

CONNESSIONI TRA ACQUE REFLUE E BIOENERGIE: UN'ANALISI EMPIRICA

Mario Cozzi¹, Mauro Viccaro¹, Francesco Di Napoli¹, Gennaro Ventura¹, Severino Romano¹

¹Università degli Studi della Basilicata, Potenza; mario.cozzi@unibas.it

Le colture energetiche irrigate con le risorse idriche non convenzionali su larga scala potrebbero diminuire gli impatti negativi derivanti dall'uso dei combustibili fossili, e allo stesso tempo salvaguardare le risorse idriche potabili e ridurre l'inquinamento nelle acque superficiali, in particolare in ambienti caratterizzati da carenza idrica come il bacino del Mediterraneo. *Short Rotation Forestry* (SRF) con pioppi e salici irrigati con acque reflue, noti come “*vegetation filter system*”, sono una valida alternativa ai sistemi forestali e di depurazione delle acque convenzionali per il raggiungimento degli obiettivi ambientali ed energetici fissati dall'Unione europea e per aumentare il reddito degli agricoltori. Problemi di pianificazione energetica sono problemi complessi con più decisori e criteri. Data la natura territoriale del problema, la ricerca propone un sistema spaziale di supporto alle decisioni in GIS (*Geographic Information System*) per valutare la fattibilità agronomica ed economica dei *vegetation filter system* nella regione Basilicata. I risultati mostrano che le distanze tra le aree di SRF e i depuratori sono il fattore chiave. Da 163 impianti di depurazione attivi, solo 25 sono economicamente convenienti e in grado di irrigare 864 ettari di SRF. Questo dimostra che c'è un grande potenziale nella regione per lo sviluppo delle bioenergie, con vantaggi economici, mettendo in evidenza l'ampia disponibilità di siti con benefici netti fino a 46,000 €/ha e periodo di ammortamento tra i 3 e 10 anni.

Parole chiave: bioenergia, short-rotation forestry, acque reflue, analisi geografica multicriteriale, analisi degli investimenti.

Keywords: bioenergy, short-rotation forestry, wastewater, geographical multicriteria analysis, cost-effective evaluation.

<http://dx.doi.org/10.4129/2cis-mc-con>

1. Introduzione

La realizzazione di impianti di *short rotation forestry* (SRF) multifunzionali, quali i “*vegetation filter system*”, è diventata una valida alternativa alle SRF convenzionali. Quanto affermato è determinato dai notevoli benefici economici e ambientali che ne derivano (Rosenqvist e Dawson, 2005b; Berndes *et al.*, 2008; Ericsson *et al.*, 2009; Dimitriou e Rosenqvist, 2011). Tali impianti, irrigati con acque reflue e realizzati con specie quali salici (*Salix spp.*) e pioppi (*Populus spp.*), sono destinati alla produzione di biomasse energetiche e alla fitodepurazione (Guidi *et al.*, 2008), in quanto le acque reflue forniscono alle piante acqua e sostanze nutritive (specialmente azoto e fosforo), favorendone la crescita e l'aumento della traspirazione, purificano le acque attraverso l'assorbimento degli elementi presenti in esse (BIOPROS, 2008). Nonostante però i numerosi vantaggi economici e ambientali mostrati dalle sperimentazioni effettuate in diversi paesi del centro-nord Europa (Rosenqvist e Dawson, 2005a, 2005b; Börjesson e Berndes, 2006; BIOPROS, 2008; Dimitriou e Aronsson, 2011; Dimitriou e Rosenqvist, 2011; Holm e Heinsoo, 2013) e nonostante la legislazione italiana consenta l'uso di acque reflue in agricoltura, le applicazioni in Italia di SRF multifunzionali sono esigue (BIOPROS, 2008; Guidi *et al.*, 2008). Il presente lavoro ha quale obiettivo la realizzazione e l'applicazione di un modello di analisi

spaziale in ambiente GIS (*Geographic Information System*) volto ad individuare aree potenzialmente idonee alla realizzazione di *vegetation filter systems*. Ponendo come base di partenza informativa gli impianti di trattamento delle acque reflue (WWTP, *wastewater treatment plant*) presenti, risulta praticabile l'impiego di un modello di analisi territoriale al fine di valutare la fattibilità di eventuali investimenti nel settore bioenergetico (Cozzi *et al.*, 2013). Il modello realizzato è stato applicato alla regione Basilicata, caratterizzata da un clima prettamente mediterraneo e interessato da fenomeni di carenze idriche, specialmente nel periodo estivo, che giustificano l'adozione di acque non convenzionali per l'irrigazione in agricoltura, al fine di non intaccare le disponibilità d'acqua potabile ad uso urbano. L'intero modello è stato costruito tenendo presente non solo della sostenibilità ambientale (corretto uso delle acque reflue, esclusione di aree vulnerabili a nitrati) ma anche della convenienza economica derivante dalla realizzazione di SRF fertirrigate con acque reflue urbane, elementi che sono alla base della reale potenzialità per la diffusione di tali sistemi.

