

# Metodologie dell'ecologia del paesaggio: un modello matematico per la valutazione di un sistema ambientale nell'area metropolitana torinese<sup>1</sup>

Ines De Palma\* e Roberto Monaco\*\*

\*

\*\* Professore ordinario di Matematica, DIST - Politecnico di Torino

## 1. Introduzione

Per una valutazione quantitativa dello stato ecologico di un sistema ambientale, un importante contributo è contenuto nel volume *Paesaggio, Pianificazione, Sostenibilità* (Fabbri 2003), dove per la prima volta è proposto l'uso del cosiddetto "grafo ecologico". Maggiori dettagli possono essere trovati nei successivi lavori dello stesso autore (Fabbri 2007; Fabbri e Finotto 2007).

Fabbri propone di suddividere il sistema ambientale, oggetto della valutazione, in unità di paesaggio o settori ecologici, i cui confini sono individuati dalle barriere naturali o antropiche presenti nel territorio. A sua volta ciascun settore ecologico è poi suddiviso nel mosaico costituito dai biotopi che individuano quelle porzioni di territorio che presentano un'uniforme copertura del suolo (*land cover*). Ogni settore ecologico è poi caratterizzato sul piano quantitativo da una sorta di energia biologica, che Fabbri chiama "metastabilità", proporzionale al valore di biopotenzialità territoriale (*Btc*, *Biological territorial capacity*) (Ingegnoli e Forman 2002) e moltiplicata per un fattore che tenga conto delle caratteristiche fisico-morfologiche dei biotopi e delle barriere contenute in ciascun settore, in modo da quantificare la capacità del settore stesso a trasferire la propria energia biologica ai settori confinanti. Il grafo è infatti completato poi dalla determinazione dei flussi di metastabilità tra settori e settori che individuano, in una qualche misura, la frammentazione del territorio considerato. Il grafo ecologico costituisce quindi, a partire dai dati territoriali raccolti direttamente con il GIS, una buona fotografia dello stato del sistema ambientale al tempo T in cui viene realizzato.

Successivamente ai contributi di Fabbri, è stato proposto un lavoro (Finotto et al. 2010) dove viene introdotto un modello matematico che, prendendo come dati iniziali quelli forniti dal grafo ecologico, proietta nel tempo la possibile evoluzione del sistema in oggetto. Il modello assume come variabili di stato la metastabilità (che nel presente lavoro verrà chiamata d'ora in poi *Energia biologica generalizzata*, *Ebg*) e la percentuale di aree verdi dotate di alto valore ecologico (cioè che presentano una *Btc* superiore a una fissata soglia) e proietta dinamicamente tali quantità nel tempo individuando i possibili futuri scenari a cui può andare incontro il sistema ambientale. Questo modello, a cui è stato attribuito l'acronimo di PANDORA<sup>2</sup>, è stato poi ulteriormente sviluppato nell'articolo (Gobattoni et al. 2011), introducendo nuovi parametri caratterizzanti il territorio. In questi due primi lavori, pur considerando il sistema ambientale suddiviso in settori ecologici e biotopi come suggerito da Fabbri, l'evoluzione delle variabili di stato è determinata a livello dell'intero sistema ambientale. Successivamente sono stati sviluppati due nuovi modelli, denominati PANDORA 2.0 (Gobattoni et al. 2012) e 3.0 (Gobattoni et al. 2014), che rispettivamente riferiscono le variabili di stato a livello dei singoli settori e addirittura a quello dei singoli biotopi. Il modello PANDORA 3.0 si è rilevato di assai complessa implementazione dovuta all'elevatissimo numero di variabili di stato. Tuttavia per la risoluzione numerica di tale modello è stata utilizzata una tecnica di approssimazione della soluzione che si è dimostrata efficace, si veda sempre (Gobattoni et al. 2014). Di conseguenza tale tecnica sarà applicata anche nel presente lavoro, proponendo alcune modifiche alla versione 2.0. Tale nuova versione, che potremmo denominare PANDORA 2.1, individua quindi le caratteristiche del territorio, e la loro evoluzione, alla scala dei settori ecologici, che appare la più appropriata a fornire una maggiore leggibilità degli scenari ottenuti. Il modello è poi applicato al particolare caso studio descritto in seguito e che comprende una porzione del sistema territoriale piemontese interessata dal progetto RURBANCE.

## **2. Concetti generali dell'analisi e del progetto RURBANCE**

Il progetto europeo RURBANCE<sup>3</sup> avviato nel luglio del 2012 fa parte della rosa di strategie del Programma di Cooperazione Territoriale Alpine Space II 2007-2013 ed è co-finanziato dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR). Si propone di sviluppare, mediante un processo decisionale inclusivo, una politica organica che sappia affrontare il rapporto tra lo sviluppo delle aree urbane e rurali e delle connessioni tra questi e le valli alpine, con gli obiettivi generali di governare le trasformazioni territoriali tutelando e valorizzando gli ambiti agricoli in un'ottica di sviluppo sostenibile. Il progetto riguarda sei paesi europei; l'Italia ha tre sistemi territoriali coinvolti, tra cui è presente anche Torino, il Ciriace e le Valli di Lanzo. Tale sistema territoriale piemontese è stato individuato dalla Regione Piemonte e corrisponde al perimetro degli Ambiti di Integrazione Territoriale 9 (Area metropolitana torinese) e 10 (Ciriè) del Piano territoriale regionale. Il perimetro definisce un'area costituita da aree agricole periurbane, aree agricole di pianura, Valli di Lanzo, il corso e il bacino idrografico del Torrente Stura di Lanzo, diverse aree naturali protette regionali tra le quali il Parco regionale della Mandria e la riserva speciale della Vauda. L'ambito territoriale è dunque caratterizzato da morfologie naturali di pregio ma è anche minacciato da un'espansione urbana diffusa. Tra i due ambiti è stato scelto il 10 del Ciriace e delle Valli di Lanzo come area pilota, mentre il territorio del progetto vero e proprio è costituito dai Comuni appartenenti all'Unione dei Comuni del Ciriace e del Basso Canavese (Ciriè, Nole, Robassomero, San Carlo Canavese, San Francesco al Campo, San Maurizio Canavese).

Le analisi condotte hanno tenuto conto di due principi fondamentali dell'ecologia del paesaggio: il principio delle "Proprietà emergenti" e quello di "Costrizione". Il primo enuncia che le proprietà di insieme del sistema-paesaggio sono sempre diverse da quelle dei singoli elementi, il valore dell'organizzazione è più importante del valore del singolo elemento facente parte dell'organizzazione stessa e ogni volta che le stesse parti si organizzano in modo diverso emergono proprietà nuove. Il secondo invece definisce il comportamento di un sistema ecologico come limitato dai comportamenti dei suoi costituenti e vincolato dai rapporti con i livelli organizzativi superiori, in altre parole, le componenti del livello inferiore, spiegano le origini di quello superiore che, a sua volta, detta i vincoli a quello inferiore (Ingegnoli,1993). Per questo motivo sono stati individuati tre differenti livelli di aggregazione territoriale (Fig.1).

