

## **4 POTENZIALITÀ DELLE COLTURE ENERGETICHE**

### **4.1 Introduzione**

Nell'ambito delle energie rinnovabili grande interesse è rivolto al settore delle bioenergie. Abbiamo visto come le biomasse, oltre ad essere una fonte energetica rinnovabile e alternativa a quelle di origine fossile, svolgono ben più altre funzioni che vanno oltre la sola produzione di energia: si passa da quelle ambientali (riduzione delle emissioni, protezione del suolo dall'erosione), a quelle di tipo economico e sociale (occupazione, aumento del reddito degli agricoltori, sviluppo delle economie rurali). Ovviamente le biomasse non rappresentano la soluzione finale della questione energetica (per quanto riguarda la sicurezza dell'approvvigionamento e la differenziazione delle fonti), né della politica di mitigazione dei cambiamenti climatici (Righelato e Spracklen, 2007). Possono tuttavia contribuire ad ampliare il portafoglio energetico, e al contempo favorire la diffusione di sistemi energetici distribuiti, l'uso di sottoprodotti e residui, altrimenti non utilizzati, per la produzione di energia e per la conversione di terreno agricolo inutilizzato a colture energetiche.

In questo modo, senza sottrarre spazio alle colture alimentari o convenzionali si possono creare filiere a scala locale di coltivazione, raccolta e di utilizzo energetico. È evidente comunque che tali riconversioni necessitano di grandi quantità di risorse idriche per cui il "conflitto" si sposterebbe sull'uso dell'acqua; si riscontrerebbero grosse difficoltà nel sostenere l'impiego a fini energetici rispetto a quello agricolo o potabile per uso umano.

Un'interessante prospettiva è invece costituita dalle acque reflue ed in particolare da quelle di origine urbana. Per queste, se utilizzate in larga parte nelle aree costiere o dei grandi sistemi fluviali, non si ha alcuna interferenza con i normali cicli e bilanci idrologici essendo destinate allo scarico a mare o nei tratti terminali dei fiumi.

La proposta trae spunto dalle ricerche condotte presso l'Università degli Studi della Basilicata che ha messo a punto un sistema per il trattamento delle acque reflue urbane in grado di operare una rimozione selettiva della frazione organica rapidamente biodegradabile (dannosa per le colture).

Lo schema impiantistico proposto, derivato dal sistema a "fanghi attivi convenzionale", consente di produrre acque a carico variabile di carbonio organico, azoto e fosforo, in modo da adeguare le stesse alle esigenze delle colture irrigate.

Lo schema proposto è stato testato per oltre 10 anni in un campo sperimentale della Regione Basilicata su colture olivicole dando i seguenti risultati:

- assenza di accumuli significativi di inquinanti nel suolo e nelle masse vegetali;
- incremento (raddoppio) delle produzioni agricole;
- incremento di circa il 2% del contenuto di carbonio organico nei terreni trattati con acque reflue;
- Riduzione delle emissioni equivalenti di CO<sub>2</sub> stimate in oltre 2 ton/anno per ogni ettaro di suolo adibito a colture e trattato con acque reflue.

L'applicazione sistematica di acque ricche di sostanza organica in terreni iper-sfruttati agronomicamente contribuisce a riequilibrare il contenuto di sostanza organica operando un significativo sequestro di carbonio. Nella sperimentazione condotta in Basilicata si è valutato un incremento del carbonio organico di circa il 2% corrispondente ad oltre 100 ton/ha di "sequestro di carbonio".

La minore (e selettiva) rimozione di sostanza organica dalle acque si traduce in un risparmio economico sui costi di trattamento e sui costi di smaltimento dei fanghi prodotti dai cicli depurativi. Si può stimare una riduzione dei costi operativi di trattamento dell'ordine del 20-30%.

Secondo quanto detto nasce l'idea di individuare i possibili terreni idonei alle SRF che possono essere irrigati con acque reflue urbane.

La maggior parte della letteratura scientifica attuale è dedicata: alla identificazione tramite via sperimentale o teorica della specie migliore da coltivare (Di Virgilio *et al.*, 2007; Facciotto *et al.*, 2006; Karačić e Weih, 2006; Bazzani *et al.*, 2005; Ercoli *et al.*, 1999); alle valutazioni economiche e ambientali di una determinata coltura (Monti *et al.*, 2007; Heller *et al.*, 2003); all'analisi del bilancio energetico di un singolo impianto di trasformazione in energia (Goor *et al.*, 2000). Un approccio di pianificazione a scala regionale o nazionale è stato usato in pochi studi. Schneider *et al.* (2001) utilizzano i GIS per valutare la disponibilità di suolo in Brasile per le coltivazioni energetiche. Fischer *et al.* (2005) definiscono un metodo, con tecniche GIS, per identificare alcuni requisiti ambientali di specie arboree ed erbacee come ad esempio il clima, il suolo, in termini di pedologia e morfologia. Salvati *et al.* (2007) hanno utilizzato un modello in GIS per la valutazione dell'attitudine fisica del territorio per SRF in Italia.

Anche la pianificazione, quindi, a livello regionale, come nel nostro caso di studio, può essere svolta soltanto utilizzando lo strumento dei GIS, che permette di valutare nell'insieme:

le caratteristiche del territorio (morfologia, pedologia, clima), le esigenze ecologiche e culturali delle specie, la distribuzione e i caratteri (superfici, uso del suolo, valore economico) dei terreni oggetto di studio.

L'integrazione di tecniche MCE con i GIS può essere utile per risolvere situazioni conflittuali in contesti spaziali (Janssen et Rietved, 1990; Malczewski, 1996) anche come approccio efficace nell'analisi di idoneità d'uso del suolo (Carver 1991; Eastman, 1997; Thill, 1999; Malczewski, 2004). Tale integrazione può essere pensata come un processo che combina e trasforma dati spaziali e dati non spaziali (input) in un risultato decisionale (output), definendo una relazione tra le mappe di ingresso e la mappa di uscita in relazione ai dati geografici e le preferenze decisionali, manipolati in base a regole decisionali specificate (Malczewski, 2004).

I metodi di analisi multicriterio più utilizzati per l'analisi d'idoneità d'uso del suolo in ambiente GIS sono le operazioni booleane di overlay (regole di combinazione non compensatorie) e i metodi di combinazione lineare pesata (WLC, regole di combinazione compensatorie) (Heywood et al., 1995; Jankowski, 1995; Barredo, 1996; Beedasy e Whyatt, 1999; Malczewski, 2004, Romano S. and Cozzi M., 2006).

Vi sono, tuttavia, alcuni limiti fondamentali associati all'uso di tali procedure in un processo decisionale (Malczewski, 2004). Jiang e Eastman (2000) danno una trattazione completa di tali limitazioni e suggeriscono che la *Ordered Weighted Averaging* (OWA) fornisce un'estensione e una generalizzazione dei metodi convenzionali di combinazione delle mappe in GIS.

OWA è una famiglia di procedure di combinazione multicriterio (Yager, 1988), che utilizza due serie di pesi: i pesi d'importanza relativa tra i criteri e i pesi ordinati (o OWA). Specificando un opportuno insieme dei pesi OWA, si può generare una vasta gamma di mappe di idoneità d'uso del suolo.

Anche se questo è un approccio relativamente nuovo (Yager, 1988), è possibile riscontrare in letteratura molteplici applicazioni della OWA convenzionale (quantitativa) in ambiente GIS (Asproth et al., 1999; Jiang e Eastman, 2000; Mendes e Motizuki, 2001; Rasmussen et al., 2001; Araújo e Macedo, 2002; Rinner e Malczewski, 2002; Makropoulos et al., 2003; Malczewski et al., 2003; Rashed e Weeks, 2003; Calijuri et al., 2004; Makropoulos e Butler, 2005). In questo ambito è da rilevare come le applicazioni GIS-OWA si sono finora concentrate sulle procedure che richiedono di specificare quantitativamente i parametri associati con gli operatori. Tuttavia, vi sono alcune evidenze che suggeriscono che gli

operatori tradizionali OWA sono di limitata applicabilità in situazioni che coinvolgono una vasta serie di criteri di valutazione (Yager, 1996). Ci si potrebbe aspettare che in una situazione decisionale spaziale complessa, i decisori potrebbero trovare difficile (o addirittura impossibile, soprattutto per i problemi che coinvolgono proprio un gran numero di criteri) formulare informazioni numeriche precise rispetto ai parametri OWA (Malczewski, 2006). Per un grande insieme di criteri di valutazione, infatti, si affronta il difficile problema di combinare le mappe criterio in modo che i risultati corrispondono alle preferenze dei decisori. In tali situazioni, gli aspetti chiave del problema decisionale potrebbero essere specificati in termini di alcuni quantificatori linguistici fuzzy quali ad esempio “*la maggior parte dei criteri devono essere soddisfatti*” o “*almeno l'80% dei criteri devono essere soddisfatti*”, ecc. (Malczewski, 2006). Ciò richiede una estensione della OWA convenzionale in modo che possa accogliere situazioni che coinvolgono affermazioni qualitative in forma di quantificatori linguistici fuzzy (Yager, 1988, 1996).