2. Materiali e metodi

2.1 Modello di analisi spaziale

Un GIS può essere definito come l'insieme complesso di risorse hardware, software, umane ed intellettive per acquisire, processare, analizzare, immagazzinare e

restituire in forma grafica ed alfanumerica dati riferiti ad un territorio (ENEA, 2006). I *software* GIS dispongono di una serie di strumenti di analisi spaziale grazie a quali è possibile creare, interrogare, mappare e analizzare i dati *raster*, eseguire analisi integrate *raster*/vettoriale, ricavare nuove informazioni dai dati esistenti, richiedere informazioni su più livelli di dati e integrare pienamente i dati *raster* con dati vettoriali tradizionali (ESRI, 2001). Un modello GIS restituisce generalmente un *output* derivante da una serie di mappe di base e può comprendere interi alberi gerarchici di dati e funzioni. Il modello adottato nel presente lavoro, schematizzato in Figura 1, è stato implementato utilizzando *software* GIS provvisti di strumenti di analisi spaziale.

La banca dati geografica di input è costituita da una serie di mappe caratterizzanti il territorio e contenenti le informazioni necessari all'analisi (Fig. 2). Il dato relativo ai WWTP è completo della tabella attributi contenente informazioni circa il numero identificativo, la portata (m³) mensile e stagionale, la quota. Ove opportuno, il dato vettoriale è stato convertito in immagini *raster* per l'esecuzione delle funzioni di analisi spaziale. Per quanto riguarda la *land suitability map* è stata ottenuta utilizzando un metodo di analisi multicriteriale rivolto all'individuazione puntuale delle superfici idonee alla coltivazione di SRF con pioppi e salici (paragrafo 2.1.1). L'*irrigation water requirement* (IWR) e la produttività delle colture sono state calcolate per ciascuna coltura esaminata (paragrafo 2.1.2).

Dalla prima dipende la capacità irrigua dei WWTP, intesa come la superficie di terreno che può essere irrigata dalla portata di ciascun WWTP ed è espressa dal rapporto tra la portata (m³) e l'IWR (m³/ha) stagionali, mentre il calcolo della produttività si è reso necessario per quantificare il beneficio economico derivante dalla vendita del cippato. Il *layer* del beneficio fondiario riporta i valori ad ettaro di seminativi, prati e pascoli per le differenti regioni agrarie. L'area di studio include tutto il territorio della Regione Basilicata, rappresentata da strati informativi georeferenziati in formato *raster* con risoluzione spaziale di 100x100 m, utilizzando come sistema geografico di riferimento *Gauss Boaga Est*, su datum Monte Mario - Roma 1940. La scelta di tale risoluzione spaziale è dipesa da un aspetto puramente pratico: l'area di ciascun pixel, pari ad un ettaro, risulta essere l'unità di riferimento ottimale per l'analisi in questione. Le funzioni di analisi spaziale adottate nel presente lavoro, comuni alla maggior parte dei *software* GIS disponibili in commercio, sono riassunte nella Tabella 1. Come è possibile notare dalla Figura 1, la realizzazione del modello ha seguito un percorso logico, alla base del quale vi è il *raster* relativo alle aree d'influenza dei WWTP, individuati a partire dalla mappa di ubicazione degli WWTP. Attraverso la funzione *distance allocation*, ad ogni WWTP è attribuito il numero identificativo del depuratore di pertinenza, tale che tutte le informazioni ricavate all'interno di ciascun'area siano facilmente collegabili ad esso.

2.1.1 Land suitability

L'analisi di idoneità d'uso del suolo per la realizzazione di SRF con salici e pioppi è stata condotta mediante l'uso congiunto di tecniche MCE (*Multi-Criteria Evaluation*) con i GIS. L'integrazione di tecniche MCE-GIS può essere utile per risolvere situazioni conflittuali in contesti spaziali (Janssen e Rietved, 1990; Malczewski, 2004, 2006), anche come approccio efficace nell'analisi di idoneità d'uso del suolo (Malczewski 2004; Romano e Cozzi 2006; Romano *et al.*, 2013a; Cozzi *et al.*, 2014). 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 ottenuta a partire da dati geografici e dalle preferenze decisionali, manipolati in base a regole decisionali specificate (Malczewski, 2004).

