

La valutazione della sostenibilità di un'infrastruttura stradale attraverso l'Analytic Network Process

Marta Bottero, Elisabetta Ciminaghi, Valentina Ferretti

Politecnico di Torino

I. INTRODUZIONE

I progetti di trasformazione del territorio fanno riferimento a sistemi di natura complessa. In termini generali, un problema complesso è definibile come un sistema costituito da un gran numero di elementi interagenti tra loro in maniera non semplice e dunque caratterizzati da dinamiche che non sono comprensibili, né prevedibili, dallo studio delle singole parti (Prigogine, 1993). I problemi complessi pongono con forza il tema della valutazione, dal momento che generalmente sono caratterizzati da una molteplicità di soluzioni che possono tendere a diversi scopi: vi sono, infatti, infinite combinazioni possibili tra gli elementi del problema, e ciascuna porta ad un modo differente di risolverlo. In questo senso diventa fondamentale la possibilità di avere alternative diverse tra le quali scegliere la soluzione migliore.

La valutazione di scenari alternativi di trasformazione urbana e territoriale costituisce un problema decisionale complesso che, per poter essere risolto, necessita della simultanea considerazione di un ampio spettro di aspetti comprendenti sia elementi tecnici, basati su osservazioni empiriche, sia elementi non tecnici, basati su valori sociali, in base ad una visione pluralistica e sistemica del problema. Un aiuto efficace in tale direzione è offerto dalla famiglia delle Analisi Multicriteri, che sono in grado di fornire una base razionale a problemi di scelta caratterizzati da differenti obiettivi e criteri (Roy e Bouyssou, 1995; Roscelli, 2005; Fusco Girard e Nijkamp, 2005).

In particolare, all'interno delle Analisi Multicriteri, un ruolo molto importante è svolto dalla recente tecnica dell'Analytic Network Process (ANP). Tale metodologia, sviluppata dallo studioso americano Thomas L. Saaty a partire dal 2005, si caratterizza come lo sviluppo generalizzato della più semplice analisi di gerarchia (Analytic Hierarchy Process – AHP) e si configura come strumento particolarmente indicato per affrontare problemi decisionali complessi, difficilmente rappresentabili mediante uno schema gerarchico in quanto comprendenti dipendenze, interazioni e feedback.

L'oggetto del presente lavoro fa riferimento all'approfondimento della tecnica dell'ANP, con particolare attenzione al ruolo della metodologia all'interno delle valutazioni di sostenibilità di interventi di trasformazione del territorio. Al fine di dare maggior concretezza alla discussione, il presente studio propone un'applicazione dell'analisi ANP relativa alla valutazione di scenari alternativi per la localizzazione di un'infrastruttura stradale. Nello specifico, il lavoro in esame fa riferimento all'individuazione dell'alternativa più sostenibile per la gestione dei flussi di traffico relativi ad un'arteria stradale localizzata nella provincia di Bologna, focalizzando l'attenzione su benefici, opportunità, costi e rischi connessi all'intervento e sulle reciproche interazioni.

2. L'ANALYTIC NETWORK PROCESS (ANP)

2.1 *Stato dell'arte*

Esiste un'estesa e consolidata letteratura sulle Analisi Multicriteri, all'interno della quale è possibile trovare un ventaglio molto ampio di tecniche e metodologie (Figueira *et al.*, 2005).

Per quanto riguarda sia l'AHP che l'ANP, i riferimenti fondamentali sono rappresentati dalla letteratura prodotta dal ricercatore americano T.L. Saaty e si sviluppano a partire dal 1980. Con riferimento alla AHP, numerose sono le applicazioni in diversi settori, che includono, tra gli altri, la pianificazione ambientale (Fusco Girard e Nijkamp, 2005; Roscelli, 2005), l'ambiente costruito (Brandon e Lombardi, 2005), lo sviluppo regionale (Nijkamp e Vreeker, 2000).

Per quanto concerne l'ANP, la letteratura è più recente e fa riferimento a svariati campi quali la gestione dei rifiuti (Promentilla *et al.*, 2006), le infrastrutture di trasporto (Tuzkaya e Onut, 2008), le politiche di pianificazione strategica (Ulutas, 2005), la logistica e il commercio (Agarwal *et al.*, 2006), l'economia e la finanza (Niemura e Saaty, 2004) e l'ingegneria civile (Piantanakulchai, 2005; Neaupane e Piantanakulchai, 2006). A livello nazionale, è interessante ricordare l'applicazione del metodo ANP per la valutazione di scenari di trasformazione urbana e territoriale (Bottero *et al.*, 2008; Bottero e Mondini, 2008).

2.2 *Metodologia*

Come già affermato in precedenza, il passaggio dalla struttura gerarchica di tipo lineare propria dell'AHP, incapace di riflettere la complessità dei problemi reali, ad una strutturazione più dinamica e capace di rispecchiare meglio le complesse interazioni che nella realtà riguardano le diverse componenti di un sistema, rappresenta lo scarto evolutivo che ha portato dall'AHP all'ANP.

Nell'ANP ogni problema decisionale viene infatti strutturato come un *network* (o rete) di elementi organizzati in gruppi secondo molteplici rapporti di influenza. Tale configurazione permette di giungere ad una struttura in grado di incorporare relazioni

di interdipendenza e retroazioni, sia all'interno di ciascun gruppo di elementi sia tra i vari gruppi di elementi. Considerando l'esistenza di retroazioni, infatti, non solo le alternative possono dipendere dai criteri, come in una gerarchia, ma soprattutto i criteri medesimi possono dipendere dalle alternative e dagli altri criteri considerati. L'ANP, grazie al suo approccio dinamico e alla capacità di modellizzare le varie relazioni esistenti tra le componenti di un problema, si configura come strumento particolarmente efficace nella valutazione dei sistemi complessi.

Lo sviluppo e l'applicazione di un modello ANP prevedono diversi step fondamentali i quali verranno illustrati nei successivi sottoparagrafi.

