

CAPITOLO 5

L'ELABORAZIONE DEGLI INDICI

1. METODOLOGIA

Lo scopo del modello proposto è quello di capire in che modo la struttura territoriale, in termini di allocazione della risorsa suolo tra usi alternativi, contribuisca al raggiungimento dei due obiettivi primari, e tra loro in un certo senso conflittuali, della pianificazione sostenibile: la generazione di ricchezza, attraverso la dislocazione sul territorio delle attività economiche, e il mantenimento dell'integrità dei sistemi naturali. Si tratta di due obiettivi complessi, il cui perseguimento implica il rispetto di più condizioni e l'attenzione a più elementi dello sviluppo e della trasformazione del territorio. Per cercare di tradurre in termini operativi obiettivi complessi quali i suddetti, si fa spesso ricorso alla costruzione di quello che in letteratura viene chiamato "albero degli obiettivi" (Beinat, 1997): si individuano, cioè, degli obiettivi di secondo livello, che, nel loro insieme, definiscono e strutturano l'obiettivo primario. Nel tentativo di individuare gli obiettivi di secondo livello, si è cercato di dare risposta alle seguenti domande: quali caratteristiche spaziali deve avere il territorio per essere considerato "economicamente efficiente"?; quali caratteristiche deve invece possedere per poter essere definito "sostenibile" dal punto di vista ecologico? Tali caratteristiche sono l'espressione delle condizioni da rispettare nella progettazione del piano e delle quali occorre garantire il perdurare nel tempo se si vogliono raggiungere gli obiettivi suddetti di salute e conservazione dei sistemi naturali e di soddisfacimento dei bisogni economici della società

L'individuazione degli obiettivi di secondo livello, ovvero delle caratteristiche del territorio significative ai fini degli obiettivi primari prefissati, è stata attuata attraverso il ricorso a strumenti di discipline specifiche che si occupano di individuare i legami tra uso dello spazio e creazione di valore economico da un lato, e uso dello spazio e funzioni ecosistemiche dall'altro: nel primo caso si parla della disciplina dell'Economia Regionale¹, nel secondo caso si parla della *Landscape Ecology*².

¹ L'economia regionale è quella branca dell'economia che inserisce nello studio del funzionamento del mercato la dimensione "spazio", esplicitandola come elemento fondamentale nella determinazione dello sviluppo del sistema economico locale. La più antica branca di questa disciplina è la "teoria della localizzazione", sviluppata a partire dai primi del Novecento, che si occupa dei meccanismi economici sottostanti la distribuzione delle attività nello spazio.

² La *Landscape Ecology* è una giovane branca dell'ecologia, sviluppatasi dopo la seconda guerra mondiale. Secondo quanto afferma Carl Troll (uno dei padri fondatori e ideatore del termine *landscape ecology*), tale disciplina combina l'approccio spaziale (orizzontale) della geografia con l'approccio funzionale (verticale) tipico dell'ecologia nello studio dei complessi fenomeni di interazione tra sistema naturale e sistema antropico (Farina, 2006). Lo spazio, inteso come porzione di territorio, assume ruolo centrale nel determinare la diversità dei processi ecologici ed il legame tra processi che avvengono a scale territoriali differenti, all'interno di una concezione gerarchica dei sistemi naturali. Uno dei principali obiettivi di tale disciplina, che trova applicazione nei processi di pianificazione, è lo studio delle relazioni esistenti tra struttura

Nelle analisi multicriteriali, tra le quali si colloca il modello proposto, gli obiettivi sono tradotti in criteri di valutazione attraverso l'utilizzo degli attributi, ovvero di parametri che li esprimano in termini quantitativi. La definizione di obiettivi ed attributi costituisce generalmente la fase più difficoltosa del processo valutativo: elemento centrale del modello di valutazione presentato è la proposta di un set di obiettivi e di attributi di primo e secondo livello da utilizzare nelle valutazioni dei piani di area vasta.

Sono stati dunque definiti gli indicatori di secondo livello, proponendo dei parametri sensibili alle variazioni della struttura territoriale, che mettessero in evidenza il legame tra variazioni della struttura stessa e conseguimento dell'obiettivo di secondo livello. La natura di questi indicatori è diversa nei due casi: infatti, mentre l'integrità dei sistemi naturali dipende dalla struttura spaziale del territorio con legami di tipo puramente geometrico, la variazione di valore aggiunto/ricchezza generata da un piano è legata al valore che la collettività attribuisce ai beni prodotti e dunque le caratteristiche geometriche del territorio devono essere integrate con giudizi di valore, espressione del sistema di preferenze. Per questo motivo, i parametri che misurano gli obiettivi di secondo livello sono di natura puramente geometrica nel primo caso, mentre combinano misure di natura geometrica e misure di valore nel secondo caso. Attraverso l'aggregazione degli indicatori di secondo livello sono stati poi costruiti gli indici del modello: l'Indice Economico (IE), che quantifica l'obiettivo dell'efficienza economica, e l'Indice di Qualità (IQ), che quantifica l'obiettivo della salvaguardia degli ecosistemi. I due indici IE e IQ si presentano, quindi, come indici complessi costruiti a partire dagli indicatori semplici che misurano gli obiettivi di secondo livello³: essi rappresentano infatti la sintesi di più informazioni circa la struttura del territorio.

L'elaborazione di ciascuno dei due indici per la misurazione dei due criteri di valutazione adottati nel modello, è avvenuta, dunque, secondo i seguenti steps:

- individuazione della disciplina di riferimento dalla quale trarre i principi per la definizione delle caratteristiche territoriali importanti e significative;
- definizione degli obiettivi di secondo livello, attraverso l'individuazione delle caratteristiche suddette;
- definizione degli indicatori di secondo livello;

territoriale e funzioni ecosistemiche: tali relazioni aiutano a prevedere le conseguenze sul piano ecologico delle attività di pianificazione e di disegno del territorio, contribuendo a creare un territorio più sostenibile (Leitao et al, 2006).

³ Gli indicatori sono delle variabili che indicano lo stato o la variazione di stato di un fenomeno che non sia di per sé assoggettabile a misurazione diretta. Essi rappresentano, integrano e caratterizzano informazioni contenute in vaste serie di dati, che spesso non sono misurabili direttamente. Sono utili strumenti laddove l'informazione primaria è troppo complessa per essere maneggiata senza fare delle aggregazioni (Wiggering et al., 2006). Gli indici, invece, sono dei parametri complessi che sintetizzano le informazioni espresse da più indicatori, in un unico parametro adimensionale normalizzato.

- aggregazione degli indicatori di secondo livello per la costruzione dell'Indice primario, IE e IQ.

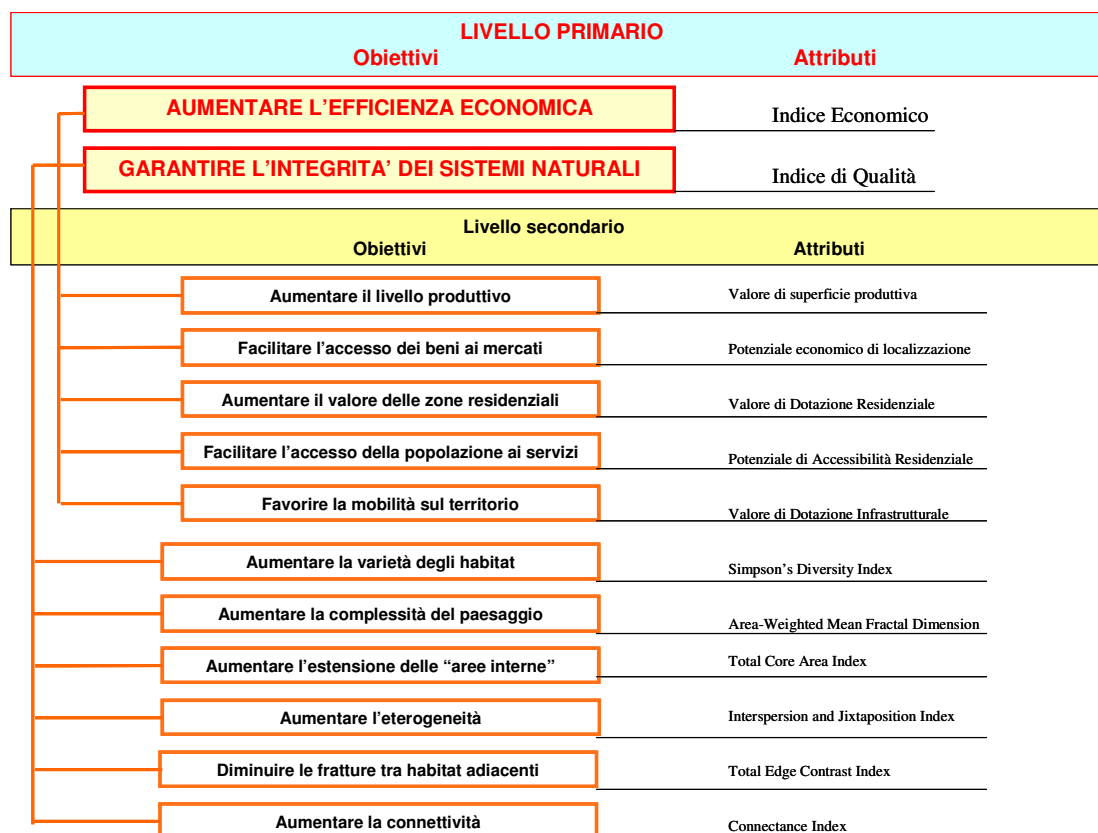


Figura 1: L'albero degli obiettivi del modello proposto.