Nell'ambito delle tecniche MCE, il metodo adottato in questo lavoro è stato quello della *Ordered Weighted Averaging* (OWA) con l'uso dei quantificatori linguistici relativi (così come proposto in Romano *et al.*, 2013a). La scelta di tale metodo è giustificata dalla maggiore flessibilità rispetto ad altri metodi MCE: un quantificatore linguistico è in grado di rappresentare al meglio le informazioni qualitative del decisore rispetto alla sua percezione del rapporto tra i diversi criteri di valutazione, in particolar modo quando nell'analisi sono coinvolti un gran numero di mappe criterio.

Dato un insieme di mappe criterio standardizzate mediante funzioni *fuzzy* [0,1] (Zadeh, 1965), il metodo richiede che siano calcolati due serie di pesi: i pesi criterio e i pesi ordine. Mentre i primi sono calcolati mediante metodo AHP (*Analytical Hierarchy Process*) (Saaty, 1980), i pesi ordine sono definiti dall'equazione:

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

dove u_j è il peso criterio riordinato in base al valore della mappa criterio (j), per $j=1,2, \dots, n$, e α è il parametro legato al quantificatore linguistico RIM (*Regular Increasing Monotone*) (Yager, 1996; Malczewski, 2006). Le mappe criterio, le funzioni *fuzzy* e il quantificatore linguistico ("A few", $\alpha=0.5$) utilizzati nell'analisi sono quelli proposti da Romano *et al.* (2013a). Le mappe ordinate sulla base del loro valore e il valore dei pesi calcolati sono riportati in Tabella 2. È da sottolineare che sono state escluse dall'analisi 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.

2.1.2 Irrigation water requirement e biomass productivity

Al fine di stimare la superficie di terreno che può essere irrigata con le portate di ciascun WWTP, è stata effettuata un'analisi approfondita sull'IWR di ciascuna coltura considerata.

L'irrigation water requirement (IWR) può essere definita come la quantità di acqua che deve essere somministrata in aggiunta alle precipitazioni per soddisfare i fabbisogni idrici delle colture, ed è data dalla differenza tra l'evapotraspirazione colturale (ET_c) e la quantità di precipitazioni effettivamente utilizzate dalle piante (Pe) (FAO, 1986):

$$IWR = ET_c - Pe \quad (2)$$

dove $ET_c = ET_0 \times K_c$ con ET_0 evapotraspirazione di riferimento e K_c coefficienti colturali (FAO, 1998); $Pe = fc(1.253 \times P^{0.824} - 2.935) \times 10^{0.001 ET_c}$ con fc fattore correttivo dipendente dalla riserva utile del terreno (nel presente lavoro è assunto pari a 1, condizione pedologica standard); P , precipitazione totale mensile (USDA, 1993). Nel caso dei *vegetation filter*, l' ET_c rappresenta anche la quantità massima di acque reflue che può essere somministrata alla coltura senza rischi d'inquinamento ambientale derivante da fenomeni di lisciviazione (Pistocchi *et al.*, 2009). Nel presente studio l' ET_c e le Pe sono stati calcolati a partire da immagini raster rappresentati ET_0 e P , mentre i valori di K_c delle colture considerate derivano da un lavoro condotto sui *vegetation filter* in ambiente mediterraneo (Guidi *et al.*, 2008). In questo modo è stato possibile calcolare l'IRW mensile e stagionale per entrambe le stagioni di crescita (ciclo biennale delle colture), convertite successivamente in metri cubi.

La produttività è stata calcolata partendo dal concetto di *water-use efficiency of productivity* (WUE) (Fisher *et al.*, 2011). La WUE è ottenuta dividendo la biomassa prodotta, espressa come sostanza organica secca, per l'acqua persa per traspirazione o evapotraspirazione (Cienciala e Lindroth, 1995; Linderson *et al.*, 2007; Forrester *et al.*, 2010; Fisher *et al.*, 2011). Viceversa, moltiplicando la WUE (espressa in grammi di biomassa secca per chilogrammo di acqua evapotraspirata) per l' ET_c stagionale è possibile conoscere la produzione potenziale di biomassa secca annua. Al fine di mantenere una certa coerenza nelle stime, il valore della WUE è stato ricavato dal lavoro di Guidi *et al.* (2008), ed è pari a 2.14 e 2.4 g di biomassa secca per kg di acqua evapotraspirata rispettivamente per salici e pioppi. Considerando la biomassa prodotta in due stagioni di crescita è stato ottenuto il *raster* delle produttività biennali espresso in tonnellate di sostanza secca, poi convertito in tonnellate di sostanza fresca, considerando che la vendita del cippato avvenga a bordo campo. Le produttività stimate sono risultate molto alte, mediamente intorno a 73 tDM/ha nel biennio, quasi il doppio delle produzioni ottenute da Guidi *et al.* (2008). Ciò è dovuto ai tassi evapotraspirativi più alti di quelli da loro registrati negli ambienti ed alle condizioni da loro studiati.