Strutturazione del problema e costruzione del modello decisionale

Ogni problema decisionale complesso viene scomposto in parti elementari (dette anche "nodi") successivamente raggruppate in serie omogenee, ossia in *clusters* di elementi, tali da formare una rete (o *network*) caratterizzata da dipendenze, interazioni e *feedback* tra i suddetti elementi.

In particolare, si rende necessario identificare:

- il *goal*, ossia l'obiettivo che si intende raggiungere con la valutazione;
- i *clusters* di criteri che guidano verso l'obiettivo generale;
- il *cluster* delle alternative, le quali rappresentano le soluzioni possibili del problema decisionale;
- gli elementi (o nodi) specifici che definiscono ogni *cluster*.

Una volta scomposto il problema nelle sue parti elementari, è necessario individuare le relazioni esistenti tra i differenti elementi della rete creata.

La figura 1 riporta un esempio di struttura a *network*, mettendo in evidenza le diverse parti della rete e le varie tipologie di relazioni che è possibile individuare.

Esistono due possibili modalità secondo cui strutturare il modello decisionale:

- la rete semplice, che consiste in una rete di relazioni che si sviluppano tra *clusters* di criteri, elementi specifici e alternative di scelta;
- la rete complessa, che presuppone l'esistenza di una gerarchia di controllo che dà origine a sottoreti, organizzate ognuna secondo la struttura "semplice", in cui sono contenuti i gruppi, gli elementi e le alternative. Il caso più comune di modello complesso con gerarchie di controllo è il cosiddetto modello BOCR (Benefici – Opportunità – Costi – Rischi). In tale modello la complessità del problema è scomposta in sottoreti separate, costituite da criteri e *network* di influenze; ciascuna delle sottoreti produce una graduatoria delle alternative che verrà poi sintetizzata e integrata con quella delle altre sottoreti al fine di produrre un risultato globale e giungere dunque ad una graduatoria finale delle opzioni di scelta.

Compilazione delle matrici di confronto a coppie

Dopo aver terminato la costruzione del modello si può procedere alla valutazione mediante il metodo dei confronti a coppie. Il procedimento di confronto segue un andamento a "rete" in cui, imponendo a rotazione ogni elemento della rete come "genitore", si esprime un giudizio di preferenza mediante la realizzazione di molteplici

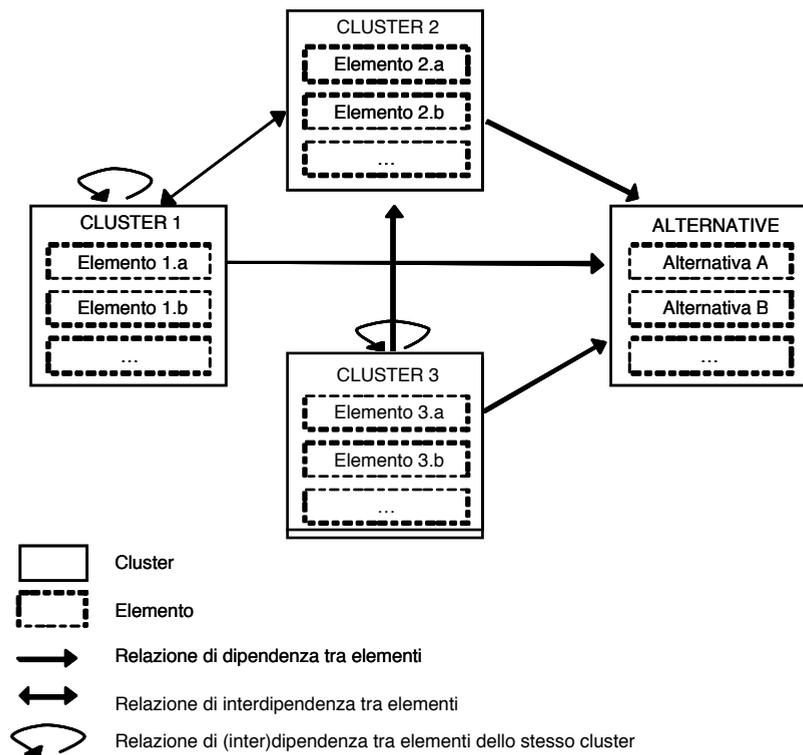


Fig. 1. Esempio di struttura “a rete semplice” con *clusters* ed elementi

confronti a coppie tra tutti gli elementi a esso precedentemente collegati (“figli”).

Durante lo svolgimento dei vari confronti a coppie si stabilisce una relazione binaria di preferenza tra due elementi confrontati rispetto al nodo genitore. I giudizi numerici stabiliti sono tratti da una scala numerica a 9 punti, denominata “scala fondamentale di Saaty”, nella quale il valore 1 significa che due attività contribuiscono in maniera uguale all’obiettivo, mentre il valore 9 indica che l’evidenza a favore di una delle due attività è massima (Saaty, 1980). I diversi confronti a coppie vengono sviluppati su due livelli: il livello dei *clusters* e il livello dei nodi.

I valori numerici stabiliti di volta in volta costituiscono delle matrici quadrate di confronto a coppie degli elementi che vengono determinate ad ogni livello della rete.

Una volta compilate le varie matrici di confronto a coppie, è possibile determinare per ognuna la priorità dei rispettivi componenti. Questa operazione viene effettuata attraverso l’estrazione, da ogni matrice, del principale autovettore che rappresenta in termini numerici la sintesi dei giudizi di preferenza espressi.

Formazione delle supermatrici

L’approccio della supermatrice consente all’ANP di incorporare e gestire dipendenze e *feedback* all’interno del sistema decisionale. Tre sono le supermatrici utilizzate nell’ANP: la “supermatrice iniziale”, la “supermatrice pesata” e la “supermatrice limite”.