## 4.2 Materiali e metodi

### 4.2.1 Quantifier-guided Ordered Weighted Averaging (OWA)

Le procedure di analisi multicriterio in ambiente GIS richiedono una serie di alternative geograficamente definite (ad esempio particelle di suolo) e una serie di criteri di valutazione rappresentati da dati spazializzati. Il problema è quello di combinare le mappe criterio secondo i valori criterio (attributo) e le preferenze dei decisori utilizzando una regola decisionale (regola di combinazione).

Assumendo che una alternativa sia rappresentata come una cella (raster) o un poligono, ogni alternativa ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) è descritta da un insieme di valori criterio standardizzati:  $a_{ij} \in [0, 1]$  per  $j = 1, 2, \dots, n$  (standardizzazione che può avvenire mediante metodi di logica sfocata *fuzzy*, Zadeh, 1965), e da preferenze che sono tipicamente indicate come i pesi criterio,  $w_j \in [0, 1]$  per  $j = 1, 2, \dots, n$ , e  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$  (calcolati ad esempio mediante la AHP, *Analytical Hierarchy Process*, Saaty, 1980). Definiti i dati di input (un insieme di mappe criterio e pesi criterio), l'operatore di combinazione OWA associa con l' $i$ -esimo posto (per esempio, raster o punto) un insieme di pesi ordinati  $v = v_1, v_2, \dots, v_n$  tale che  $v_j \in [0, 1]$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ ,  $\sum_{j=1}^n v_j = 1$ , ed è definito come segue (Yager, 1988; Malczewski et al., 2003; Malczewski, 2006):

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n \left( \frac{u_j v_j}{\sum_{j=1}^n u_j v_j} \right) z_{ij} \quad (\text{Eq. 1})$$

dove  $z_{i1} \geq z_{i2} \geq \dots \geq z_{in}$  è la sequenza ottenuta riordinando i valori attributo  $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ , e  $u_j$  è il peso criterio riordinato in base al valore dell'attributo,  $z_{ij}$ . È importante sottolineare la differenza tra i due tipi di pesi (i pesi criterio e i pesi ordine). I pesi criterio vengono assegnati ai criteri di valutazione per indicare la loro importanza relativa. Tutte le posizioni sulla  $j$ -esima mappa criterio è assegnato lo stesso peso di  $w_j$ . I pesi ordine sono associati con i valori criterio *pixel-by-pixel*. Essi sono attribuiti al valore attributo dell' $i$ -esima posizione in ordine decrescente senza considerare da quale mappa criterio il valore deriva.

Con diversi set di pesi ordine è così possibile generare una vasta gamma di operatori OWA comprese le più comuni procedure di combinazione di mappa in ambiente GIS: la combinazione lineare pesata (WLC) e le operazioni booleane di sovrapposizione, come l'intersezione (AND) e l'unione (OR) (Yager, 1988; Malczewski et al., 2003; Malczewski, 2006).

Gli operatori AND e OR rappresentano i casi estremi della OWA e corrispondono rispettivamente agli operatori MIN e MAX. I pesi ordine associati con l'operatore MIN sono:  $v_n = 1$ , e  $v_j = 0$  per tutti gli altri pesi; dati i pesi ordine,  $OWA_{i(MIN)} = MIN_j(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ . I pesi successivi sono associati con l'operatore MAX:  $v_1 = 1$ , e  $v_j = 0$  per tutti gli altri pesi, e di conseguenza  $OWA_{i(MAX)} = MAX_j(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ . Assegnando uguali pesi ordine (tale che,  $v_j = 1/n$  per  $j = 1, 2, \dots, n$ ), si ottiene la convenzionale WLC, la quale è situata nel punto centrale nel continuum fra gli operatori MIN e MAX (Yager, 1988), tale che  $OWA_{i(WLC)} = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij}$ .

#### 4.2.2 I pesi ordine: l'uso dei quantificatori linguistici fuzzy

Come detto precedentemente, le procedure di combinazione OWA coinvolgono l'uso di due serie di pesi, i pesi criterio e i pesi ordine. I primi possono essere calcolati mediante diversi metodi (Malczewski, 1999, 2006), quale ad esempio il metodo AHP; per i pesi ordine può essere d'aiuto l'uso dei quantificatori linguistici, come espressione del linguaggio umano nell'interazione computer-human (Malczewski, 2006).

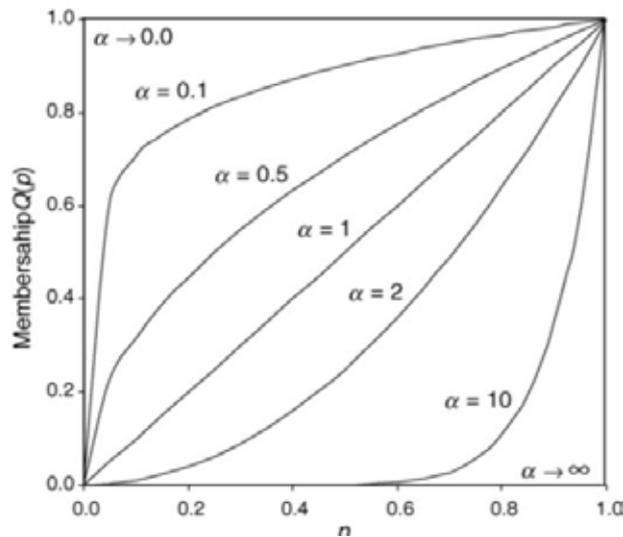
Dato un insieme di mappe criterio e un quantificatore linguistico fuzzy  $Q$ , si può eseguire una procedura per combinare i criteri sulla base di una dichiarazione per quanto riguarda la relazione tra i criteri di valutazione (Malczewski, 2006). Ad esempio, la procedura di

combinazione può essere guidata da un'istruzione del tipo: “*la maggior parte dei criteri devono essere soddisfatti*”, oppure “*almeno la metà dei criteri devono essere soddisfatti*”, ovvero “*tutti i criteri devono essere soddisfatti*”, ecc. Questo tipo di procedura viene indicato come “quantifier-guided multicriteria evaluation” (Yager, 1996).

In base al tipo di quantificatore linguistico si possono distinguere: i quantificatori linguistici assoluti e quantificatori linguistici relativi (o proporzionali) (Zadeh, 1983). Affermazioni come “*almeno circa 4*”, “*circa 5*”, “*quasi 10*”, “*non più di 10*”, “*più di 5*”, ecc. forniscono esempi di quantificatori assoluti. I quantificatori relativi indicano una quantità proporzionale, come “*la maggior parte*”, “*molti*”, “*pochi*”, “*quasi tutto*”, “*circa la metà*”, “*circa il 60%*”, ecc. Possono essere rappresentati come insiemi fuzzy nell'intervallo unitario  $[0, 1]$ , dove 0 significa 0% e 1 significa 100%. Quindi se  $Q$  è un quantificatore linguistico, allora può essere rappresentato come un insieme fuzzy  $Q$  dell'intervallo  $[0, 1]$  dove per ogni  $p \in [0, 1]$ ,  $Q(p)$  indica il grado di compatibilità di  $p$  con il concetto indicato con  $Q$ . Ad esempio, se  $Q$  è “*most*” e se  $Q(0,95) = 1$ , allora sarebbe come dire che il 95% è completamente compatibile con l'idea trasmessa dal quantificatore linguistico “*most*”, mentre  $Q(0,60) = 0,75$  indicherebbe che il 60% è solo 0,75 compatibile con il concetto di “*most*”.