2. L' "INDICE DI QUALITÀ"

2.1. Generalità

L'indice di qualità del territorio (IQ) è un indice che rende conto del livello di integrità e di salute degli ecosistemi, elemento fondamentale per la continua produzione dei beni e servizi ecosistemici che sono alla base di qualsiasi attività sociale ed economica⁴. L'ipotesi alla base del calcolo di questo indice è la stretta dipendenza tra organizzazione spaziale del territorio e funzioni ecosistemiche, ipotesi fondante della disciplina della *landscape ecology* (LE). Secondo l'approccio della LE, la struttura spaziale del territorio, non solo in termini di superficie complessiva destinata a ciascun

⁴Come si è visto nei capitoli precedenti, tali beni e servizi ecosistemici non attraversano il mercato, in quanto legati in particolare alle funzioni di supporto e di regolazione svolte dai sistemi naturali, e non hanno carattere di sostituibilità, motivo per cui diventa poco significativo il tentativo di misurarne il valore in termini economici.

uso del suolo, ma anche in termini di dislocazione spaziale dei diversi *land-use*, è elemento fondamentale per garantire nel tempo il funzionamento costante dei sistemi naturali e dunque l'espletamento delle funzioni ad esso conseguenti. Forman (1995), infatti, afferma che: “*for any landscape, or major proportion of landscape, there exists an optimal spatial arrangement of ecosystems and land uses for achieving basic human needs and for creating a sustainable environment*”.

La modificazione del territorio conseguente al suo utilizzo da parte della collettività porta ad una semplificazione della struttura territoriale: numerosi studi suggeriscono che la complessità geometrica di un territorio decresce con l'aumentare dell'intensità dell'uso del suolo e questo fenomeno è accompagnato da una diminuzione della diversità biologica degli habitat naturali da un lato, e un incremento della produzione economica dall'altro. In particolare, la LE focalizza l'attenzione su tre caratteristiche fondamentali del paesaggio (Forman, 1986; Leitao, 2006):

- la struttura, che concerne la composizione e lo schema di distribuzione spaziale degli elementi del territorio, ovvero degli ecosistemi o delle tipologie di uso del suolo. La struttura del territorio ha due dimensioni: una è la composizione, ovvero il numero, la tipologia e l'estensione degli elementi, senza alcun riferimento alla loro distribuzione nello spazio; l'altra è la configurazione, che rappresenta invece il carattere spaziale, il posizionamento relativo, l'orientamento degli elementi del territorio;
- le funzioni, individuate nei flussi di animali, piante, energia, minerali nutrienti e acqua che attraversano gli elementi del territorio;
- il cambiamento, ovvero l'alterazione della struttura e delle funzioni nel tempo, in seguito a processi adattivi di interazione tra gli elementi del territorio e con le attività umane che ne modellano la struttura.

La dimensione spaziale e, nello specifico, le modalità di localizzazione, distribuzione e forma degli ecosistemi, sono direttamente collegate ai processi che avvengono nei sistemi territoriali: il modo più efficace per gestire l'uso del suolo è capire l'interazione dinamica tra struttura e funzioni, attraverso l'analisi dei processi che prendono vita nel territorio e che vanno a modificare il *land mosaic* (Forman, 1995)⁵. In particolare il

⁵Secondo Forman (1995), qualsiasi territorio può essere descritto attraverso tre elementi fondamentali che costituiscono il *mosaico*: le macchie di ecosistemi (*patches*), i corridoi e la matrice. Le macchie di ecosistemi sono definite come aree relativamente omogenee al loro interno, caratterizzate da uno specifico *land use*, che differiscono essenzialmente da ciò che le circondano. I corridoi sono invece aree ad estensione prevalentemente lineare caratterizzate da un particolare uso del suolo, differente dal contesto che lo circonda. La matrice è invece l'uso del suolo dominante in termini di estensione, grado di connettività e continuità.

fenomeno della frammentazione, che causa la suddivisione del territorio in *patches*⁶ di dimensioni sempre minori, è una delle maggiori cause della riduzione della biodiversità e dell'alterazione dei sistemi naturali. Le cause di questi fenomeni sono generalmente di natura antropica: l'uso del suolo a destinazione urbana o agricola, la realizzazione di strade, che rappresentano fratture nel territorio, ma anche di spazi adibiti ad attività ricreative. L'effetto dell'attività antropica si esplica sotto due aspetti principali: da un lato la semplificazione dei sistemi naturali in termini di diminuzione della diversità, e dall'altra, l'alterazione della struttura spaziale del territorio, verso situazioni a minore eterogeneità⁷.

Esiste dunque una profonda relazione tra struttura spaziale del territorio e integrità dei sistemi naturali: la LE è in grado di fornire indicazioni su quali debbano essere le caratteristiche spaziali di un territorio al fine di garantire nel tempo l'integrità dei sistemi naturali; queste caratteristiche vengono utilizzate dal modello come obiettivi di secondo livello per la sostenibilità ecologica. Diventa così possibile misurare il grado di raggiungimento di tali obiettivi attraverso gli strumenti quantitativi propri della LE, noti come *landscape metrics*.

2.2. Obiettivi e indicatori i secondo livello

Compito della pianificazione sostenibile è quello di ricercare la distribuzione degli usi del suolo (*habitat*) che consente in misura maggiore ai sistemi naturali di rigenerarsi indefinitamente, anche a fronte di uno sfruttamento delle risorse. A tale scopo, la LE individua alcune caratteristiche che devono essere rispettate nelle trasformazioni del tessuto territoriale, caratteristiche il cui perseguimento costituisce gli obiettivi di secondo livello per il raggiungimento dell'obiettivo primario di conservazione dei sistemi naturali. Essi sono:

- aumentare la varietà (DIVERSITY) del territorio,
- aumentare la complessità del paesaggio, per favorire gli scambi di materia ed energia che avvengono attraverso i confini dei *patches*;
- aumentare l'estensione delle aree interne (CORE AREA), ovvero delle aree non influenzate da fenomeni di interazione tra ecosistemi;

⁶Nella trattazione che segue, il termine *patch* sarà utilizzato come sinonimo di *habitat* e di *land use*.

⁷I concetti di diversità e di eterogeneità sono tra loro collegati, ma mentre la diversità descrive la differenziazione qualitativa dei *patches*, l'eterogeneità rappresenta la complessità spaziale del territorio: essa può essere definita come la distribuzione disomogenea, ma non casuale, degli oggetti (*patches* o *corridors*) nel territorio (Forman, 1995).

- aumentare l'eterogeneità del territorio, in termini di configurazione spaziale e distribuzione delle diverse tipologie di *patches*;
- diminuire il livello di contrapposizione tra habitat adiacenti (CONTRAST), ovvero la differenza tra *patches* confinanti, in termini di caratteristiche ecologiche;
- aumentare la connettività del territorio (CONNECTIVITY), ovvero il grado in cui la struttura del territorio facilita od impedisce la circolazione delle specie.

Una volta definiti gli obiettivi di secondo livello, il passo successivo per la creazione del modello consiste nella definizione di indicatori in grado di misurarli. A ciò vengono in aiuto le *landscape metrics*, algoritmi che esprimono quantitativamente la struttura del territorio, misurandone le caratteristiche spaziali a partire da cartografia o da dati telerilevati sulla copertura del suolo⁸.

