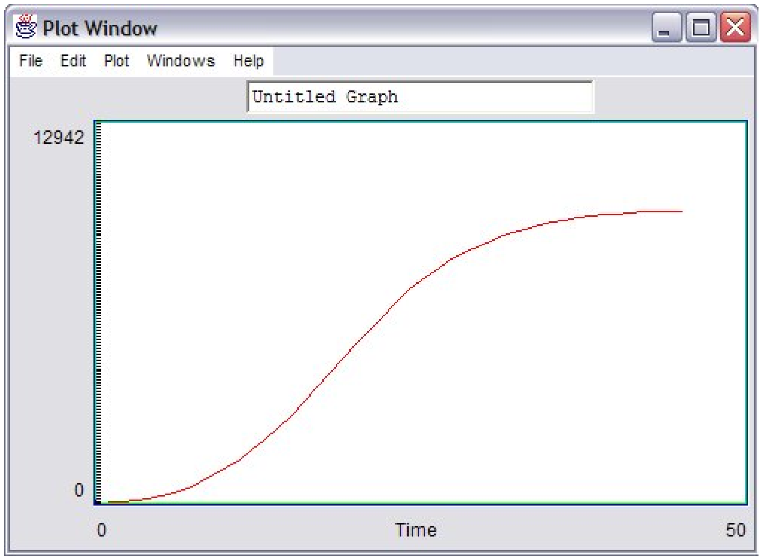

Figura 5.2: StarLogo: diffusione dell'innovazione, $\phi = 2$

Zimmermann e Deroïan (2001) propongono un modello in cui i fenomeni di accumulo delle influenze sono contestualizzati nell'ambito di una rete sociale. Gli autori considerano un numero di agenti assolutamente identici tra loro, distinguibili solo per la loro posizione nella rete e per lo stato di ciascuno, variabile tra 0 e 1, corrispondente all'adozione (1) o meno (0) dell'innovazione; si suppone che la decisione di adozione sia irreversibile e che quindi un agente che sia passato allo stato 1 conservi sempre questo stato. Ogni agente decide di adottare se nel suo vicinato almeno ϕ altri agenti hanno già adottato l'innovazione, con ϕ variabile tra 1 ed il numero di agenti nel modello.

Il parametro ϕ formalizza la capacità di persuasione dei legami interpersonali: nel modello la decisione di ogni singolo è data dalle decisioni degli agenti che compongono il suo vicinato. Allo stesso tempo, quando ϕ è maggiore di uno, nel vicinato deve esservi un numero sufficiente di innovatori perché vi sia

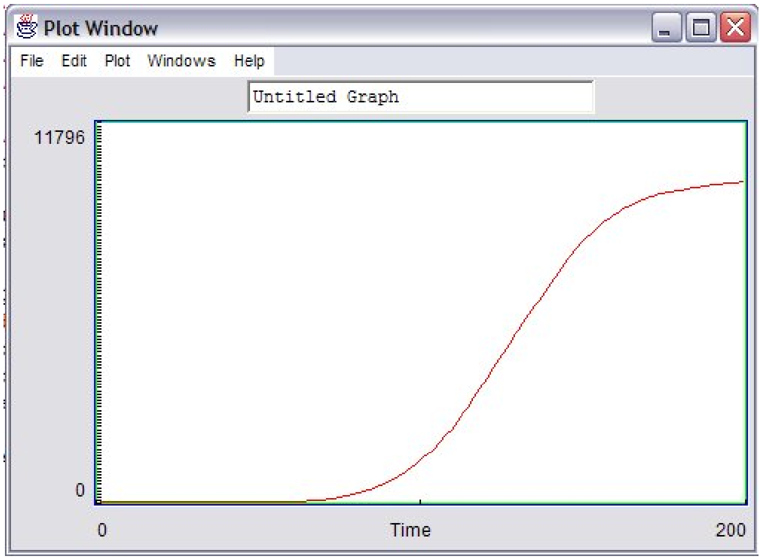

Figura 5.3: StarLogo: diffusione dell'innovazione, $\phi = 3$

una ulteriore diffusione: deve potersi riscontrare un riconoscimento sociale dell'innovazione.

Il modello può essere riprodotto in StarLogo inserendo gli agenti nella consueta scacchiera su cui possono muoversi casualmente e mettere in atto gli incontri necessari per le dinamiche di diffusione: ogni agente esaminerà il suo vicinato di Moore[1] e modificherà il suo stato (adotterà l'innovazione) se un numero ϕ di vicini definito dall'utente hanno già adottato l'innovazione.

Le simulazioni sono state condotte considerando 5000 agenti di cui 100 hanno in un primo tempo ($t = 0$) già adottato l'innovazione[2]: si riportano in figure 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 i grafici che mostrano il numero di agenti che hanno adottato rispetto al tempo per diversi valori di ϕ. La dinamica con $\phi = 1$ e $\phi = 2$ è del tutto simile a quella vista per le simulazioni del capitolo precedente, quando si prendevano in considerazione le sole dinamiche di trasmissione

[1] tutte le otto celle del vicinato, in orizzontale, verticale e diagonale

[2] tutti gli agenti sono disposti casualmente sulla scacchiera

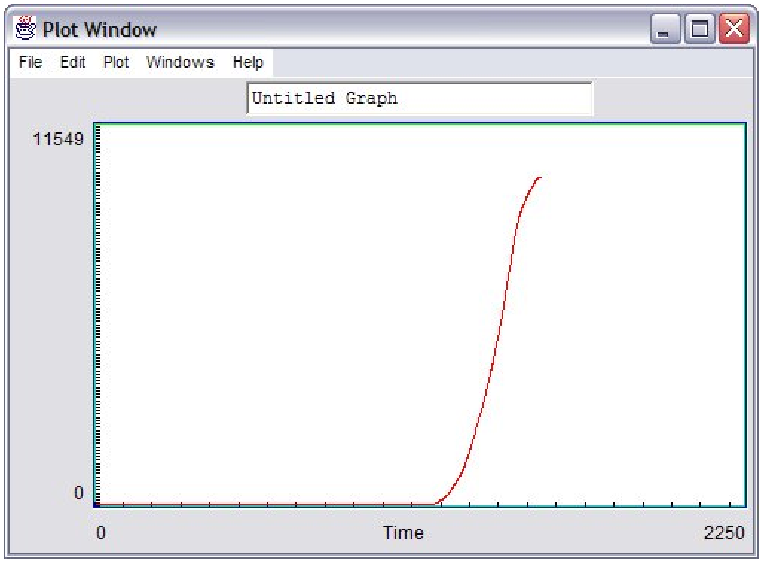

Figura 5.4: StarLogo: diffusione dell'innovazione, $\phi = 4$

locale. I fenomeni di accumulo di influenza descritti da Zimmermann e Deroïan (2001) si manifestano per valori di $\phi \geq 3$ quando è necessaria l'influenza da parte di molteplici soggetti per determinare la scelta dell'innovazione. Per tutti i valori di ϕ considerati le interazioni a livello locale fanno emergere a livello globale un numero di innovatori critico superato il quale l'innovazione è velocemente adottata da tutti i soggetti: il tempo necessario a raggiungere tale livello è crescente all'aumentare del parametro ϕ.

Zimmermann e Deroïan (2001) definiscono la "soglia di convergenza" come quel numero minimo di adottatori iniziali necessario per ottenere la diffusione in tutto il sistema; gli autori argomentano anche che assume particolare importanza la posizione di questi soggetti innovatori nella rete. Nel modello è infatti indispensabile che per ogni soggetto che non abbia ancora adottato l'innovazione vi sia un intorno con un numero di innovatori sufficiente per determinare la scelta d'innovazione: in questo senso è necessaria una certa densità dei legami tra i soggetti, ma anche una buona numerosità dei soggetti stessi.

Questi limiti possono essere superati considerando la rete dotata delle caratteristiche dei Piccoli Mondi descritte nel par. 4.4: inserendo nella struttura a rete proposta da Zimmermann e Deroïan (2001) la determinazione a-spaziale dei legami (i soggetti globali) si possono ottenere forme di rete con maggiori capacità di diffusione in termini di velocità, ma anche in termini di capacità di raggiungere soggetti "distanti" nello spazio della scacchiera. Se a fianco delle interazioni faccia a faccia tra i soggetti a livello locale si attivano forme di trasferimento dell'informazione di tipo a-spaziale la diffusione avverrà contemporaneamente ai due livelli con risultati analoghi a quelli visti negli esempi del capitolo precedente, in cui l'accumulo delle influenze e la topologia della rete contribuiscono al successo dell'innovazione. Anche la velocità della diffusione, che nel modello dipende sostanzialmente dalla posizione dei primi innovatori nella struttura sociale, non trova più questo limite se entrano in gioco i processi di ridefinizione dei legami descritti dai piccoli mondi.

5.2 Buchi strutturali

Finora sono state prese in considerazione le proprietà delle reti ed in particolare dei legami che permettono ai soggetti di interagire. In questa sezione si esamina invece, seguendo in gran parte l'esposizione di Burt (1992), cosa succede quando i legami in questione mancano e possono essere attivati creando opportunità e benefici ai soggetti che partecipano alla rete.

5.2.1 Capitale sociale

Coleman (1988) ha introdotto la nozione di capitale sociale, considerato come una specifica categoria di risorse per i soggetti e composto dalla struttura delle relazioni che ogni soggetto ha con gli altri attori, cioè dai rapporti interpersonali.

I soggetti che operano in un mercato apportano capitale di tre tipi: capitale finanziario, capitale umano e capitale sociale. Il capitale finanziario è composto dal denaro, dagli investimenti, dal credito, mentre il capitale umano comprende le capacità personali, l'educazione, l'intelligenza, l'esperienza. Il capitale finanziario ed il capitale umano si distinguono dal capitale sociale per due caratteristiche:

- sono soggetti alla proprietà di qualcuno, sono posseduti da un soggetto o da più soggetti per motivi naturali o legali, mentre il capitale sociale è detenuto congiuntamente da entrambe le parti di una relazione;
- nell'ambito della produzione riguardano la fase di investimento, nel senso che capitale finanziario e umano vengono investiti per creare capacità produttiva, mentre il capitale sociale riguarda il profitto: *"through relations with colleagues, friends and clients come the opportunities to transform financial and human capital into profit"* (Burt, 1992).

Il metodo più semplice per misurare il capitale sociale è considerare il numero di contatti, cioè il numero di altri attori con i quali un soggetto ha relazioni dirette, numero che varia moltissimo da una persona ad un'altra o da un'organizzazione a un'altra.

Le relazioni tra soggetti si distinguono per contenuto e per intensità.

La differenze di contenuto sono dovute al fatto che i nostri rapporti con altre persone possono essere di natura diversa e riguardare la sfera affettiva (la famiglia, gli amici), il lavoro (colleghi, clienti), il tempo libero o la vita pubblica (associazioni, partiti) e così via.

Le differenze di intensità si riferiscono alla distinzione proposta da Granovetter (1973) tra legami forti e legami deboli. I primi riguardano le relazioni a cui i soggetti dedicano più tempo: possono riguardare contenuti diversi, ma sono più intensi e comportano un coinvolgimento sentimentale. Si tratta tipicamente dei rapporti tra familiari, tra amici stretti, tra soggetti che hanno quindi molto spesso modo di incontrarsi e trascorrere tempo assieme. I legami deboli si hanno invece tra persone che, pur conoscendosi, si incontrano raramente, magari qualche volta nell'arco di un anno stabilendo una relazione che può essere informale ma sicuramente non intima. Granovetter, esaminando come un campione di soggetti avesse trovato occupazione, scoprì che la maggior parte di loro aveva trovato lavoro grazie ad un'indicazione passata attraverso un legame debole e solo raramente grazie ad indicazione dei parenti o amici intimi.

Esiste una possibile spiegazione per questo fenomeno e va ricercata nel fatto che le relazioni più strette tra i soggetti sono quelle in cui si è legati da rapporti di parentela o di fiducia: molto spesso questi tipi di rapporti interpersonali tendono a formarsi tra soggetti simili per occupazione, età, educazione, interessi. Di conseguenza si tratta di soggetti che tenderanno a frequentare le stesse amicizie, ad avere interessi comuni e occupazioni simili che li metteranno di fatto in condizione di accedere alle medesime informazioni. Inoltre molto spesso capita che diversi soggetti tutti legati da legami forti formino una sorta di *cluster* in cui circoleranno probabilmente sempre le stesse notizie: i soggetti connessi da legami deboli avranno il ruolo fondamentale di "ponti" tra i diversi gruppi, in analogia agli attori globali dei piccoli mondi (par. 4.4).

5.2.2 Struttura della rete

L'insieme dei soggetti conosciuti da un individuo formano la sua rete di contatti: la struttura di tale rete e la posizione dei soggetti nel suo interno possono, come si è visto nel par. 5.1.1, favorire la circolazione delle informazioni. Più in generale si può affermare che la rete sociale in cui si trova un soggetto può da sola permettergli di ottenere vantaggi competitivi e maggiori profitti. In un contesto competitivo la circolazione dell'informazione è cruciale se si tratta di poter accedere prima o meglio di altri ad un'opportunità, affinché possa essere sfruttata o per indirizzarla verso la persona in grado di utilizzarla.

Si può accedere direttamente all'informazione oppure ottenerla da qualcuno che ne è già a conoscenza: in questo secondo caso tutto dipende dai soggetti a cui si è in qualche modo collegati. La rete sociale di cui si fa parte può da un lato permettere di accedere velocemente alle informazioni di cui si ha bisogno e contemporaneamente filtrare e portare verso l'esterno notizie su noi stessi.

Una rete grande e diffusa è la migliore garanzia di accedere ad una informazione utile quando essa si presenta: in generale quindi, i benefici di una rete di questo tipo sono maggiori rispetto ai benefici di una rete piccola e omogenea. Tuttavia accrescere indeterminatamente la grandezza della rete può anche presentare svantaggi: secondo Burt (1992) quello che conta è il numero dei cosiddetti contatti "non ridondanti". L'autore definisce come ridondanti quei contatti che portano agli stessi soggetti e che quindi portano gli stessi benefici in termini di informazioni a cui si ha accesso.