Non ci sono prove empiriche per dimostrare quale delle due classi di quantificatori linguistici è più adatto per la valutazione multicriteriale. Malczewski propone una classe di quantificatori proporzionali conosciuti come quantificatori RIM (*Regular Increasing Monotone*) (Yager, 1996; Malczewski, 2006). Per identificare il quantificatore s'impiega uno dei più semplici e dei più utilizzati metodi per definire un sottoinsieme parametrizzato nell'intervallo unitario (Yager, 1996), così che  $Q(p) = p^\alpha$ ,  $\alpha > 0$ , dove  $Q(p)$  è rappresentato come un insieme fuzzy nell'intervallo  $[0, 1]$ . Si può così generare un'intera famiglia di quantificatori RIM (Figura 4-1).

Figura 4-1 Una famiglia di quantificatori RIM



Fonte: Malczewski, 2006

La Tabella 4-1 mostra una selezione dei quantificatori RIM e le loro caratteristiche. Modificando il parametro  $\alpha$ , si possono generare differenti tipi di quantificatori e operatori associati ai due casi estremi “All” e “At least one”. Per  $\alpha = 1$ ,  $Q(p)$  è proporzionale a  $\alpha$  e pertanto è indicato come quantificatore “Half” (identity). Come tende a zero, il quantificatore  $Q(p)$  si avvicina al caso estremo di “At least one”, che corrisponde alla operatore MAX. Come tende all'infinito, il quantificatore  $Q(p)$  si avvicina al caso estremo di “All”, che corrisponde all'operatore MIN.

Tabella 4-1 Alcune proprietà dei RIM per selezionare il valore del parametro  $\alpha$

$\alpha$	Quantificatore (Q)	Pesi OWA ( $v_j$ )	ORness	Tradeoff	Procedure di combinazione GIS
$\alpha \rightarrow 0$	At least one	$v_1 = 1; v_j = 0$ , per tutti gli altri pesi	1,0	0,0	OWA (OR, MAX)
$\alpha = 0,1$	At least a few	*	*	*	OWA
$\alpha = 0,5$	A few	*	*	*	OWA
$\alpha = 1$	Half (identity)	$v_j = 1/n$ , per tutti i j	0,5	1,0	OWA (WLC)
$\alpha = 2$	Most	*	*	*	OWA
$\alpha = 10$	Almost all	*	*	*	OWA
$\alpha \rightarrow \infty$	All	$v_n = 1; v_j = 0$ , per tutti gli altri pesi	0,0	0,0	OWA (AND, MIN)

\*Tali misure sono un problema specifico

Fonte: Malczewski, 2006

Il concetto di quantificatori fuzzy fornisce dunque un metodo per generare i pesi ordine (Malczewski, 2006). I pesi sono basati sul quantificatore RIM. Essi sono definiti come segue (Yager, 1996):

$$v_j = \left( \frac{\sum_{k=1}^j u_k}{\sum_{k=1}^n u_k} \right)^\alpha - \left( \frac{\sum_{k=1}^{j-1} u_k}{\sum_{k=1}^n u_k} \right)^\alpha \quad (\text{Eq. 2})$$

È importante notare che nelle procedure di valutazione multicriteriale in ambiente GIS, i pesi criterio hanno tipicamente la seguente proprietà:  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ . Di conseguenza,  $\sum_{j=1}^n u_j = 1$  e l'equazione precedente può essere semplificata a:

$$v_j = \left(\sum_{k=1}^j u_k\right)^\alpha - \left(\sum_{k=1}^{j-1} u_k\right)^\alpha \quad (\text{Eq. 3})$$

Così, i pesi ordine  $v_j$  derivano dai pesi criterio,  $w_j$ . Dati dunque i pesi criterio,  $w_j$ , e pesi ordine,  $v_j$ , l'OWA quantificato-guidata è definito come segue (Malczewski, 2006):

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n \left( \left(\sum_{k=1}^j u_k\right)^\alpha - \left(\sum_{k=1}^{j-1} u_k\right)^\alpha \right) z_{ij} \quad (\text{Eq. 4})$$

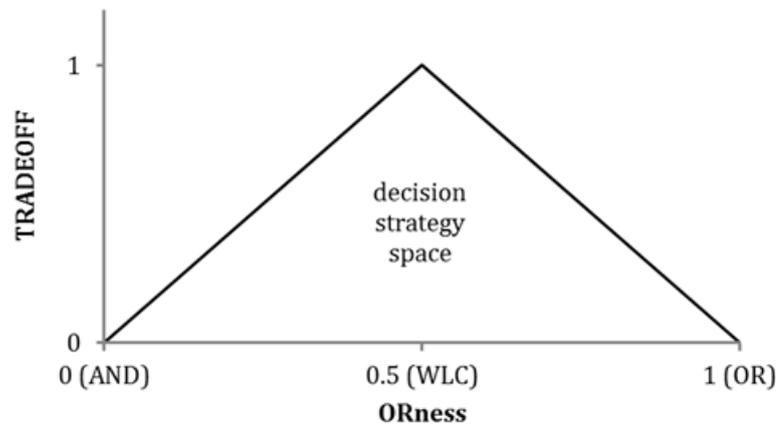
L'OWA così calcolata in ambiente GIS fornisce uno strumento per la generazione di una vasta gamma di strategie decisionali (modelli alternativi di idoneità d'uso del suolo), specificando un quantificatore linguistico adeguato (il parametro) e l'insieme dei pesi associati all'OWA. Le posizioni degli operatori OWA possono essere identificati nel continuum che va dal quantificatore “All” al quantificatore “At least one”. Ci sono due misure comunemente usate per identificare la posizione dell'operatore OWA: la misura di tradeoff e ORness (Yager, 1988, 1996, Jiang e Eastman, 2000; Malczewski, 2006).

Il tradeoff è una misura di compensazione (sostituibilità criterio). Esso indica il grado in cui uno scarso rendimento su un criterio può essere compensato da una buona performance su altri criteri presi in considerazione (Jiang e Eastman, 2000; Malczewski, 2006). La misura del tradeoff assume dunque valori nell'intervallo 0,1 tale che il valore 0 indica l'assenza di compromesso tra i criteri, mentre il valore uguale a 1 indica un compromesso pieno (Tabella 4-1). La misura può essere interpretata come il grado di dispersione dei pesi OWA. In particolare, il grado in cui i pesi sono distribuiti uniformemente tra tutti i criteri controlla il livello di compromesso globale tra i criteri (Malczewski, 2006).

La posizione della OWA nel continuum tra il quantificatore “All” e “At least one” può anche essere identificata specificando il grado di ORness (o grado di rischio) (Yager, 1988, 1996; Malczewski, 2006). Anche in questo caso il grado di ORness varia da 0 (*risk-averse*, operatore MIN, AND) a 1 (*risk-taking*, operatore MAX, OR). Come è possibile notare dalla Tabella 4-1, il grado di ORness è anche legato al quantificatore RIM. In particolare, si possono ottenere diversi gradi di ORness modificando il parametro  $\alpha$  (Yager, 1988, 1996): il rischio passa da 0 a 1 per  $\alpha$  che passa da infinito a zero ( da “All” a “At least one”).

Risulta dunque ovvio come lo spazio di strategia decisionale sia definito anche dalle due misure OWA: tradeoff e ORness (Figura 4-2).

Figura 4-2 Spazio di strategia decisionale: relazione tra le misure di tradeoff e ORness.



### 4.3 Caso di studio

#### 4.3.1 Area di studio

Inserita tra le grandi regioni meridionali (Campania, Puglia, Calabria), la regione Basilicata ha una superficie territoriale pari a 999.224 ettari con una popolazione di 578.036 abitanti (ISTAT, 2011), un territorio prettamente rurale con la popolazione concentrata per i due terzi nei pochi grandi centri urbani. Da qui deriva la bassa densità abitativa regionale (58.7 abitanti per km<sup>2</sup>) nettamente al disotto della media nazionale (circa 201 abitanti per km<sup>2</sup>)

Il territorio lucano presenta notevoli differenze da un punto di vista morfologico: si passa dal basamento calcareo delle Murge e della fossa Bradanica a nordest, alle aree montuose e collinari della Catena Appenninica, distribuita in dorsali con allineamento NW-SE, alle pianure del litoraneo ionico (AA.VV., 2006).