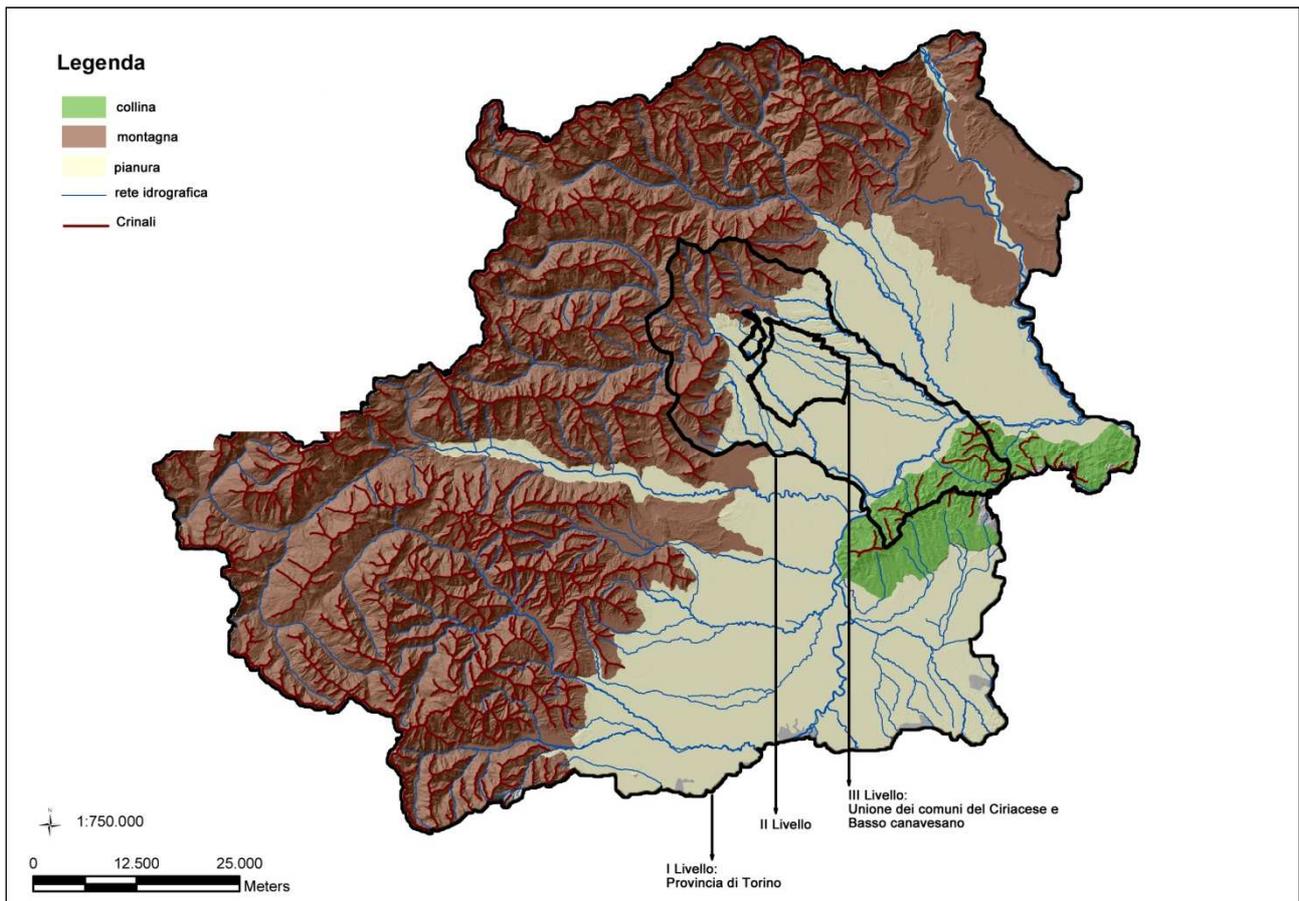


Figura 1. Livelli di aggregazione territoriale

Il primo livello d'area vasta riguarda tutta la provincia di Torino, sono stati presi in considerazione i confini amministrativi perché prossimi a quelli naturali. Il secondo livello di analisi, definito area d'interesse, invece è stato delimitato dalla conformazione geomorfologica del territorio e dunque dai principali corsi d'acqua, dai crinali, e dalle unità di paesaggio agrarie e forestali. Il perimetro comprende l'area metropolitana torinese, la prima cintura nord ovest di Torino, la piana attraversata dal Torrente Stura e le Valli di Lanzo. A nord i confini sono i rilievi montani, mentre a sud è inclusa la fascia della collina torinese. È un ambito territoriale eterogeneo, costituito da aree agricole periurbane, porzioni di aree agricole di pianura che si alternano ad unità boschive, centri abitati di medie e piccole dimensioni nei quali si registra una significativa espansione delle superfici edificate con fenomeni diffusi di *sprawl*. All'interno di questo livello, infine, è stata individuata un'area di dettaglio, coincidente con il territorio pilota del progetto RURBANCE, che comprende l'Unione dei comuni del Ciriacese e del Basso Canavese sul quale sono state svolte le analisi del presente studio. La tripartizione dell'area ha permesso di cogliere l'organizzazione gerarchica del territorio mostrando quegli aspetti che altrimenti non sarebbero potuti essere osservati se si fosse preso in considerazione il solo territorio di dettaglio (terzo livello). In questo modo è stato possibile ricreare un quadro completo delle dinamiche ambientali e quindi dei collegamenti tra le aree *source* e quelle che fungono da cuscinetto. Le analisi delle componenti ambientali e insediative sono differenziate in base alla scala spaziale. Il primo livello è di conoscenza generale, il secondo di inquadramento del contesto ai fini della creazione dell'eco-mosaico e del grafo ecologico, il terzo infine affronta specificatamente le caratteristiche delle aree coinvolte nel presente studio.

### 3. Analisi area di dettaglio

Il livello territoriale di analisi, come detto, riguarda il territorio oggetto delle azioni pilota del progetto europeo RURBANCE. La presenza di aree protette, aree agricole e di una fitta rete di corsi d'acqua fa dell'area un potenziale sistema ecologico di connessione con l'area metropolitana

torinese. Il principale corridoio ecologico trasversale è lo Stura di Lanzo, corso d'acqua a regime torrentizio che scorre in un ampio greto ciottoloso e presenta una vegetazione ripariale piuttosto intera. Le riserve naturali della Mandria e della Vauda sono le due aree con livelli di naturalità più elevati nelle quali si estendono nuclei di quercu-carpineti (formazioni costituite principalmente da farnia e carpino bianco con differenti gradi di mescolanza), querceti di rovere e roverella nella prima ed estensioni di brughiera nella seconda. Il sistema agricolo è connotato da estensioni di seminativi intervallati da prati, pascoli, fasce di robinieti e impianti per arboricoltura da legno. Nei pressi di Caselle, San Francesco al Campo e Ciriè, sono presenti ancora una rete di siepi e filari di rilevante valore ecologico che struttura il tessuto agricolo. L'area metropolitana periurbana è invece l'area più problematica in quanto caratterizzata da un elevato livello di frammentazione degli insediamenti e da una forte disgregazione del sistema agricolo. Il sistema insediativo si snoda lungo la SP 2 dando luogo ad una conurbazione diffusa che ingloba i Comuni di S. Maurizio Canavese, Ciriè, Nole e Mathi. Le espansioni di aree residenziali hanno un carattere diffuso che non segue la logica del compattamento dell'urbanizzato esistente. L'espansione delle aree industriali, soprattutto nella parte sud ovest dell'area, avviene invece in territorio agricolo e, anche in questo caso, in modo piuttosto disperso. Le attività agricole sono caratterizzate dalla compresenza di aziende di dimensioni medio-piccole prevalentemente dedite all'allevamento di bovini. Il Ciriacese è collegato con le infrastrutture di trasporto principale dalla SP 2, da una rete di viabilità secondaria e dalla ferrovia Torino-Ceres (parte integrante del Servizio Ferroviario Metropolitano di Torino, linea SFM 2 Germagnano-Pinerolo, gestita da Trenitalia). Nell'area è presente l'aeroporto di Caselle, di medie dimensioni, la cui struttura è stata rinnovata per i Giochi olimpici del 2006.

Il risultato complessivo emergente dall'intersezione delle due reti, quella naturale costituita dall'insieme delle aree boscate, zone umide, coltivi, prati ecc, e quella antropica (tessuto insediativo-infrastrutturale) è un eco-mosaico (Fig.2), ossia un mosaico delle componenti complessive di un paesaggio definite dalle loro forme, dimensioni e aggregazioni eco-sistemiche. Gli elementi strutturali di un eco-mosaico sono le macchie, i biotopi, i corridoi, le matrici e gli ecotoni. Per macchia si intende una porzione non lineare di superficie territoriale, il cui aspetto differisce dall'ambiente circostante (Ingegnoli, 1993), l'ambiente è qui definito come una matrice che contiene ogni tessera e che costituisce nel complesso il mosaico ambientale. Per corridoio invece si intende una tessera o un insieme di tessere con configurazione spaziale e con una dimensione prevalente (Ingegnoli, Giglio, 2005). La forma, dimensione, distribuzione, modalità di aggregazione e mutua connessione delle macchie è di fondamentale importanza per poter determinare i rapporti energetici tra i vari ecosistemi e dunque la trasformazione del paesaggio complessivo, in quanto ogni tessera, in base al proprio corredo bioenergetico, si trasforma nel tempo in funzione del livello dei disturbi presenti sul territorio (Finotto, 2006).