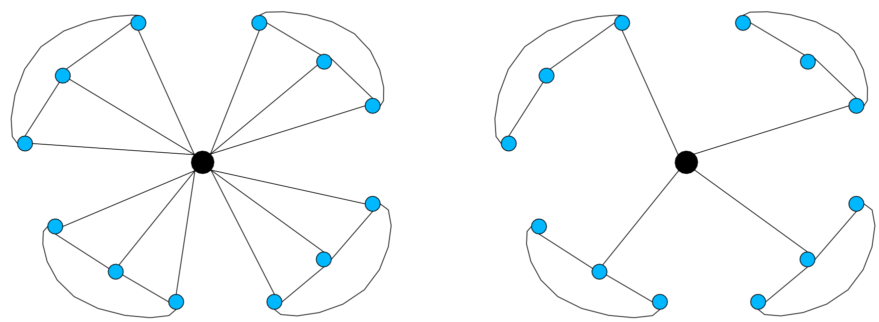

Figura 5.5: Esempio di reti con legami ridondanti e non ridondanti

Si considerino i due grafi in figura 5.5: il soggetto al centro è inserito in una rete composta da altri dodici soggetti, che formano sotto-reti (o *cluster*) composte da tre individui. Nello schema a sinistra nella figura il soggetto intrattiene relazioni strette con tutti e dodici gli altri nodi: nello schema a destra l'individuo al centro mantiene un legame con solo un soggetto per ogni sotto-rete. Nel grafo a sinistra il soggetto al centro deve mantenere dodici relazioni per raggiungere dodici soggetti, mentre nel grafo a destra per raggiungere sempre dodici soggetti sono necessari solo quattro legami. In termini di costi, anzitutto in termini di tempo necessario a mantenere ciascun contatto, la rete a destra in figura fornisce al nodo al centro gli stessi benefici informativi ad un costo minore: il "vantaggio" è in questo senso il dover mantenere quattro legami anziché dodici. I legami non più presenti nel grafo a destra, che in precedenza portavano alla stessa sotto-rete, erano in effetti tutti legami ridondanti: i quattro restanti possono essere definiti invece legami non ridondanti.

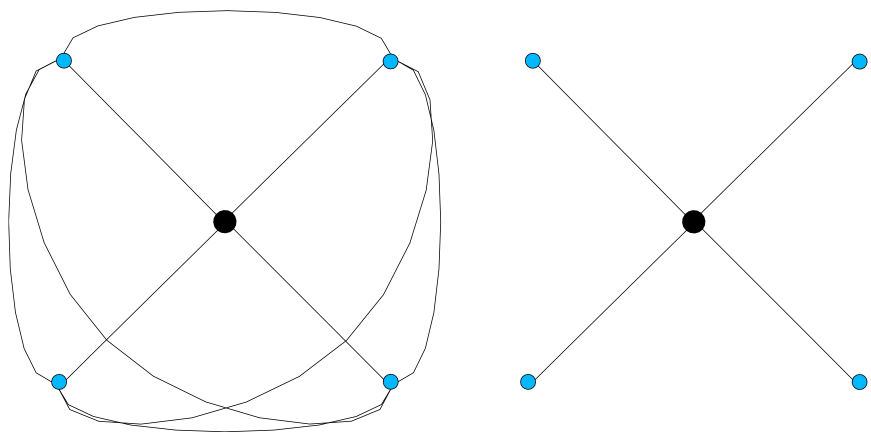

Figura 5.6: Esempio di reti con legami ridondanti e non ridondanti

In figura 5.6 sono riportati i grafi di due reti entrambe composte da 5 soggetti: l'individuo al centro ha sempre quattro contatti, ma nella rete a sinistra vi sono relazioni tra tutti i soggetti mentre nella rete a destra non vi è alcuna relazione tra i nodi eccetto che con quello centrale. Il costo del mantenimento della rete per l'individuo al centro è lo stesso in entrambi i casi, ma la rete a destra è composta da quattro contatti non ridondanti che lo mettono in contatto con soggetti diversi per ogni nodo. Nella rete a sinistra, invece, ogni relazione mette il soggetto al centro a contatto sempre con le stesse persone: per ogni nodo vi sono sempre tre legami ridondanti e uno solo non ridondante (quello che rimane nel grafo a destra).

5.2.3 *Structural holes*

Con Burt (1992):

> I use the term structural hole for the separation between nonredundant contacts. Nonredundant contacts are connected by a structural

> hole. A structural hole is a relationship of non redundancy between two contacts. The hole is a buffer, like an insulator in an electric circuit. As a result of the hole between them, the two contacts provide network benefits that are in some degree additive rather than overlapping.

Si ha quindi un "buco strutturale" quando due soggetti sono potenzialmente collegabili da un legame non ridondante, che tuttavia (ancora) non esiste: il legame in questione può essere attivato e fornire alla rete benefici di tipo additivo, nel senso che le nuove relazioni che si vengono così a formare non si sovrappongono a quelle preesistenti.

Burt propone due condizioni di tipo empirico che possono rivelare la presenza dei buchi strutturali, in quanto individuano chiaramente quando i buchi non vi possono essere:

- coesione (*cohesion*): si può dire che due contatti sono ridondanti quando tra loro esiste un legame forte[3], che quindi esclude la presenza di un buco strutturale;
- equivalenza strutturale (*structural equivalence*): si ha quando due soggetti hanno gli stessi contatti e permettono quindi di accedere alle stesse informazioni.

La ridondanza per coesione è esemplificata dal grafo a sinistra in figura 5.7: il legame forte tra i due contatti fa sì che essere legati ad uno dei due sia sufficiente per avere accesso ad entrambi. Rientrano in questa categoria i rapporti tra familiari, amici stretti, tra persone che si incontrano spesso: in

[3] si veda il par. 5.2.1 in merito agli studi di Granovetter

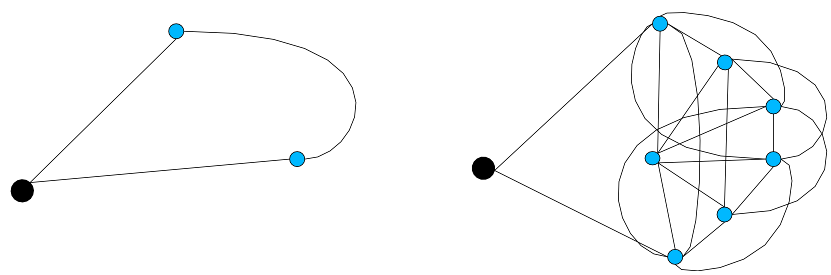

Figura 5.7: Esempio di ridondanza per coesione e per equivalenza strutturale

generale si tratta di soggetti che si incontrano spesso o che hanno rapporti di tipo affettivo. Si assume che più è forte il legame tra i soggetti, maggiore sia il flusso di informazioni scambiate.

Burt (1992) definisce una variabile di relazione (*relationship variable*) z_{ij} per misurare la forza dei legami tra due soggetti dati i e j: tanto maggiore è z_{ij} tanto forte è la relazione tra il soggetto i e il soggetto j. Un legame molto forte implica la presenza di forte coesione tra i nodi della rete, indicando quindi l'assenza di buchi strutturali.

Nel grafo a desta in figura 5.7 i due legami che collegano il nodo isolato alla rete sono strutturalmente equivalenti, in quanto portano ad uno stesso *cluster* di soggetti nell'ambito del quale è altamente probabile che circolino sempre le medesime informazioni: è sufficiente un solo legame, quindi nel grafo vi è un legame ridondante.

In generale per massimizzare l'efficienza di una rete occorre massimizzare il numero di contatti non ridondanti nella rete e di conseguenza il numero di buchi strutturali per ogni contatto: a parità di grandezza, le reti con maggiori contatti non ridondanti danno maggiori benefici perché hanno più buchi strutturali per ogni contatto (Burt, 1992). I contatti non ridondanti danno la possibilità di accedere a diverse fonti di informazione: il beneficio è quindi in termini di capacità di ottenere informazioni maggiori in termini di quantità e di eterogeneità.

5.2.4 I vantaggi dei buchi strutturali

Per mostrare i benefici dei buchi strutturali Burt introduce nella sua esposizione il ruolo del *tertius gaudens*, del soggetto che in qualche modo riesce a trarre profitto dalla contrapposizione di altri[4]. Il ruolo del *tertius* può manifestarsi quando vi sono due o più attori nella stessa relazione o quando vi sono attori in due o più relazioni con interessi opposti. Il primo è il caso del venditore che sfrutta la presenza di due o più compratori per ottenere un prezzo maggiore; la seconda è la possibilità di scegliere tra le richieste simultanee di attori in relazioni separate. La strategia del *tertius* in generale sfrutta una tensione esistente tra altri soggetti, creando competizione in modo tale che le richieste dei contatti diventino in qualche modo conflittuali.

La conflittualità di cui si parla non è una forma di ostilità tra i soggetti, ma è la possibiità che il *tertius* ha, interponendosi nella relazione, di gestire le informazioni tra i "due litiganti": in questo modo può sfruttare la propria capacità informativa rispetto alla loro incertezza, per ottenere così il controllo dell'esito della transazione.

Esiste quindi la possibilità per un soggetto di sfruttare le condizioni favorevoli offerte da un buco strutturale per trarne profitto, magari mettendo insieme esigenze di individui diversi precedentemente non legati tra loro.

I vantaggi dei buchi strutturali possono quindi riassumersi in:

- maggiore esposizione del soggetto alle informazioni (par. 5.2.3);

[4] "Fra i due litiganti il terzo gode"

- possibilità di controllare l'esito delle relazioni tra altri soggetti.

Tra tutti i soggetti che formano la rete quelli meglio posizionati per ottenere questi vantaggi sono i nodi dotati di autonomia strutturale (*structural autonomy*): si tratta di attori che sono legati a contatti caratterizzati da molti buchi strutturali, ma che contemporaneamente non hanno buchi strutturali intorno a sé. Questi attori sono in grado di approfittare dei vantaggi in termini di informazioni e controllo offerti dai buchi strutturali, ma allo stesso tempo non avendo buchi attorno a sè non offrono gli stessi vantaggi ad altri attori che potrebbero sfruttarli per i loro scopi a svantaggio dei primi (Burt, 1992).

Capitolo 6

Economia e impresa

In questo capitolo vengono in sintesi esposti alcuni aspetti delle riflessioni degli economisti classici che riguardano l'imprenditore, in particolare con riferimento alla teoria dell'equilibrio economico di Walras prima e di Arrow - Debreu in seguito[1] . Quindi si considerano i punti principali della critica al metodo classico della cosiddetta scuola austriaca, con un approfondimento sul concetto di imprenditore sviluppato da Kirzner, che sarà utile per inquadrare il ruolo dell'imprenditore alla luce dei contesti teorici sviluppati nei cap. 4 e 5.

6.1 Il modello walrasiano

L'obiettivo del modello proposto da Léon Walras è la determinazione simultanea di prezzi e quantità di equilibrio. L'insieme degli scambi ha per oggetto la ricchezza sociale, definita come il complesso dei beni materiali e immate-

[1]Per una presentazione esauriente di questi argomenti si rimanda fin d'ora a Pavanelli (2002) e Napoleoni e Ranchetti (1990), da cui prende ampi spunti quanto segue

riali utili e disponibili in quantità limitata; l'utilità è intesa da Walras in senso soggettivo. Sul mercato operano tre categorie di soggetti, distinguibili sulla base dei capitali prevalentemente a loro disposizione: proprietari fondiari, lavoratori, capitalisti. Un ruolo a parte è svolto dagli imprenditori, che Walras considera una categoria a sé stante: gli imprenditori acquistano e combinano i fattori della produzione per ottenere beni di consumo, beni intermedi e capitali durevoli. Nel modello walrasiano vi sono:

- agenti massimizzanti, caratterizzati da proprie preferenze e con dotazioni iniziali di capitali o di beni di consumo non coincidenti con quelli ottimali;
- una pluralità di mercati tra loro interrelati: le transazioni avvengono sui mercati dei prodotti, dei capitali, dei servizi produttivi.

La tecnologia in base alla quale i fattori di produzione vengono combinati è data, così come il numero dei lavoratori e l'ammontare di risorse disponibili. L'obiettivo del modello è ottenere quantità e prezzi dei beni prodotti sotto ipotesi che:

- vi sia completa interrelazione tra i mercati: quantità e prezzi determinati su un mercato influiscono anche sugli altri mercati;
- vi sia concorrenza perfetta, ovvero si operi in un mercato in cui ciascun soggetto non è in grado da solo di modificare i prezzi[2].

Si ha un equilibrio concorrenziale walrasiano se esiste un insieme di prezzi tali che in ogni mercato la domanda eguagli l'offerta, ogni agente venda o acquisti

[2]si dice che i soggetti siano *price taker*

secondo quanto aveva programmato, tutti gli agenti, siano consumatori o imprese, massimizzino profitti e utilità.

La teoria dell'equilibrio economico generale è stata riformulata negli anni '50 dagli economisti K. Arrow e G. Debreu, utilizzando una diversa impostazione metodologica e tecniche matematiche più sofisticate. In primo luogo devono essere esplicitate alcune premesse:

- le merci sono distinte non solo in base alle caratteristiche fisiche, ma anche in base alla data e al luogo in cui la merce è disponibile;
- si postula l'esistenza per tutte le merci di mercati a pronti, di mercati a termine e di mercati contingenti o condizionati, in cui il realizzarsi dello scambio è condizionato al verificarsi o meno di un certo evento; questa preposizione è nota come "postulato dei mercati completi";
- il sistema dei prezzi è dato, ovvero si è in condizione di concorrenza perfetta;
- i soggetti economici sono distinti in produttori e consumatori.

L'economia è composta da un insieme completo di prezzi, uno per ogni merce, un insieme completo di piani di produzione, uno per ogni produttore, e da un insieme completo di piani di consumo, uno per consumatore. L'insieme di prezzi di equilibrio è tale che:

- il piano individuato per ogni produttore è quello che massimizza i suoi profitti;
- il piano individuato per ogni consumatore è quello che massimizza la sua utilità;

– per ogni merce la quantità domandata eguaglia sempre la quantità offerta (ipotesi di prezzi *market-clearing*).