Da un punto di vista climatico ci sono differenze dovute proprio alla complessità orografica del territorio, caratterizzata da dislivelli molto forti, che dal livello del mare si spingono a oltre i 2.200 m, e dalla posizione geografica, a cavallo di tre mari: Adriatico a nord-est, Tirreno a sud-ovest, Ionio a sud-est. Come evidenziato da Cantore et al. (1987), gran parte del territorio presenta caratteristiche tipicamente mediterranee (litorale Ionico, fossa Bradanica e Murge materane), con zone oltre gli 800 m s.l.m. che si caratterizzano per un clima temperato-freddo con estati più o meno siccitose.

Le precipitazioni medie annue variano dai 529 mm fino ai circa 2.000 mm, concentrate nell'area sud-occidentale della regione poiché la catena appenninica intercetta buona parte delle perturbazioni atlantiche presenti nel Mediterraneo. I mesi con maggiore piovosità sono

novembre e dicembre, quelli meno piovosi luglio ed agosto durante i quali si manifestano soventi periodi di siccità accentuata.

L'andamento delle temperature è caratterizzato da forti escursioni, con estati molto calde e inverni rigidi. Il mese più freddo è in genere gennaio (con temperature media tra i -4 e i 7 °C).

La superficie agricola totale è di 489.229,22 ha (il 48,96% della superficie regionale) e la superficie agricola utilizzata è di 368.726,53 ha, di cui il 57,72% a seminativi (per lo più in asciutto) e il 10,77% a frutteti, localizzati principalmente in aree collinari; la restante superficie (31,28%) è destinata a prati permanenti e pascoli localizzati principalmente in montagna, con soli 2008,85 ha destinati all'arboricoltura da legno e solo 30,74 ha a coltivazioni energetiche (ISTAT, 2010). La componente forestale si caratterizza per l'elevata naturalità, con mosaici di paesaggi costituiti da molte specie e consociazioni endemiche. La superficie forestale ammonta a 354.895 ha, con un indice di boscosità pari al 35,6% (INEA, 2006). In termini di distribuzione delle specie, le categorie fisionomiche più rappresentative sono i querceti mesofili e meso-termofili che rappresentano il 51,8% della superficie forestale complessiva. Seguono i boschi di faggio con l'8,4%, la macchia mediterranea con il 7,9%, gli arbusteti termofili con il 6,9% e altri boschi di latifoglie con il 5,5%.

#### 4.3.1.1 Caratterizzazione dell'area di studio

Il lavoro di caratterizzazione dell'area è stato condotto interamente in ambiente GIS, realizzando per ognuno dei fattori ambientali considerati uno strato informativo georeferenziato in formato *raster* con risoluzione di 100 m, utilizzando come sistema geografico di riferimento il sistema Gauss Boaga Est, su datum Monte Mario - Roma 1940.

I fattori ambientali (criteri) utilizzati nel modello d'informatizzazione geografica (Tabella 4-2) sono strettamente connessi alle esigenze ecologiche e colturali delle specie prese in esame, con particolare riguardo alla distribuzione altimetrica, alle esigenze idriche, termiche, edafiche e colturali (meccanizzazione della coltura).

**Tabella 4-2 Fattori ambientali presi in considerazione**

Fattore	Unità di misura
Precipitazione media annua	mm
Precipitazione media mesi estivi	mm
Temperatura media annua	°C
Temperatura media mese più freddo	°C
Altitudine	m slm
Pendenza	%
Profondità del suolo*	cm
Carbonati*	% di CaCO <sub>3</sub>
Reazione*	pH
Tessitura*	classi tessiturali

\*Valori raggruppati in classi (Tabelle 4-1)

**Tabelle 4-1 Valore rappresentativo per ogni classe di appartenenza**

CARBONATI			REAZIONE		
CLASSE	CaCO <sub>3</sub> (%)	VALORE	CLASSE	pH	VALORE
non calcareo	< 0,5	1	molto acida	< 4,5	1
molto scarsamente calcareo	0,5 - 1,0	2	acida	4,5 - 5,5	2
scarsamente calcareo	1,0 - 5	3	subacida	5,6 - 6,5	3
moderatamente calcareo	5 - 10	4	neutra	6,6 - 7,3	4
molto calcareo	10 - 25	5	subalcalina	7,4 - 7,8	5
fortemente calcareo	25 - 40	6	alcalina	7,9 - 8,4	6
estremamente calcareo	> 40	7	molto alcalina	8,5 - 9,0	7

PROFONDITÀ			TESSITURA		
CLASSE	PROFONDITÀ (cm)	VALORE	CLASSE	NATURA DEL SUOLO*	VALORE
molto sottile	< 25	1	grossolana	S, SF	1
sottile	25 - 50	2	moderatamente grossolana	FS	2
moderatamente profondo	50 - 100	3	media	F, FL, L	3
profondo	100 - 150	4	moderatamente fine	FSA, FA, FLA	4
molto profondo	> 150	5	fine	A, AS, AL	5

\*S=sabbiosa; F=franca; L=limosa; A=argillosa

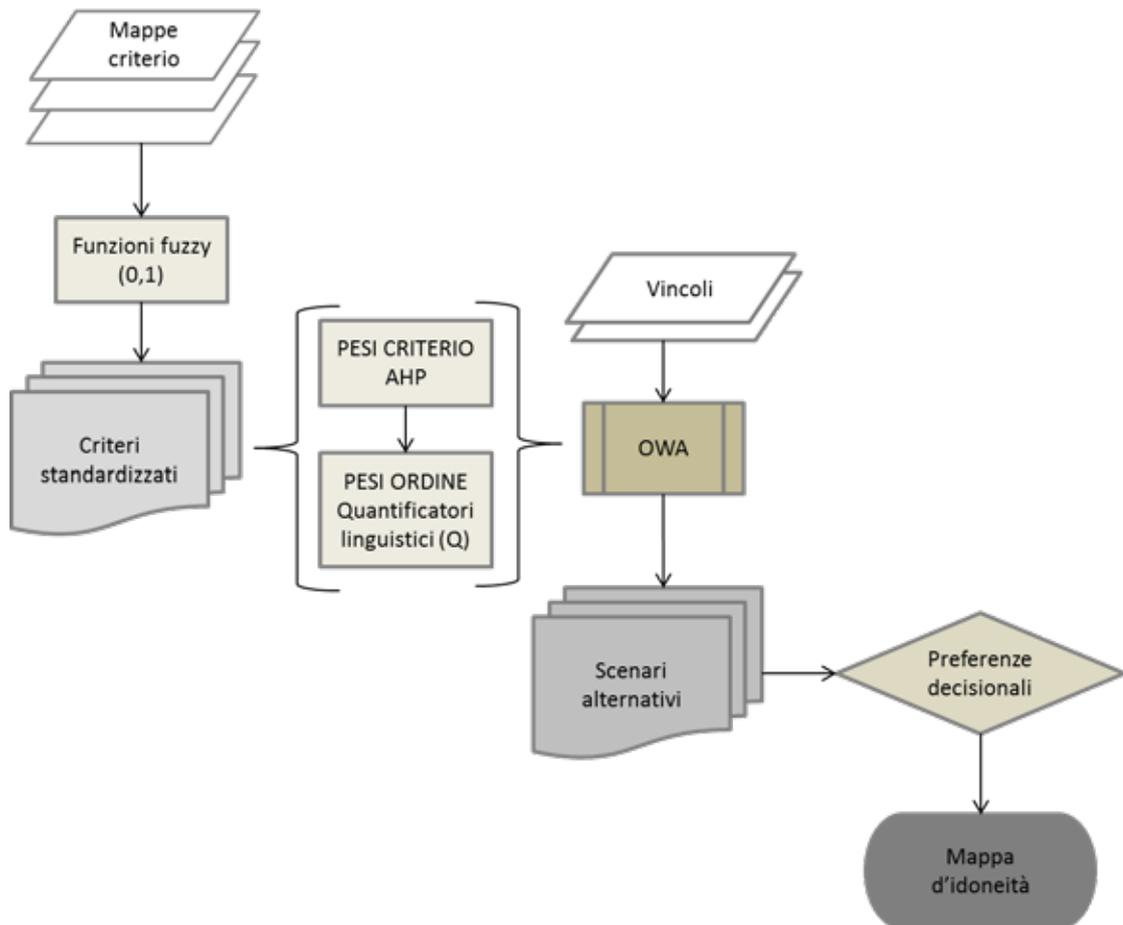
Dato l'elevato numero di specie che possono essere utilizzate nelle energy crops (El Bassman, 2010), sono state individuate le specie legnose che, a seguito di varie esperienze, sono risultate maggiormente idonee per impianti a ciclo breve (SRF) in Italia (Minotta et al., 2000; Bonari et al., 2004; Bergante S. e Facciotto G., 2006; Facciotto et al., 2006), quali: *Eucalyptus camaldulensis* Dehn, *Populus x euroamericana* Guinier, *Robinia pseudoacacia* L., *Salix alba* L..