Le tessere sono aggregate secondo quattro tipologie prevalenti:

- componenti naturali;
- componenti semi-naturali;
- componenti antropico-agricole;
- componenti antropico-urbanizzate.

Tecnicamente l'eco-mosaico è stato costruito a partire dal *land cover* della Regione Piemonte risalente al 2006, il dato è stato aggiornato mediante il confronto dei dati vettoriali e *raster* BDTRE del 2010 e del dato *Land Cover Piemonte: Classificazione uso del suolo 2010* della Regione Piemonte. L'individuazione dei biotopi presenti sul territorio è volta alla realizzazione del già citato grafo ecologico che sarà argomentato nel prossimo paragrafo.

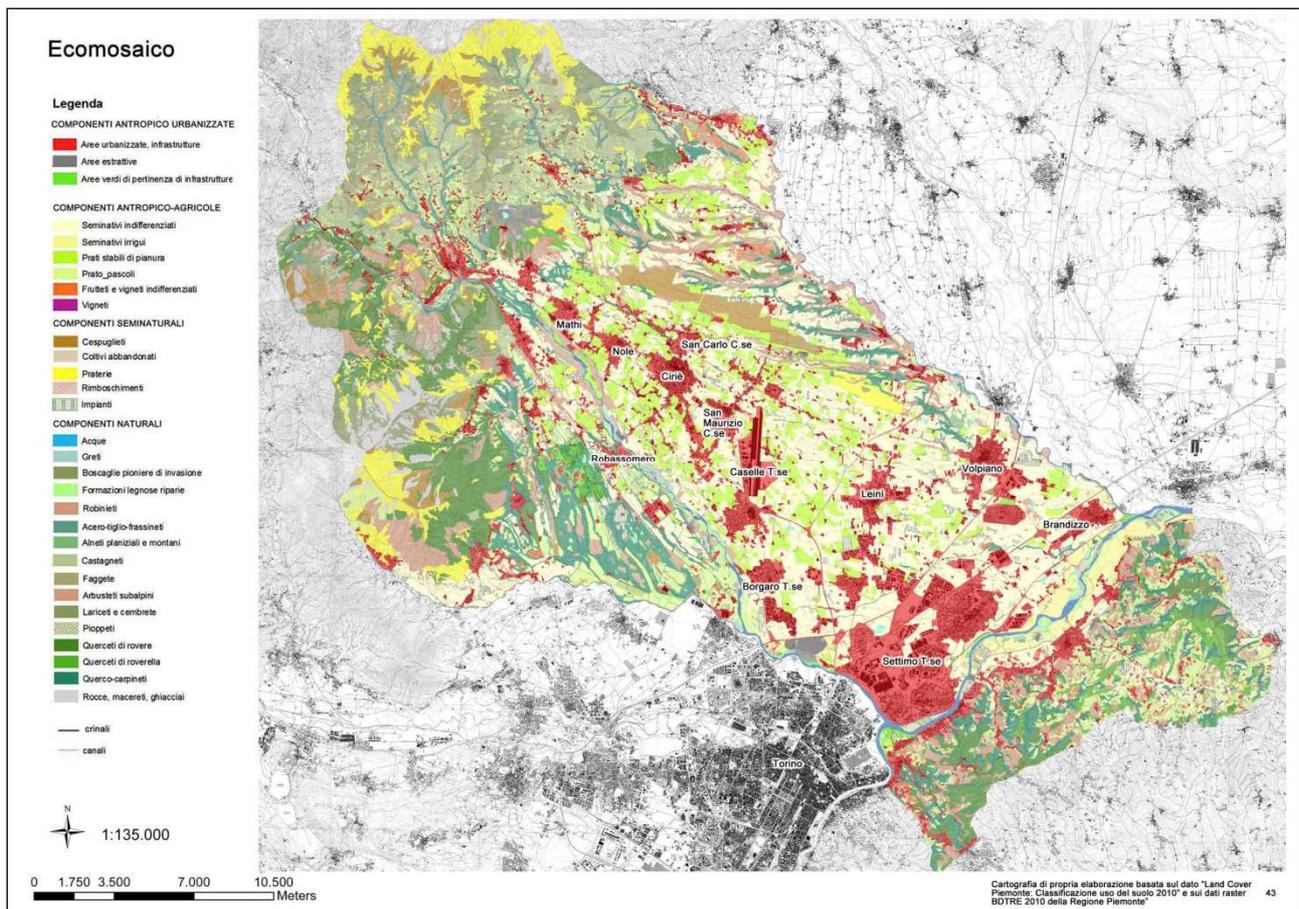


Figura 2. Ecomosaico dell'area d'interesse

#### 4. Stima del valore ecologico del sistema oggetto di studio

La stima del valore ecologico del sistema oggetto di studio è stata effettuata, come detto, tramite la realizzazione del grafo ecologico, consistente in una serie di nodi legati tra loro da archi che indicano quali legami collegandole varie coppie di nodi. Tale schema è stato applicato all'elaborato dell'eco-mosaico sul quale sono stati individuati dei settori ecologici come insieme di biotopi di tipo naturale e semi-naturale. I confini di ogni settore sono dati dalle barriere permeabili (corsi d'acqua, canali artificiali, ma anche crinali che dividono i flussi del trasporto dovuti all'acqua) e impermeabili (aree urbanizzate e rete stradale). La finalità del grafo ecologico è quella di valutare, mediante la lettura congiunta di diversi indicatori propri dell'Ecologia del Paesaggio, il grado di connessione delle componenti eco-sistemiche e il loro livello di frammentazione dovuta all'interferenza della rete antropica su quella naturale.

Per la costruzione del grafo ecologico dell'area di interesse, sono stati utilizzati l'indice di Btc, l'indice di "evenness" che tiene conto dell'indice di "diversità di Shannon"<sup>4</sup>, le lunghezze delle fasce ecotonali che suddividono tra loro i biotopi, l'indice di permeabilità delle barriere, l'indice di Ebg, che esprime sotto forma di indicatore il concetto dell'energia biologica generalizzata illustrata nell'Introduzione, e il flusso di Ebg tra settori ecologici confinanti, che permette la determinazione dell'indice di connettività. Le formule matematiche per determinare alcune di queste grandezze verranno fornite nel prossimo paragrafo dove il modello matematico PANDORA 2.1 verrà illustrato<sup>5</sup>. Di seguito diamo solo alcune specificazioni qualitative che permettono di interpretare meglio il significato di dette grandezze.

La Btc è una funzione di stato che misura la capacità latente di auto-equilibrio di un sistema paesistico. Tale indice stima la soglia di energia biologica generalizzata di un sistema ambientale oltre la quale avviene la trasformazione del sistema stesso. E' una grandezza connessa alla capacità

metabolica delle componenti del sistema e alla presenza di biomassa vegetale che gioca un ruolo fondamentale nella trasformazione dell'energia solare.

L'indice di diversità di Shannon esprime la misura del grado medio d'incertezza nella previsione che un oggetto, scelto a caso in una collezione, appartenga a una determinata categoria. Questa incertezza cresce con "l'aumentare del numero di categorie e della loro equidistribuzione" (Finotto, 2011). Il concetto deriva dalla teoria dell'informazione (Shannon, Wiener, 1948) ed è stato trasposto nei campi di applicazione dell'ecologia del paesaggio (O'Neill, 1988; Turner, 1989). L'indice di evenness, teorizzato da Pielou nel 1975, è pari al rapporto tra il valore della diversità reale e quella massima teorica e "misura la ripartizione delle abbondanze relative dei tipi di elementi del paesaggio all'interno di un mosaico paesistico" (Finotto, 2011). La diversità reale converge con quella massima teorica se il rapporto tende all'unità, mentre se il rapporto tende a zero, la diversità paesaggistica è minima e quindi l'eco-mosaico sarà dominato ad un solo elemento. L'indice di connettività esprime il livello di connessione che correla diverse unità paesaggistiche; nella definizione di questo parametro entrano in gioco, oltre ai valori di Ebg, i perimetri delle barriere che fungono da confini di ogni settore, la lunghezza del tratto divisorio e il relativo grado di permeabilità.