La “supermatrice iniziale” (o non pesata) è composta dai vettori priorità ottenuti dal confronto a coppie; tale supermatrice rappresenta i flussi di influenza individuati nel *network*.

I valori riportati all’interno della supermatrice iniziale non tengono conto dei diversi pesi attribuiti ai *clusters*; per questo motivo è necessario costruire una seconda matrice (la “supermatrice pesata”) ottenuta moltiplicando i valori della supermatrice iniziale per la matrice ottenuta al livello del confronto tra i *clusters*. Infine moltiplicando la supermatrice pesata per sé stessa un numero di volte tendente a infinito, si ottiene la cosiddetta “supermatrice limite” ovvero quella supermatrice le cui colonne contengono il vettore delle priorità degli elementi dell’analisi.

Aggregazione dei risultati e analisi di sensitività

Mentre nel caso della rete semplice la graduatoria di priorità delle alternative è ottenuta direttamente dalla supermatrice limite, nel caso della rete complessa occorre procedere ad un’ulteriore aggregazione dei risultati, dal momento che lo schema BOCR conduce a individuare quattro serie di pesi per le alternative, una per i benefici, una per i costi, una per le opportunità e una per i rischi. Per l’aggregazione e la sintesi finale delle priorità di ciascuna alternativa sono disponibili diverse formule specifiche (Saaty, 2003, 2006; Wijnmalen, 2007).

Inoltre, una volta ottenuti i risultati finali del modello è ancora opportuno sviluppare un’analisi di sensitività. Scopo fondamentale dell’analisi di sensitività è quello di verificare la stabilità della graduatoria di preferibilità finale al variare dei pesi assegnati ai criteri di controllo e dunque valutare la robustezza del modello decisionale.

3. CASO STUDIO

3.1 Descrizione delle alternative

Il caso studio preso in considerazione riguarda la valutazione della sostenibilità di due opzioni alternative relativamente ad un’infrastruttura viaria di livello provinciale localizzata nell’area metropolitana della città di Bologna. Il progetto fa riferimento ad una variante della SP 65 della Futa nel tratto compreso tra i comuni di Pianoro e di San Lazzaro di Savena.

L’analisi delle condizioni di traffico presenti nella zona ha portato all’esigenza di intervenire con soluzioni mirate, finalizzate a diminuire le pressioni ambientali presenti nell’area: si è pensato quindi di procedere con la costruzione di una variante della SP con l’obiettivo prioritario di decongestionare i flussi all’interno degli abitati delocalizzandoli in un’area esterna.

Le alternative considerate fanno riferimento al progetto e all’opzione di non intervento (tabella 1).

Tab. 1. Descrizione delle alternative

Alternative	Descrizione
Opzione 0	L'alternativa fa riferimento al mantenimento della configurazione attuale della SP 65 della Futa che prevede l'attraversamento dei centri abitati. Tale soluzione comporta notevoli criticità di carattere ambientale (inquinamento acustico ed atmosferico), nonché una gestione inefficiente dei flussi di traffico.
Opzione 1	L'alternativa fa riferimento all'ipotesi di intervenire con la realizzazione di una variante alla SP 65 della Futa che prevede il passaggio in un'area esterna al centro abitato. L'intervento comporta una ripartizione dei flussi di traffico esistenti con evidenti ricadute positive in termini di efficienza. Dal punto di vista progettuale, la soluzione prevede alcuni nodi problematici quali i passaggi in viadotto sul torrente Savena e la realizzazione di una galleria artificiale. In termini ambientali, è possibile osservare che la delocalizzazione dei flussi di traffico concorre al miglioramento della qualità ambientale all'interno del centro abitato, anche se possono esistere impatti di carattere paesaggistico nell'area in cui la nuova infrastruttura andrà a svilupparsi.

3.2 *Strutturazione del problema decisionale*

Data l'elevata complessità del problema decisionale, il modello apparso più idoneo allo sviluppo dell'Analytic Network Process è stato quello basato sulla struttura complessa (vedi par. 2.2).

L'operazione di identificazione ed esplicita definizione dei criteri, ovvero degli elementi all'interno di ciascun *cluster*, risulta critica e non priva di difficoltà e rischi in quanto da questi dipende il risultato finale (*hyperchoice problem*), tanto che Saaty (1986) la definisce "più un'arte che una scienza". I criteri di valutazione fungono infatti da strumenti di analisi e di misura dei fenomeni complessi ed eterogenei legati alle risorse e agli interventi presi in considerazione e, come tali, devono quindi rappresentare i diversi punti di vista, essere comprensibili, coerenti, completi e non ridondanti. Si sottolinea quindi come, nella definizione dei criteri/elementi di valutazione, particolare attenzione sia stata dedicata alla verifica della loro neutralità rispetto alle opzioni di scelta al fine di evitare di sbilanciare il modello a favore di un'alternativa piuttosto che dell'altra.

Il problema decisionale è stato quindi scomposto in 5 *clusters* (alternative, aspetti ambientali, aspetti economici, aspetti sociali e aspetti trasportistici) organizzati secondo le sottoreti BOCR (Benefici, Opportunità, Costi, Rischi).

I benefici e i costi sono stati identificati con gli aspetti certi, rispettivamente positivi e negativi, relativi alla trasformazione e valutati al presente, guardando ad un futuro di medio lungo termine sul quale sono state sviluppate previsioni abbastanza dettagliate. Le opportunità e i rischi sono stati invece considerati come aspetti meno certi, rispettivamente positivi e negativi, valutati a trasformazione già avvenuta e guardando ad un futuro più lontano ancora, sul quale è pertanto più difficile fare delle previsioni.

Come precedentemente sottolineato, l'obiettivo generale dell'analisi risulta essere la valutazione della soluzione maggiormente sostenibile per la gestione dei flussi di traffico per l'area in esame.

La tabella 2 riporta il *network* decisionale sviluppato secondo il modello BOCR. Come si vede, la rete risulta composta da quattro sottoreti caratterizzate dalla presenza di differenti *clusters* ed elementi, oltre che dall'esistenza del *cluster* comune delle alternative di scelta.