In aggiunta a tali fattori sono state realizzate e considerate nell'analisi la carta forestale e la carta d'uso del suolo regionale (vincoli) al fine di individuare i soli territori potenzialmente destinabili alle SRF. Sono stati esclusi infatti i terreni la cui destinazione d'uso era tale da non poter essere disponibili per le SRF, quali superfici artificiali, colture permanenti, territori boscati, zone umide e corpi idrici.

### 4.3.2 Analisi d'idoneità d'uso del suolo

L'analisi di idoneità d'uso del suolo per la messa a dimora di SRF è stata condotta mediante un *modello di analisi geografica*, in cui le valutazioni ambientali vengono svolte attraverso l'uso congiunto di tecniche MCE con i sistemi informativi georeferenziati (GIS). Il metodo precedentemente descritto fa sì che in un contesto decisionale complesso, dato un certo numero di alternative, si giunga ad un risultato conforme alle preferenze decisionali specificate attraverso una sequenza ben definita di processi (Figura 4-3).

Figura 4-3 Schematizzazione del modello di analisi.



Individuati i criteri necessari per l'analisi specifica, si è passato alla loro standardizzazione impiegando funzioni spaziali sfocate (*fuzzy*), scelte in funzione del tipo di dato trattato e dell'incertezza associata ad esso. Grazie ad esse è stato possibile ottenere nuove immagini raster con valori di idoneità [0,1] della specie al territorio in relazione a ciascun fattore ambientale considerato.

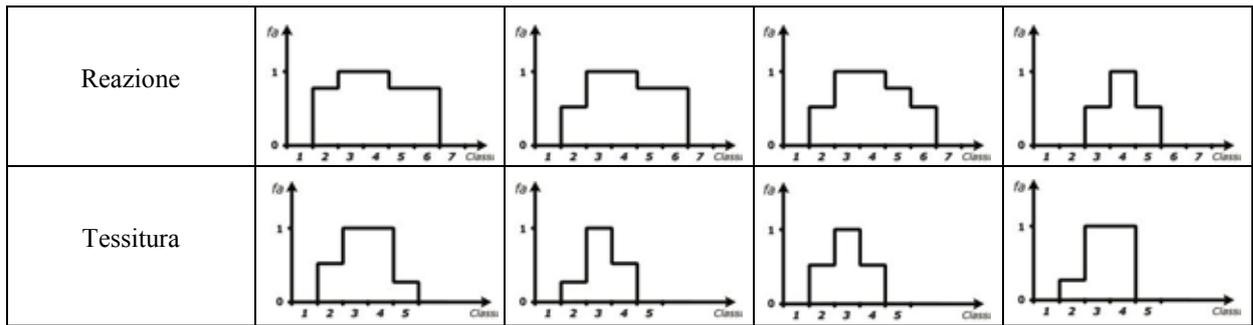
In seguito alla standardizzazione dei criteri il metodo d'analisi precedentemente descritto richiede il calcolo di due serie di pesi: i pesi criterio e i pesi ordine. I primi sono stati calcolati mediante metodo AHP, effettuando una comparazione a coppie mediante matrice di Saaty. I

pesi ordine, il cui calcolo dipende anche dai pesi criterio, sono stati calcolati ricorrendo ai quantificatori linguistici RIM mediante il metodo proposto da Malczewski (2006).

Il procedimento richiede che siano ordinati i criteri in base al loro valore (valore criterio) in ordine decrescente al fine di ordinare i pesi criterio.

**Tabella 4-3 Funzioni di appartenenza fuzzy rappresentative delle condizioni di idoneità territoriale alla coltivazione delle specie target in relazione ai fattori ambientali considerati.**

	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	<i>Populus x euroamericana</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Salix alba</i>
Precipitazione medie annua				
Precipitazione media mesi estivi				
Temperatura media annua				
Temperatura media del mese più freddo				
Altitudine				
Pendenza				
Carbonati				
Profondità				



Dato che i criteri sono rappresentati da immagini raster costituite dallo stesso numero di pixel ma di valori differenti, si può assumere che il valore rappresentativo per ogni singola immagine raster sia costituito dalla media dei valori di tutti pixel. Calcolata dunque per ogni criterio, sono stati ordinati i valori e in relazione ad essi i pesi criterio.

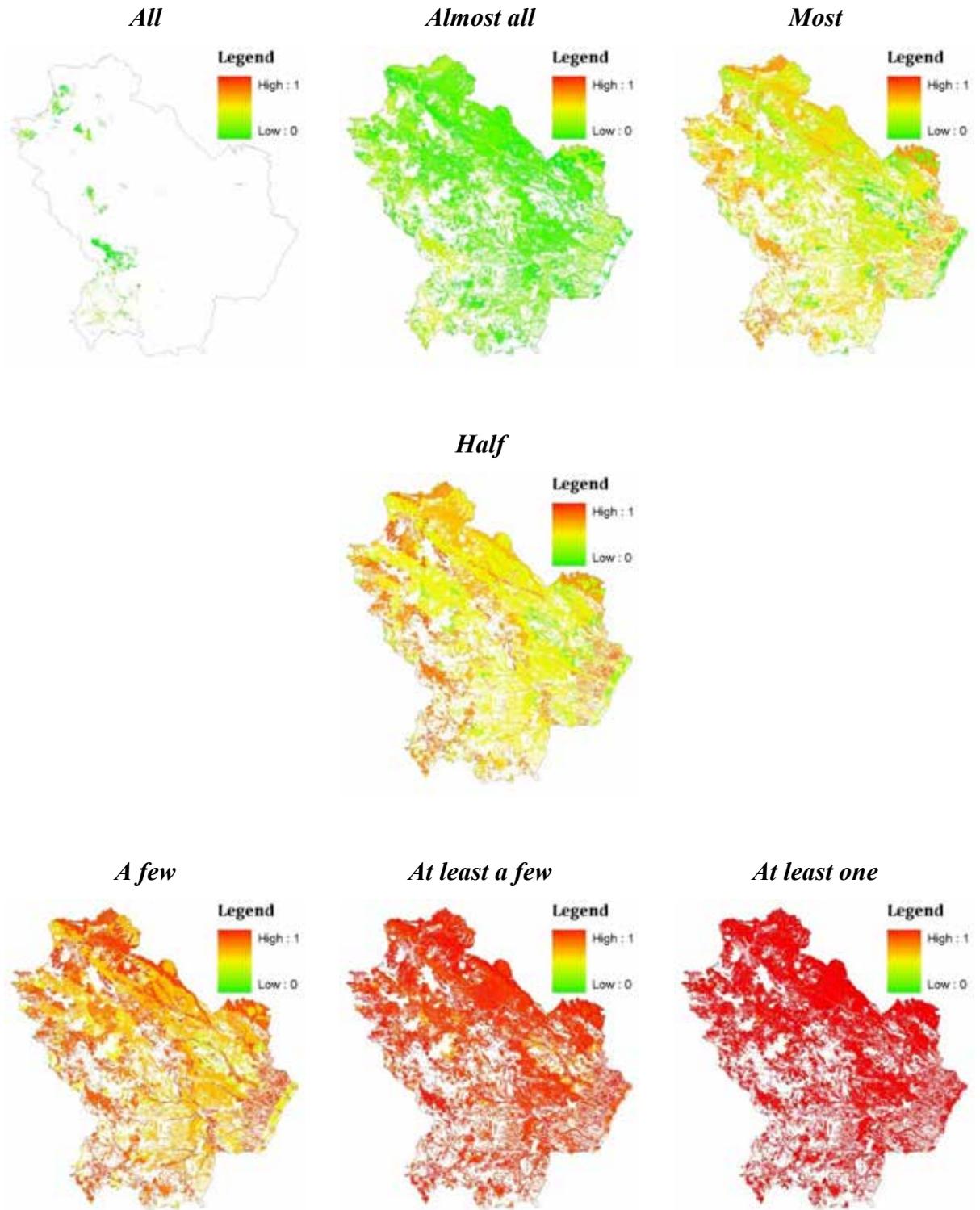
Il passo successivo ha riguardato il calcolo dei pesi ordine (Eq.4) sulla base dei pesi criterio e del valore  $\alpha$  rappresentativo per ogni quantificatore linguistico Q (vedi Tabella 4-1), ottenendo così un set di pesi ordine (vedi allegato).