6.2 La critica della scuola austriaca e il concetto di scoperta imprenditoriale

La scuola austriaca prende origine da un gruppo di economisti dei primi del Novecento (si tratta di Carl Menger, Eugene von Boehm-Bawerk, e Friedrich von Wieser) e negli anni '30 assume connotati distinti dall'economia classica e neoclassica con il lavoro di Friedrich von Hayek e Ludwig von Mises, che è stato ripreso negli ultimi anni dando origine alla scuola austriaca moderna. La critica all'economia neoclassica, al modello di Walras e alla riformulazione di Arrow e Debreu, riguarda in particolare la nozione di equilibrio: gli economisti austriaci criticano il fatto che tali modelli considerino l'economia sempre in condizioni di equilibrio, senza mai spiegare come questo venga effettivamente raggiunto partendo da condizioni di non equilibrio. Il mercato walrasiano è tale per cui tutti gli operatori sono *price taker*, nel senso che non sono in grado di modificare i prezzi: questo aspetto, assieme all'assunzione che anche la qualità delle merci sia in qualche modo una variabile esterna all'operare degli agenti, è ritenuto dagli austriaci in contrasto con una realtà in cui gli operatori competono sul mercato in base ai prezzi ed alla qualità delle merci.

La posizione degli autori della scuola austriaca si può distinguere per l'attenzione rivolta alla conoscenza e al ruolo della scoperta nelle dinamiche del mercato. Con Kirzner (1997):

> In particular this approach (a) sees equilibration as a systematic process in which market participants acquire more and more accurate and complete mutual knowledge of potential demand and supply attitudes, and (b) sees the driving force behind this systematic process in what will be described below as entrepreneurial discovery.

Gli attori del mercato non sono più soggetti massimizzanti caratterizzati da ben definiti sistemi di preferenze o produttori caratterizzati da precise funzioni di produzione inseriti in un mercato in condizione di equlibrio: si tratta piuttosto di individui in grado di "imparare" dal mercato, scambiando informazioni e conoscenza con gli altri soggetti. Tra questi soggetti gli imprenditori assumono il ruolo di vero motore dell'economia, attraverso il processo di scoperta imprenditoriale. Come afferma Mises (1963):

> The driving force of the market process is provided neither by the consumers nor by the owners of the means of production - land, capital goods, and labor - but by the promoting and speculating entrepreneurs. These are people intent upon profiting by taking advantage of differences in prices. Quicker of apprehension and farther-sighted than other men, they look around for sources of profit.

Esiste la possibilità della scoperta se esiste informazione imperfetta: per l'economia *mainstream*[3] l'incompletezza dell'informazione è un limite posto al raggiungimento dell'equilibrio, mentre per gli autori austriaci offre la possibilità della scopeta. La scoperta imprenditoriale mette in luce un'opportunità

[3] questo termine viene utilizzato da Kirzner (1997) per indicare la teoria economica walrasiana e i suoi sviluppi contemporanei

di colmare una precedente ignoranza, di cui si ignora la stessa esistenza, motivo per cui la scoperta è accompagnata dall'elemento di sorpresa.

Mentre gli imprenditori dell'economia *mainstream* prendono quantità e prezzi come dati, gli imprenditori austriaci determinano direttamente queste variabili del mercato. Sempre con Mises (1963):

> They buy where and when they deem prices too low, and they sell where and when they deem prices too high. They approach the owners of the factors of production, and their competition sends the prices of these factors up to the limit corresponding to their anticipation of the future prices of the products. They approach the consumers, and their competition forces prices of consumers goods down to the point at which the whole supply can be sold. Profit-seeking speculation is the driving force of the market as it is the driving force of production.

Nel mercato vi sono sempre opportunità che possono generare profitto per l'imprenditore: si tratta di errori commessi in precedenza da altri imprenditori che possono essere "corretti" se scoperti e compresi. Il momento della scoperta è fondamentale: gli impenditori non operano una ricerca sistematica di queste opportunità, così come si può fare per una ricerca finalizzata ad un'innovazione. Non è possibile cercare le opportunità imprenditoriali per il fatto che non si può essere consapevoli della loro esistenza, proprio nel senso che non si sa che cosa si sta cercando. In questo aspetto risiede il ruolo della sorpresa per aver scoperto una opportunità di profitto prima sconosciuta.

Resta da spiegare la tendenza di alcuni soggetti alla scoperta imprenditoriale. Seguendo l'esposizione di Kirzner (1997):

> What accounts for a systematic tendency toward that succession

> of wholesome surprises which must constitute the equilibrative process, is not any implausible series of happy accidents, but rather the natural alertness to possible opportunities (or the danger of possible disaster) which is characteristic of human beings. [...] Entrepreneurial alertness refers to an attitude af receptiveness to available (but hitherto overlooked) opportunities.

Questo atteggiamento “vigile” dell’imprenditore non può essere concepito se non nell’ambito della concezione austriaca dell’uomo, recettivo agli stimoli esterni e capace di immaginazione, la cui azione è *open ended*, può sempre sfociare in qualsiasi risultato.

6.3 Il profitto dell’imprenditore

Strettamente legato al concetto economico di imprenditore è il profitto, la remunerazione della sua attività imprenditoriale. Nella concezione dell’economia neoclassica il profitto può essere inteso come (Colombatto, 2001):

- la remunerazione delle capacità di direzione dell’impresa, che però sono capacità tipiche del manager piuttosto che dell’imprenditore;
- la remunerazione del rischio, che riguarda però i fattori produttivi;
- la remunerazione del lavoro.

Il profitto dell’imprenditore di Kirzner remunera invece la capacità dell’imprenditore di cogliere l’opportunità imprenditoriale: si tratta di un momento temporalmente precedente alla effettiva realizzazione dell'impresa sebbene soltanto in questo secondo momento il profitto si concretizza.

L'imperfezione del mercato è origine degli errori e delle informazioni distorte e quindi delle opportunità. Con (Colombatto, 2001):

> L'imprenditore Kirzneriano è, infatti, motivato alla scoperta imprenditoriale dall'esistenza di informazione incompleta o distorta, o costosa. Egli è alla ricerca di tali imperfezioni perché la loro individuazione rende possibile la creazione di ricchezza, parte della quale è almeno temporaneamente appropriabile - il profitto. In altri termini, l'imprenditore di Kirzner non potrebbe esistere se non vi fossero imperfezioni, opportunità non rilevate di miglioramento e progresso. Laddove questo fosse invece il caso, la scoperta imprenditoriale si esaurirebbe e, se non esistessero vincoli normativi che garantiscono rendite di posizione, i profitti nel settore si azzererebbero.

In questo senso si assisterebbe ad un'economia in cui i concorrenti, in grado di conoscere perfettamente le capacità produttive e le innovazioni dell'impresa, sarebbero in grado di replicarle: il processo di imitazione dell'imprenditore innovatore da parte dei concorrenti descritto da Schumpeter si realizzerebbe quindi immediatamente, annullando quel periodo di tempo in cui l'imprenditore è in grado di trarre profitto dall'innovazione. Se così fosse, in assenza di vantaggi per l'innovatore, non vi sarebbe per questo alcuna ragione per promuovere e recepire qualsiasi progresso.

6.4 Un'ipotesi sulla nascita dell'impresa

Le caratteristiche dell'imprenditore di Kirzner possono essere così riassunte:

- l'attività imprenditoriale si esprime in una serie di scoperte di opportunità di profitto;
- queste opportunità sono date da errori commessi in precedenza e più in generale da imperfezioni, informazioni incomplete o distorte;
- il profitto dell'imprenditore deve essere distinto dalla remunerazione dell'organizzazione dell'impresa o dei fattori produttivi: la remunerazione dell'imprenditore-scopritore riguarda il momento stesso della scoperta, antecedente alla realizzazione concreta dell'attività imprenditoriale.

Se l'informazione gioca un ruolo fondamentale nel favorire la scoperta, si è visto (par. 5.2.4) che sfruttando i "buchi strutturali" si possono ottenere i maggiori vantaggi ai minori costi, a condizione di accettare la validità della forma dei rapporti interpersonali descritta dalle reti sociali (par. 4.2). E' stata inoltre avanzata l'ipotesi che la presenza di legami a-spaziali tra gli attori produca grandi benefici in termini di capacità di diffusione delle informazioni e in generale di facilità di accesso ai nodi della rete (par. 4.4).

Tutto questo non è comunque sufficiente: le opportunità devono essere trasformate in profitto attraverso il comportamento attivo dell'imprenditore, che viene a conoscenza di una opportunità e la sfrutta. Le ragioni all'origine di questo comportamento attivo sono state oggetti di studio di sociologi, come l'ipotesi legata all'etica protestante formulata da Max Weber, e di economisti: Schumpeter, ad esempio, individuava fattori psicologici quali il desiderio di potere, di conquistarsi un "regno" personale, di competere per ottenere il successo fine a sé stesso o ancora per il solo piacere di esercitare l'ingegno e creare.

Burt (1992) distingue due generi di motivazione alla base del comportamento imprenditoriale: quelle appena descritte sono motivazioni *"push"*, che l'autore affianca a motivazioni definite *"pull"*.

> There is also a "pull" explanation. Players can be pulled to entrepreneurial action by the promise of success. I do not mean that players are rational creatures expected to calculate accurately and act in their own interest. [...] I mean simply that given two opportunities, any player is more likely to act on the one with the clearer path to success. The clarity of opportunity is its own motivation. As the number of entepreneurial opportunities in a network increases, the odds of some being clearly defined by deep structural holes increases, and therefore the odds of entepreneurial behavior increases.

Le opportunità sono ancora alla base dell'imprenditorialità: in particolare quando un soggetto ha di fronte un'opportunità offerta da un "buco strutturale" particolarmente evidente, il percorso che lega tale opportunità al profitto risulta chiaro e fornisce la motivazione al comportamento imprenditoriale. All'aumentare del numero di *structural holes* in una rete aumenta il numero di opportunità imprenditoriali: questo in particolare si verifica quando un soggetto è in grado, perché psicologicamente o culturalmente spinto all'imprenditorialità, di costruire attorno a sé una rete "ricca di buchi strutturali".

Più in generale, con Burt (1992):

> Networks are more often built in the course of doing something else. If your work, for example, inolves meeting people from different walk of life, your network will end up composed of contacts who without you have no contact with one another. Even so, the network is its own explanation of motive.

La presenza di un "buco strutturale" si trasforma in opportunità imprenditoriale e in profitto se:

- il soggetto ha investito tempo ed energie nel formare un contatto con un altro nodo della rete e nel rafforzare l'entità di tale legame;
- attorno a tale contatto vi sono *structural holes*.

In questo contesto il profitto è correlato alla vicinanza tra i soggetti e alla presenza di "buchi strutturali". In termini di vicinato le relazioni sono tanto forti quanto più i soggetti sono vicini tra loro: in questo contesto investire tempo ed energie nel creare e mantenere un legame con un altro soggetto significa avvicinarsi ad esso. I soggetti entrano quindi in relazione con le fonti di informazione a cui sono più vicini e contribuiscono alla diffusione e all'influenza ed allo stesso tempo la subiscono.

Quando queste relazioni di vicinato non esistono, ma possono essere colmate da un soggetto imprenditore, si ha una forma di "buco strutturale": posizionandosi dove il legame viene a mancare, l'agente-imprenditore può mettere in relazione tra loro due fonti di informazione ed ottenere i benefici di profitto e controllo offerti dai "buchi strutturali".

6.5 Un modello in StarLogo

Le ipotesi appena descritte possono essere modellizzate in StarLogo utilizzando come punto di partenza il modello di diffusione dell'informazione con automi cellulari del par. 4.6.3.

L'informazione, presente sulla scacchiera di StarLogo sotto forma di celle con stato (colore) differente dalle altre, si diffonde secondo le regole degli automi cellulari: a differenza del modello presentato nel par. 4.6.3, che prevedeva relazioni sia "locali" che "globali", in questo caso l'informazione si diffonde esclusivamente attraverso relazioni di prossimità.

Le celle possono essere caratterizzate da due tipi di informazione, identificati dal colore blu e dal colore giallo: all'inizio della simulazione l'informazione è presente in celle con coordinate casuali. Il numero di celle blu o gialle è definito dall'utente per ciascun colore: è così possibile partire da una situazione di "parità" tra un colore e l'altro, di prevalenza di uno rispetto all'altro, ma anche scegliere di esaminare l'evoluzione del modello con un solo tipo di informazione.

Vi sono due possibili vie di diffusione: la prima riguarda le sole relazioni di vicinato, la seconda prevede l'individuazione dei buchi strutturali.

6.5.1 Diffusione per solo vicinato

Nel modello il colore blu o giallo di una cella identifica la presenza di un tipo di informazione tra le due possibili: si può considerare, in analogia con il modello presentato al par. 5.1.1, che si tratti di una particolare tecnolgia che i soggetti possono decidere di adottare.

La diffusione per prossimità avviene secondo regole ad automi cellulari:

ogni cella considera il suo vicinato di von Neumann[4], conta il numero di celle con colore blu oppure giallo e modifica il proprio stato seguendo quello che caratterizza la maggioranza delle celle vicine. Per formalizzare l'accumulo delle influenze (par. 5.1.1) è in ogni caso necessario che almeno due celle del vicinato siano dello stato che assumerà la cella in questione. Poiché le celle del vicinato di Von Neumann sono quattro (più la cella stessa) è abbastanza probabile che si verifichino situazioni di "parità": in questo caso la cella sceglierà casualmente tra lo stato associato al colore blu e lo stato associato al colore giallo.

6.5.2 Individuazione dei buchi strutturali

Si è detto (par. 5.2.3) che si ha un buco strutturale quando due nodi della rete sono potenzialmente collegabili da un legame che può, una volta instaurato, fornire benefici alla rete con il risultato di fornire una relazione aggiuntiva che però non si sovrappone a quelle preesistenti.