Tab. 2. *Clusters* ed elementi nel *network* decisionale

Bocr	Clusters	Elementi
Benefici	Aspetti economici	Valorizzazione immobiliare delle aree
	Aspetti sociali	Aderenza alle aspettative della comunità locale
	Aspetti trasportistici	Efficienza dei flussi di traffico Qualità acustica ed atmosferica
Opportunità	Aspetti ambientali	Disponibilità di aree verdi Immagine dei luoghi
	Aspetti economici	Rifunzionalizzazione delle aree Innesco di processi di valorizzazione del territorio
	Aspetti sociali	Impatti sulla sicurezza stradale
		Disponibilità di servizi per la popolazione
		Effetti sulla salute Effetti sulla capacità di scambio Effetti sui tempi di percorrenza
	Costi	Aspetti ambientali
Aspetti economici		Costi di realizzazione/ esercizio dell'opera
Aspetti trasportistici		Criticità dovute alla realizzazione/ esercizio dell'opera Impatti paesaggistici
Rischi	Aspetti ambientali	Impatti acustici Interferenze con suolo e assetto idrico superficiale e sotterraneo
	Aspetti economici	Costi di manutenzione/ gestione
	Aspetti sociali	Mancata condivisione del progetto

3.3 Sviluppo del modello decisionale

Come già visto al paragrafo 2, lo sviluppo del modello coincide con la fase di confronto e valutazione che si articola secondo due livelli distinti: il confronto tra *clusters*, più generale e strategico, e il confronto tra nodi, più specifico e dettagliato¹.

Per ragioni di semplicità espositiva verrà di seguito illustrato lo sviluppo del modello con riferimento alla sola sottorete delle opportunità, più rappresentativa rispetto

1 Lo sviluppo in termini operativi dei modelli ANP è supportato dal software Superdecisions scaricabile dal sito www.superdecision.com.

alle altre, ricordando però che ciascuno degli *step* metodologici di seguito illustrati va ripetuto per tutte e quattro le sottoreti.

Lo schema della sottorete opportunità è riportato in Figura 2. Come si vede, il *network* è strutturato su differenti *clusters* collegati tra loro da vari rapporti di dipendenza e interazione.

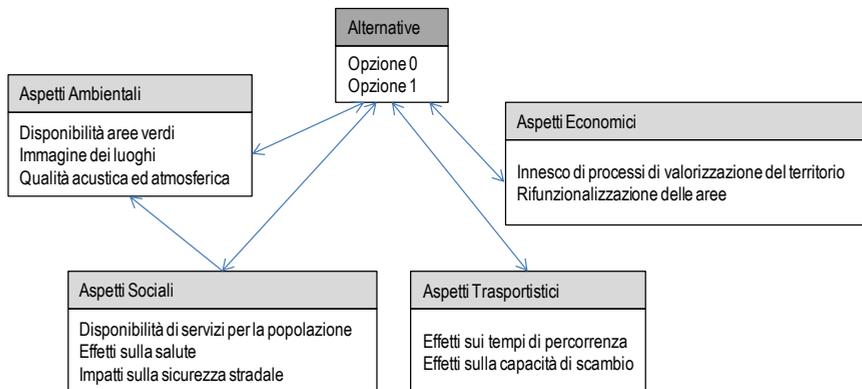


Fig. 2. Schema della sottorete relativa alle opportunità

Una volta stabilito il *network* decisionale, è necessario procedere al confronto a coppie al livello dei *clusters*.

Considerando l'obiettivo generale del modello come nodo genitore, le domande a cui occorre rispondere per la compilazione delle matrici di confronto a coppie sono le seguenti:

Con riferimento all'individuazione dell'alternativa più sostenibile per la gestione dei flussi di traffico nell'area, hanno più influenza:

- gli aspetti ambientali (disponibilità di aree verdi, immagine dei luoghi, qualità acustica e atmosferica) o gli aspetti economici (innescio di processi di valorizzazione del territorio, rifunionalizzazione delle aree)? Di quanto?

Ambientali	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Economici
------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----------

- gli aspetti ambientali o gli aspetti sociali (disponibilità di servizi per la popolazione, effetti sulla salute, impatti sulla sicurezza stradale)? Di quanto?

Ambientali	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sociali
------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---------

- gli aspetti ambientali o gli aspetti trasportistici (effetti sui tempi di percorrenza, effetti sulla capacità di scambio)? Di quanto?

Ambientali	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trasportistici
------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----------------

- gli aspetti economici o gli aspetti sociali? Di quanto?

Economici	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Sociali
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---------

- gli aspetti economici o gli aspetti trasportistici? Di quanto?

Economici	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trasportistici
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----------------

- gli aspetti sociali o gli aspetti trasportistici? Di quanto?

Sociali	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trasportistici
---------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----------------

I risultati delle valutazioni espresse sono stati utilizzati per la compilazione delle matrici di confronto a coppie. In questo caso, ad esempio, i giudizi formulati hanno fornito i punteggi da inserire nelle colonne della matrice riportata nella tabella 3.

Tab. 3. Matrice di confronto a coppie fra *clusters* (sottorete Opportunità)

goal	A. Ambientali	A. Economici	A. Sociali	A. Trasportistici	Priorità
A. Ambientali	1	5	3	1/3	0,262
A. Economici	1/5	1	1/3	1/7	0,055
A. Sociali	1/3	3	1	1/5	0,118
A. Trasportistici	3	7	5	1	0,565

Una volta ottenute le priorità di tutti i *clusters* è possibile costruire la cosiddetta matrice peso dei *clusters* che risulta quindi essere formata dai vettori priorità estratti da ciascuna matrice quadrata di confronto a coppie a questo livello. La tabella 4 riporta la matrice peso dei *clusters* per il caso in esame con evidenziato il vettore priorità illustrato nell'esempio precedente.