Le metriche in generale rappresentano simultaneamente più aspetti del territorio: molte di esse sono tra loro correlate perché vengono calcolate a partire dagli stessi parametri primari indipendenti (che sono, ad esempio, la superficie, la lunghezza dei confini, la tipologia); alcune sono ridondanti perché sono modi alternativi di rappresentare la stessa informazione. L'esatta interpretazione di una metrica dipende dalla conoscenza di come essa varia in funzione della variazione della struttura territoriale⁹. Ad oggi esiste una gran varietà di metriche, alcune maggiormente codificate, altre il cui comportamento in relazione alla struttura territoriale non è ancora del tutto chiaro: molti studi sono stati fatti con l'intento di individuare quelle maggiormente significative, ma il tema è ancora al centro di un ampio dibattito (Li e Reynolds, 1995; McGarigal e McComb, 1995; Ritters et al., 1995; Botequilha Leitao et al., 2006). In realtà, l'utilizzo di una metrica piuttosto che di un'altra nella rappresentazione della stessa caratteristica del territorio dipende dagli obiettivi della valutazione e dagli strumenti di analisi a disposizione¹⁰.

⁸Le metriche possono essere definite su tre livelli di risoluzione spaziale: a livello di singolo *patch*, a livello di classe, ovvero integrate su tutti i *patches* di una medesima tipologia (classe), e a livello dell'intero paesaggio, ovvero integrate su tutti i tipi di *patches* che costituiscono il territorio. Nella costruzione dell'indice di qualità si utilizzeranno le metriche definite sull'intero territorio. Le metriche, inoltre, si dividono in due categorie: le metriche di composizione, che misurano la varietà e l'abbondanza delle tipologie di *patches* presenti, senza però considerare il carattere spaziale della loro dislocazione; le metriche di configurazione, che invece si riferiscono alla disposizione, all'orientamento, alla compenetrazione dei diversi *patches*.

⁹I modelli neutrali costituiscono un eccellente strumento per l'interpretazione del comportamento delle LM in talune condizioni. Essi infatti controllano il processo che genera la struttura territoriale, permettendo di individuare i precisi legami tra variazioni nella struttura e comportamento dell'indice (Gustafson, 1998).

¹⁰Lo scopo del presente lavoro esula da una trattazione esaustiva di tutte le metriche esistenti. Verranno trattate solo quelle utilizzate nel modello. Per una trattazione completa si rimanda a: Farina 2006; Botequilha Leitao 2006; Turner e Gardner 1991; <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.

Allo scopo della costruzione dell'indice, le metriche per la quantificazione degli obiettivi di secondo livello devono soddisfare alcuni requisiti:

- deve esserne noto il comportamento in relazione alla variazione della geometria del territorio;
- devono assumere valori all'interno di un range di variazione limitato, per poter meglio delineare le situazioni estreme;
- devono essere indipendenti tra loro, per evitare fenomeni di ridondanza e, soprattutto, di correlazione tra variabili.

La diversità del territorio

All'interno del concetto di varietà del territorio, indicato con il termine inglese *diversity*, ricadono sia il concetto di ricchezza, inteso come presenza di un elevato numero di habitat (*richness*), ovvero di diversi *land-use*, sia l'idea della omogenea ripartizione del territorio tra essi (*evenness*). Si tratta di un concetto nato nel campo dell'ecologia per lo studio delle popolazioni e mutuato dalla *landscape ecology* per misurare la numerosità dei *land use* presenti nell' "ecosistema territorio". Gli indici di diversità forniscono, dunque, informazioni non solo sulla ricchezza dell'ecosistema, ovvero il numero di *land use* presenti, ma prendono in considerazione anche l'abbondanza relativa tra essi. Si considerino ad esempio due territori di 100 ettari ciascuno, in cui sono presenti 10 tipologie di *land use*. Un territorio presenta 10 ettari per ogni *land use*, mentre l'altro ha un ettaro per ciascuno dei nove *land use* e 91 ettari per il decimo. Chiaramente il primo territorio presenta una maggiore diversità, ma entrambi hanno la stessa ricchezza in termini di ecosistemi presenti. Prendendo in considerazione l'abbondanza relativa, l'indice di diversità dipende non solo dalla ricchezza, ma anche dalla uniformità con cui il territorio è ripartito tra i diversi usi.

Tra gli indici di diversità, si è scelto di utilizzare in questo caso il *Simpson Diversity Index* (SIDI): esso rappresenta la probabilità che due *patches* scelti casualmente appartengano alla stessa tipologia (classe). Viene calcolato attraverso un algoritmo piuttosto semplice:

$$SIDI = 1 - \sum_{i=1}^m P_i^2$$

in cui P_i rappresenta l'abbondanza relativa, ovvero la frazione di territorio occupata dalla i -esima tipologia di *patches*. Si calcola dividendo il numero di *patches* della classe in questione (n_i) per il numero complessivo di *patches* presenti sul territorio ($P_i = n_i/N$). La sommatoria è estesa a tutte le classi presenti (m).

Si tratta di un indice adimensionale, con campo di variazione limitato: $0 \leq SIDI < 1$. SIDI assume il valore zero quando il territorio contiene un solo *patch*, ovvero ha diversità nulla. Man mano che il numero di tipologie di habitat (*richness*) aumenta e la distribuzione della superficie si fa omogenea tra esse (*evenness*) il valore di SIDI tende all'unità.

La complessità del paesaggio

La complessità del paesaggio è espressa dalla complessità della forma dei *patches* (PATCH SHAPE). La forma dei *patches* influenza l'intensità e la natura delle interazioni tra ecosistemi, che avvengono con scambi di materia ed energia attraverso i confini dei diversi habitat. Occorre dunque avere una "linea di scambio" (il confine) sufficientemente elevata rispetto alla superficie dei *patches*: per questo motivo assume importanza il rapporto tra area e perimetro, quale indice della complessità della forma. La forma è un parametro difficile da quantificare in modo esauriente in una sola metrica. In letteratura si trovano più indici (Botequila Leitao, 2002; Forman, 1995; Mccarigal et al., 1995), ma nei più recenti sviluppi della *Landscape Ecology* si sta sempre più affermando l'utilizzo della dimensione frattale, come indice di complessità geometrica. Tale indice è basato sul rapporto tra il perimetro (P) e l'area (A) dell'oggetto: il grado di complessità di un poligono è espresso attraverso la relazione $P \approx \sqrt{A^D}$ (o in termini logaritmici $\ln P \approx \frac{D}{2} \ln A$) che lega queste due caratteristiche attraverso l'utilizzo di un esponente, la dimensione frattale appunto (D)¹¹.

Nell'applicazione allo studio della struttura territoriale, la dimensione frattale è calcolata per ciascun patch ($FRAC_{ij}$: dimensione frattale del j-esimo patch appartenente alla i-esima tipologia) secondo il seguente algoritmo:

$$FRAC_{ij} = \frac{2 \ln(0,25 \cdot p_{ij})}{\ln a_{ij}}$$

p_{ij} = perimetro del patch, espresso in metri;

a_{ij} = area del patch, espressa in metri quadrati di superficie.

¹¹Il termine "frattale" fu coniato nel 1975 da Mandelbrot per descrivere un oggetto irregolare che presenta tale irregolarità a tutte le scale di osservazione, in modo invariato. Un frattale è una forma fatta di parti simili all'intero: può essere considerato un oggetto a dimensione frazionaria (Farina, 2006). Il concetto di dimensione frattale è basato a sua volta sul concetto di autosimilarità, ovvero la caratteristica di un oggetto di poter essere diviso in N parti simili alla figura intera. La dimensione frattale è generalmente compresa tra 1 e 2: frattali di dimensione prossima ad 1 saranno simili ad una curva, mentre frattali di dimensione prossima a 2 tenderanno ad occupare tutto il piano.

Si tratta di un indice adimensionale, con campo di variazione limitato: $1 \leq \text{FRAC} \leq 2$. FRAC assume il valore unitario per forme euclidee estremamente semplici, come ad esempio il quadrato, il cerchio, il rettangolo, per le quali $P = \sqrt{A}$, mentre per forme convolute e complesse, nelle quali il perimetro diventa sempre più esteso nel piano, si ha che $P \approx A$, con $D = 2$. Il parametro FRAC rappresenta la complessità della forma in modo più elaborato rispetto ad altri indici di più semplice calcolo, ma, a differenza di questi, ha il vantaggio di non essere sensibile agli effetti di scala.