Il primo passo per la realizzazione del grafo è stato l'analisi dell'elaborato dell'eco-mosaico per l'individuazione dei settori ecologici definiti da barriere permeabili e impermeabili. Sono stati così individuati 125 settori per l'area di interesse (Fig.3) e nello specifico 24 settori per il Ciriace (Fig.4). In particolare nella Fig.3 sono evidenziate in rosso le barriere impermeabili. Ad ogni settore sono associati i valori totali di Ebg rappresentati dalla dimensione dei nodi e dalla gradazione cromatica di ciascun settore (tale gradazione di verdi è anche riportata nella successiva Fig.4). Ciascuno di essi è connesso ai settori limitrofi da legami, rappresentati da archi, il cui differente spessore dipende dal maggior o minor flusso di Ebg scambiata. L'intensità di tale scambio è anche in relazione al grado di permeabilità delle barriere che delimitano i settori stessi. Le barriere antropiche sono state classificate in tessuti urbani compatti estesi totalmente impermeabili, in tessuti urbani compatti lineari che invece hanno un grado di permeabilità e in viabilità principale (autostrade e strade extraurbane principali). Le barriere naturali sono rappresentate dai principali crinali, dai canali artificiali e dai corsi d'acqua. I valori numerici degli indici di permeabilità delle varie barriere, secondo la loro tipologia, possono essere trovati nel lavoro (Gobattoni et al., 2011). Come è possibile notare dall'elaborato del grafo ecologico i settori con valori di energia biologica generalizzata maggiori (con nodi più grandi e grigi più scuri) sono quelli distanti dai centri abitati, con assenza o ridotta presenza di tessuti urbani e confinanti con i corsi d'acqua che si configurano come ottimi corridoi per il passaggio di energia. Le criticità principali invece riguardano i settori nei pressi dei centri abitati che, configurandosi come barriere impermeabili nei confronti del sistema ambientale, rendono difficoltoso il passaggio di energia tra le zone vegetali presenti.