Tab. 4 Matrice peso dei *clusters* (sottorete Opportunità)

	Alternative	A. Ambientali	A. Economici	A. Sociali	A. Trasportistici
Alternative	0,000	1,000	1,000	0,125	1,000
A. Ambientali	0,262	0,000	0,000	0,875	0,000
A. Economici	0,055	0,000	0,000	0,000	0,000
A. Sociali	0,118	0,000	0,000	0,000	0,000
A. Trasportistici	0,565	0,000	0,000	0,000	0,000

Dopo aver analizzato ogni sottorete del modello a livello dei *cluster*, occorre approfondire le valutazioni considerando i vari elementi, in relazione ai rapporti di influenza e interdipendenza impostati nel *network* al livello dei nodi.

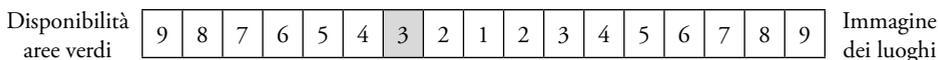
Sempre con riferimento alla sottorete opportunità, a titolo di esempio, viene di seguito illustrato un confronto tra nodi avente come nodo genitore l'alternativa 1 e come nodi figli gli elementi del *cluster* degli aspetti ambientali a esso collegati nel modello ipotizzato. Tale tipologia di confronto serve a valutare l'influenza dei vari

elementi sulle alternative considerate e rappresenta quindi i cosiddetti *feedback* resi possibili dalla metodologia ANP.

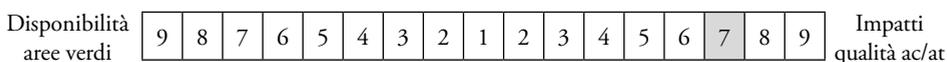
Le domande a cui si è dovuto rispondere sono state le seguenti:

L'alternativa 1, che prevede la realizzazione della variante alla SP 65 della Futa, influenzerà di più:

- la disponibilità di aree verdi o l'immagine dei luoghi? Di quanto?



- la disponibilità di aree verdi o gli impatti sulla qualità acustica e atmosferica? Di quanto?



- l'immagine dei luoghi o gli impatti sulla qualità acustica ed atmosferica? Di quanto?



I giudizi espressi sono riportati nella tabella 5.

Tab. 5 Matrice di confronto a coppie tra nodi (sottorete Opportunità).

Alternativa 1	Disponibilità aree verdi	Immagine dei luoghi	Impatti sulla qualità ac/ atm	Priorità
Disponibilità aree verdi	1	3	1/7	0,149
Immagine dei luoghi	1/3	1	1/9	0,066
Impatti sulla qualità ac/ atm	7	9	1	0,785

Una volta terminata la fase di confronto e valutazione vengono costruite per ciascuna sottorete del modello 3 supermatrici (vedi paragrafo 2.2).

Le priorità locali degli elementi del *network* derivanti dai molteplici confronti a coppie sviluppati al livello dei nodi costituiscono la supermatrice iniziale. La tabella 6 rappresenta la supermatrice iniziale per la sottorete opportunità con in evidenza il vettore priorità derivante dal confronto a coppie sopra illustrato.

Successivamente, con riferimento alla sottorete delle opportunità, la supermatrice iniziale (tabella 6) deve essere moltiplicata per la matrice dei cluster (tabella 4) al fine di ottenere la supermatrice pesata (tabella 7) che, moltiplicata per se stessa un numero di volte tendente ad infinito fornisce la supermatrice limite, contenente le priorità finali.

Tab. 6. Supermatrice iniziale (sottorete Opportunità)

		Alternative		A. Ambientali			A. Economici		A. Sociali			A.trasportistici	
		Alt 0	Alt 1	A1	A2	A3	E1	E2	S1	S2	S3	T1	T2
Alt.	Alt 0	0,000	0,000	0,167	0,125	0,167	0,125	0,111	0,125	0,167	0,125	0,100	0,100
	Alt 1	0,000	0,000	0,833	0,875	0,833	0,875	0,889	0,875	0,833	0,875	0,900	0,900
Amb.	A1	0,333	0,149	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,000
	A2	0,333	0,066	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	A3	0,333	0,785	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,875	0,000	0,000	0,000
Eco.	E1	0,500	0,750	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	E2	0,500	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Soc.	S1	0,333	0,481	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	S2	0,333	0,114	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	S3	0,333	0,405	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Tras.	T1	0,500	0,750	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	T2	0,500	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tab. 7. Supermatrice pesata (sottorete Opportunità)

		Alternative		A. Ambientali			A. Economici		A. Sociali			A.trasportistici	
		Alt 0	Alt 1	A1	A2	A3	E1	E2	S1	S2	S3	T1	T2
Alt.	Alt 0	0,000	0,000	0,167	0,125	0,167	0,125	0,111	0,125	0,021	0,125	0,100	0,100
	Alt 1	0,000	0,000	0,833	0,875	0,833	0,875	0,889	0,875	0,104	0,875	0,900	0,900
Amb.	A1	0,087	0,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,109	0,000	0,000	0,000
	A2	0,087	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	A3	0,087	0,206	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,766	0,000	0,000	0,000
Eco.	E1	0,028	0,041	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	E2	0,028	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Soc.	S1	0,039	0,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	S2	0,039	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	S3	0,039	0,048	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Tras.	T1	0,283	0,424	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	T2	0,283	0,141	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

3.4 Risultati finali e analisi di sensitività

I vettori derivanti dalle quattro supermatrici limite forniscono le priorità di tutti gli elementi considerati nell'analisi (tabella 8).