Nella metafora degli automi cellulari i legami sono tanto forti quanto più i soggetti sono vicini: ogni cella per determinare il suo stato è influenzata dallo stato delle celle che ne compongono il vicinato, con le quali ha quindi i legami più forti. Quando questi legami vengono a mancare, quando esiste un vicinato che può essere sfruttato per migliorare la diffusione dell'informazione a livello del sistema nel suo complesso, si ha un buco strutturale. Nel modello i buchi strutturali vengono individuati dalle celle seguendo regole ad automi cellulari, secondo la casistica della figura 6.1 in cui la cella tratteggiata al

[4]si veda anche par 1.2

centro è il buco strutturale determinato dalle due celle colorate in cui è presente l'informazione.

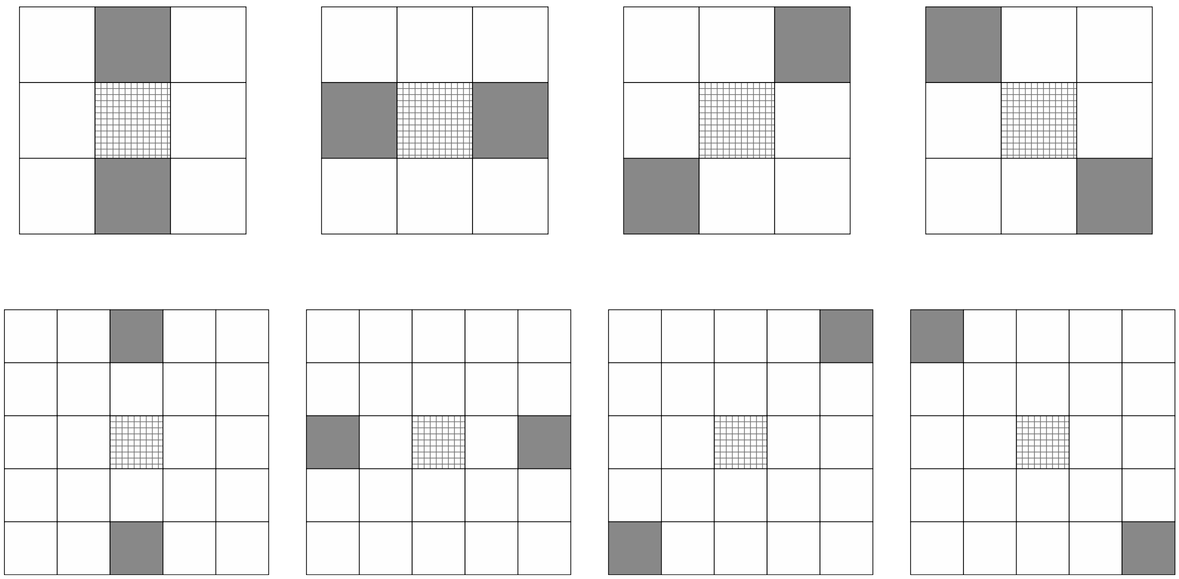

Figura 6.1: Individuazione dei buchi strutturali

In relazione alle caratteristiche della scacchiera e alla disposizione delle celle di stati-colori diversi, una particolare configurazione della presenza dell'informazione nelle celle può ricadere in più di uno dei casi presentati. Inoltre può darsi che un "buco strutturale" sia determinato contemporaneamente da celle caratterizzate dall'una e dall'altra tecnologia: in questo caso vale la regola che favorisce la maggioranza e che in caso di "parità" determina casualmente lo stato da assumere.

In base alle regole appena descritte ad ogni intervallo di tempo le celle che rientrano nelle casistiche dei "buchi strutturali" avranno colore rosso per l'informazione di tipo blu e colore marrone per l'informazione di tipo giallo.

L'individuazione dei "buchi strutturali" così definiti avviene a livello locale con le regole definite per le celle ed applicate dalle medesime, indipendentemente dall'evoluzione globale del sistema: questa caratteristica permette di affermare che si tratta di un modello con automi cellulari.

6.5.3 L'imprenditore e la scoperta

Fin'ora sono state descritte le regole che riguardano le celle della scacchiera, che nel linguaggio di StarLogo sono definite *patches*.

Gli agenti che si muovono sulla scacchiera, le "tartarughe", sono in numero definito dall'utente e si muovono in direzione casuale ed al massimo di un passo alla volta. Ad ogni passo le tartarughe verificano il colore della cella in cui si trovano: se lo stato della cella individua un buco strutturale (è di colore rosso o marrone) l'agente ha compiuto una scoperta.

Una volta effettuata la scoperta l'agente è, nella metafora del modello, un imprenditore: se il buco strutturale corrisponde ad esempio alla tecnologia blu, la "tartaruga" colorerà di blu la cella su cui si trova ed altre cinque celle in direzione casuale, contribuendo così a colmare il buco strutturale e a diffondere l'informazione blu.

Prima ancora l'agente "scopritore" colora di nero cinque celle, sempre in direzione casuale: in questo modo si introduce nel modello una formalizzazione di due fenomeni legati all'attività dell'imprenditore. In primo luogo l'utilizzazione di risorse e informazioni per realizzare la produzione; inoltre colorando di nero alcune celle si creano i presupposti per nuovi buchi strutturali e per nuove scoperte: si tratta degli errori commessi dagli imprenditori descritti da Kirzner (par. 6.2).

Nel modello di Kirzner l'imprenditore ottiene un profitto che è legato al momento della scoperta: anche nella simulazione in StarLogo gli agenti ottengono un profitto al momento della scoperta, sotto forma di un incremento di 100 della variabile *bez* per l'intervallo di tempo successivo. Il ruolo della variabile è cruciale perché definisce il numero di passi casuali che ciascun agente può compiere sulla scacchiera per ogni unità di tempo: maggiore è il numero dei passi, maggiori sono le possibilità per l'agente di scoprire un "buco strutturale". La quantità di passi "spesa" dall'agente corrisponde al suo investimento nello stabilire le relazioni con l'ambiente che lo circonda: questa è l'attività tipica dell'imprenditore e per questo motivo si suppone che l'agente-imprenditore investa tutto il profitto eventualmente ottenuto nel periodo precedente fino ad esaurirlo completamente nella "ricerca" nel caso in cui non trovi alcuna opportunità, o per sfruttare l'opportunità imprenditoriale nel caso in cui scopra un "buco strutturale". In ogni caso all'inizio di ogni intervallo di tempo tutti gli agenti sono dotati di un valore minimo di 1 per la variabile *bez*.

Si può affermare che gli agenti, per la loro limitata capacità di movimento e per il fatto che sono in grado di conoscere solo lo stato della cella su cui si trovano, sono caratterizzati da conoscenza imperfetta: anche questo aspetto del modello è in analogia con la teoria dell'imprenditore di Kirzner (Kirzner, 1997).

6.5.4 Il modello al lavoro

In figura 6.2 è riportata la schermata del modello appena esposto, "tradotto" in StarLogo: il codice del programma è presentato nell'appendice a questo capitolo. Alla sinistra della consueta scacchiera, dove sono visualizzati i movimenti degli agenti e gli stati delle celle, vi sono i bottoni che permettono

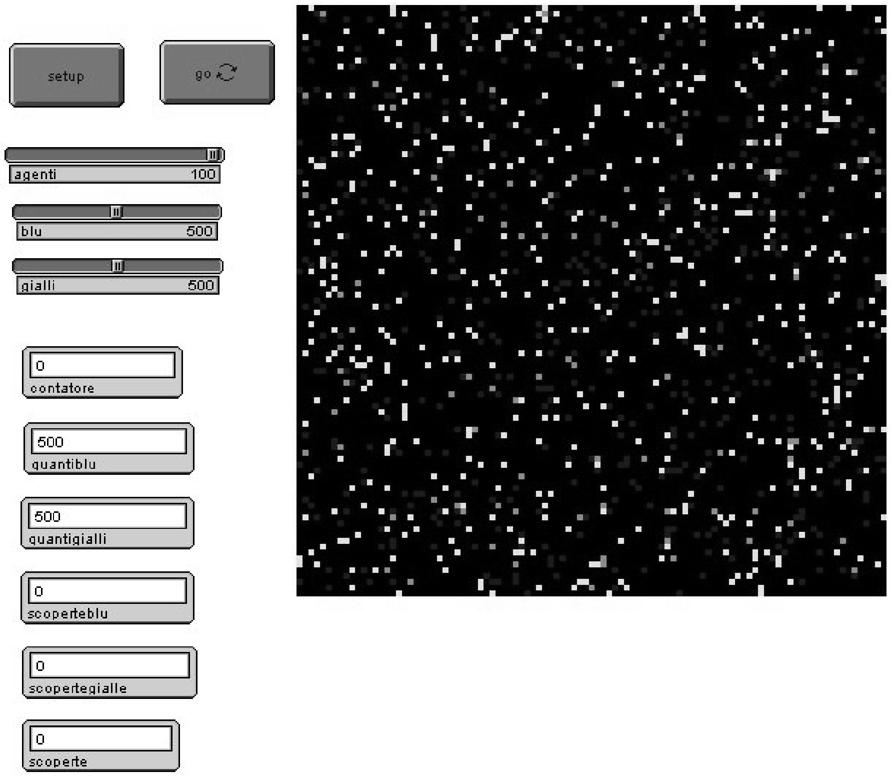

Figura 6.2: StaLogo: la scacchiera è inizializzata ed il modello è pronto

di inizializzare e far funzionare il modello, gli *slider* che consentono all'utente di definire le variabili rilevanti per l'inizializzazione e alcuni *monitor* che mostrano il numero di passi, di celle blu o gialle, di scoperte totali e suddivise per tipologia di informazione. Un grafico mostra l'andamento del numero di celle blu o gialle e delle rispettive scoperte rispetto al tempo.

Nelle pagine seguenti sono esposti i risultati delle simulazioni condotte con diverse ipotesi per i parametri del modello.

Una prima ipotesi è distribuire gli stati delle celle in condizione di assoluta parità: a parità di agenti (100) si possono ad esempio impostare 500 celle blu e 500 gialle oppure 100, 300 o 1000 celle di entrambi i colori. Fin dai primi passi vengono individuate un gran numero di opportunità che vengono quindi facilmente “scoperte” dagli agenti: le celle con colore giallo o blu tendono quindi a moltiplicarsi piuttosto velocemente, da un lato a causa della dinamica di diffusione per prossimità, dall’altro per l’azione degli agenti “scopritori”. Dopo circa 60 passi l’informazione ha raggiunto la quasi totalità delle celle; inoltre si assiste ad una tendenza delle celle dello stesso colore ad aggregarsi, nel senso che l’informazione blu o gialla non è più diffusa su tutta la scacchiera, ma si formano vaste zone di celle dello stesso colore (fig. 6.3).

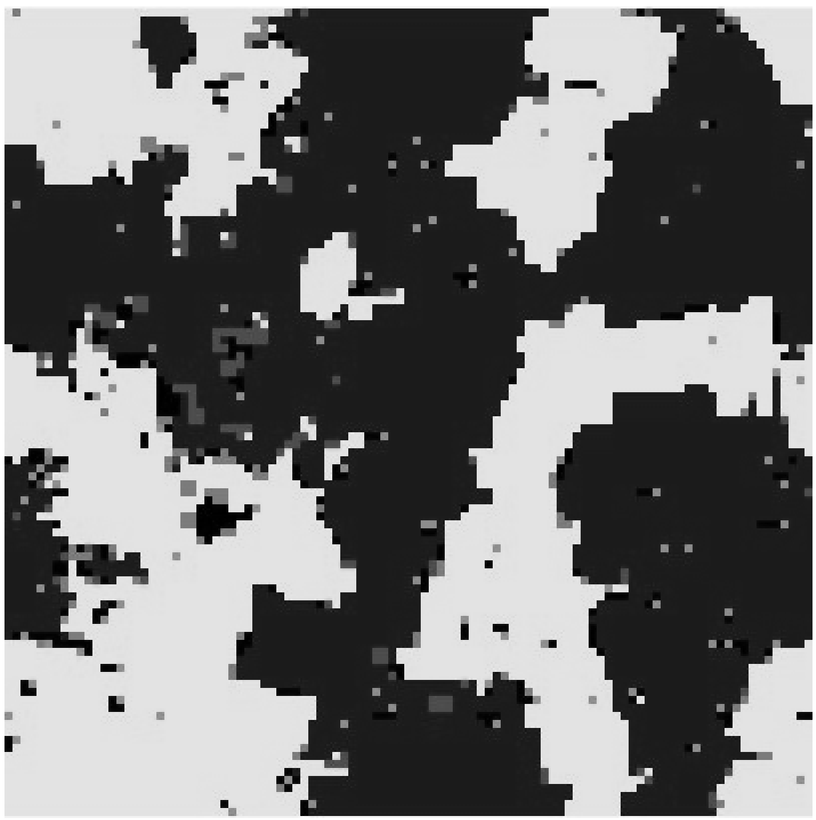

Figura 6.3: StaLogo: stato delle celle dopo 64 passi

In questa fase dell’evoluzione del modello assume grande importanza l’ipotesi che prevede che gli agenti, una volta effettuata la scoperta, utilizzino una parte delle informazioni disponibili localmente modificando lo stato di alcune celle che diventano nere (indicando quindi l'assenza di informazione). Queste celle hanno un ruolo cruciale nel mantenere un certo grado di variabilità nel modello e permettere il manifestarsi di nuove opportunità e di conseguenza di nuove scoperte: nella metafora dell'imprenditore di Kirzner si tratta degli errori commessi dagli imprenditori, errori che una volta scoperti e corretti si trasformano in opportunità d'impresa. In conseguenza di questo fenomeno, quando l'informazione è diffusa in tutte le celle, il numero di scoperte supera necessariamente il numero di celle blu o gialle (fig. 6.4).