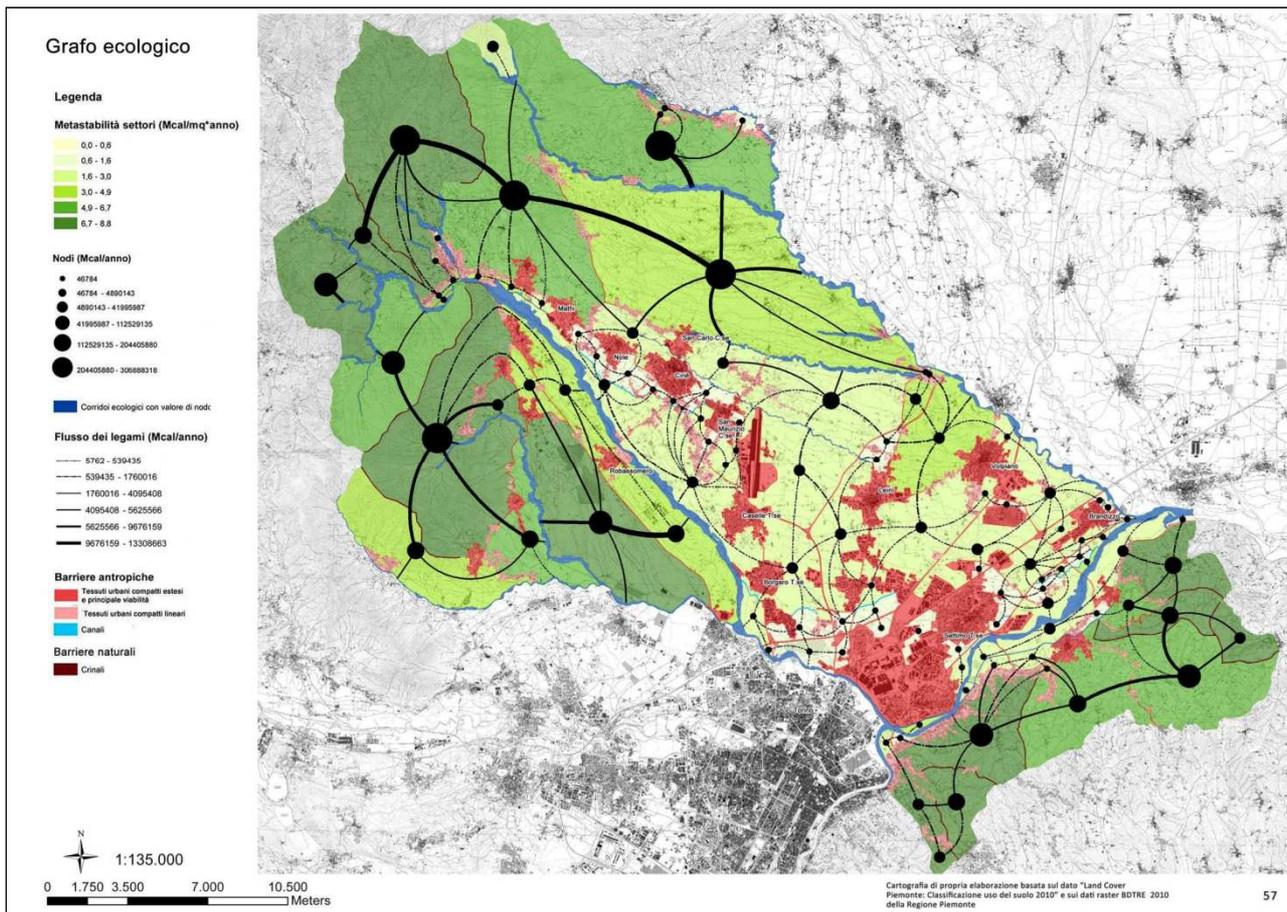


Figura 3. Grafo ecologico dell'area di interesse

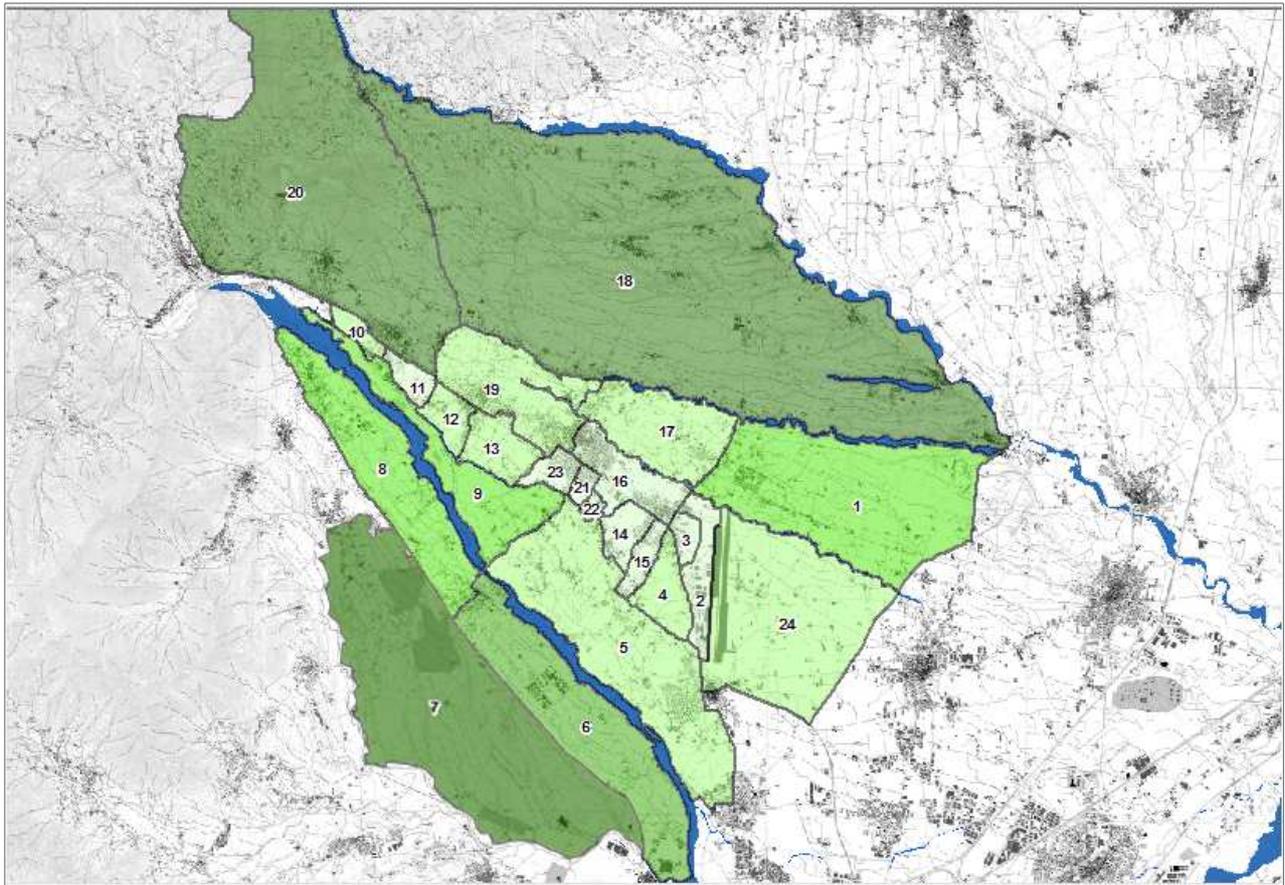


Figura 4. L'area di dettaglio suddivisa nei 24 settori

## 5. Il modello matematico

Da quanto fin qui discusso, è possibile affermare che il territorio è un sistema vivente, dinamico e in continua evoluzione temporale. La Btc, quindi, può essere considerata come una funzione di stato capace di valutare la produzione di energia biologica metabolizzata in una determinata unità d'area del territorio. A partire da questa assunzione, come anticipato nell'introduzione, sono stati sviluppati dei modelli matematici di simulazione delle trasformazioni del territorio che valutano a quali possibili scenari esso possa tendere. Per l'analisi dell'evoluzione del territorio oggetto del presente lavoro, si è scelto di adoperare un modello che assuma come unica variabile di stato il valore totale di BTC di ciascuno dei settori del grafo. Di seguito si fornisce una descrizione accurata del modello, definendo le varie grandezze che lo compongono.

Come già affermato, il sistema ambientale considerato viene suddiviso in  $n$  settori ecologici, ciascuno dei quali è individuato dall'indice  $i = 1, \dots, n$ . Ogni settore  $i$  è poi, a sua volta, suddiviso in  $m_i$  biotopi, identificati dall'indice  $j$ , con  $j = 1, \dots, m_i$ . Il valore unitario di BTC, corrispondente a una fissata copertura del suolo di un biotopo appartenente al settore  $i$ , verrà indicato con il simbolo  $B_{ji}$ . La grandezza  $B_{ji}$  assume valori nell'intervallo  $[0, B_{max}]$ , con  $B_{max} = 6.5 \text{Mcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{anno})$ . I valori unitari di BTC, inoltre, possono essere raggruppati in modo da individuare cinque distinte classi ecologiche

$$A = [0, 0.4); \quad B = [0.4, 1.2); \quad C = (1.2, 2.4); \quad D = (2.4, 4.0); \quad E = (4.0, 6.5]$$

che corrispondono a coperture di suolo che vanno dalla classe A, caratterizzata da minima attività biologica, alla classe E relativa ad aree boscate di quercu-carpineti. Una tabella esaustiva dei valori unitari di  $B_{ji}$  in ragione della copertura dei suoli può essere trovata, oltre che nel volume (Ingegnoli, Giglio, 2005), anche nel lavoro (Gobattoni et al., 2011).

Il valore totale di Btc di ogni settore, espresso in  $\text{Mcal}/\text{anno}$ , è calcolabile dalla formula

$$B_i = \sum_{j=1}^{m_i} s_{ji} B_{ji}$$

dove  $s_{ji}$  è l'area del biotopo  $j$  appartenente al settore  $i$ . Tale valore totale di BTC  $B_i$  di ciascun settore è assunto come variabile di stato del modello matematico ed è variabile nel tempo, in ragione dei cambiamenti che la copertura del suolo potrà subire. Il valore totale di BTC calcolato dal grafo ecologico è assunto come dato iniziale all'istante  $t=0$ , i.e.  $B_i(t=0) = B_{i0}$ .

Nel lavoro (Gobattoni et al., 2014) è stata ampiamente discussa la formulazione del modello matematico di evoluzione da attribuire al valore di BTC di ciascun settore. Tale modello è dato da una equazione logistica ( $n$  dimensionale), con termine di impatto, data dalla forma:

$$B_i'(t) = c_i(t)B_i(t) \left(1 - \frac{B_i(t)}{B_i^{max}}\right) - h_i U_i B_i(t) \quad (1)$$

dove  $c_i(t)$  sono gli indici, variabili nel tempo, di connettività dei settori e

$$B_i^{max} = B_{max} A_i, \quad A_i = \sum_{j=1}^{m_i} s_{ji}.$$

I coefficienti  $U_i$  sono dati dalle somme, costanti, di tutte le aree a indice di BTC pari a zero (aree di edificato, infrastrutture che sono definite come barriere impermeabili) del settore  $i$  rapportate alla superficie totale  $A_i$  dello stesso, mentre gli  $h_i$  sono dati dalla somma dei perimetri di queste stesse aree rapportate al perimetro totale  $P_i$  del settore. I parametri  $U_i$  pertanto misurano l'effettiva incidenza su ogni settore delle aree a BTC nulla, mentre gli  $h_i$  ne descrivono la corrispondente dispersione.

Gli indici di connettività si calcolano a partire dai flussi di energia biologica. Il flusso dell' $i$ -esimo settore è dato da (Fabbri, 2003):

$$\Phi_i(t) = \sum_{k \in I_i} \frac{M_i(t) + M_k(t)}{2(P_i + P_k)} H_{ik}, \quad H_{ik} = \sum_{r=1}^s L_{ik}^r p^r$$

dove  $L_{ik}^r$  è la lunghezza del generico tratto  $r$  della frontiera tra i settori  $i$  e  $k$  con indice di permeabilità  $p^r$  e  $[0,1]$ ,  $P_i$  e  $P_k$  sono i perimetri, come detto, dei due settori e dove la sommatoria è estesa all'insieme  $I_i$  di tutti i settori confinanti con l' $i$ -esimo. Inoltre risulta

$$\sum_{r=1}^s L_{ik}^r = L_{ik}$$

Dove  $L_{ik}$  è la lunghezza del confine tra i due settori  $i$  e  $k$ , suddiviso, appunto, in  $s$  tratti.