Trascurando le priorità del *cluster* delle alternative (in bianco nei grafici di tabella 8), nella scelta della soluzione più sostenibile maggiore importanza è stata attribuita ai benefici legati all'efficienza dei flussi di traffico, alle opportunità connesse agli effetti sui tempi di percorrenza, ai costi di realizzazione ed esercizio dell'opera e ai rischi dovuti alla mancata condivisione del progetto. È poi possibile mettere in evidenza l'importanza assegnata agli aspetti ambientali quali i rischi determinati da interferenze dell'opera con il suolo e l'assetto idrico, quelli relativi agli impatti acustici e paesaggistici e le opportunità legate alla qualità acustica e atmosferica nell'area in esame.

Infine, le priorità delle alternative ricavate dalla supermatrice limite di ciascuna sottorete vengono normalizzate fornendo così l'ordinamento delle due opzioni di intervento. Occorre sottolineare che un valore di preferibilità maggiore nella graduatoria relativa alle sottoreti Benefici e Opportunità significa che l'alternativa comporta maggiori benefici o opportunità ed è quindi preferibile; all'opposto, un valore maggiore nella graduatoria relativa alle sottoreti Costi e Rischi significa che l'alternativa

Tab. 8. Priorità degli elementi risultanti dal modello secondo le quattro sottoreti

Benefici		
Alt.	Opzione 0	0,059
	Opzione 1	0,441
Asp. econ.	Valorizzazione immobiliare delle aree	0,081
Asp. sociali	Aderenza aspettative comunità loc.	0,034
Asp. trasp.	Efficienza flussi di traffico	0,385
Opportunità		
Alt.	Opzione 0	0,060
	Opzione 1	0,436
Asp. ambientali.	Disponibilità aree verdi	0,023
	Immagine dei luoghi	0,013
	Impatti qualità acustica e atmosferica	0,101
Asp. econ	Innesco processi di valorizzazione del territorio	0,020
	Rifunzionalizzazione aree	0,008
	Disponibilità servizi per la popolazione	0,027
Asp. sociali.	Effetti sulla salute	0,008
	Impatti sicurezza stradale	0,023
Asp. trasp.	Effetti sui tempi di percorrenza	0,202
	Effetti sulla capacità di scambio	0,079
Costi		
Alt.	Opzione 0	0,055
	Opzione 1	0,445
Asp. amb.	Effetti ambientali per realizzazione/ esercizio	0,052
Asp. econ.	Costi di realizzazione/esercizio dell'opera	0,319
Asp. trasp.	Criticità dovute a realizzazione/esercizio	0,129
Rischi		
Alt.	Opzione 0	0,228
	Opzione 1	0,240
Asp. amb.	Impatti acustici	0,120
	Impatti paesaggistici	0,072
Asp. econ.	Interferenze con suolo e assetto idrico	0,135
	Costi di manutenzione/gestione	0,075
Asp. sociali	Mancata condivisione del progetto	0,140

comporta maggiori costi o rischi ed è quindi meno preferibile. La tabella 9 riassume le priorità normalizzate di ciascuna alternativa in ogni sottorete. Tali priorità rappresentano il punto di partenza per l'aggregazione e la sintesi finale dei risultati del modello.

Tab. 9. Priorità delle alternative per tutte le sottoreti del modello

Alternative	Benefici	Opportunità	Costi	Rischi
Opzione 0	0,118	0,121	0,110	0,487
Opzione 1	0,882	0,879	0,890	0,513

Per arrivare all'integrazione dei risultati provenienti da ciascuna sottorete in un'unica graduatoria finale rispetto al *goal* del problema, sono disponibili diverse formule (Saaty, 2003; Saaty e Ozdemir, 2008). La tabella 10 riporta la graduatoria di preferibilità delle due alternative in esame in funzione delle diverse formule aggregative disponibili.

Tab. 10. Vettori di priorità delle alternative secondo le diverse formule disponibili

Alternative	Additiva negativa $B+O-C-R$	Additiva reciproca $B+O+1/C+1/R$	Additiva probabilistica $B+(1-C)+O+(1-R)$	Moltiplicativa $B*O/C*R$
Opzione 0	-1,000	0,425	0,374	0,135
Opzione 1	0,000	0,575	0,626	0,865

Com'è possibile notare dalla lettura della tabella 10, la soluzione relativa all'ipotesi di intervenire con una variante alla SP 65 della Futa, assume la priorità maggiore secondo tutte le formule aggregative utilizzate (Wijnmalen, 2007; Saaty e Ozdemir, 2008).

Al fine di testare la stabilità del risultato è stata inoltre sviluppata un'analisi di sensitività per la formula additiva reciproca (Saaty, 2005), variando, di volta in volta, il peso di uno dei quattro criteri di controllo e mantenendo gli altri costanti.

Considerando la relazione tra i benefici e le alternative valutate (figura 3), si osserva che entrambe sono sensibili a variazioni del peso attribuito al criterio dei benefici. In particolare, il vantaggio dell'opzione 1 in termini di benefici aumenta all'aumentare del peso attribuito agli stessi mentre nel caso dell'opzione 0 la performance dell'alternativa decresce all'aumentare del peso attribuito al criterio di controllo. Dunque l'opzione 1 presenta caratteristiche positive in termini di benefici, mentre l'opzione 0 presenta caratteristiche negative.

Prendendo invece in considerazione i costi (figura 4), l'analisi di sensitività illustra come sia le alternative sia il risultato stesso in termini di graduatoria siano sensibili a variazioni del peso attribuito ai costi. Si passa infatti da un ordinamento delle alternative in cui l'opzione 1 risulta preferibile (per un peso attribuito ai costi pari allo 0%) ad un ordinamento in cui risulta invece preferibile l'opzione 0 (per un peso attribuito ai costi pari al 100%). Ragionando in termini di costi l'opzione 0 presenta quindi caratteristiche positive per cui l'aumento del peso attribuito ai costi influisce positivamente sulla sua scelta; viceversa per l'opzione 1.