Implementando il modello e inserendo in esso i vincoli presi in considerazione, è stato possibile ottenere sette mappe di idoneità per ogni singola specie afferenti a diversi operatori OWA, compresi gli operatori AND, OR e la convenzionale WLC.

Le Figure 4-1 mostrano un esempio delle sette mappe alternative di idoneità d'uso del suolo per lo sviluppo delle specie legnose prese in esame. Ogni mappa è associata ad un quantificatore linguistico, ad un parametro  $\alpha$ , e a diverse misure di tradeoff e ORness. La figura associata al quantificatore linguistico fuzzy “All” (operatore MIN) rappresenta lo scenario peggiore di idoneità nel quale sono assegnati i valori più bassi ad ogni pixel. Riducendo il valore del parametro  $\alpha$  da  $\alpha \rightarrow \infty$  a  $\alpha=1$  aumenta il grado di ORness da 0 a 0.5 e di tradeoff da 0 a 1. Ciò implica un aumento dei valori di idoneità per ogni pixel (scenario sempre più ottimistico). La mappa di idoneità associata al quantificatore linguistico “Half” ( $\alpha=1$ ) rappresenta la strategia corrispondente alla convenzionale WLC. Tale strategia è caratterizzata da un ORness=0.5 e un pieno tradeoff. Riducendo il valore di  $\alpha$  da 1 a 0 si assiste ad un aumento del grado di ORness e ad una riduzione del grado di tradeoff; la figura associata al quantificatore linguistico fuzzy “At least one” (operatore MAX) rappresenta lo scenario più ottimistico per l'idoneità d'uso del suolo a colture energetiche. Tale scenario corrisponde all'operatore OR con un grado di ORness pari a 1 e un grado di tradeoff pari a 0.

Considerando dunque i quantificatori linguistici e i diversi gradi di Orness e tradeoff il decisore potrà individuare la migliore soluzione in relazione alle esigenze decisionali specificate.

Figure 4-1 Mappe di idoneità d'uso del suolo per la messa a dimora di *Populus x* euroamericana.



#### 4.3.2.1 Scelta delle Mappa d'idoneità

Data la mancanza di campi sperimentali di colture energetiche in regione, risulta difficile testare il modello e vagliare quale delle mappe ottenute meglio si presta a rappresentare la realtà, come invece è stato fatto per un'analisi d'idoneità d'uso del suolo per SRF a livello nazionale (Salvati et al., 2007).

La scelta dunque della mappa più rappresentativa di ogni singola specie si è basata considerando le esigenze ecologiche e colturali, il grado di ORness e la distribuzione dei valori di idoneità corrispondenti, nonché le esigenze del pianificatore.

La riuscita di un impianto SRF deriva dal fatto che la specie trovi le condizioni climatiche ed edafiche migliori (tipo di terreno e siccità estiva in particolare) e che l'impianto possa essere gestito al meglio considerando dunque anche le esigenze colturali (meccanizzazione, irrigazioni). Risulta evidente dunque che più criteri vengono considerati nell'analisi e più attendibile sarà il risultato. I quantificatori linguistici che meglio esprimono questo concetto e che hanno contribuito al calcolo dei pesi ordine sono: "tutti criteri devono essere soddisfatti" (quantificatore "*All*"), "quasi tutti" ("*Almost all*") e "la maggior parte" ("*Most*"). A tali quantificatori corrisponde inoltre un basso grado di ORness (basso rischio).

Se ciò è vero nella gestione classica delle SRF, dove non sono previste irrigazioni se non di soccorso, nel caso specifico, contribuendo alla riuscita della coltura irrigando con acque reflue trattate in maniera semplificata, non solo ricche in sostanza organica ed elementi nutritivi ma disponibili l'intero anno, potremmo permetterci un maggior rischio connesso all'analisi, scegliendo la mappa che per prima si discosta dalla classica WLC e connessa al quantificatore "*A few*". Per poter avere comunque una maggiore idea dei risultati ottenuti è stata fatta un'analisi per valutare la distribuzione dei valori di idoneità delle diverse mappe.

Come è possibile notare osservando i diversi Box-plot (Figure 4-2), la scelta finale della mappa connessa al quantificatore "*A few*" è giustificata anche dal fatto che essa presenta un ampio range di valori di idoneità con una distribuzione piuttosto uniforme, anche se verso una analisi più ottimistica rispetto ai quantificatori "*All, Almost all, Most*".

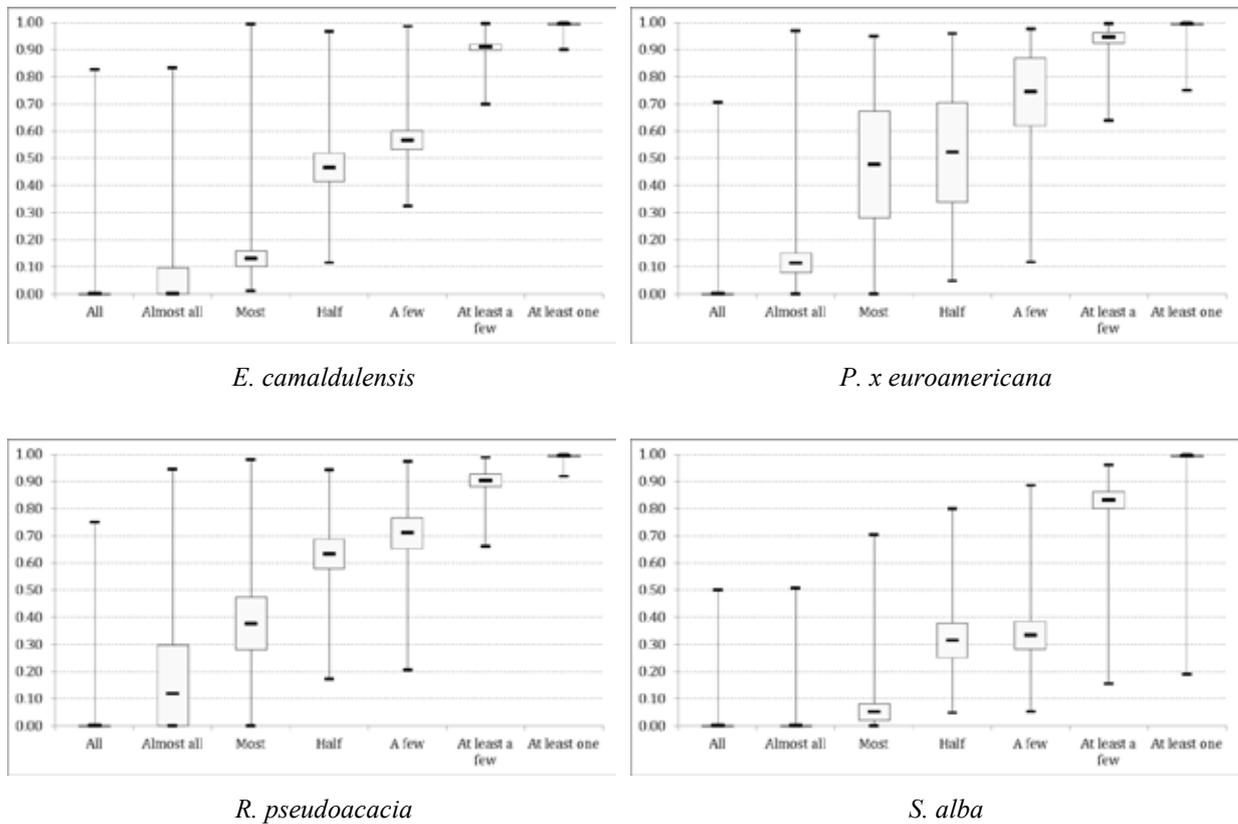
Onde avere una più chiara lettura dei risultati, ottenuti attraverso il modello OWA, sono stati discretizzati i valori attraverso l'ausilio di un'altra tipologia di quantificatori linguistici (Chen et al, 1992). Essi rappresentano un valido e consolidato strumento per la conversione di valori cardinali in attributi qualitativi. Tramite il loro impiego, infatti, risulta possibile fornire