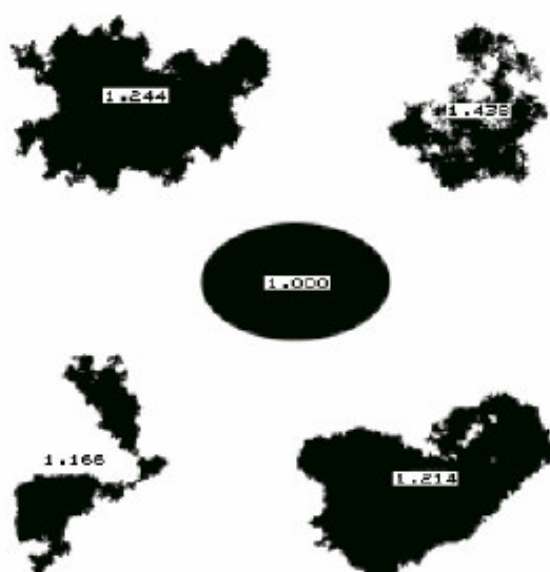


Figura 2: Esempi di differenti livelli di complessità della forma, espressi dalla dimensione frattale. Immagine tratta da:
http://www.reindeergraphics.com/tutorial_images/droppedImage-112.png

Per estendere il concetto di dimensione frattale all'intero territorio, si calcola generalmente una media pesata, in cui i pesi sono rappresentati dalla superficie dei *patches* (*Area-Weighted Mean Fractal Index*)¹². A livello territoriale quindi, il calcolo della dimensione frattale si esegue attraverso il seguente algoritmo, che presenta il medesimo range di variazione di FRAC:

¹²In realtà, le modalità di estensione a livello territoriale delle metriche calcolate per i singoli *patches* sono molteplici: l'idea di base consiste in ogni caso nel tentativo di riassumere le informazioni calcolate per i singoli *patches*. A livello territoriale si possono considerare diverse elaborazioni. L'estensione può avvenire infatti attraverso il calcolo delle semplice media aritmetica, oppure attraverso la media pesata utilizzata in questo modello, che pesa i valori dei singoli *patches* sulla base della loro estensione superficiale; oppure attraverso il valore medio. Si possono considerare anche il range di variazione, la deviazione standard e il coefficiente di variazione (per approfondimenti: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>).

$$AM_FRAC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \left[FRAC_{ij} \cdot \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} a_{ij}} \right) \right]$$

m = numero di tipologie di *patches* presenti;

n_i = numero di *patches* della i -esima tipologia;

a_{ij} = area del patch ij .

L'estensione delle aree interne

L'area interna (*core area*) di un *patch* è l'area non interessata da fenomeni di interazione tra ecosistemi. Tali fenomeni sono noti come “fenomeni di confine” (*edge effects*) e rappresentano caratteristiche ecologiche associate alla congiunzione tra habitat differenti: essi possono influenzare in modo positivo o negativo le specie presenti. L'estensione dell'area interna è legata alla dimensione dei *patches*¹³, alla complessità della forma ed alla distanza massima di propagazione dei fenomeni di confine¹⁴. Nel valutare la possibilità di sopravvivenza degli ecosistemi, bisogna fare riferimento alla superficie effettivamente disponibile, che è determinata dalle aree interne. A parità di altre condizioni, *patches* di dimensioni minori ma con una forma maggiormente complessa possono essere caratterizzati da maggiore estensione della *core area*. La *core area* è definita come l'area all'interno di un *patch* che si trova oltre una determinata distanza dal confine della macchia. Le misure della *core area* riflettono sia la composizione che la configurazione del territorio. Molti degli indici che hanno a che fare con il numero o la densità delle macchie, oppure la loro dimensione, hanno i corrispondenti indici in termini di *core area*, calcolati in modo analogo dopo aver eliminato le zone di confine o tampone.

¹³La dimensione dei *patches* influenza profondamente i processi ecologici dei sistemi naturali, la produttività primaria, l'accumulo di nutrienti, i flussi di specie animali e vegetali sul territorio, la circolazione della risorsa idrica, ecc. *Patches* di dimensioni elevate sono in genere da preferire, ma non possono sostituire *in toto* le funzioni ecologiche espletate da *patches* di dimensioni più ridotte. Il territorio ideale dovrebbe essere composto da *patches* di grandi dimensioni contornati da altri di dimensioni minori sparpagliati nella matrice di fondo (Forman, 1995). In generale, le metriche che misurano le dimensioni dei *patches* sono sempre presenti nei sistemi di metriche utilizzati per lo studio e l'analisi del territorio (si vedano ad esempio: Botequilha Leitao et al., 2006; Venturelli e Galli, 2006). Nel presente modello si è scelto di utilizzare una misura della *core area*, che misura gli effetti congiunti della dimensione dell'habitat e dei fenomeni di confine, per due motivi: il modello ha bisogno di indici con campo di variazione limitato e non esistono metriche con questa caratteristica che rappresentino la dimensione dei *patches*; inoltre il condensare due caratteristiche importanti del territorio in una sola metrica permette di diminuire il numero di variabili del modello.

¹⁴La distanza alla quale si propagano gli *edge effects*, a partire dalla linea di confine tra due differenti habitat, si definisce sulla base del fenomeno in osservazione e può essere considerata costante o variabile per ciascuna tipologia di habitat.

L'indice di area interna utilizzato nel modello è il *Total Core Area Index* (TCAI), che misura l'ammontare della superficie non affetta da fenomeni di confine, in percentuale rispetto alla superficie complessiva del territorio, in relazione ad un prefissata larghezza dei confini. Esso ha dunque un campo di variazione limitato: $0 < CAI < 100$. Il valore dell'indice a livello dell'intero territorio si calcola a partire dal valore della *core area* dei singoli *patches* secondo il seguente algoritmo:

$$TCAI = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^c}{A} \cdot 100$$

a_{ij}^c = core area del j-esimo *patch* della i-esima classe;

A = area totale del territorio;

n = numero di *patches* della i-esima classe;

m = numero di classi.

Il TCAI assume valore nullo quando tutti i *patches* hanno conformazione e dimensioni tali da non avere superficie non toccata da fenomeni di confine; tende al valore massimo quando invece gran parte della superficie può essere definita "interna" (Fig. 3).

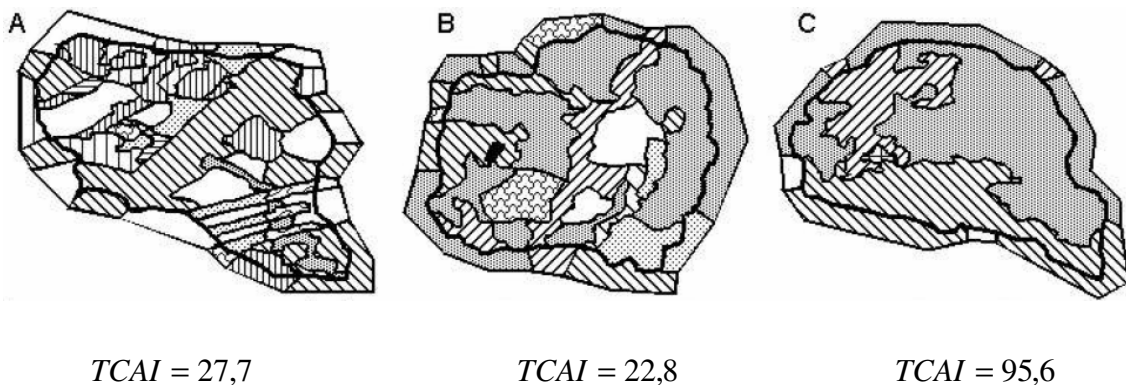


Figura 3: Variazione dell'indice TCAI in funzione della distribuzione spaziale dei *patches*. Immagine tratta da (McGarigal e Marks, 1995).

L'eterogeneità del territorio

L'eterogeneità rappresenta la complessità spaziale del territorio: può essere intesa come la distribuzione disomogenea, ma non casuale, dei *patches* (Forman, 1995). Essa può essere misurata attraverso l'*Interspersion and Juxtaposition Index* (IJI), che rappresenta una misura esplicita della configurazione spaziale dei *patches*, dal momento che quantifica il livello di interspersione, ovvero indica come sono intervallate nel

territorio le diverse tipologie di *patches* (ossia i diversi *land use*)¹⁵. Alla base del calcolo di tale indice sta il concetto di adiacenza tra classi, misurato in termini di lunghezza di confine tra esse. L'indice IJI è definito in percentuale rispetto al massimo livello di interspersione possibile in relazione al numero di classi presenti ed ha dunque un campo di variazione limitato: $0 < IJI \leq 100$

Esso si calcola attraverso il seguente algoritmo:

$$IJI = \frac{-\sum_{i=1}^m \sum_{k=i+1}^m \left[\left(\frac{e_{ik}}{E} \right) \cdot \ln \left(\frac{e_{ik}}{E} \right) \right]}{\ln \frac{m(m-1)}{2}} \cdot 100$$

e_{ik} = lunghezza totale del confine tra le classi i e k ;

E = lunghezza complessiva dei confini tra *patches* nel territorio, escluso il perimetro del territorio in esame;

m = numero di classi presenti.