Quando l'analisi di sensitività viene sviluppata in base alle opportunità (figura 5) non vi è inversione nella graduatoria delle alternative. Le due opzioni sono però sensibili alla variazione dell'importanza attribuita alle opportunità e, mentre l'alternativa

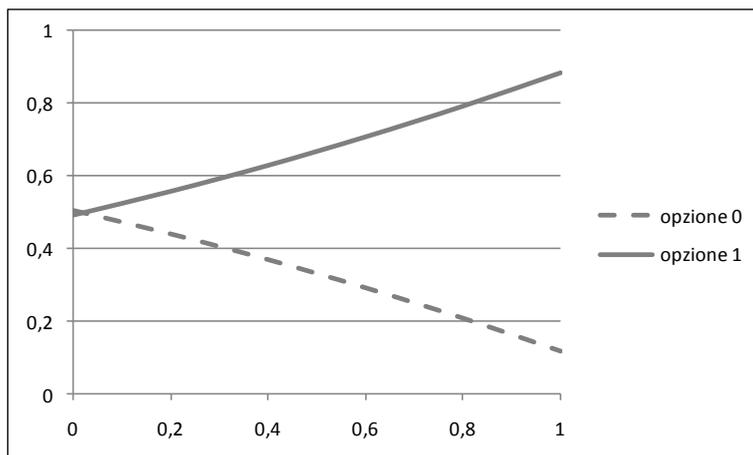


Fig. 3. Analisi di sensitività - Benefici

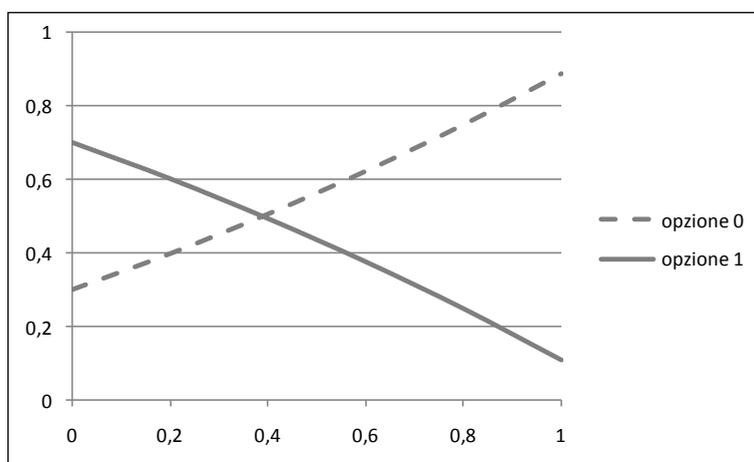


Fig. 4. Analisi di sensitività - Costi

1 vede la preferenza aumentare a suo vantaggio, l'alternativa 0 presenta caratteristiche negative in termini di opportunità.

Realizzando l'analisi di sensitività sui rischi (figura 6) è interessante notare come si passa da un ordinamento in cui l'opzione 1 risulta preferibile (per un peso attribuito ai rischi pari a 0%), ad un ordinamento in cui la priorità delle due alternative è pressoché identica (per un peso pari a 100%).

4. CONCLUSIONI

Il lavoro illustra l'applicazione della tecnica ANP nell'ambito di un progetto di trasformazione del territorio. In particolare, lo studio si concentra sulla scelta infra-

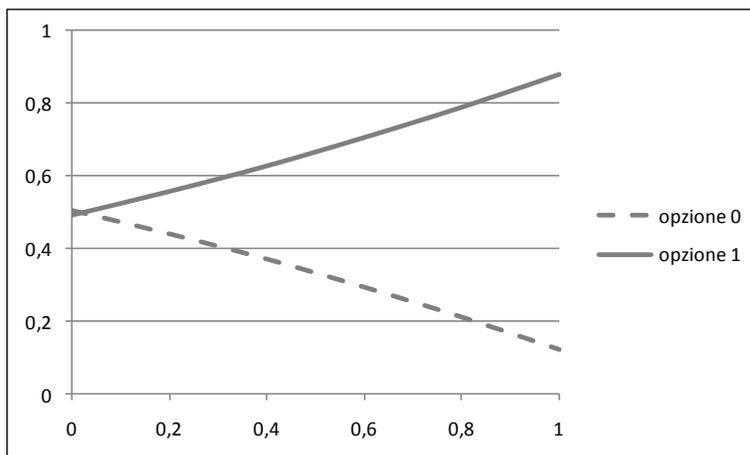


Fig. 5. Analisi di sensitività - Opportunità

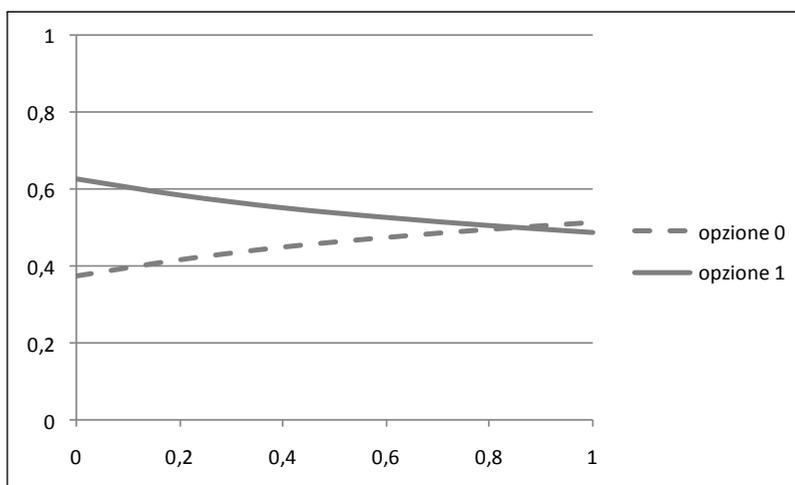


Fig. 6. Analisi di sensitività - Rischi

strutturale ritenuta maggiormente sostenibile per la gestione del traffico stradale che attraversa un comune localizzato nella provincia di Bologna.