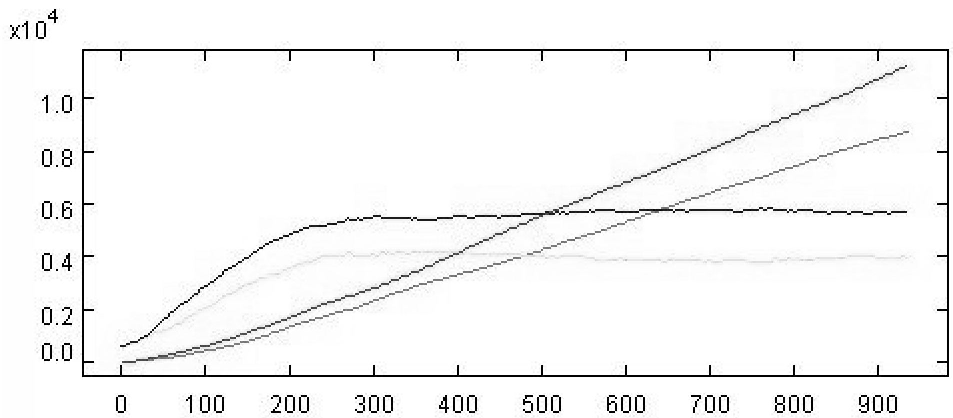

Figura 6.4: StaLogo: celle in cui è presente l'informazione e "scoperte" rispetto al tempo

Nel lungo periodo vi sono due possibili tendenze per l'evoluzione del modello, verificate per circa 3500, 5500 e 13000 passi.

- Una tecnologia (quindi un colore caratteristico delle celle) "prende il sopravvento" fino a caratterizzare la totalità delle celle;

- Le due tecnologie "convivono" in una sorta di stato stazionario apparente: in questo caso può darsi che uno stato caratterizzi la grande maggioranza delle celle, mentre l'altro stato "resista" solo in una minoranza che si presenta aggregata in una specifica zona della scacchiera (fig. 6.5).

Figura 6.5: StaLogo: esempio di evoluzione dopo 13937 passi

In una seconda serie di simulazioni si utilizza un solo tipo di informazione, presente inizialmente in un numero di celle variabile tra 100 e 1000. In questa forma il modello non descrive più le dinamiche di diffusione e competizione tra due tipi di tecnologia, ma si concentra sui soli processi diffusivi. A seconda del numero di agenti e del numero di celle in cui è inizialmente presente l'informazione la dinamica è più o meno veloce, ma nel lungo periodo il modello converge ad una condizione in cui il segnale si diffonde in tutte le celle. Se all'inizio vi sono, ad esempio, solo 100 celle "colorate", saranno necessari in media 8000 passi perché la diffusione sia completa; se invece si parte con l'informazione già presente in 1000 celle saranno necessari solo circa 100 passi. Quando l'informazione è presente in tutte le celle della scacchiera non vi saranno più "scoperte" perché l'assenza di celle nere (in cui quindi non vi è informazione) impedirà la formazione di "buchi strutturali" e conseguentemente di opportunità di scoperta. Durante gli ultimi passi della simulazione, prima che la diffusione sia completa, si nota che vi è ancora una possibile causa di variabilità dovuta al fatto che alcuni agenti "scoprono" alcuni buchi segnalati dalla scacchiera e conseguentemente utilizzano una parte delle informazioni presenti nelle celle (colorandole di nero). Questo fenomeno dipende dalla posizione degli agenti: se le celle evidenziano la presenza di un "buco strutturale" e uno degli agenti si trova abbastanza vicino ad esso (ovvero ha investito nell'intrattenere relazioni con il gruppo di celle in questione) vi sono probabilità che la scoperta avvenga, altrimenti le celle nere "superstiti" vengono immediatamente coinvolte grazie all'influenza delle celle vicine. In questo esempio il numero di scoperte ed il numero di celle in cui è presente l'informazione procedono sostanzialmente di pari passo (fig. 6.6).

6.6 Locale e globale

Il comportamento del modello è il risultato dell'interazione, ad ogni intervallo di tempo, di due "livelli":

- le celle, caratterizzate dalle regole di diffusione e di individuazione dei "buchi strutturali" ad automi cellulari;

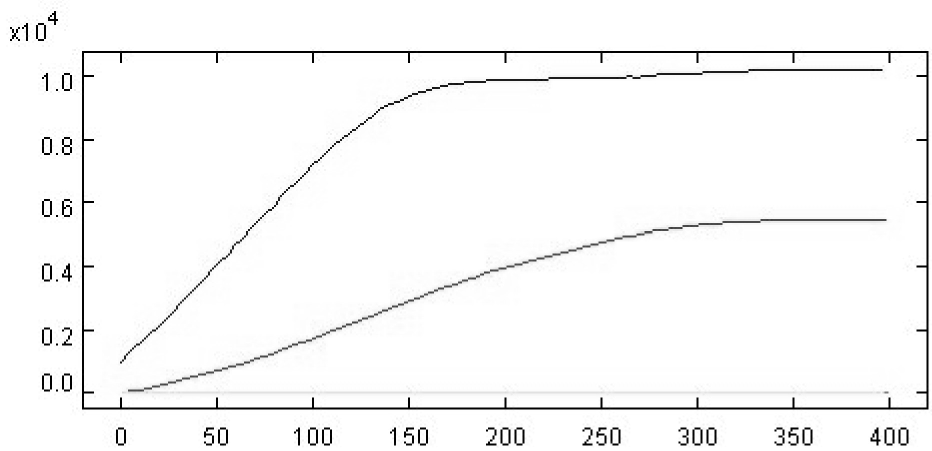

Figura 6.6: StaLogo: celle in cui è presente l'informazione e "scoperte" rispetto al tempo

- gli agenti, impegnati nella ricerca dei "buchi strutturali".

Si può affermare che il "primo livello" costituito dalla scacchiera è il supporto per gli agenti, che costituiscono il "secondo livello" (fig. 6.7): per come è definito il modello è la scacchiera che in un primo tempo influenza gli agenti, mentre solo in un secondo momento (quello della scoperta) sono invece gli agenti a condizionare lo stato delle celle. La presenza dell'informazione (o dei "buchi strutturali") è una proprietà specifica delle celle, che sono in grado di individuare e sviluppare autonomamente le dinamiche relative ai propri stati; il compito degli agenti è solo di scoprire i "buchi strutturali", contribuire (molto marginalmente) alla diffusione dell'informazione e al fattore di disturbo rappresentato dalle celle che vengono colorate di nero, annullando l'eventuale presenza di informazione acquisita in precedenza.

Il ruolo degli agenti è quindi del tutto secondario e subordinato a quello delle celle: trasferire tra le regole di queste ultime quanto definito per gli

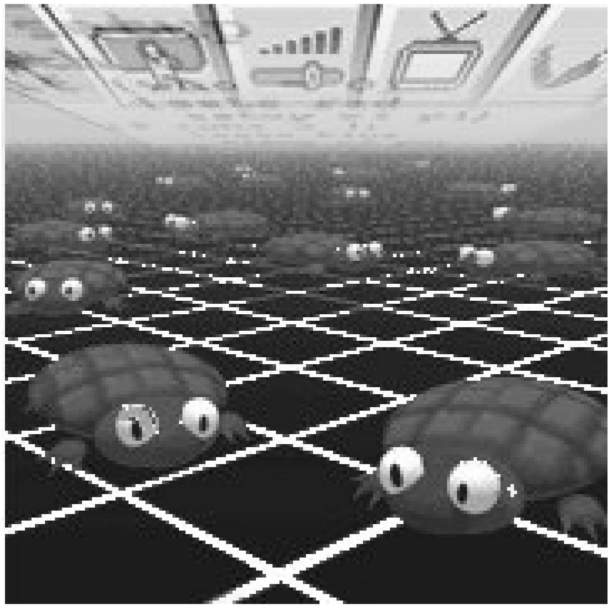

Figura 6.7: Il livello delle celle e il livello degli agenti (dal logo di StarLogo 1.2.2)

agenti riguardo al momento della scoperta potrebbe portare agli stessi risultati. Si tratterebbe quindi di costruire un modello in cui tutte le regole sono definite per le celle, ottenendo una simulazione esclusivamente ad automi cellulari: StarLogo non sarebbe probabilmente sufficiente perché le procedure sono definibili, sia per le celle sia per le "tartarughe", sino ad un livello non troppo elevato di complicazione.

Nonostante questi limiti, il modello presenta comunque alcune caratteristiche che permettono di definirlo "ad automi cellulari": anzitutto la rilevanza del ruolo delle celle, di cui si è appena trattato.

Inoltre si può sottolineare la relazione tra il livello locale ed il livello globale del modello. Il primo è costituito dalle celle e dagli agenti: ad ogni intervallo di tempo ciascuno di essi conosce lo stato della piccola porzione del “mondo” che costituisce il suo vicinato. Le celle considerano infatti un intorno composto da altre otto celle per le dinamiche di diffusione e un intorno di 24 celle per l’individuazione dei buchi strutturali; gli agenti possono invece conoscere lo stato soltanto della cella in cui si trovano, salvo il fatto di “esplorarne” diverse (ma sempre raggiungibili con percorsi di al massimo un passo, cioè una cella) per ogni intervallo di tempo. Il livello globale del modello è invece costituito dal risultato d’insieme, in cui si osservano fenomeni di diffusione ad ampio raggio e di aggregazione, oltre che comportamenti di stabilità nel lungo periodo.

Ciascuna cella (e ciascun agente) conosce solo la parte del “mondo” che le è immediatamente vicina e le regole di interazione prevedono solo comportamenti di prossimità, locali: in “aggregato”, dall’interazione di ciascun soggetto locale con un altro soggetto locale, si ottiene un comportamento d’insieme che presenta caratteristiche di coerenza. Questo significa che un osservatore “esterno” al modello può prendere in considerazione e descrivere il comportamento d’insieme senza indagare sulla natura e sul risultato dell’interazione fra celle e agenti.

Il modello è quindi descrivibile su tre livelli: il primo è costituito dal comportamento delle celle, il secondo da quello degli agenti e il terzo dal comportamento d’insieme. Tuttavia non si tratta di tre livelli che si sovrappongono, con le celle al livello più “basso” e l’aspetto globale al livello più “alto”: se i comportamenti di celle e agenti possono essere considerati come sovrapposti[5], il comportamento d’insieme non può invece essere considerato come un terzo livello a sua volta sovrapposto al secondo. Esso è invece un

[5]nel senso che l’uno (quello delle celle) influenza l’altro (quello degli agenti) in modo tale che il secondo sia quello più evidente all’osservatore e quindi quello al livello più “alto”

livello a sé stante (fig. 6.8), perché è il risultato dell'interazione di celle e agenti e quindi da questi separato ma non sovrapponibile: la distanza tra il livello (o sistema) celle - agenti e il livello (o sistema) d'insieme è l'elemento di complessità del modello.

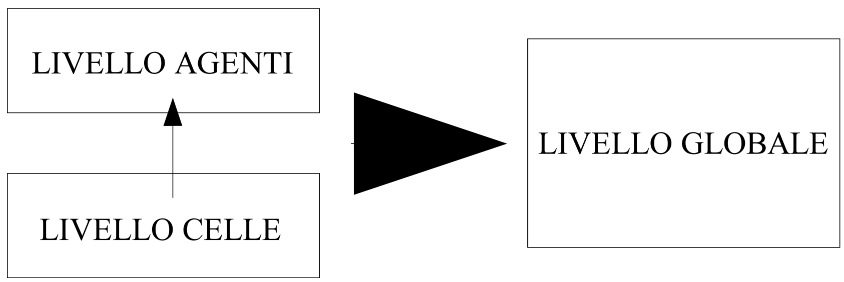

Figura 6.8: L'elemento di complessità del modello

6.7 Reti e impresa

Fino ad ora la metafora della rete è stata utilizzata per descrivere le relazioni tra i soggetti in generale e più nello specifico quelle relazioni che permettono la circolazione delle informazioni. In particolare i soggetti "protagonisti" del modello esposto nei paragrafi precedenti sono gli imprenditori e quindi, in estensione, le imprese.

Alcune tra le osservazioni dei paragrafi precedenti possono essere trasportate ad una dimensione *micro*, ovvero con riferimento a ciascuna impresa se questa viene considerata come un'architettura reticolare. Si ipotizza che l'impresa sia composta da un certo numero di unità produttive, ciascuna in grado di realizzare una parte della produzione, che nel loro insieme sono in grado di rispondere coerentemente agli *input* provenienti dall'esterno. E' necessario, soprattutto per quanto concerne la circolazione delle informazioni, un certo grado di coordinamento tra le unità che possono comunque essere considerate anche nella loro autonomia: la metafora della rete può essere applicata a questo modello, in cui ciascuna unità è un nodo e i legami tra i nodi permettono il passaggio di informazioni e fattori produttivi.

In Terna (2002b) è descritto il modello jVE (*Java Virtual Enterprise*) di simulazione di impresa in cui l'azienda è composta da unità produttive ciascuna in grado di compiere un passo della produzione: gli ordini relativi ai beni da produrre sono formalizzati tramite sequenze di numeri, ciascuno dei quali rappresenta un passo da compiere per la realizzazione dell'ordine in questione. Gli ordini sono gestiti in modo decentrato da ciascuna unità, che riceve e trasmette l'intera sequenza numerica che contiene le operazioni già concluse e le operazioni ancora da compiere. Una volta completata l'operazione che le spetta, ciascuna unità deve prendere decisioni relative alla trasmissione dell'ordine tenendo conto anche dell'esigenza di facilitare le decisioni dell'unità di destinazione: il coordinamento tra le unità e la circolazione delle informazioni, in termini di formazione delle scorte, condivisione di risorse, gestione delle sequenze di attività, è un aspetto cruciale per il buon funzionamento dell'impresa.

Nel contesto di un'impresa così organizzata assume grande importanza la forma delle relazioni tra le unità: queste potrebbero ad esempio essere coordinate in modo "rigido", con una sequenza predeterminata di eventi e di passaggi di informazioni. Tuttavia potrebbe essere possibile un coordinamento realizzato attraverso una forma alternativa di relazioni che sfruttino i "buchi strutturali" esistenti tra le unità con il risultato di un'organizzazione più efficiente. In questo caso i "buchi strutturali" possono individuare momenti di discontinuità nella circolazione dell'informazione tra i soggetti interni all'impresa (o a un gruppo di imprese che collaborano a un particolare prodotto o progetto): se i "buchi" vengono colmati stabilendo legami adeguati si possono ottenere miglioramenti della capacità produttiva o innovazioni di processo.