Nella formula del flusso compare l'energia biologica generalizzata (EBG)  $M_i$  di ogni settore, che come anticipato nell'introduzione quantifica la capacità del settore stesso a trasferire la propria energia biologica ai settori confinanti. Tale energia, calcolata al tempo  $t$ , è data da

$$M_i(t) = (1 + K_i) B_i(t)$$

dove il parametro  $K_i \in [0,1]$ , come detto nell'introduzione, dipende da varie caratteristiche fisico-morfologiche dei settori e dei biotopi, come discusso in (Gobattoni et al., 2012) e può essere considerato un vero e proprio indice della diffusività di energia biologica di ciascun settore. In particolare per questa analisi sono stati scelti parametri riferiti solo ai biotopi e precisamente la lunghezza ecotonale  $K_i^{ec}$  tra i biotopi confinanti, l'indice di evenness  $K_i^{ev}$  e l'indice di permeabilità dei confini del settore  $K_i^{pe}$ , tutti con valori contenuti nell'intervallo  $[0,1]$ . In formule  $K_i$  è espresso da

$$K_i = (K_i^{ec} + K_i^{ev} + K_i^{pe})/3$$

dove le espressioni dei suddetti parametri possono essere trovate nel lavoro (Gobattoni et al., 2014). Restano da definire gli indici di connettività. Per questi è necessario calcolare il flusso massimo connesso con l' $i$ -esimo settore:

$$\Phi_i^{max} = \sum_{k \in I_i} \frac{M_i^{max} + M_k^{max}}{2(P_i + P_k)} L_{ik} ,$$

dove il massimo valore di energia generalizzata è dato da

$$M_i^{max} = 2B_{max}A_i$$

Infine l'indice di connettività dell' $i$ -esimo settore è dato da:

$$c_i(t) = \frac{\Phi_i(t)}{\Phi_i^{max}} .$$

Nell'equazione (1) è conveniente introdurre variabili adimensionalizzate; quindi se si introduce la Btc totale normalizzata  $E_i(t) = B_i(t)/B_i^{max}$  e si divide l'equazione (1) per  $B_i^{max}$ , la stessa si trasforma in

$$E_i'(t) = c_i(t)E_i(t)[1 - E_i(t)] - h_iU_iE_i \quad (2)$$

Quest'ultima equazione costituisce un sistema differenziale di  $n$  equazioni, tutte completamente accoppiate attraverso i coefficienti  $c_i(t)$  che dipendono, tramite le EBG  $M_i(t)$ , da tutte le variabili  $B_i(t) = E_i(t) B_i^{max}$ .

Risolvere il sistema differenziale (2) con un integratore numerico è sicuramente oneroso e potrebbe generare alcune instabilità, come discusso nell'articolo (Gobattoni et al., 2014). Seguendo il metodo proposto in quest'ultimo lavoro è possibile applicare un processo di approssimazione che permette di risolvere il sistema differenziale attraverso una gerarchia algebrica (Ixaru, 1984).

Il sistema (2) è un sistema a coefficienti variabili in quanto i coefficienti  $c_i$  dipendono esplicitamente dal tempo attraverso le grandezze  $M_i$  e  $M_k$ , come evidenziato nella loro definizione. Se i coefficienti  $c_i$  assumessero valori costanti nel tempo, l'equazione (2), a partire dalla condizione iniziale  $E_i(t=0) = E_{i0} = B_{i0}/B_i^{max}$ , avrebbe la seguente soluzione esplicita

$$E_i(t) = \frac{c_i - h_iU_i}{k_0 \exp[-(c_i - h_iU_i)t] + c_i} \quad (3)$$

Dove

$$k_0 = \frac{c_i - h_iU_i - E_{i0}c_i}{E_{i0}}$$

Tale soluzione esplicita può essere utilizzata scegliendo una opportuna ripartizione dell'asse dei tempi. Suddividendo questo asse in intervalli uguali  $\Delta t = t_s - t_{s-1}$ , a partire da  $t_0$ , che siano

sufficientemente piccoli, tali cioè da considerare i coefficienti  $c_i$  costanti durante il tempo  $\Delta t$ , la soluzione del sistema (2), avvalendosi della formula (3), può essere approssimata dalla seguente gerarchia algebrica

$$E_i(t_s) = \frac{f_i(t_{s-1})}{d_i(t_{s-1})\exp[-f_i(t_{s-1})\Delta t] + c_i(t_{s-1})}, \quad (4)$$

dove

$$f_i(t_{s-1}) = c_i(t_{s-1}) - h_i U_i, \quad d_i(t_{s-1}) = \frac{f_i(t_{s-1}) - E_i(t_{s-1})c_i(t_{s-1})}{E_i(t_{s-1})}.$$

Naturalmente la determinazione della soluzione di questa gerarchia algebrica al generico istante di tempo  $t_s$  dovrà tener conto che da ogni soluzione  $E_i$  al tempo  $t_{s-1}$  è necessario calcolare, per tutti i settori, i valori di  $B_i = E_i B_i^{\max}$ , di  $M_i$  e infine di  $c_i$ , fermo restando che invece i valori di  $h_i$ ,  $U_i$ ,  $H_{ik}$  e  $K_i$  sono costanti e possono essere calcolati a monte dell'implementazione della gerarchia stessa.

## 6. Analisi dei risultati

Il primo passo per l'applicazione del modello è stato quello di analizzare il grafo ecologico precedentemente elaborato che fornisce, al momento considerato, i valori di Btc, dell'energia generalizzata, della connettività, nonché degli altri parametri necessari all'implementazione del modello matematico all'area di studio. Come è stato evidenziato nel Paragrafo 2, sono stati estratti dal territorio di interesse del progetto RURBANACE i 24 settori ecologici relativi all'area di dettaglio. Tali dati sono raggruppati nella tabella sottostante e la loro analisi fornisce già una fotografia sufficientemente chiara dello stato del territorio in oggetto.

Settori	$A_i$	$B_i$	$E_i$	$K_i$	$F_i$	$c_i$	$U_i$	$h_i$
1	19.156.648	27.436.760	0,22	0,77	0,39	0,11	0,09	1,83
2	2.260.943	1.087.488	0,07	0,48	0,11	0,07	0,60	1,39
3	764.299	269.428	0,05	0,40	0,08	0,04	0,41	0,81
4	2.285.714	2.044.555	0,14	0,57	0,22	0,06	0,25	1,45
5	17.004.435	16.966.208	0,15	0,66	0,26	0,08	0,23	2,51
6	13.162.369	25.642.762	0,30	0,83	0,55	0,20	0,17	1,36
7	29.896.496	108.815.666	0,56	0,88	1,05	0,26	0,03	1,17
8	10.139.270	15.009.602	0,23	0,78	0,41	0,30	0,23	1,72
9	6.584.277	10.539.244	0,25	0,66	0,41	0,16	0,11	0,60
10	837.269	698.421	0,13	0,40	0,18	0,16	0,36	1,20
11	991.018	596.025	0,09	0,39	0,13	0,04	0,47	1,48
12	1.395.933	1.117.444	0,12	0,18	0,15	0,07	0,32	1,39
13	2.431.435	2.144.607	0,14	0,47	0,20	0,05	0,23	1,81
14	1.452.734	1.043.624	0,11	0,44	0,16	0,04	0,40	1,05
15	1.072.430	432.111	0,06	0,23	0,08	0,04	0,66	1,42
16	3.416.393	1.983.927	0,09	0,42	0,13	0,04	0,49	1,09

<b>17</b>	6.369.795	6.417.415	0,15	0,63	0,25	0,13	0,21	1,58
<b>18</b>	69.754.645	163.176.984	0,36	0,88	0,68	0,17	0,07	1,97
<b>19</b>	4.589.299	6.489.058	0,22	0,61	0,35	0,17	0,61	1,88
<b>20</b>	42.953.048	126.821.142	0,45	0,99	0,90	0,19	0,09	2,20
<b>21</b>	459.102	142.388	0,05	0,00	0,05	0,05	0,74	1,06
<b>22</b>	302.009	46.784	0,02	0,00	0,02	0,04	0,86	1,29
<b>23</b>	1.059.134	563.194	0,08	0,32	0,11	0,04	0,54	1,27
<b>24</b>	16.437.048	14.923.549	0,14	0,61	0,22	0,08	0,22	1,91
Valori medi		22.267.016	0,17	0,52	0,29	0,11	0,35	1,47

Innanzitutto vale subito la pena di notare che le dimensioni dei vari settori, riportate dalle superfici  $A_i$  in  $mq$  della seconda colonna, presentano valori anche molto diversi, sicché alcuni tra i settori potrebbero influenzare positivamente o negativamente la qualità ecologica dell'intero sistema ambientale. In generale, tuttavia, sono i settori più piccoli quelli che presentano indici con valori più bassi di produzione di energia biologica e quindi la loro influenza risulta limitata, come si può evincere dai valori di  $B_i$ , riportati nella terza colonna.

Per poter avere un'idea più immediata sulla valutazione dell'intero territorio considerato, risulta utile considerare i valori medi dei vari indici, che sono indicati nell'ultima riga della tabella.