Attraverso lo sviluppo dell'ANP secondo il modello BOCR, lo studio ha messo in luce la preferibilità della soluzione che prevede lo spostamento dei flussi di traffico con la realizzazione di una nuova arteria stradale localizzata in un'area esterna al centro abitato. Al di là della graduatoria di preferibilità delle alternative in esame, l'analisi ha permesso di giungere ad un vettore che fornisce l'importanza degli elementi individuati. Da tale vettore emergono alcuni risultati interessanti: in primo luogo, è possibile evidenziare come gli elementi di natura economica e gli aspetti trasportistici del problema assumono un ruolo prioritario ai fini della decisione finale (Bottero e Lami, 2009); in secondo luogo, l'analisi mette in luce che una parte importante nella valutazione dell'intervento è giocata dagli aspetti ambientali, quali le interferenze con

il suolo e l'assetto idrico o la qualità acustica e atmosferica dell'area; infine, grande importanza è assunta dagli aspetti più preminentemente sociali legati all'opera che fanno riferimento alla sua condivisione da parte della popolazione.

Attraverso la presente applicazione della metodologia ANP si è quindi inteso far emergere le potenzialità di tale tecnica nell'evidenziare quali siano gli elementi più significativi ai fini della decisione attraverso un processo di valutazione trasparente. Interessanti sviluppi futuri del lavoro potrebbero derivare da un confronto partecipato tra i vari attori in gioco per l'identificazione e la pesatura dei criteri di valutazione.

BIBLIOGRAFIA

- Agarwal A., Shankar R., Tiwari M.K. (2006). Modelling the metrics of lean, agile and leagile supply chain: an ANP-based approach. *European Journal of Operational Research*, vol. 173 ,n. 1, pp. 211-225.
- Brandon P.S., Lombardi, P. (2005). *Evaluating Sustainable Development*. UK, Blackwell Science.
- Bottero M., Lami I., Lombardi P. (2008). *Analytic Network Process, Le valutazioni di scenari di trasformazione urbana e territoriale*. Firenze, Alinea Editrice.
- Bottero M., Lami I.M. (2009). Sustainable mobility and urban planning: the application of the Analytic Network Process for the assessment of different transport scenarios. Second International Conference on Whole Life Urban Sustainability and its Assessment, 22–24 April 2009, Loughborough, UK.
- Bottero M., Mondini G. (2008). An Appraisal of Analytic Network Process and Its Role in Sustainability Assessment in Northern Italy. *International Journal of Management of Environmental Quality*, vol.19, issue 6, pp. 642-660.
- Ferretti V. (2009). Utilizzo dell'Analytic Network Process per la valutazione di un intervento di trasformazione urbana: il progetto del nuovo palazzo della Regione Piemonte a Torino. In: Bottero M., Mondini G. (a cura di). *Valutazione e sostenibilità. Piani, programmi, progetti*. Torino, Celid.
- Figueria J., Greco S., Ehrgott M. (eds). (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Survey*. Springer, New York.
- Fusco Girard L., Nijkamp P. (2005). *Energia, bellezza e partecipazione: le sfide della sostenibilità*. Milano, Franco Angeli.
- Neaupane K.M., Piantanakulchai M. (2006). Analytic Network Process Model for Landslide Hazard Zonation. *Engineering Geology*, n. 85, pp. 281-294. Elsevier.
- Niemura, M.P., Saaty T. L. (2004). An Analytic Network Process Model for Financial-Crisis Forecasting. *International Journal of Forecasting*, vol. 20, issue 4, pp. 573-587.
- Nijkamp P., Vreeker R. (2000), Sustainability Assessment of Development Scenarios: Methodology and Application to Thailand. *Ecological Economics*, vol.33, n. 1, pp. 7-27.
- Piantanakulchai, M. (2005). Analytic Network Process Model For Highway Corridor Planning. *Proceedings of 8° International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*. Honolulu, Hawaii, USA, 8-10 July 2005.

- Promentilla, M.A.B., Furuichi T., Ishii K., Tanikawa N. (2006). Evaluation of remedial countermeasures using the analytic network process. *Waste Management*, vol. 26, issue 12, pp.1410-1421.
- Prigogine I. (1993). *Le leggi del caos*. Roma-Bari, Laterza.
- Roscelli R. (a cura di). (2005). *Misurare nell'incertezza*. Torino, Celid.
- Roy B., Bouyssou D. (1995). *Aide multicritère à la décision: méthodes et case*. Paris, Economica.
- Saaty R.W. (2003). *Decision-making in Complex Environments: The Analytic Hierarchy Process (AHP) for Decision-making and The Analytic Network Process (ANP) for Decision-making with Dependence and Feedback*, Pittsburgh, RWS Publications.
- Saaty T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York, McGraw Hill.
- Saaty T. L. (1986). Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Sciences*, (32), 7.
- Saaty T. L. (2000). *Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburg, RWS Publications.
- Saaty T.L., (2005). *Theory and Applications of the Analytic Network Process*. Pittsburg, RWS Publications.
- Saaty T.L., Vargas L.G. (2006). *Decision making with the Analytic Network Process*. New York, Springer Science.
- Saaty T. L., Ozdemir M.S. (2008). *The Encyclicon. A Dictionary of Complex Decisions Using the Analytic Network Process*. Pittsburgh, RWS Publications.
- Tuzkaya U., Onut S. (2008). A fuzzy Analytic Network Process based approach to transportation-mode selection between Turkey and Germany: a case study. *Information Sciences*, vol. 178, n. 15, pp. 3133-3146.
- Ulutas, B.H. (2005), Determination of the appropriate energy policy for Turkey. *Energy*, vol. 30, issue 7, pp. 1146-1161.
- Wijnmalen, D.J.D. (2007). Analysis of benefits, opportunities, costs, and risks (BOCR) with the AHP-ANP: A critical validation. *Mathematical and Computer Modelling*, n. 46, pp. 892-905.