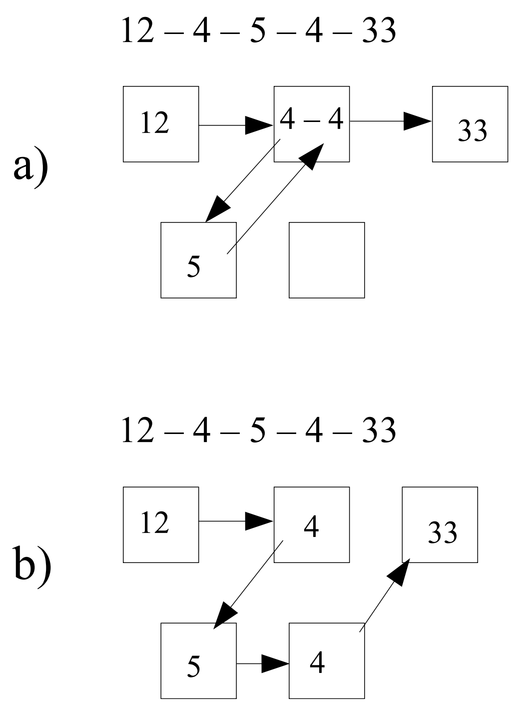

Figura 6.9: Un esempio di "buco strutturale"

L'esempio in figura 6.9 utilizza la formalizzazione del modello jVE: le unità rappresentate dai quadrati devono eseguire un ordine sotto forma di sequenza numerica (12 - 4 - 5 - 4 - 33). Nell'ipotesi "a", la ricetta viene assegnata ad una prima unità che si incarica della produzione "12" e passa l'informazione alla successiva che, dopo essersi presa carico della produzione "4" passa a sua volta l'ordine. La terza unità produce "5" e rimanda l'ordine a quella da cui l'aveva ricevuto: a questo punto avremo un'unità che dovrà completare due passi della produzione (4 - 4) prima di completare l'ordine con "33". Nell'ipotesi "b", invece, la terza unità è collegata ad un'unità che nell'ipotesi precedente non era stata presa in considerazione: in questo modo ciascuna unità ha l'incarico di compiere una fase della produzione e non si corre il rischio di creare "code" che possono rallentare i tempi dell'intero processo produttivo.

In questo semplice esempio un'unità incaricata dell'assegnazione ad un'altra di un passo della produzione può determinare un miglioramento dell'efficienza dell'organizzazione d'insieme se è in grado di sfruttare un legame con un'altra unità che era precedentemente "nascosto", se è in grado cioè di individuare e sfruttare un "buco strutturale".

6.8 I rapporti tra la rete e le scoperte

Il problema di quantificare e verificare empiricamente lo spirito imprenditoriale è espresso da Colombatto (2001):

> Definire lo spirito imprenditoriale è certamente opera non agevole; e ancora più difficile è tentare di quantificarlo. Ciò sarebbe un ostacolo di non poco conto a eventuali tentativi di verifica empirica, i quali richiederebbero una scomposizione della remunerazione della scoperta imprenditoriale - il profitto Kirzneriano - nelle remunerazioni delle due diverse componenti che contribuiscono a tale scoperta: la alertness e lo spirito imprenditoriale, cui contribuiscono le dotazioni di capitale finanziario, di capitale fisso, di know-how e lavoro più o meno qualificato, di qualità organizzative e commerciali proprie dell'individuo.

Si è detto (par. 6.3 e par. 6.5.3) che il profitto dell'imprenditore corrisponde alla remunerazione della scoperta, momento che precede ed è distinto dall'attività produttiva e manageriale. Nel modello proposto nei paragrafi precedenti le scoperte sono il risultato del movimento casuale degli agenti, che esplorano la scacchiera individuando le eventuali opportunità segnalate dai "buchi strutturali". Questi ultimi sono una proprietà della scacchiera: infatti vengono individuati autonomamente dalle celle prima ancora che gli agenti-imprenditori possano procedere nella loro "esplorazione". Nel modello proposto la quantificazione dello spirito imprenditoriale (ovvero della capacità di scoperta) può essere considerata come un passaggio successivo alla quantificazione dei "buchi strutturali".

Utilizzando la metafora della rete per descrivere il contesto in cui sono organizzate internamente ed esternamente le imprese (par. 6.7) si possono quantificare alcuni "buchi strutturali"[6] che individuano le possibili scoperte imprenditoriali, determinate dalle opportunità d'impresa oppure dagli errori commessi in precedenza da altri imprenditori. La metafora della rete può essere proposta come una rappresentazione della realtà intelligibile dall'osservatore (si tratta di un modello semplice) attraverso la quale si possono individuare i "buchi strutturali" intesi come origine di alcune opportunità d'impresa.

La spiegazione della scoperta imprenditoriale così proposta prescinde dalle qualità dell'individuo: i "buchi strutturali" precedono la scoperta essendo espressione del contesto in cui operano i soggetti. Le opportunità sono già presenti nel sistema ed è compito dell'imprenditore riuscire ad individuarle. Si tratta quindi di opportunità diverse da quelle descritte da Kirzner:

[6] i più evidenti, oppure utilizzando la terminologia di Burt (1992) i più "profondi"

non sono del tutto nascoste all'osservatore che invece può individuarle intenzionalmente se ha la possibilità di riconoscere un "buco strutturale" o una particolare configurazione della rete che ne può segnalare la presenza o la possibile formazione.

Lo stato di attenzione dell'imprenditore di Kirzner (l'*alertness*) può avere infine origine nel contesto, inteso come la rete sociale in cui il soggetto è inserito: se la rete sociale che gli individui costruiscono attorno a sé attraverso le relazioni e le conoscenze della vita quotidiana rispecchia in qualche modo le loro attitudini, si può ipotizzare che un soggetto dotato di spiccate qualità imprenditoriali tenda a intrattenere relazioni realizzando una rete ricca di opportunità, intese come "buchi strutturali".

6.9 Considerazioni conclusive e possibili sviluppi futuri

I "buchi strutturali" sono stati proposti nei paragrafi precedenti come strumento per approfondire tre generi di fenomeni:

- la nascita di un'impresa;
- l'organizzazione interna all'impresa;
- l'organizzazione tra imprese diverse.

Le applicazioni riguardanti l'organizzazione dell'impresa e tra imprese diverse sembrano essere più interessanti e meritano possibili approfondimenti futuri, perché possono avere un più agevole riscontro empirico e qualche forma di applicazione pratica. All'interno di un modello di impresa organizzata con unità produttive (par. 6.7) i "buchi strutturali" possono individuare, nell'ipotesi più semplice, l'opportunità di modificare la struttura delle relazioni tra le unità per ottenere risultati migliori in termini di *performance* dell'intera struttura. Se si tratta invece di indagare su come l'organizzazione assuma differenti configurazioni di fronte alla necessità di un cambiamento radicale delle forme di produzione (ad esempio nel caso dell'introduzione di un nuovo prodotto), i "buchi strutturali" possono ad esempio rivelare la necessità di introdurre *ex novo* un'unità ed individuare in quale punto del processo produttivo l'unità debba essere collocata.

L'individuazione a priori dei "buchi strutturali" non sembra essere possibile se non procedendo per tentativi: un modello di simulazione potrebbe invece evidenziare, sotto adeguate condizioni, l'emergenza di nuove unità produttive o di diverse forme di organizzazione.

Appendice A

Quarto capitolo: codice StarLogo

In questa sezione sono riportati e commentati i codici dei programmi in StarLogo del quarto capitolo.

A.1 *SmallWorldsPatches*

Sezione *Observer*.

```
globals [contatore passi quanti]

patches-own [nx ny]

breeds[turtles frogs]
```

Definizioni delle variabili globali (contatore, passi, quanti) e delle variabili dei *patches*.
Definizioni di due tipi di agenti (tartarughe e rane).

```
to setup
```

Inizia la procedura setup.

```
ca
create-frogs beta
create-turtles 1000 - beta
set passi 0
```

Pulisce lo schermo e azzera le variabili, crea *beta* agenti *frogs* e 1000− *beta* agenti *turtles*.

```
ask-turtles[setupturtles]
ask-frogs[setupfrogs]
```

Gli agenti *turtles* eseguono la procedura *setupturtles* e gli agenti *frogs* eseguono la procedura *setupfrgos*.

```
ask-patch-at
random screen-width random screen-height [setpc blue]
```

La casella nella posizione con ascissa e ordinata determinata casualmente tra 0 e l'altezza (o larghezza) dello schermo viene colorata di blu.

```
clearplot
setplot-xmax 600
viewplot
```

Il grafico viene inizializzato, con valore massimo 600 per le ascisse, e visualizzato.

```
end
```

Comando obbligatorio: la procedure *setup* è finita.

```
to go
if (quanti >= 10000) [stopall]
ask-turtles [locale]
ask-frogs [globale]
set quanti count-pc blue
set passi passi + 1
plot quanti
end
```

La procedura *go* viene attivata con un bottone e ripetuta all'infinito, facendo eseguire agli agenti *turtles* la procedura *locale* ed agli agenti *frogs* la procedura globale. All'inizio di ogni esecuzione il programma controlla se la variabile *quanti* (data dal numero di caselle blu) ha superato il valore 10000[1]: in tal caso l'esecuzione è terminata. Il comando *plot* traccia il grafico della variabile *quanti*.

Sezione ***Turtle.***

```
to setupturtles
seth 0
setc white
```

[1]in effetti il numero di caselle è maggiore, ma ho scelto un numero più basso per ridurre gli effetti di distorsione dovuti al fatto che le ultime caselle in cui l'informazione non è presente richiedono molti passi prima di essere raggiunte dal movimento casuale degli agenti

```
setxy random screen-width random screen-height
end

to setupfrogs
seth 0
setc green
setxy random screen-width random screen-height
end
```

Tutti gli agenti prendono la medesima direzione di marcia *seth 0* e sono disposti casualmente sulla scacchiera: gli agenti *turtles* hanno colore bianco, mentre i *frogs* hanno colore verde.

```
to globale
rt random 5 * 90
fd random 2
```

Ogni agente (in questo caso *frogs*) ruota verso destra con angolo determinato casualmente e procede di 0 o 1 casella.

```
set nx random 102
set ny random 102
```

Le variabili *nx* e *ny* hanno valore casuale tra 0 e 101.

```
if ((pc-at nx (ny + 1)) = blue) or ((pc-at (nx + 1) ny) = blue) or
 ((pc-at (nx - 1) ny) = blue) or ((pc-at nx (ny - 1)) = blue)
[stamp blue]
end
```

Ogni agente di tipo “globale” verifica se nel dintorno di Von Neumann delle coordinate definite casualmente vi sono caselle blu: in caso positivo colora di blu la casella su cui si trova realmente.

```
to locale
rt random 5 * 90
fd random 2
if ((pc-at 0 1) = blue) or ((pc-at 1 0) = blue) or
 ((pc-at -1 0) = blue) or ((pc-at 0 -1) = blue)
[stamp blue]
end
```

Ogni agente di tipo “locale” verifica se nel dintorno di Von Neumann della casella in cui si trova vi sono caselle blu: in caso positivo colora di blu la casella.

A.2 *SmallWorldsTurtles*

Sezione *Observer*.

```
globals [contatore passi quanti alpha beta]
breeds[turtles frogs]
turtles-own [nx ny]

to setup
ca
set alpha (beta / 100 * num)
```

```
create-frogs alpha
create-turtles num - alpha
set passi 0
ask-turtles[setupturtles]
ask-frogs[setupfrogs]
create-and-do 1
[setxy random screen-width random screen-height
setc blue]
clearplot
viewplot
end


to go
set quanti count-color blue
set passi passi + 1
plot quanti
if (quanti >= num + 1) [stopall]
ask-turtles [locale]
ask-frogs [globale]
end
```

Il codice è del tutto analogo a quello del programma precedente: in questo caso, però, l'utente definisce il numero di agenti e la percentuale degli stessi di tipo globale, che in precedenza erano fissi il primo e definito in termini assoluti il secondo.

Sezione *Turtle*.

```
to setupturtles
set contatore 0
seth 0
setc white
setxy random screen-width random screen-height
end

to setupfrogs
set contatore 0
seth 0
setc green
setxy random screen-width random screen-height
end


to globale
wait 0
rt random 5 * 90
fd random 2
set nx random 102
set ny random 102
if ((color-at nx (ny + 1)) = blue) or ((color-at (nx + 1) ny) = blue)
or ((color-at (nx - 1) ny) = blue) or ((color-at nx (ny - 1)) = blue)
[setc blue]
```

```
end
```

Anche questa parte di codice è analoga al programma precedente: si differenzia solo per il fatto che in questo caso è l'agente a diventare di colore blu con il comando *setc blue*.

```
to locale
wait 0
rt random 5 * 90
fd random 2
if ((color-at 0 1) = blue) or ((color-at 1 0) = blue) or ((color-at -1 0) = blue)
 or ((color-at 0 -1) = blue)
[setc blue]
end
```

Ogni *turtle* considera il suo vicinato di Von Neumann e diventa di colore blu se lo è almeno una delle vicine.

A.3 *SmallWorldsCA*

Questo programma è descritto nella sola sezione *Observer*, perché agisce solo a livello di *patches* senza in alcun modo coinvolgere gli agenti *turtles*.