una rappresentazione matematica di un termine linguistico. È stato possibile così considerare *non idonei* i territori con valori nell'intervallo 0-0,77 e *idonei* quelli nell'intervallo 0,77-1.

Attraverso una riclassificazione delle mappe è stato possibile così individuare i soli terreni idonei con una superficie pari 35.532 ha, 258.512 ha, 148.770 ha e 394 ha rispettivamente per eucalipto, pioppo, robinia e salice a fronte di 562.932 ha disponibili per SRF in regione.

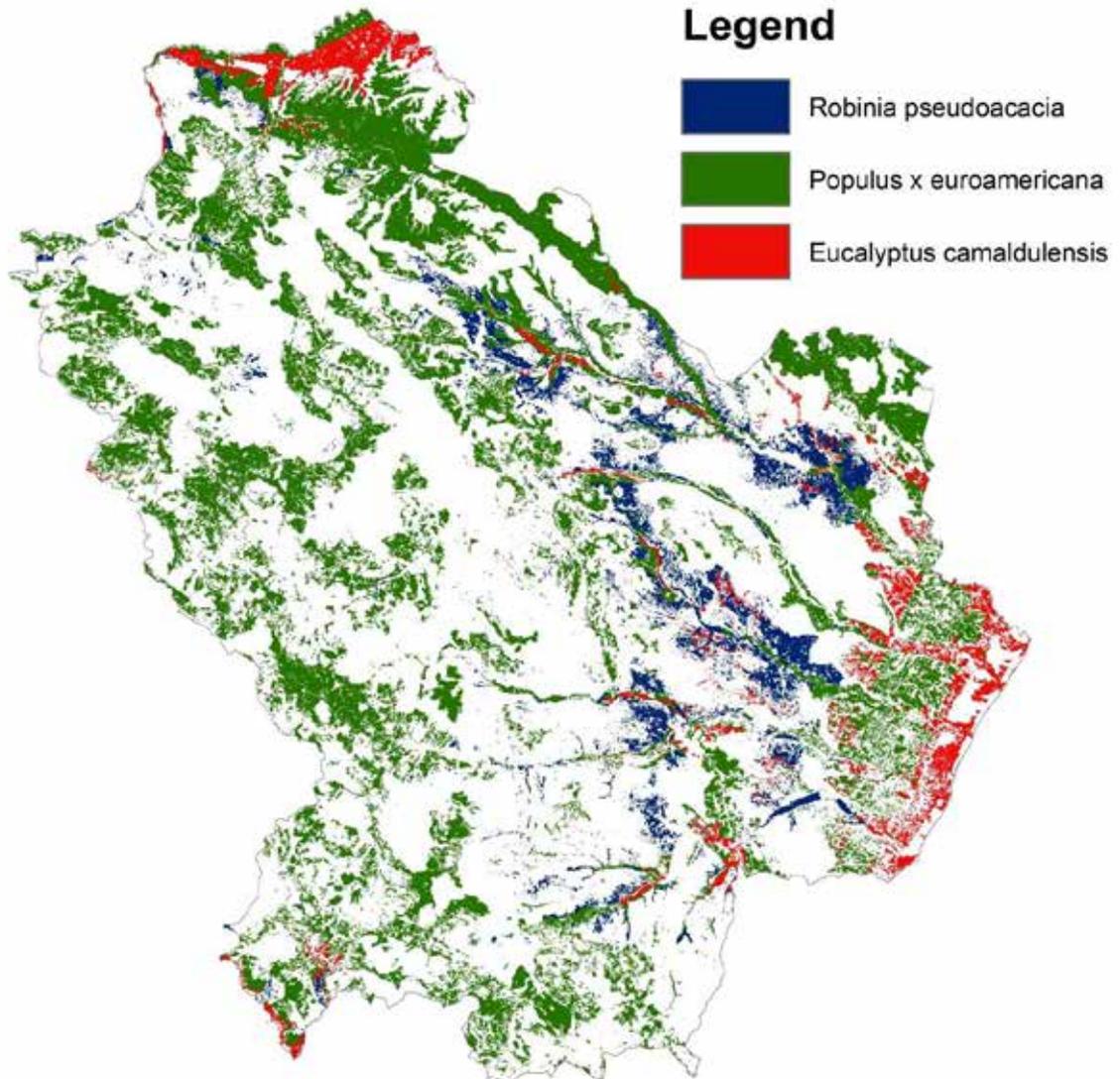
Successivamente è stata fatta una sovrapposizione di mappe per individuare tra le specie, quelle più adatte in regione per le SRF dando, in quei territori che potevano essere idonei per più specie, priorità all'eucalipto per la maggiore rusticità in ambiente mediterraneo e per la maggiore resistenza a patologie rispetto al pioppo, e poi con priorità decrescente al pioppo, salice e robinia.

**Figure 4-2 Box-plot: distribuzione dei valori di idoneità nei diversi scenari per la quattro specie considerate.**



I risultati hanno messo in evidenza una superficie invariata per l'eucalipto (35.532 ha), una perdita di superficie per il pioppo e la robinia che si attesta rispettivamente sui 236.721 ha e 47.681 ha (avendo priorità inferiori in quei territori idonei per più specie), e una perdita di superficie per il salice a discapito di eucalipto e pioppo (Figura 4-4).

Figura 4-4 Livello di idoneità del territorio provinciale di Potenza per colture SRF



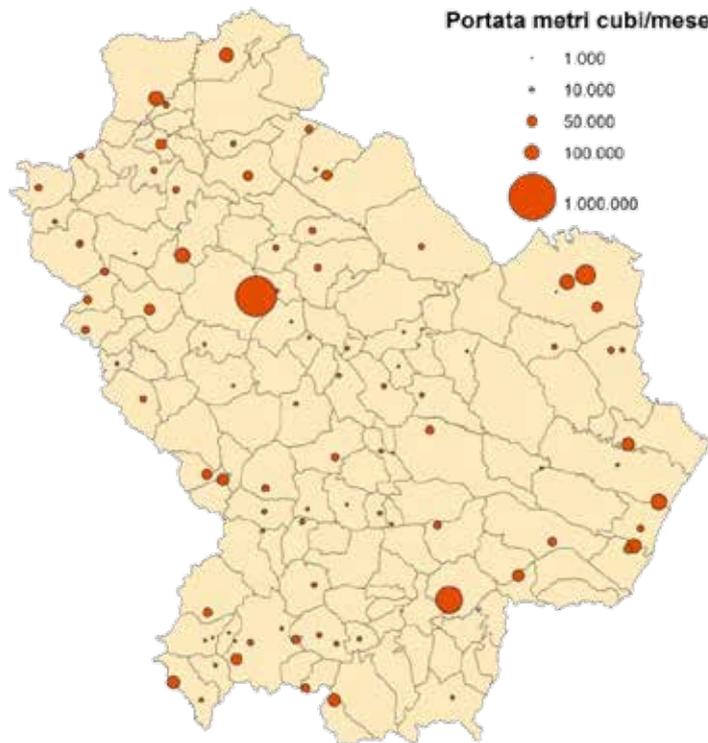
### 4.3.3 Individuazione dei terreni fertirrigabili

L'individuazione dei potenziali terreni fertirrigabili con acque reflue è stata condotta interamente in ambiente GIS, richiedendo come prima analisi l'individuazione spaziale dei depuratori presenti in regione.