Ricordando che tali indici (tranne l'ultimo  $h_i$ ) assumono valori tra 0 e 1, è semplice eseguire una lettura di massima del territorio.

Dall'esame dei valori di  $B_i$  e del suo indice  $E_i$  emerge che il valore medio di tale indice è pari a 0,17 (ciò significa che di tutta la  $B_i$  producibile dal sistema ambientale, solo il 17% di essa è effettivamente generata) e nello specifico, su 24 settori del territorio di riferimento, solo 8 (i settori 1, 6, 7, 8, 9, 18, 19 e 20) presentano valori dell'indice di  $B_i$  accettabili (maggiori del 20%).

La situazione complessiva, quindi, è piuttosto negativa; ciò è anche verificabile dal fatto che il territorio è caratterizzato da una scarsa trasmissibilità di energia poiché il valore medio (0,29) dell'indice  $F_i = M_i/M_i^{max}$  (riportato in sesta colonna) risulta essere comunque anch'esso piuttosto basso. Ciò è dovuto al valor medio, pari a 0,52, dell'indice  $K_i$  che mostra come il territorio abbia una diffusività di energia piuttosto moderata, come anche confermato dal valor medio dell'indice di connettività che addirittura si attesta a un valore pari a 0,11 (settima colonna) assolutamente basso. In pratica i valori di questi indici mostrano che il territorio in questione è fortemente frammentato, come può essere del resto facilmente verificato osservando la Fig.2, dove le barriere impermeabili (zone a  $B_i$  nulla) sono riportate in nero. Tale frammentazione è anche confermata dal valore medio dell'indice  $U_i$ , di edificato (0,35, penultima colonna), molto alto rispetto alla media provinciale che si aggira intorno allo 0,15 (questo valore fa riferimento alla percentuale di aree urbanizzate riscontrate per l'intero territorio del progetto RURBANANCE), nonché dal valore medio dell'indice  $h_i$ , pari a 1,47 (ultima colonna), maggiore, quindi, del valore di criticità normalmente assunto pari a 1.

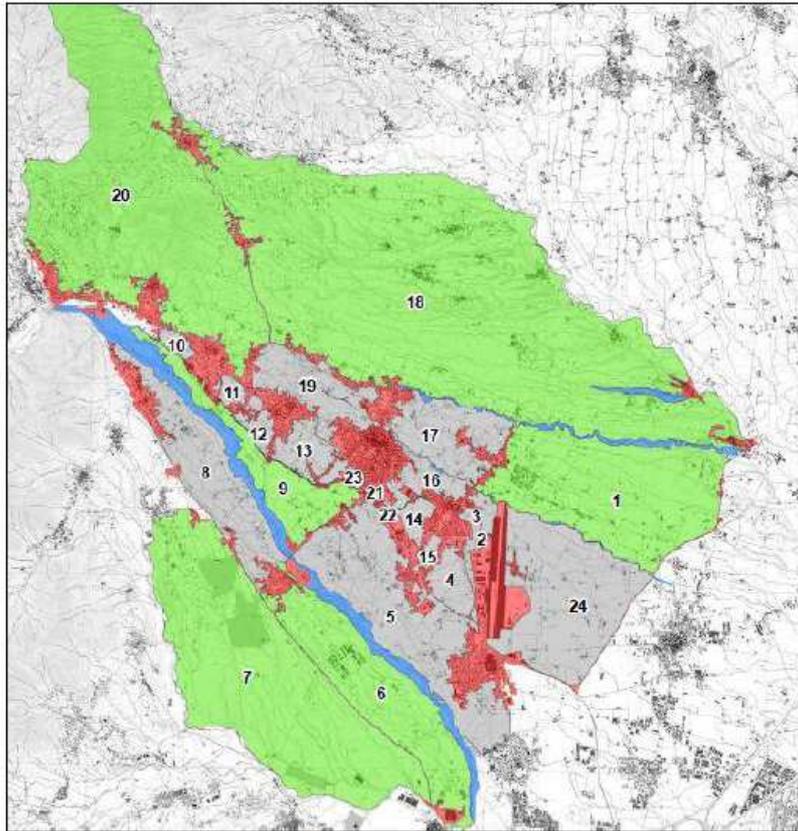


Figura 5. In verde i settori che soddisfano la disuguaglianza  $E_i > h_i U_i$

Per quanto riguarda gli scenari a cui il territorio propende, è noto, dall'analisi di stabilità dell'equazione dedotta nel lavoro (Gobattoni et al., 2014), che i settori per cui vale la disuguaglianza  $E_i < h_i U_i$  tendono asintoticamente ad annullare la produzione di Btc. Viceversa se un settore presenta indici per cui vale la disuguaglianza opposta, i.e.  $E_i > h_i U_i$  allora il settore tenderà ad avere nel tempo una produzione di Btc, in generale, non nulla, che potrà essere maggiore o minore di quella iniziale determinata dal grafo ecologico. Inoltre, il verificarsi di quest'ultimo caso, cioè quello di una diminuzione della produzione di Btc, è tipica di quei settori che non sono in grado di scambiare energia con gli altri settori confinanti a causa della presenza di barriere impermeabili; questa situazione è rappresentativa di quei territori caratterizzati dalla frammentazione ed insularizzazione ambientale.

Nella Fig.5 è possibile distinguere i sei settori (1, 6, 7, 9, 18, 20) che soddisfano la disuguaglianza  $E_i > h_i U_i$  (colorati in verde), mentre tutti gli altri (i restanti diciotto), che non la soddisfano, sono contraddistinti dalla colorazione in grigio. Inoltre, ancora una volta, sono indicate in rosso le barriere impermeabili.

Per mostrare con maggior chiarezza una previsione nel tempo della produzione di Btc dei settori, è stata eseguita una simulazione numerica del modello dato dall'equazione (2), utilizzando la formula risolutiva (4). I risultati sono mostrati nella Fig.6, che presenta una scala temporale logaritmica arbitraria sull'asse delle ascisse e i valori di Btc, appunto, su quella delle ordinate. Per tale analisi sono stati scelti i sei settori che tendono allo scenario dato dalla disuguaglianza  $E_i > h_i U_i$ ; il grafico mostra che solo due di essi, il 7 e il 9, proiettano una crescita nella produzione di Btc. Per gli altri la previsione è quella di una produzione di Btc che comunque mostra una tendenza di decadimento.

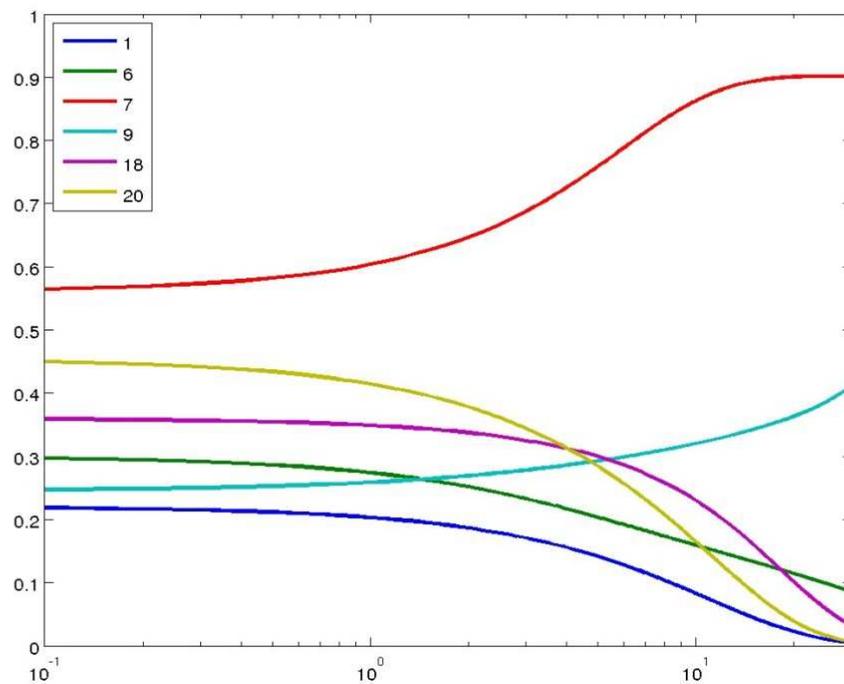


Fig.6 – Valori dell'indice di Btc  $E_i$  in funzione del tempo per i settori in cui  $E_i > h_i U_i$