Sezione *Observer*.

```
globals [contatore quanti inizio]
patches-own [state conta nx ny]
```

```
to setup

ca

set contatore 0

repeat inizio

[

ask-patch-at

random screen-width random screen-height [set state 1]

]
```

La casella con coordinate determinate casualmente entro le dimensioni della scacchiera assegna valore 1 alla sua variabile *state*: questo viene ripetuto *inizio* volte (definite dall'utente) per caselle diverse.

```
ask-patches

[ifelse (state = 1) [setpc blue] [setpc black]]
```

Tutte le caselle diventano di colore blu se hanno *state* 1 e di colore nero altrimenti.

```
set quanti 0

clearplot

viewplot

end
```

La procedura *setup* comprende i comandi per l'impostazione del grafico.

```
to go

set quanti count-pc blue

plot quanti

if quanti = 10201 [stopall]
```

La variabile *quanti* viene determinata contando il numero di caselle blu, viene disegnata sul grafico ed utilizzata per fermare il programma quando tutta le celle sono di colore blu.

```
ifelse ((random 100) > beta)
```

Se la condizione è verificata esegue la prima serie di comandi tra parentesi quadre, altrimenti esegue la seconda serie di comandi tra parentesi quadre. L'utente seleziona la percentuale *beta* di attori globali: se il numero generato casualmente è maggiore di beta si eseguono i comandi per le interazioni locali, altrimenti si eseguono le interazioni globali.

```
 [
ask-patches
[
ifelse (pc > 0 )
[set state 1]
[set state 0]]
```

Se il colore della casella è diverso dal nero (che corrisponde al numero 0) la variabile *state* avrà valore 1.

```
nsum4 state conta
```

Ogni cella esegue la somma dei valori della variabile *state* per il suo vicinato di Moore e assegna il risultato alla variabile *conta*.

```
ask-patches[
if (conta >= 2)
```

```
[set state 1]
if (state = 1)
[setpc blue]
if (state = 0)
[setpc black]
]
]
```

Tutte le celle modificano la variabile *state* a 1 se il valore della variabile *conta* è maggiore o uguale a 2; quindi assumono colore blu se hanno *state* 1 e colore nero se hanno *state* 0.

```
[
ask-patches
[
ifelse (pc > 0 )
[set state 1]
[set state 0]
]
create-and-do inizio
[setxy random screen-width random screen-height
if ((pc-at xcor (ycor + 1)) = blue) or ((pc-at (xcor + 1) ycor) = blue)
or ((pc-at (xcor - 1) ycor) = blue) or ((pc-at xcor (ycor - 1)) = blue)
[stamp blue]
die]
]
set contatore contatore + 1
```

```
end
```

Nel caso in cui siano attivate le relazioni globali vengono create e disposte casualmente sulla scacchiera un numero di tartarughe pari al numero di celle inizialmente colorate di blu. Ogni tartaruga verifica se nel suo vicinato di Moore esiste almeno una casella blu e in tal caso colora di blu la cella su cui si trova; eseguita tale procedura le tartarughe scompaiono.

Appendice B

Quinto capitolo: codice StarLogo

In questa sezione è riportato e commentato il codice del programma in StarLogo del quinto capitolo.

B.1 Modello di diffusione dell'innovazione

Sezione *Observer*.

```
globals [passi quanti]
turtles-own [conta]
```

Dichiarazione delle variabili globali (contatore, passi, quanti) e delle variabili delle *turtles* (conta). Le variabili nel programma sono:

– *phi*, indica il numero di soggetti innovatori che devono essere presenti nel vicinato di un agente perché questo adotti l'innovazione; è definita dall'utente;

– *number*, indica il numero di agenti nella simulazione; è definita dall'utente;

– *innovatori*, indica il numero di agenti che hanno già adottato l'innovazione all'inizio della simulazione; è definita dall'utente;

– *passi*, conta il numero di passi, cioè il tempo trascorso nella simulazione;

– *quanti*, conta il numero di agenti che hanno adottato l'innovazione;

– *conta*, viene utilizzata dalle *turtles* per contare quanti vicini hanno adottato l'innovazione.

```
to setup
ca
crt number - innovatori
ask-turtles [setup]
```

La procedura *setup* crea un numero di tartarughe pari al valore *number* definito dall'utente meno il numero di innovatori iniziali, sempre definito dall'utente con la variabile *innovatori*.

```
create-and-do innovatori
[setxy random screen-width random screen-height
setc blue]
```

Vengono create $n = innovatori$ tartarughe che si posizionano casualmente sullo schermo e prendono colore blu.

```
clear-plot
```

```
view-plot
setplot-xmax 1000
end
```

Viene inizializzato il grafico.

```
to go
if quanti >= number [stopall]
ask-turtles[procedura]
```

La procedura *go* è attivata dall'utente con l'apposito bottone e fa eseguire alle tartarughe la procedura *procedura*: quando tutti gli agenti sono di colore blu il programma si ferma.

```
set quanti count-color blue
plot quanti
set passi passi + 1
end
```

Alla variabile *quanti* viene assegnato il numero delle tartarughe blu e viene disegnata sul grafico. Viene inoltre incrementata di una unità la variabile *passi* che conta il tempo trascorso nella simulazione.

Sezione ***Turtle.***

```
to setup
seth 0
setc white
setxy random screen-width random screen-height
end
```

La procedura *setup* posiziona le *turtles* casualmente sulla scacchiera, definendone la direzione di marcia ed il colore (bianco).

```
to procedura
rt random 5 * 90
fd random 2
```

Gli agenti si muovono casualmente (per la direzione e il passo) sulla scacchiera.

```
set conta 0
if ((color-at 1 1) = blue)
[set conta conta + 1]
if ((color-at 1 0) = blue)
[set conta conta + 1]
if ((color-at 1 -1) = blue)
[set conta conta + 1]
if ((color-at 0 1) = blue)
[set conta conta + 1]
if ((color-at 0 -1) = blue)
[set conta conta + 1]
if ((color-at -1 1) = blue)
[set conta conta + 1]
if ((color-at -1 0) = blue)
[set conta conta + 1]
if ((color-at -1 -1) = blue)
[set conta conta + 1]
```

```
if conta >= phi
[setc blue]
end
```

Ogni agente esamina il suo vicinato di Moore ed aumenta di una unità la varabile *conta* per ogni vicino di colore blu: se il valore di *conta* è maggiore o uguale al valore del parametro ϕ definito dall'utente, l'agente diventa di colore blu.

Appendice C

Sesto capitolo: codice StarLogo

In questa sezione è riportato e commentato il codice del programma in StarLogo del sesto capitolo. Per questa applicazione è stato utilizzata la versione 2.0 di StarLogo, disponibile da agosto 2002 al sito http://education.mit.edu/starlogo.

C.1 Modello di diffusione dell'innovazione con buchi strutturali

Sezione *Observer*.

```
globals [contatore quantiblu scoperte quantigialli scoperteblu scopertegialle
diffblu diffgiallo]
patches-own [state contablu contagiallo tempblu tempgiallo scelta]
turtles-own [bez tros temp]
```

Dichiarazione delle variabili globali (contatore, quantiblu, inizio, scoperte, quantigialli, scoperteblu, scopertegialle, diffblu, diffgiallo), delle variabili delle *turtles* (bez, tros, temp) e dei *patches* (state, contablu, contagiallo, tempblu, tempgiallo, scelta). Le variabili nel programma sono:

- *contatore*, conta i passi (il tempo trascorso) durante l'esecuzione del programma;
- *quantiblu*, conta il numero di celle blu;
- *quantigialli*, conta il numero di celle gialle;
- *scoperte*, conta il numero di "scoperte";
- *scoperteblu* e *scopertegialle*, contano il numero di "scoperte" che danno origine ad una produzione rispettivamente blu o gialle;
- *blu* e *gialli*, indicano il numero di celle che devono essere colorate di blu e di giallo al momento dell'inizializzazione della scacchiera; sono definite dall'utente;
- *diffblu* e *diffgiallo*, contano la differenza tra le celle richieste blu o gialle dall'utente (*blu* e *gialli*) e quelle effettivamente colorate di blu o giallo durante la selezione casuale; la procedura sarà precisata in seguito;
- *agenti*, indica il numero di agenti nella simulazione; è definita dall'utente;
- *state*, utilizzata nell'assegnazione casuale dei colori alle celle durante l'inizializzazione, può assumere valore 0 (nero), 1 (blu) oppure 2 (giallo);
- *contablu*, *contagiallo*, *tempblu*, *tempgiallo* e *scelta* vengono utilizzate nelle procedure di definizione dei colori delle celle;

– *bez*, indica il numero di passi (per un'unità di tempo) a disposizione di ciascuna *turtle* per il movimento sulla scacchiera; corrisponde all'investimento in relazioni effettuato da ogni agente;

– *tros*, serve ad incrementare di 100 il numero *bez* di passi a disposizione degll'agente nel caso in cui questo abbia effettuato una scoperta; l'incremento avrà effetto nel periodo successivo.

```
to setup
ca
```

La procedura *setup* prevede anzittutto l'inizializzazione di tutte le variabili e la pulizia dello schermo.

```
repeat blu
[
ask-patch-at
random screen-width random screen-height [set state 1]
]

repeat gialli
[
ask-patch-at
random screen-width random screen-height
[set state 2]
]
```

Il comando *repeat* ripete le istruzioni tra parentesi quadre tante volte quante definite dalla variabile, in questo caso *blu* o *gialli*. Le istruzioni tra parentesi quadre scelgono una cella a caso e le assegnano stato 1 oppure 2.

```
ask-patches
[ifelse (state = 1) [setpc blue] [setpc black]]
```

Se lo stato della cella è 1 il colore della medesima è definito blu; altrimenti il colore è nero.

```
ask-patches
[if (state = 2) [setpc yellow]]
```

Se lo stato della cella è 2 il colore è definito giallo.

```
set quantiblu count-pc blue
set quantigialli count-pc yellow


set diffblu (blu - quantiblu)
set diffgiallo (gialli - quantigialli)
```

Dopo l'assegnazione casuale delle celle blu e gialle, le stesse vengono contate dalle variabili *quantiblu* e *quantigialli*; quindi le variabili *diffblu* e *diffgiallo* calcolano la differenza tra le celle richieste blu o gialle dall'utente e il numero di celle effettivamente presenti sulla scacchiera di colore blu o giallo. Questa operazione e una parte dei comandi che seguono sono necessari affinché il risultato dell'inizializzazione della scacchiera sia corrispondente a quanto richiesto dall'utente: infatti, nella definizione casuale può capitare che il numero sia minore. Poiché il programma seleziona casualmente la cella cui assegnare stato 1 o 2, può accadere che la stessa cella venga selezionata due volte con il risultato di ottenere un numero minore di celle di un determinato colore rispetto a quanto richiesto: questo accorgimento è indispensabile ad esempio se si vuole partire da una condizione iniziale in cui esattamente metà celle siano di un colore e metà dell'altro. Una piccola differenza, data l'importanza della condizione iniziale sull'evoluzione del sistema, può falsare notevolmente i risultati.

```
create-and-do diffblu
[setxy random screen-width random screen-height
loop
[if (pc = black)
 [stamp blue
die]
fd 1
]
]


create-and-do diffgiallo
[setxy random screen-width random screen-height
loop
[if (pc = black)
 [stamp yellow
die]
fd 1
]
```

```
]
```

Una possibile soluzione del problema appena esposto è creare tante tartarughe quante sono le celle ancora da colorare di blu o giallo e posizionarle in coordinate casuali. E' ancora possibile che la cella su cui si trova ora la tartaruga sia già colorata; per questo, utilizzando il comando *loop* si ripetono i seguenti comandi:

1. se il colore della cella è nero, la *turtle* la colora di blu (giallo) e quindi scompare[1];

2. se il colore della cella non è nero, la tartaruga fa un passo avanti: in questo caso (i comandi sono all'interno di un ciclo) si ritorna al comando 1).

```
set quantiblu count-pc blue
set quantigialli count-pc yellow
```

Finalmente si contano il numero di celle blu e gialle, per visualizzarne il numero corretto all'utente dopo l'inizializzazione del programma

```
crt agenti
ask-turtles [setupturtles]
```

Si creano un numero di tartarughe pari a *agenti*, che devono quindi eseguire i comandi specificati nella procedura *setupturtles*.

[1]per far scomparire la tartaruga in StarLogo si utilizza il comando *die* che, sebbene sia un po' macabro, rende bene l'idea

```
clearplot
setplot-title ""
setup-graph
viewplot
end
```

La procedura *setup* si conclude con alcuni comandi relativi al grafico.

– *clearplot* inizializza il grafico;

– *setplot-title* assegna un titolo al grafico, che per l'inizializzazione corrisponde ad un campo vuoto;

– *stup-graph* rimanda ad una procedura specifica di inizializzazione del grafico;

– *viewplot* apre la finestra del grafico.

```
to go
set quantiblu count-pc blue
set quantigialli count-pc yellow
graph
```

Inizia la procedura *go*: si esegue il conto delle celle blu e gialle e viene attivata la procedura *graph*.

```
ask-patches
```

Tutti i comandi che seguono sono inseriti all'interno di un comando *ask-patches*: dalla sezione *observer* non è infatti possibile esegure comandi specifici delle celle.

```
[
set contablu 0
set contagiallo 0

if ((pc-at 0 1) = blue)
[set contablu contablu + 1]
if ((pc-at 0 -1) = blue)
[set contablu contablu + 1]
if ((pc-at -1 0) = blue)
[set contablu contablu + 1]
if ((pc-at 1 0) = blue)
[set contablu contablu + 1]

if ((pc-at 0 1) = yellow)
[set contagiallo contagiallo + 1]
if ((pc-at 0 -1) = yellow)
[set contagiallo contagiallo + 1]
if ((pc-at -1 0) = yellow)
[set contagiallo contagiallo + 1]
if ((pc-at 1 0) = yellow)
[set contagiallo contagiallo + 1]
```

Le variabili *contablu* e *contagiallo* vengono azzerate. La procedura prevede quindi che ogni cella conti il numero di celle vicine (in orizzontale e in verticale) di colore blu (giallo) ed assegni il risultato alla variabile *contablu* (*contagiallo*).

```
if (contablu > contagiallo)
[
if (contablu > 2)
[setpc blue]
]

if (contablu < contagiallo)
[
if (contagiallo > 2)
[setpc yellow]
]
```

La cella assume quindi lo stato che caratterizza la maggioranza delle celle del suo vicinato: in ogni caso è però necessario che tale maggioranza sia costituita da almeno due celle dello stesso colore.

```
if (contablu = contagiallo)
[set scelta random 101
ifelse (scelta <= 50)
[if (contablu > 2)
[setpc blu]
]
[if (contagiallo > 2)
[setpc yellow]
]
]
]
```