Tale indice rappresenta una variabile indipendente dagli altri parametri utilizzati nel modello: un territorio che presenti 4 ampi *patches* differenti, e un territorio che invece sia costituito da 100 *patches* di dimensioni minori appartenenti alle stesse 4 classi, avranno indice IJI di pari valore se le classi sono ugualmente intersperse, cioè se le classi hanno la stessa adiacenza l'una all'altra. IJI tende ad assumere valori bassi quando le classi non sono equamente adiacenti a tutte le altre; mentre tende al valore massimo (100) nel caso contrario, quando si ha la massima interspersione. In Fig. 4, si mostra il concetto base dell'indice: ognuna delle tre aree rappresentate è costituita da 5 classi, che mantengono sempre la stessa estensione, ma sono dislocate in modo differente sul territorio. La maggior complessità nell'organizzazione spaziale è riflessa in una crescita dell'indice, che raggiunge il valore massimo quando le classi sono ugualmente adiacenti tra loro, ovvero quando la lunghezza dei confini tra le diverse classi è uguale.

¹⁵L'indice IJI, a differenza del *Contagion Index*, altro indice di configurazione altamente utilizzato, misura solo l'interspersione, ovvero l'intervallarsi delle diverse classi, e non la dispersione dei *patches* sul territorio, che consiste invece nella distribuzione spaziale di una classe. Il *Contagion Index* al contrario rappresenta una misura aggregata delle due caratteristiche e per questo motivo il suo comportamento risulta meno chiaro in relazione alla struttura territoriale. In questa sede si è preferito utilizzare il IJI non solo perché corrisponde al requisito imposto ai parametri di rappresentare una sola caratteristica del territorio, ma anche perché il IJI è applicabile a qualsiasi tipologia di mappa, sia essa in formato raster o vettoriale, mentre il *Contagion Index* è fortemente influenzato dalla risoluzione dell'immagine, perché viene calcolato sulla base della adiacenza tra celle, mentre il IJI viene calcolato sulla base della adiacenza tra *patches* e dunque non risente di tale inconveniente (McGarigal e Marks, 1995).

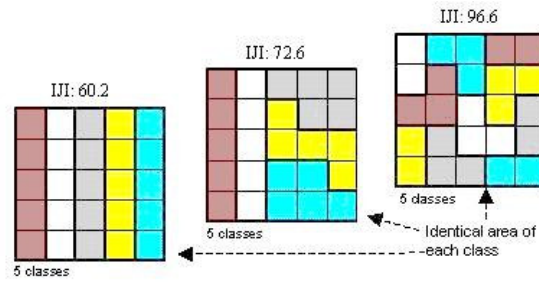


Figura 4: Variazione dell'indice IJI al variare della distribuzione spaziale dei *patches*. Immagine tratta da <http://ec.europa.eu/agriculture/publi/landscape/ch1.htm>.

La contrapposizione tra habitat adiacenti

Il livello di contrasto tra habitat adiacenti ha notevoli conseguenze non solo nella regolazione dei flussi di specie che attraversano il territorio, ma anche nel regolare la biodiversità e la propagazione di eventi calamitosi. In genere, l'adiacenza tra *patches* di natura simile, ad esempio una foresta ed una zona umida, comporta conseguenze ecologiche di gran lunga minori rispetto all'accostamento di usi del suolo profondamente diversi, come ad esempio il confine tra una foresta ed una zona urbana (Botequilha Leitao, 2006; Forman, 1995).

La metrica utilizzata per misurare questa caratteristica del territorio è il *Total Edge Contast Index* (TECI): è una misura della configurazione del territorio, in quanto fa esplicito riferimento alla collocazione spaziale dei diversi usi del suolo. Il calcolo di questa metrica si basa su due informazioni principali:

- il livello di contrasto tra tipologie di *patches* (d_{ik}); si tratta di un peso che può assumere valori compresi tra lo zero e l'unità, che viene assegnato a tutte le possibili combinazioni di usi del suolo. Tale peso viene assegnato sulla base di considerazioni specifiche circa i processi naturali e le relazioni oggetto dello studio;
- la lunghezza di ciascuna tipologia di confine (e_{ik}), che deve essere determinata per ciascuna possibile combinazione di usi del suolo.

Ciascuna tipologia di confine viene moltiplicata per il rispettivo livello di contrasto; questi valori sommati tra loro vengono poi divisi per la lunghezza complessiva dei confini (E'), e tradotti in percentuale: $0 \leq TECI \leq 100$

L'algoritmo per il calcolo del TECI è il seguente:

$$TECI = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=i+1}^m (e_{ik} \cdot d_{ik})}{E'} \cdot 100$$

e_{ik} = lunghezza complessiva del confine tra le due tipologie di *patches* i e k , espressa in metri;

d_{ik} = contrasto tra le due tipologie di *patches* i e k ;

m = numero di tipologie di *patches* presenti;

E' = lunghezza complessiva dei confini, comprendente anche il perimetro del territorio in esame.

Il TECI assume valore nullo quando non vi sono confini all'interno del territorio ($e_{ik} = 0$ per qualsiasi combinazione di i e k), che significa che l'intero territorio è composto da un unico *patch*; oppure quando il valutatore ritiene che tutte le tipologie di confine abbiano contrasto nullo ($d_{ik} = 0$ per qualsiasi combinazione di i e k). Il TECI assume invece valore massimo quando a tutte le tipologie di confine è assegnato massimo contrasto ($d_{ik} = 1$ per qualsiasi combinazione di i e k).

La connettività del territorio

La connettività è una caratteristica del territorio che si riferisce alla capacità di facilitare o impedire i flussi ecologici. Nonostante sia considerata un elemento vitale della struttura del territorio, essa ancora non ha una definizione precisa e una modalità di quantificazione univoca. Ciò è dovuto al fatto che all'interno di questo concetto in realtà ricadono due aspetti importanti: da un lato la connessione strutturale degli habitat, e dall'altro la connessione funzionale del territorio, così come viene percepita dagli organismi o dai processi ecologici interessati. La connessione strutturale è legata alla continuità fisica di un habitat, caratteristica che viene perduta a seguito dei processi di frammentazione di origine naturale o antropica che si verificano sul territorio: si tratta dunque di una caratteristica della configurazione territoriale. Il concetto di connessione funzionale tra *patches*, invece, dipende chiaramente dal processo o dall'organismo d'interesse e fa riferimento ad una distanza di soglia al di sopra della quale gli spostamenti/flussi di quella determinata specie non avvengono.

Generalmente, un territorio è considerato “connesso” quando gli organismi e i processi naturali possono muoversi facilmente attraverso i diversi habitat. La perdita di connettività è legata al fenomeno della frammentazione, ovvero la suddivisione degli habitat in una serie di *patches* di dimensioni inferiori, isolati gli uni dagli altri da una matrice sostanzialmente diversa dall'originale (Wilcove et al., 1986; Forman, 1995; Farina, 2006). Quando gli habitat sono frammentati, il conseguente isolamento comporta un grosso rischio di estinzione per le specie ed i processi ecologici del territorio.

L'indice usato per la misura della connettività è il *Connectance Index* (CONNECT): tale metrica è definita a livello di classe di *patches* e misura la connettività del territorio facendo riferimento al numero di collegamenti funzionali tra i *patches* della classe considerata. Esso considera tutte le possibili coppie di *patches*, stabilendo la connessione oppure la disgiunzione sulla base di criteri prestabiliti, che generalmente consistono in

una distanza di soglia. Tale distanza deve essere definita a priori da chi conduce l'analisi e può avere natura sia di distanza euclidea sia di distanza funzionale e generalmente viene calcolata come distanza tra i centri dei *patches* (non come distanza tra i confini). L'indice CONNECT è definito in percentuale rispetto al massimo livello di connettività possibile in relazione al numero di *patches* della classe in esame e dunque ha un campo di variazione limitato: $0 < CONNECT \leq 100$.