Dall'analisi delle cartografie prodotte, emerge che i due settori 7 e 9 coincidono, rispettivamente con il Parco naturale della Mandria e con l'area contigua della Stura di Lanzo, definiti come le principali fonti di biodiversità del territorio. Gli altri settori, invece, nonostante abbiamo in certi casi alti valori di Btc iniziale (il settore 20 e il 18, contenente la riserva naturale della Vauda) sono destinati all'insularizzazione ambientale, in quanto appaiono maggiormente assediati dal tessuto urbano, che assume il ruolo di una barriera impermeabile all'interno del sistema ambientale, rendendo difficoltoso il passaggio di energia tra le zone vegetali presenti. In conclusione, dunque, si può affermare che si è in presenza di un sistema ambientale ancora caratterizzato da biotopi resistenti ad eventuali fattori esterni ma prossimo alla trasformazione in paesaggio resiliente qualora non si arrestino i meccanismi di impoverimento territoriale (*sprawl* urbano e conversione a seminativi delle macchie boscate e della brughiera presente).

## 7. Conclusioni

Mediante l'applicazione delle metodologie dell'ecologia del paesaggio e del modello matematico PANDORA 2.1, è stato possibile stimare il valore ecologico dell'area oggetto di studio in funzione di un contesto d'area vasta. L'elaborazione dell'ecomosaico e la successiva valutazione della stabilità ecologica, hanno permesso di definire un quadro completo delle dinamiche ambientali. La definizione degli scenari evolutivi mediante il modello matematico PANDORA 2.1, invece, ha contribuito alla valutazione eco sistemica dell'area di dettaglio, sancendo la condizione critica del sistema ambientale caratterizzato da biotopi resistenti ad eventuali fattori esterni ma prossimi alla trasformazione in paesaggi resilienti qualora non si arrestino i meccanismi di impoverimento territoriale; d'altra parte tale modello potrebbe concorrere ad un ipotetico processo gestionale dei cosiddetti servizi eco sistemici (Pelorosso et al., 2015), definibili come i benefici multipli forniti dagli ecosistemi alla comunità (servizi di supporto, servizi di fornitura, servizi di regolazione, servizi culturali<sup>6</sup>). La valutazione dei servizi eco sistemici si sta diffondendo a livello globale in numerose ricerche, studi, progetti internazionali e strumenti di pianificazione territoriale; alla base di questa innovazione sta la necessità di operare a scale territoriali vaste, in modo da osservare e comprendere, da ogni angolazione, le iterazioni che avvengono nel territorio e superare piuttosto l'ottica del singolo intervento. La condizione necessaria affinché si operi un'adeguata valutazione di

essi, è la predisposizione di proiezioni nel tempo degli effetti migliorativi degli interventi o viceversa dei possibili effetti collaterali scaturiti. In altre parole, per poter adottare un approccio ecosistemico, i decisori e in generale i politici dovrebbero dotarsi di strumenti conoscitivi e gestionali in grado di considerare le dinamiche in questione: il presente modello potrebbe dunque concorrere alla realizzazione di tale obiettivo.

## Bibliografia

- Battisti C. (2004), *Frammentazione ambientale, connettività, reti ecologiche. Un contributo teorico e metodologico con particolare riferimento alla fauna selvatica*. Provincia di Roma, Assessorato alle Politiche agricole, ambientali e Protezione civile.
- Fabbri P. (2003), *Paesaggio, Pianificazione, Sostenibilità*, Firenze, Alinea.
- Fabbri P. (2007), *Principi Ecologici per la Progettazione del Paesaggio*, Milano, Franco Angeli.
- Fabbri P., Finotto F. (2007), “Nuovi strumenti per la progettazione del paesaggio: grafo ecologico e perequazione”, in: Ghersi A. (a cura di), *Politiche Europee per il Paesaggio: proposte operative*, Roma, Gangemi, pp. 244-261.
- Finotto F. (2006), *Macchia paesistica. Criteri per una lettura della cellula strutturale del mosaico ambientale*, Quaderni della Ri-Vista, Ricerche per la progettazione del paesaggio, Firenze University press.
- Finotto F. (2011), “Landscape assessment: the ecological profile”, in Cassatella C., Peano A. (eds), *Landscape Indicators: Assessing and Monitoring Landscape Equality*, Dordrecht, Springer, pp. 47-75.
- Finotto F., Monaco R., Servente G. (2010), Un modello per la valutazione di energia biologica in un sistema ambientale, *Scienze Regionali (Italian Journal of Regional Science)*, 9, 3: 61-84.
- Gobattoni F., Lauro G., Leone A., Monaco R., Pelorosso R. (2011), “A procedure for the mathematical analysis of landscape evolution and scenarios assessment”, *Landscape & Urban Planning* n.103, pp. 289-302.
- Gobattoni F., Lauro G., Monaco R., Pelorosso R. (2012), “Mathematical models in landscape ecology: stability analysis and numerical tests”, *Acta Appl. Math.* n. 125, pp. 173-192.
- Gobattoni F., Groppi M., Monaco R., Pelorosso R. (2014), “New developments and results for mathematical models in environment evaluations”, *Acta Appl. Math.* n. 132, pp. 321-331.
- Ingegnoli V. (1993), *Fondamenti di ecologia del paesaggio*, Milano, Città Studi.
- Ingegnoli V., Forman R.T.T. (2002), *Landscape Ecology: a widening foundation*. Berlin, Springer-Verlag.
- Ingegnoli V., Giglio E. (2005), *Ecologia del paesaggio. Manuale per conservare gestire e pianificare l'ambiente*.
- Ixaru L.G. (1984), *Numerical Methods for Differential Equations and Applications*, Dordrecht, Reidel.
- Monaco R., Servente G. (2011), *Introduzione ai modelli matematici nelle scienze territoriali*, Torino, Celid.
- O'Neill R.V. et al. (1988), “Indices of landscape pattern”, *Landscape Ecology* n. 3, pp. 153-162.
- Pelorosso R., Geri F., Gobattoni F., Leone A., Monaco R. (in press), “Evaluation of ecosystem services related to bio-energy landscape connectivity (BELC) for land use decision making across different planning scales”, *Ecological Indicators*.
- Pielou E.C. (1975), *Ecological diversity*, New York, John Wiley & Sons.
- Shannon C.E., Weaver W. (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana, University of Illinois Press.
- Turner M.G. (1989), “Landscape Ecology: the effect of pattern on process”, *Annual Review of Ecology and Systematics* n. 20, pp. 171-197.

---

<sup>1</sup>La ricerca che ha condotto a questa pubblicazione è stata parzialmente finanziata da un contributo del Gruppo GNFM dell'INDAM - Istituto Nazionale di Alta Matematica " F. Severi"

<sup>2</sup>Procedure for mathematical analysis of landscape evolution and equilibrium scenarios assessment.

<sup>3</sup>Rural-urban inclusive governance strategies and tools for the sustainable development of deeply transforming Alpine territories.

<sup>4</sup>Gli indici di diversità di Shannon e di evenness, sono considerati nei set di indicatori di molti documenti europei finalizzati alla valutazione del paesaggio, quali ad esempio: EnRisk (Environmental Risk Assessment for European Agriculture) dell'European Centre for Nature Conservation (Delbaere, 2005), PAIS (Proposal on Agri-Environmental Indicators; Duchateau, 2002), ELCAI (European Landscape Character Assessment Initiative; Wascher, 2005).

<sup>5</sup> Per la definizione di tutte queste grandezze si rimanda a Monaco e Servente 2011, in bibliografia.

<sup>6</sup> Per uno studio approfondito si rimanda alla Classificazione dei servizi ecosistemici secondo il Millenium Ecosystem Assessment ([www.millenniumassessment.org](http://www.millenniumassessment.org)).