2.2 Analisi economica

La possibilità di destinare terreni agricoli per la realizzazione dei *vegetation filter systems* dipende dalla convenienza economica di tali sistemi. A tal fine è stato effettuato il calcolo di alcuni indicatori economici, che

costituiscono un punto di riferimento per gli agricoltori nelle scelte alternative di investimento. Nello specifico l'analisi ha riguardato il calcolo del *Net Present Value* (NPV) e del *Payback Period* (PBP) delle superfici investite a SRF fertirrigate con acque reflue:

$$NPV = \sum_{k=0}^n \frac{FC_k}{(1+r)^k} \quad (4)$$

FC_k : flusso all'anno k dato dai benefici all'anno k meno i costi all'anno k ;
 k : durata dell'investimento;
 r : saggio di sconto.

$$PBP = \text{Initial Investment} / \text{Cash Inflow per Period} \quad (5)$$

La procedura logica seguita per la valutazione è consistita in una ricerca delle voci di costo (spese d'investimento e di gestione) e di beneficio (ricavi generati dall'investimento) prodotti dalle superfici investite a SRF e dalla realizzazione dell'impianto di fertirrigazione. La durata del ciclo produttivo viene considerata di 12 anni con ceduzioni biennali e una densità d'impianto di 10,000 p ha⁻¹. I costi d'impianto, gestione e ripristino del fondo sono calcolati sulla base dei prezzi di mercato del materiale tecnico e delle tariffe orarie delle macchine e della manodopera e sulle esperienze sperimentali effettuate (Spinelli *et al.*, 2006; ENAMA, 2008; F.I.M.A.V., 2012). Si considera inoltre un saggio di sconto del 4.5%. Tale saggio è stato ottenuto sulla base dei rendimenti dei Buoni Poliennali del Tesoro (BTP) decennali, depurati dall'effetto inflazionistico, riscontrati in Italia (Banca d'Italia, 2013). Per quanto riguarda il beneficio fondiario, il suo valore è contenuto del database geografico.

I ricavi connessi all'investimento derivano invece dalla vendita del cippato, ottenuti moltiplicando le produzioni biennali per il prezzo di compravendita allo stato fresco (WC of 50%), che a bordo campo ammonta a 55 €/t. Quest'ultimo valore è stato desunto da rilevazioni presso gli impianti già attivi in regione Basilicata, da cui risulta che i prezzi di acquisto della biomassa all'imposto si aggirano tra €50-60 a tonnellata.

Tra le voci di ricavo non sono stati, tuttavia, considerati i possibili proventi generati sottoforma di Certificati Bianchi che porterebbero ad ulteriori vantaggi economici agli investimenti (Romano *et al.*, 2013b; Cozzi *et al.*, 2014).

I costi relativi all'impianto di fertirrigazione riguardano la realizzazione della condotta di adduzione dell'acqua dal WWTP alle superfici SRF e della vasca di raccolta, nonché l'applicazione di pompe e filtri per la distribuzione e il pretrattamento delle acque (AA.VV., 2012). Poiché il trattamento alternativo delle acque reflue con i *vegetation filter system* porta ad un vantaggio economico per le società responsabili per il trattamento delle acque, un ulteriore incremento della redditività dei *vegetation filter* per gli agricoltori potrebbe derivare dalla compensazione economica per accettare tali acque nei propri terreni.

Uno studio condotto in Irlanda ha mostrato che tale compensazione può ammontare a 788-2004 GBP/ha l'anno (Rosenqvist e Dawson, 2005b).

L'ammontare esatto del compenso è difficile da definire o predire, in quanto dipende da accordi tra gli operatori del servizio di trattamento delle acque e gli agricoltori che ricevono i reflui, dall'ammontare dell'acqua e dai costi di altri metodi di trattamento. Nel nostro caso di studio, secondo alcune indagini effettuate in regione l'ammontare del compenso è considerato pari a 0.19 €/m³ di acqua utilizzata nella fertirrigazione.