Il *Connectance Index* a livello di classe calcola il numero di collegamenti funzionali tra tutti i *patches* della classe (n_i), riportato al numero massimo complessivo di collegamenti possibili:

$$CONNECT(classlevel) = \frac{\sum_{j=k}^n c_{ijk}}{\frac{n_i \cdot (n_i - 1)}{2}} \cdot 100$$

Lo stato di connessione (c_{ijk}) tra due *patches* j e k appartenenti alla i-esima classe, è misurato attraverso una variabile binaria (0-1): se la distanza tra i due supera la distanza di soglia, si avrà disgiunzione, indicata dal valore $c_{ijk} = 0$; se invece la distanza reale è inferiore a quella di soglia i due *patches* si considerano connessi e si avrà $c_{ijk} = 1$.

Per calcolare tale indice a livello di territorio, basterà sommare i valori ottenuti per tutte le classi presenti (m):

$$CONNECT(landscapelevel) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=k}^n c_{ijk}}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i \cdot (n_i - 1)}{2}} \cdot 100$$

L'indice assume valore nullo in due casi: quando il territorio è costituito da un solo *patch*, oppure quando nessuna coppia di *patches* ha una distanza inferiore alla distanza di soglia fissata. Assume invece valore massimo pari a 100 qualora tutte le possibili coppie ricadono al di sotto del valore soglia e sono dunque connesse tra loro.

2.3. La costruzione dell' "Indice di Qualità"

Le metriche così individuate (Fig. 5) costituiscono un sistema di sei variabili indipendenti, che quantificano la qualità del territorio in relazione ad alcune caratteristiche strutturali considerate fondamentali per il mantenimento dell'integrità dei sistemi naturali.

Obiettivo	Metrica	Simbolo
Aumentare la varietà degli habitat	Simpson's Diversity Index	SIDI
Aumentare la complessità del paesaggio	Area-Weighted Mean Fractal Dimension	AM_FRAC
Aumentare l'estensione delle aree interne	Total Core Area Index	TCAI
Aumentare l'eterogeneità	Interspersion and Juxtaposition Index	IJI
Diminuire le fratture tra habitat adiacenti	Total Edge Contrast Index	TECI
Aumentare la connettività	Connectance Index	CONNECT

Figura 5: Gli obiettivi di secondo livello e le corrispondenti metriche utilizzate.

L'Indice di Qualità (IQ) vuole essere un indice riassuntivo che informa circa la presenza o meno sul territorio delle caratteristiche individuate. IQ intende quindi sintetizzare le informazioni espresse dalle 6 metriche illustrate nel paragrafo precedente in un unico valore adimensionale, normalizzato in una scala da 0 a 1.

L'indice è costruito attraverso il metodo della media pesata, la cui espressione più generale per un serie di N variabili indipendenti (x), è la seguente:

$$IQ = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i$$

dove w_i rappresenta il peso associato alla i-esima variabile.

In questo caso, i pesi associati alle 6 metriche di partenza sono rappresentati dai coefficienti di normalizzazione necessari per trasformare i range di variazione delle metriche in intervalli 0-1. Per tale operazione si è utilizzato il metodo di normalizzazione max-min:

$$w = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Oltre al valore numerico del peso, occorre prestare attenzione al segno. Infatti, per tutte le metriche scelte l'aumento della qualità territoriale cresce in modo concorde con il valore numerico, tranne che per il TECI: infatti, più alto è il valore di questa metrica minore è la capacità del territorio di supportare flussi e favorire la circolazione delle specie. A seguito di queste considerazioni, l'espressione per il calcolo dell'Indice di Qualità è la seguente:

$$IQ = \frac{SIDI + (AM_FRAC - 1) + 0,01 \cdot (IJI + CONNECT + TCAI - TECI)}{6}$$

3. L' "INDICE ECONOMICO"

3.1. Generalità

Obiettivo di questo indice è quello di individuare il legame esistente tra allocazione della risorsa suolo e generazione di ricchezza. Specificatamente, l'IE rende conto della capacità di una particolare allocazione del suolo di contribuire alla crescita economica, intesa come incremento di valore aggiunto. A questo scopo, va tenuta presente la particolare natura della risorsa suolo: essa si caratterizza come un fattore produttivo a disponibilità limitata, non rinnovabile, ma a fecondità ripetuta (per non dire illimitata). Conseguentemente, il problema della sostenibilità economica nell'uso del suolo non si pone in termini di dosaggio nel consumo (come si porrebbe in caso di risorse esauribili a fecondità singola), ma in termini di efficienza. Alla base di queste considerazioni vi è la coscienza della ineliminabile dimensione spaziale delle attività economiche, che deriva non solo dal fatto che per produrre è necessario spazio, ma anche dalle diverse opportunità di produzione e sviluppo che caratterizzano ciascun territorio. Infatti, se è intuitivo e ragionevole pensare che la capacità produttiva di una regione vada di pari passo con l'ammontare della superficie destinata ad uso economico, non è altrettanto di immediata comprensione la relazione che può esistere tra una particolare zonizzazione del territorio e le potenzialità economiche che ne conseguono. In tal senso, vengono in aiuto i modelli proposti nel tempo da vari autori nell'ambito della disciplina dell'economia urbana, che mettono in evidenza la centralità della dimensione spaziale nel determinare l'efficienza e la possibilità di crescita economica di una regione (Camagni, 1992; Capello, 2004).

Infatti, secondo quanto afferma Camagni (1992), *“ogni attività localizzata nello spazio fisico, sia essa un'unità di produzione, un'unità demografica o una città, sviluppa con l'ambiente circostante una complessa rete di rapporti bi-direzionali che si svolgono su molteplici livelli”*. Esiste dunque una sorta di interazione spaziale tra le attività dislocate nello spazio fisico, che si può ricondurre al più generale principio di accessibilità, considerato uno dei principi fondativi dell'economia urbana¹⁶. Il principio di accessibilità sta alla base dell'organizzazione dello spazio urbano e scaturisce dalla competizione fra le diverse attività economiche per assicurarsi le localizzazioni più vantaggiose. Accessibilità significa superamento della barriera imposta dallo spazio al movimento di persone e cose e allo scambio di beni, servizi, informazioni; significa pronta disponibilità di fattori produttivi e beni intermedi per l'impresa, senza dover

¹⁶ La prima analisi del “principio di accessibilità” si fa risalire a J. H. von Thunen (1826).

sopportare un costo/tempo di trasporto; significa, per le persone, poter usufruire di servizi senza imporsi il costo di lunghi trasferimenti. (Camagni, 1992).

Nel tentativo di individuare le caratteristiche spaziali che un sistema economico deve soddisfare per poter essere considerato efficiente e sostenibile, si è pensato di estendere i concetti propri dell'economia urbana anche allo spazio extra-urbano, nella consapevolezza che la linea di demarcazione tra spazio urbano e spazio rurale sta diventando nel tempo sempre più sottile. Tali principi vengono traslati in un'ottica diversa da quella della loro normale utilizzazione: l'approccio non è infatti quello tipico dell'impresa che debba decidere dove collocarsi, ma di un pianificatore centrale il cui compito è quello di individuare le porzioni di territorio da dedicare agli usi non naturali del suolo. Allo scopo del presente lavoro, sono considerati usi non naturali i seguenti:

- uso produttivo, suddiviso in produzione agricola ed industriale/artigianale;
- uso residenziale;
- uso sociale, costituito da terreni a destinazione commerciale e/o ricreativa;
- uso infrastrutturale, per tutte le porzioni di territorio su cui vengono realizzate vie di comunicazione stradali, ferroviarie, portuali, ecc.

Il calcolo dell'IE si basa su un'idea di dislocazione diffusa delle attività antropiche sul territorio; ovvero si abbandona l'idea, caratteristica dei modelli classici (quali quelli di Von Thunen e di Christaller¹⁷), di un centro città che funge da polo attrattore di tutte le attività e fulcro del mercato, per considerare due elementi dai quali il pianificatore moderno non può prescindere:

- il fatto che lo sviluppo della tecnologia nel settore dei trasporti ha permesso di rendere relativo il problema della distanza fisica, sostituendolo con la questione dell'efficienza delle infrastrutture di trasporto. Dunque, ad oggi, la forte spinta all'agglomerazione tipica della prima metà del secolo scorso è stata sostituita da una tendenza alla diffusione, dato il diminuire dei costi di trasporti (in termini sia di costo che di tempo);
- il fatto che oggi molta parte del territorio sia già stata scenario di utilizzi di tipo non naturale e si trova dunque in una condizione tale da dover essere considerata, al momento della stesura e valutazione di un nuovo piano, come invariante territoriale in termini di uso del suolo.