In caso di "parità" la scelta è determinata casualmente, sempre a condizione che almeno due celle del vicinato siano del colore scelto.

```
ask-patches
[

if (pc = black)
[
set tempblu 0
set tempgiallo 0
if ((pc-at 0 1) = blue) and ((pc-at 0 -1) = blue)
[set tempblu tempblu + 1]
if ((pc-at -1 0) = blue) and ((pc-at 1 0) = blue)
[set tempblu tempblu + 1]
if ((pc-at -1 -1) = blue) and ((pc-at 1 1) = blue)
[set tempblu tempblu + 1]
if ((pc-at -1 1) = blue) and ((pc-at 1 -1) = blue)
[set tempblu tempblu + 1]
if ((pc-at 0 2) = blue) and ((pc-at 0 -2) = blue)
[set tempblu tempblu + 1]
if ((pc-at -2 0) = blue) and ((pc-at 2 0) = blue)
[set tempblu tempblu + 1]
if ((pc-at -2 -2) = blue) and ((pc-at 2 2) = blue)
[set tempblu tempblu + 1]
if ((pc-at -2 2) = blue) and ((pc-at 2 -2) = blue)
[set tempblu tempblu + 1]
```

```
if ((pc-at 0 1) = yellow) and ((pc-at 0 -1) = yellow)
[set tempgiallo tempgiallo + 1]
if ((pc-at -1 0) = yellow) and ((pc-at 1 0) = yellow)
[set tempgiallo tempgiallo + 1]
if ((pc-at -1 -1) = yellow) and ((pc-at 1 1) = yellow)
[set tempgiallo tempgiallo + 1]
if ((pc-at -1 1) = yellow) and ((pc-at 1 -1) = yellow)
[set tempgiallo tempgiallo + 1]
if ((pc-at 0 2) = yellow) and ((pc-at 0 -2) = yellow)
[set tempgiallo tempgiallo + 1]
if ((pc-at -2 0) = yellow) and ((pc-at 2 0) = yellow)
[set tempgiallo tempgiallo + 1]
if ((pc-at -2 -2) = yellow) and ((pc-at 2 2) = yellow)
[set tempgiallo tempgiallo + 1]
if ((pc-at -2 2) = yellow) and ((pc-at 2 -2) = yellow)
[set tempgiallo tempgiallo + 1]
```

Questa sezione della procedura determina la presenza o meno delle opportunità, che corrispondono alla presenza o meno di buchi strutturali. Questi vengono individuati, nella metafora degli automi cellulari, nei casi presentati in figura C.1.

Queste configurazioni possono manifestarsi indifferentemente per le celle blu o gialle: a seconda del caso viene incrementata la variabile *tempblu* o *tempgiallo*.

```
if (tempblu > tempgiallo)
[setpc red]
```

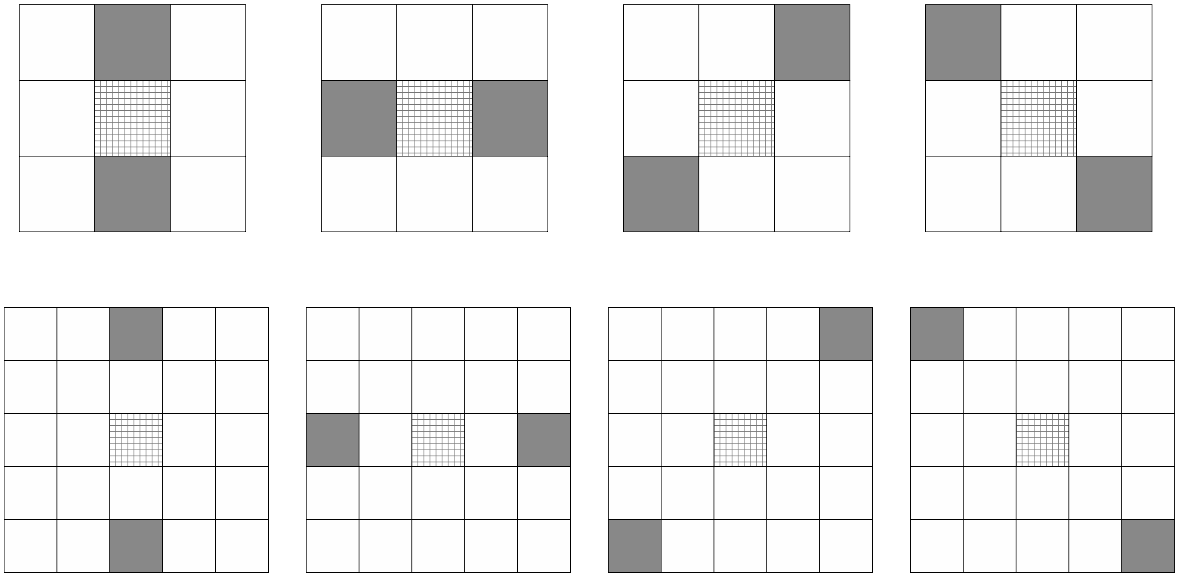

Figura C.1: Individuazione dei buchi strutturali

```
if (tempblu < tempgiallo)
[setpc brown]
if (tempblu > 0)
[
if (tempblu = tempgiallo)
[set scelta random 101
ifelse (scelta <= 50)
[setpc red]
[setpc brown]
]
]
]
]
```

I buchi strutturali così individuati possono essere associati al tipo di tecnologia blu oppure gialla: nel primo caso il buco strutturale sarà individuato con il colore rosso, nel secondo caso con il colore marrone.

La scelta tra il colore rosso o marrone viene effettuata in base a quale "tecnologia" presenta il maggiore numero di buchi strutturali. In caso di parità la scelta è effettuata casualmente.

```
ask-turtles [cerca]
set contatore contatore + 1
end
```

La procedura *go* termina con il comando di esecuzione della procedura *cerca* per gli agenti e l'incremento della variabile che conta i "passi" di esecuzione.

```
to setup-graph
pp1 ppreset setppc blue
pp2 ppreset setppc yellow
pp3 ppreset setppc red
pp4 ppreset setppc brown
setplot-title "Diffusione vs. tempo"
end
```

La procedura inizializza le "penne" che disegnano il grafico ed associa un colore a ciscuna. Inoltre viene impostato il titolo del grafico.

```
to graph
pp1 ppd plot quantiblu
```

```
pp2 ppd plot quantigialli
pp3 ppd plot scoperteblu
pp4 ppd plot scopertegialle
end
```

La procedura assegna a ciascuna "penna" del grafico una variabile del programma.

Sezione *Observer.*

```
to setupturtles
setxy random screen-width random screen-height
setc green
set bez 50
end
```

Le tartarughe vengono posizionate sulla scacchiera con coordinate casuali, prendono colore verde e alla variabile *bez* è assegnato valore 50.

```
to cerca
repeat bez
[
rt random 5 * 90
fd random 2
if (pc = red)
[
set tros tros + 100
stamp black
```

```
set scoperte scoperte + 1
set scoperteblu scoperteblu + 1
produciblu
stop
]
```

I comandi compresi tra parentesi quadre vengono ripetuti *bez* volte: questo formalizza il fatto che gli agenti abbiano a disposizione una quantità limitata di capacità di investimento e quindi di passi casuali da compiere alla ricerca delle opportuntà imprenditoriali.

Le tartarughe si muovono in direzione casuale compiendo al massimo un passo. Se la cella su cui vengono a trovarsi è rossa eseguono i comandi:

- incrementano di 100 la variabile *tros*: si suppone che la scoperta fornisca un profitto che può essere reinvestito;
- colorano di nero la cella su cui si trovano;
- incrementano di 1 la variabile *scoperte*;
- incrementano di 1 la variabile *scoperteblu*;
- eseguono la procedura *produciblu*;
- interrompono il ciclo *repeat*.

```
if (pc = brown)
[
set tros tros + 100
stamp black
```

```
set scoperte scoperte + 1
set scopertegialle scopertegialle + 1
producigiallo
stop
]
]
```

La procedura è del tutto analoga alla precedente e si applica alla tecnolgia gialla.

```
set bez 1
set bez bez + tros
set tros 0
end
```

La variabile *bez* viene, per tutte le tartarughe, fissata ad un minimo di 1: a questo viene sommato l'eventuale profitto dovuto alla scoperta di un buco strutturale. La variabile temporanea che individua tale profitto viene azzerata.

```
to produciblu
stamp blue
seth random 5 * 90
repeat 5
[fd 1
stamp blue]
repeat 5
[seth random 5 * 90
```

```
fd 1
stamp black]
end
```

Nel caso in cui vi sia stata una scoperta, la tartaruga esegue questa procedura. La cella su cui si trova viene colorata di blu, così come altre cinque celle in direzione casuale. Inoltre, sempre in direzione casuale, cinque celle vengono colorate di nero, formalizzando l'utilizzazione delle risorse informative presenti sul mercato.

```
to producigiallo
;setxy random screen-width random screen-height
stamp yellow
seth random 5 * 90
repeat 5
[fd 1
stamp yellow]
repeat 5
[seth random 5 * 90
fd 1
stamp black]
end
```

La procedura è del tutto analoga alla precedente e si applica in caso di scoperte collegate alle celle gialle.

Bibliografia

W. B. Arthur, S. Durlauf, e D. Lane. *The Economy as an Evolving Complex System II*. Addison-Wesley, 1997.

G. Bateson. *Mente e natura*. Adelphi, 1984.

R. Burt. *Structural holes: the social structure of competition*. Harvard University Press, 1992.

B. Chopard, P. Luthi, e A. Masselot. Cellular automata and lattice boltzman techniques: An approach to model and simulate complex systems. Computer Science Department, University of Geneva, 2001.

J. Coleman. Social capital in the creation of human capital. *American Journal of Sociology*, 94 (Supplement):S95 – S120, 1988.

E. Colombatto. Dall'impresa dei neo-classici all'impresa di Kirzner. *Economia Politica*, (2):157–179, 2001.

S. Conti. *Geografia economica. Teorie e metodi*. UTET, 1996.

R. Cowan e N. Jonard. Network structure and the diffusion of knowledge. *MERIT Research Memorandum*, (99-028), 1999.

M. Gardner. Mathematical games: The fantastic combinatons of John Conway's new solitaire game of life. *Scientific American*, (October):112–17, 1970.

N. Gilbert e P. Terna. How to build and use agent-based models in social science. *Mind & Society*, 1:57–72, 2000.

M. Granovetter. The strenght of weak ties. *American Journal of Sociology*, 78:1360–1380, 1973.

F. Hahn. Una retrospettiva intellettuale. *Moneta e Credito*, (188):427–442, dicembre 1994.

F. A. Hayek. The use of knowledge in society. *The American Economic Review*, 35(4):519–530, 1945.

H. E. Kilpatrick. Complexity, spontaneous order and Friedrich Hayek: Are spontaneous order and complexity essentially the same thing? *Complexity*, 6(4):16–20, 2002.

I. Kirzner. Entrepreneurial discovery and the competitive market process: An austrian approach. *Journal of Economic Literature*, 35:60–85, Marzo 1997.

C. Langton. Vita artificiale. *Sistemi Intelligenti*, IV(2):189–245, agosto 1992.

H. Maturana e F. Varela. *Autopoiesi e cognizione. La realizzazione del vivente*. Marsilio, 1985.

H. Maturana e F. Varela. *L'albero della conoscenza*. Garzanti, 1987.

L. Von Mises. *Human Action: A Treatise on Economics.* Fox & Wilkes, 1963.

J. L. Le Moigne. *La théorie du système général.* Presses universitaires de France, 1977.

E. Morin. *Le méthode - 1. La Nature de la Nature.* Seuil, 1981.

C. Napoleoni e F. Ranchetti. *Il pensiero economico del Novecento.* Einaudi, 1990.

I. Nonaka. *The Knowledge Creating Company.* Oxford University Press, 1995.

D. Parisi. *Simulazioni. La realtà rifatta nel computer.* Il Mulino, 2001.

G. Pavanelli. *Valore, distribuzione, moneta: un profilo di storia del pensiero economico.* Franco Angeli, 2002.

M. Polanyi. *The Tacit Dimension.* Doubleday, 1967.

J. Propp. Further ant-ics: Trajectory of generalized ants. *Mathematical Intelligencer*, (16), 1993.

I. Stewart. La risposta definitiva. *Le Scienze*, 313, Settembre 1994.

P. Terna. Simulation tools for social scientists: Building agent based models with Swarm. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 1(2), 1998. http://www.soc.surrey.ac.uk/JASS/1/2/4.html.

P. Terna. Simulazione ad agenti in contesti di impresa. *Sistemi intelligenti*, XIV(1):33–51, 2002b.

P. Terna. La simulazione come strumento di indagine per l'economia. In *Workshop su Scienze cognitive ed economia*. Associazione Italiana di Scienze Cognitive, 2002c.

L. Tesfatsion. Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up. *ISU Economics Working Paper*, (1), 2002.

A. Turco. *Verso una teoria geografica della complessità*. Unicopli, 1988.

L. von Bertalanffy. *Teoria generale del sistema*. Mondadori, 1983.

M. M. Waldrop. *Complessità: uomini e idee al confine tra ordine e caos*. Instar Libri, 1995.

D. J. Watts. *Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness*. Princeton Studies in Complexity, 1998.

S. Wolfram. Statistical mechanics of cellular automata. In *Cellular Automata and Complexity: collected papers*. Addison Wesley, 1983.

S. Wolfram. Two-dimensional cellular automata. In *Cellular Automata and Complexity: collected papers*. Addison Wesley, 1985.

S. Wolfram. *A new kind of science*. Wolfram Media, 2002.

J. Zimmermann. Des clusters aux small worlds une approche en termes de proximités. *CNRS/GREQAM*, 01A23, 2001. http://durandal.cnrs-mrs.fr/GREQAM/dt/dt.htm.

J. Zimmermann e F. Deroïan. Cumul d'influence et réseaux sociaux: une application aux processus de diffusion de l'innovation. *CNRS/GREQAM*, 01A22, 2001. http://durandal.cnrs-mrs.fr/GREQAM/dt/dt.htm.