Partendo da un database contenente le informazioni circa le coordinate spaziali, il funzionamento e le portate di tutti i depuratori presenti, è stato possibile realizzare una mappa al fine di conoscere l'esatta ubicazione di essi, necessaria per le elaborazioni successive. Dei 241 depuratori censiti dall'ARPAB Basilicata risultano funzionanti solo 173, di cui solo 165 posseggono le informazioni circa le portate, quest'ultime necessarie per dimensionare gli impianti e calcolare la superficie di SRF che ogni depuratore può servire.

I dati relativi alle portate espressi in  $\text{m}^3/\text{s}$  o  $\text{m}^3/\text{gg}$  sono stati convertiti in  $\text{m}^3/\text{mese}$  in modo da determinare gli ettari di SRF irrigabili mensilmente prendendo in considerazione una soglia mensile di fertirrigazione di  $350 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Dal dimensionamento degli impianti sono stati eliminati i depuratori troppo piccoli (con portate  $<3.500 \text{ m}^3/\text{mese}$ ), individuando solo 94 di essi potenzialmente utilizzabili per fertirrigare SRF (Figura 4-5).

Figura 4-5 Distribuzione spaziale dei depuratori e relative portate



Avendo a disposizione la mappa d' idoneità delle SRF e la mappa con i depuratori utilizzabili con la relativa superficie irrigabile, si è passati ad individuare i terreni potenzialmente irrigabili; l'analisi per l'individuazione dei terreni ha preso in considerazione una serie di aspetti:

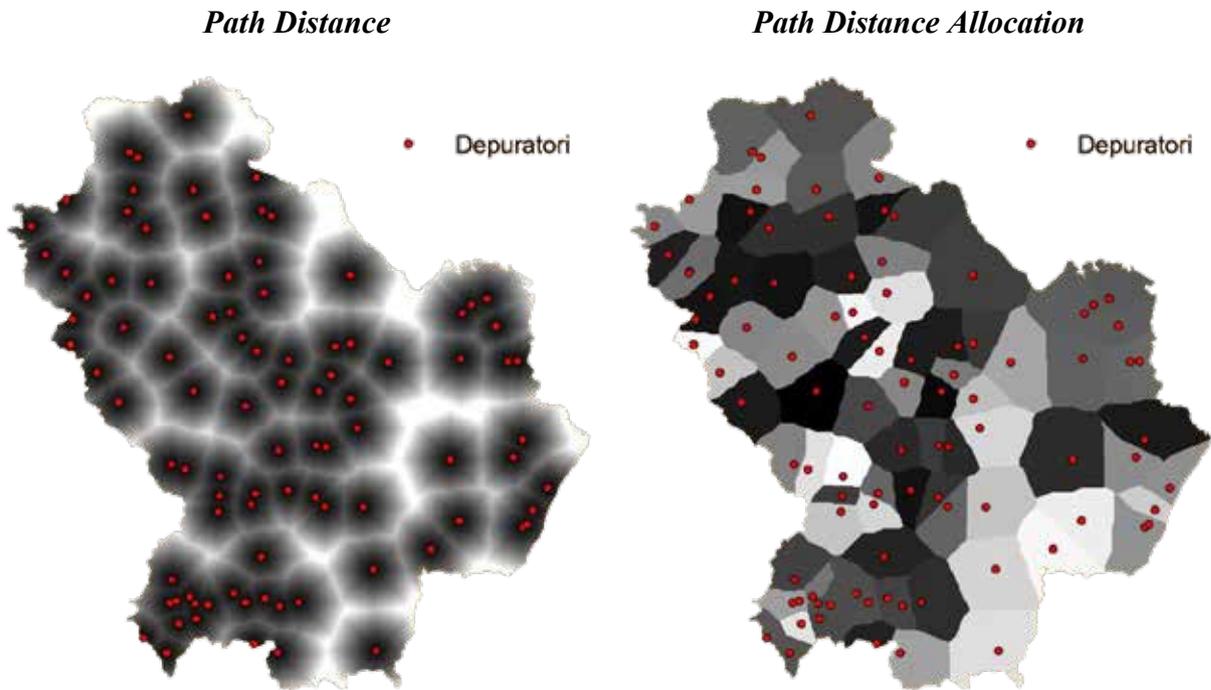
1. Le superfici da fertirrigare devono essere il più vicino possibile al depuratore (per ridurre i costi della condotta di adduzione);
2. I terreni da fertirrigare devono trovarsi a valle del depuratore (per ridurre i costi di pompaggio dell'acqua a monte).

Avvalendoci di operazioni logiche di "analisi spaziale" (Spatial Analyst) in ambiente GIS, partendo dalla mappa dei depuratori, è stato possibile realizzare:

- a) una mappa relativa alle distanze da ogni depuratore,
- b) una mappa relativa alle aree di influenza di ciascun depuratore in relazione alle distanze stesse (poiché le distanze derivano da un'esplosione concentrica, il cui centro è

il depuratore stesso, i confini di ciascun area derivano dall'incontro delle distanze massime di ciascuna esplosione),  
rispettivamente mediante funzioni di *Path Distance* e *Path Distance Allocation* (Figure 4-3).  
Ad ogni area di influenza è stato assegnato il numero identificativo del depuratore presente.

Figure 4-3 Operazioni logiche di Spatial Analyst:



Conoscendo le aree di influenza di ciascuna depuratore e le relative distanze, tali dati sono stati implementati con la mappa dei depuratori, la mappa d'idoneità delle SRF e con il DEM (Digital Elevation Model) nella funzione *Sample*, ottenendo così un foglio di calcolo contenente:

- numero identificativo del depuratore e relativa altitudine;
- e per ciascun ettaro di SRF idoneo:
  - numero identificativo area influenza del depuratore;
  - distanza dal depuratore di pertinenza;
  - altitudine.

Con le informazioni sopra elencate, è stato possibile individuare gli ettari di SRF afferenti a ciascun depuratore.

Dei 319.934 ha di territorio regionale idonei per l'impianto di SRF, solo 6.664 ha risultano potenzialmente fertirrigabili di cui 1.851 ha di Eucalipto, 3.269 ha di Pioppo e 1.544 ha di Robinia.

Figura 4-6 Terreni di SRF potenzialmente fertirrigabili dai depuratori presenti in regione



Se in una prima fase l'attribuzione delle distanze dai depuratori di ogni ettaro di SRF è servito per individuare quelli più vicini, nella fase successiva è stato necessario individuare delle macroaree di ettari contigui per calcolare la distanza di queste ultime dagli impianti di depurazione. Una condotta di adduzione infatti può irrigare superfici molto ampie, e poiché il loro costo dipende dalla distanza, questa fase è stata utile per la successiva analisi economica; ogni macroarea sarà servita da una condotta la cui lunghezza dipenderà dalla distanza che intercorre tra il depuratore più vicino e la macroarea stessa.

Per un totale di 94 depuratori sono state individuate così 233 macroaree potenzialmente fertirrigabili (a cui è stato attribuito un numero identificativo) con una superficie totale di 6.664 ettari.

La mappa così ottenuta è stata inserita nella funzione *Sample* con le mappe necessarie (Tabella 4-4) per ottenere un foglio di calcolo contenente per ciascun ettaro di SRF:

- numero identificativo della particella e relative coordinate;
- numero identificativo dell'area di influenza del depuratore;
- numero identificativo della macroarea di appartenenza;

- distanza dal depuratore.

Avendo a disposizione una database così articolato è stato possibile effettuare un'analisi economica di notevole dettaglio.

**Tabella 4-4 Dati di Input/Output nella funzione di Sample**

<i>Funzione</i>	Input	Output
Sample	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ mappa area d'influenza di ciascun depuratore;</li><li>➤ mappa macroaree;</li><li>➤ mappa distanza dai depuratori;</li><li>➤ mappa degli ettari di SRF potenzialmente fertirrigabili.</li></ul>	Foglio di calcolo