¹⁷ Per approfondimenti si vedano: Camagni, 1992; Capello, 2004.

3.2. Obiettivi e indicatori di secondo livello

Nel tentativo di individuare le condizioni spaziali da soddisfare per aumentare l'efficienza economica nella dislocazione delle attività sul territorio, si sono considerati i seguenti obiettivi di secondo livello:

- massimizzare il livello di produzione, ovvero l'output del sistema economico;
- facilitare l'accesso dei beni al mercato, dislocando in modo adeguato le attività produttive;
- aumentare il valore delle zone residenziali;
- facilitare l'accesso ai servizi da parte della popolazione, dislocando in modo adeguato le zone residenziali;
- facilitare la mobilità sul territorio.

L'aspetto più importante, e al tempo stesso di più difficile risoluzione, nel calcolo di questo indice risiede nel fatto che deve in qualche modo legare le scelte spaziali effettuate con il valore ad esse attribuito dalla società: il concetto di ricchezza o di valore aggiunto è espressione delle preferenze della collettività, preferenze che nel tempo possono variare in relazione ai nuovi bisogni della società. Per questo motivo, i parametri che misurano gli aspetti sopra elencati derivano da una commistione di misure fisiche/spaziali circa l'uso del suolo e misure di valore economico attribuito a tale uso del suolo.

Particolare attenzione va posta nella determinazione delle misure di valore. Vi possono essere infatti diverse possibilità:

- si può decidere di attribuire un valore unitario al territorio a seconda della destinazione d'uso, senza tenere conto delle particolari realizzazioni che si avranno su ciascuna area. In questo modo, si crea una sorta di graduatoria di valore per i diversi *land use*: ad esempio, a tutte le aree a destinazione industriale è associato un uguale valore, che è diverso da quello associato alle aree agricole. In questo modo, aree industriali sulle quali sono localizzate attività di tipo differente hanno lo stesso valore. In questo modo, i parametri di valore avrebbero natura di tipo convenzionale, non riflettendo dei prezzi di mercato; tale assunzione comporterebbe una stima grossolana, ma di veloce realizzazione;
- oppure si può decidere di utilizzare dei parametri di mercato, aventi natura previsionale. A tale scopo, occorre poter effettuare delle previsioni sui livelli produttivi delle diverse aree ed elaborare dei parametri simili al Prodotto Lordo Vendibile o alla Rendita. In questo modo, i parametri unitari di valore del territorio cambiano non solo in base alla destinazione d'uso, ma anche in relazione al particolare tipo di attività produttiva che su quel terreno si intende

realizzare. Appare chiaro che, a fronte di una maggiore rispondenza ai valori di mercato, il modello si complica notevolmente;

- da ultimo, è possibile pensare a dei modelli che associno, ad ogni singola unità di superficie, un valore che tenga conto, non solo della destinazione d'uso e delle particolari attività svolte in essa, ma anche delle eventuali esternalità generate, ovvero delle ricadute sul territorio circostante in termini di inquinamento, deturpazione paesaggistica, peggioramento della qualità della vita. Ad esempio, una zona destinata alla realizzazione di edilizia residenziale, a parità di tutte le altre condizioni, avrà valore maggiore se locata in prossimità di una zona ricreativa e valore minore se locata in prossimità, invece, di una zona industriale. In questo modo, il modello si complica nella determinazione dell'Indice Economico e si rende auspicabile la previa realizzazione di una mappa dei valori (magari in ambiente GIS), che associ a ciascuna unità di superficie il valore proposto.

Elemento fondamentale è però l'omogeneità delle misure di valore adottate nel calcolo dei diversi indicatori.

Il livello di produzione

Secondo quanto visto nel Cap.1, la sostenibilità economica di un sistema consiste nella sua capacità di mantenere e garantire nel tempo un livello di produzione di beni economici almeno pari a quello attuale; anzi, in un'ottica estremista, l'obiettivo dovrebbe essere quello della continua crescita del sistema economico. Per questo motivo, tra gli aspetti considerati compare il livello di produzione. In generale, l'indicatore utilizzato per misurare la produzione economica di una nazione, o di una regione, è il PIL, ma tale indicatore risulta poco funzionale allo scopo del presente modello in quanto non mostra relazioni con l'uso del suolo: dovendo ragionare su progetti di piano alternativi, non si può prevedere come potrà variare questo indicatore a seguito della modificazione della struttura del territorio. In questo frangente, si necessita di un indicatore che rappresenti il livello produttivo in relazione alla struttura del territorio, che sia di facile calcolo e non abbia bisogno di studi o modelli di crescita regionali complessi. Per questo motivo si è pensato di utilizzare, come variabile *proxi*, una sorta di stima del valore della superficie produttiva, calcolato moltiplicando le superfici (a_{ij}) delle aree ad uso agricolo e industriale per il valore unitario (v_{ij}), che esprime il valore associato all'unità di superficie (Euro/m²). Tale valore sarà diverso in relazione alla destinazione d'uso (agricola o industriale) e dei particolari processi produttivi che si intendono realizzare e può avere carattere di valore medio per l'intera zona. Si ottiene così il Valore della Superficie Produttiva (VSP), che associa alla superficie destinata ad usi produttivi un valore

economico in relazione al valore aggiunto generato dai processi di trasformazione che in essa avvengono:

$$VSP = \sum_{i=agr,ind} \sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} \cdot v_{ij}$$

Tale valore, espresso in Euro, rende conto del livello di output economico generato dalle aree produttive del territorio. In esso sono esplicitate le preferenze del pianificatore, attraverso la determinazione dei valori unitari della superficie produttiva. Tali valori unitari possono essere espressi mediante svariati parametri: la Produzione lorda vendibile, la Rendita Netta oppure in termini di occupazione generata. La scelta del parametro dipende dalla disponibilità di dati specifici e anche dagli obiettivi politici del pianificatore.

L'accesso dei beni al mercato

Secondo l'approccio dell'economia regionale, uno dei principi secondo i quali si organizzano le attività nello spazio è l'accessibilità. Volendo estendere tale principio ad un intero territorio ed alla molteplicità di localizzazioni che esso contiene, occorre fare riferimento a quella che viene chiamata "accessibilità generalizzata", che rende ragione dell'intensità di relazione di ogni punto dello spazio rispetto a tutti gli altri. L'accessibilità generalizzata può essere misurata applicando il modello del "potenziale di localizzazione", concetto che deriva da quello di energia potenziale proprio della fisica dei gravi e che permette di misurare l'influenza esercitata su un punto da tutto lo spazio circostante, sulla base della posizione relativa che esso assume rispetto alle altre n masse localizzate nello spazio e con le quali esso interagisce.

In questa sede, il concetto di potenziale è utilizzato allo scopo di misurare il valore dell'interazione spaziale tra le zone destinate ad uso industriale e commerciale. Ciò per misurare il livello di accessibilità ai mercati, luogo in cui vengono vendute le merci prodotte nelle aree produttive, ed il livello di connessione tra le varie zone produttive ai fini del trasporto e dello scambio dei fattori produttivi. Il "potenziale economico di localizzazione" di un sito industriale (E_a) viene calcolato facendo riferimento alla superficie degli altri *patches*¹⁸ ad uso industriale o commerciale (A_j), come misura della massa delle unità territoriali con cui interagisce, ed alla distanza (δ_{aj}), come misura della frizione spaziale incontrata dai flussi. Alla distanza può essere applicato un peso (β_{aj}), allo scopo di trasformare la distanza fisica in distanza reale, pesandola sulla base della consistenza delle infrastrutture di trasporto che collegano i due *patches*. Viene dunque

¹⁸ In questo contesto, il termine *patch* è usato come sinonimo di "zona a destinazione d'uso omogenea".

valutata l'interazione del *patch a* con tutti gli altri *patches* ad uso commerciale e/o industriale ($N_{ind} + N_{comm}$).

Il valore di tale “potenziale di localizzazione” viene calcolato attraverso la moltiplicazione per un parametro (K , misurato in Euro/m) che rappresenta il costo medio unitario del trasporto dal *patch a* al *patch i*, a seconda del sistema di collegamenti previsto dal piano. Per semplicità, se il territorio presenta una omogenea distribuzione delle vie di comunicazione, il valore di K potrebbe anche essere considerato costante sull'intero territorio:

$$E_a = \sum_{i=1}^{N_{comm}+N_{ind}} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{A_j}{\beta_{aj} \cdot \partial_{aj}} \cdot K_{aj}$$

Il concetto di potenziale in economia spaziale può essere considerato, da un lato, come indicatore di “flussi potenziali”, dall'altro come un indicatore di “posizione”. I due aspetti sono fortemente connessi in quanto la posizione relativa di un punto dello spazio discende dalle interazioni possibili con lo spazio circostante e proprio grazie a queste interazioni si può associare alla posizione un valore economico. Grazie a questa interpretazione del concetto di potenziale di localizzazione si può:

- spiegare le scelte localizzative del pianificatore (orientate ai luoghi con maggior potenziale localizzativo);
- spiegare l'insieme di flussi che da tale localizzazione scaturiscono;
- attribuire un valore a ciascuna localizzazione sulla base della sua accessibilità generalizzata (Camagni, 1992; Capello, 2004).

In questo caso, attraverso l'utilizzo del fattore K , il valore del potenziale così calcolato diventa una stima del valore della posizione dei siti produttivi di natura industriale, in relazione all'accessibilità ai siti di commercializzazione dei prodotti e agli altri siti produttivi.

Per il calcolo del potenziale economico di localizzazione dell'intero territorio, si sfrutta la definizione che la fisica fornisce parlando di energia potenziale di un sistema di punti: essa è data dalla somma dell'energia potenziale dei singoli punti. Si procede pertanto al calcolo della sommatoria, estesa a tutti i *patches* a destinazione d'uso industriale (N_{ind})

$$E = \sum_{a=1}^{N_{ind}} E_a$$

Il valore delle zone residenziali

La generazione di ricchezza/valore non avviene solo nelle zone prettamente produttive, agricole o industriali, ma anche nelle zone destinate ad uso residenziale: la produzione immobiliare è anch'essa un'attività economica che incrementa il livello di benessere della popolazione. In particolare, la funzione di utilità individuale e, conseguentemente, la funzione di benessere sociale, è legata alla dotazione individuale di beni economici, tra i quali un peso notevole assume il bene immobile "abitazione". La dimensione dell'abitazione è uno dei fattori che determinano le scelte residenziali degli individui, assieme al costo ed alla localizzazione (Camagni, 1992). Tale parametro influisce sulla densità abitativa del territorio, che aumenta man mano che le dimensioni delle abitazioni decrescono. Nella gestione sostenibile del territorio, assumono dunque importanza lo spazio destinato ad uso residenziale, in relazione alla popolazione.

Il valore delle zone residenziali viene espresso in questa sede dall'Indice di Valore Residenziale (IVR), che misura la superficie destinata alle residenze dal piano strutturale in esame e ne calcola il valore moltiplicandola per un coefficiente di valore unitario (v_j , in analogia a quanto visto per il valore della Superficie Produttiva):

$$VSR = \sum_{j=1}^n A_j \cdot v_j$$

Il valore unitario v_j può essere diverso per ciascun *patch* in relazione alla tipologia delle abitazioni previste e/o dell'indice di edificabilità della zona (che in qualche modo rende conto del livello di affollamento e, dunque, della qualità della vita).

L'accesso ai servizi

Il principio di accessibilità governa anche le scelte residenziali della popolazione, la quale si trova di fronte ad un vero e proprio trade-off tra facilità di accesso alle aree commerciali, culturali e ricreative e costo crescente del terreno edificabile man mano che la vicinanza ai servizi aumenta. Nella stesura di un piano territoriale, è opportuno che il pianificatore tenga in considerazione tale principio di scelta allo scopo di meglio gestire i flussi di persone che attraversano il territorio. In tal senso, in analogia a quanto fatto per misurare l'efficienza della distribuzione spaziale delle attività industriali, si può calcolare, per ciascun *patch* che il piano destina ad uso residenziale, il livello di accessibilità alle zone commerciali/ricreative, centro dei servizi alla persona.

Il "potenziale di accessibilità residenziale" di un *patch a* ad uso abitativo ($ACCESS_a$) viene calcolato facendo riferimento alla superficie dei *patches* a destinazione commerciale e/o ricreativa (A_j), come misura della massa delle unità territoriali che interagiscono, ed alla distanza (δ_{aj}) come misura della frizione spaziale incontrata dai

flussi. Anche in questo caso può essere utilizzato un peso (β_{aj}) per trasformare la distanza fisica in distanza reale, pesandola sulla base della consistenza delle infrastrutture di trasporto che collegano i due *patches*.

Il valore di tale “potenziale di localizzazione” viene calcolato attraverso la moltiplicazione per un parametro (K, misurato in Euro/m) che rappresenta il costo medio unitario del trasporto dal *patch a* al *patch i*, a seconda del sistema di collegamenti previsto dal piano. Per semplicità, se il territorio presenta una omogenea distribuzione delle vie di comunicazione, il valore di K potrebbe anche essere considerato costante sull'intero territorio:

$$ACCESS_a = \sum_{i=1}^{N_{comm}+N_{ricr}} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{A_j}{\beta_{aj} \cdot \partial_{aj}} \cdot k_{aj}$$

Per il parametro k si possono fare considerazioni analoghe a quelle fatte per il potenziale economico di localizzazione.

Il “potenziale di accessibilità residenziale” dell'intero territorio si calcola sommando il potenziale di tutti i *patches* ad uso residenziale (N_{res}):

$$ACCESS = \sum_{a=1}^{N_{res}} ACCESS_a$$

La mobilità sul territorio

L'esigenza di mobilità è oggi sempre più diffusa tra la popolazione e, al tempo stesso, rappresenta una delle maggiori problematiche dell'era moderna, in quanto genera, da un lato, fenomeni di congestione legati ai grandi flussi che attraversano il territorio, dall'altro, fenomeni di inquinamento importanti. La capacità di un territorio di gestire grandi flussi di popolazione si presenta come una carta a vantaggio della competitività del territorio stesso e della sua crescita economica: per questo motivo diventa importante la dotazione di infrastrutture nel sistema dei trasporti. In termini di pianificazione, e dunque di destinazione di uso del suolo, non ha importanza solo la lunghezza della rete stradale e ferroviaria che permea il territorio, ma la superficie destinata a tale scopo, in relazione alla portata delle infrastrutture (strade di maggiore larghezza sono in grado di supportare livelli di traffico più intensi). Il “Valore della Dotazione Infrastrutturale” (VDI) si è calcolato moltiplicando la superficie (A_j) destinata al sistema dei trasporti (strade, ferrovie, sistemi portuali e aeroportuali, ecc) per un valore unitario (v_j):

$$VDI = \sum_{j=1}^n A_j \cdot v_j$$

Il valore unitario della superficie infrastrutturale (v_j) può essere determinato in relazione alla facilità di scorrimento (Euro/m²).

3.3. La costruzione dell' "Indice Economico"

Gli indici sopra elencati costituiscono un sistema di 5 parametri indipendenti che quantificano alcune caratteristiche del territorio che si reputano importanti nel determinare la convenienza ed efficienza economico-sociale dell'allocazione delle zone ad usi "non naturali" del suolo (Fig. 6). Sulla base di tali parametri viene elaborato l'indice di efficienza, come parametro rappresentativo dell'obiettivo primario della sostenibilità ambientale.

Obiettivo	Parametro	Simbolo
Aumentare il livello di produzione	Valore di Superficie Produttiva	VSP
Facilitare l'accesso dei beni ai mercati	Potenziale economico di localizzazione	E
Aumentare il valore delle zone residenziali	Valore di Dotazione Residenziale	VDR
Facilitare l'accesso della popolazione ai servizi	Potenziale di Accessibilità Residenziale	ACCESS
Facilitare la mobilità sul territorio	Valore di Dotazione Infrastrutturale	VDI

Figura 6: Gli obiettivi di secondo livello considerati per il raggiungimento dell'obiettivo primario della efficienza economica ed i corrispondenti parametri utilizzati per la loro quantificazione

L'Indice Economico si presenta come sintesi delle informazioni contenute nei cinque parametri indipendenti individuati per la quantificazione degli obiettivi di secondo livello. L'indice è costruito come semplice somma degli indici di secondo livello e può assumere valori maggiori di zero: esso esprime, per certi versi, il valore economico del territorio in relazione alle attività economiche che in esso sono localizzate. Esso è espresso in termini monetari (Euro) e può assumere un valore positivo, senza delimitazione di un range di variabilità. Ciò è legato alla sua natura di essere espressione delle preferenze della collettività, attraverso i giudizi di valore che vengono utilizzati per il calcolo dei singoli parametri.

$$IE = VSP + E + VDR + ACCESS + VDI$$