3. Risultati

Il modello di analisi multicriteriale ha restituito le mappe d'idoneità di SRF per salici e pioppi (Fig. 3). Dalla distribuzione dei valori d'idoneità si evince che il pioppo risulta essere più idoneo alla realizzazione di SRF in regione (Romano *et al.*, 2013a): la riclassificazione delle mappe mediante metodo Chen (Chen e Hwang, 1992) ha portato ad individuare i soli terreni idonei con una superficie pari 258,512 ha e 394 ha rispettivamente per pioppo e salice. Data la ridotta superficie per il salice, si è deciso di considerare nel modello di analisi spaziale solo la mappa d'idoneità del pioppo.

Dal calcolo del PBP per un impianto ipotetico di SRF posto una distanza dal WWTP di 100 m (situazione ottimale) sono stati eliminati tutti quei WWTP con una capacità irrigua inferiore a 10 ettari, in quanto è risultata essere la superficie che alla distanza minima porta ad un ritorno dell'investimento inferiore alla metà del ciclo di vita dell'impianto (< a 6 anni). Ciò ha portato ad individuare solo 37 depuratori potenzialmente utili per la fertirrigazione. Risulta evidente che all'aumentare delle distanze sono necessarie superfici sempre maggiori per avere un ritorno economico nel breve periodo. La distanza infatti risulta essere il fattore che più fortemente condiziona la fattibilità di tali sistemi, dato l'elevato costo di realizzazione della condotta di adduzione dell'acqua (200 €/m).

Realizzato il raster delle aree d'influenza e delle distanze sulla base dei restanti WWTP, sono stati individuati i terreni di SRF a valle di essi per una superficie complessiva di 34,282 ettari, ottenendo le aree SRF contigue in ciascun'area d'influenza. In molti casi, sono state individuate per ciascun depuratore più aree SRF a cui destinare le acque per la fertirrigazione, talvolta di superficie maggiore alla reale capacità irrigua del depuratore stesso.

Sulla base del risultato finale del modello di analisi spaziale, il quale per ciascuna terreno di SRF ha fornito informazioni circa il depuratore di appartenenza, la distanza da esso e i valori medi di produttività e beneficio fondiario, sono stati calcolati gli indicatori di convenienza economica. In caso di superfici maggiori alla capacità irrigua dei WWTP, l'analisi è stata condotta solo sugli ettari che possono essere realmente fertirrigati (e.g. su una superficie di 150 ettari di SRF l'analisi è condotta solo sui 70 ettari di capacità irrigua del WWTP).

L'analisi economica ha portato così a individuare 85 aree di SRF con NPV positivo potenzialmente fertirrigabili con le acque reflue di 25 depuratori. Risulta evidente che l'acqua fornita da ciascun depuratore può essere impiegata solo per un'area di SRF, per la quale realizzare l'impianto di fertirrigazione (condotta di adduzione, vasca di raccolta, pompe, filtri). La scelta delle aree su cui effettuare gli investimenti dipende sia dal valore del NPV (che può arrivare anche a 46,000 €/ha) ma anche dall'esigenze di chi effettua l'investimento e sulla sua propensione ad accettare o meno un tempo di ritorno dell'investimento più lungo pur di avere un beneficio economico più alto.

Sulla base di tali scelte, il modello di analisi spaziale permette di individuare in maniera speditiva le aree che possono essere soggette all'investimento, essendo queste georeferite (Fig. 4).

4. Conclusioni

L'impiego di risorse endogene si prospetta sempre più come un processo determinante nella strategia energetica dei paesi. Quanto detto trova maggiore consistenza per quelle nazioni, come l'Italia, fortemente dipendenti dell'estero per i propri fabbisogni energetici. I recenti indirizzi nella programmazione energetica nazionale nascono da una duplice volontà comunitaria, orientata da una parte ad assolvere gli impegni sottoscritti rispetto al Protocollo di Kyoto e dall'altra a garantire una maggiore sicurezza geopolitica, riducendo progressivamente la dipendenza energetica estera.

Le energie rinnovabili rappresentano lo strumento attraverso il quale è possibile, al contempo, adempiere sia alla riduzione delle immissioni nocive in atmosfera sia nell'ottenimento di vantaggi economici. La sola condizione che emerge nell'attuazione di una strategia rinnovabile è rappresentata dal fatto che lo sviluppo deve avvenire in maniera diffusa sul territorio, in quanto fonti a bassa intensità energetica.

Le produzioni energetiche su suoli agricoli (SRF) offrono indubbi vantaggi ambientali ed economici, rispettivamente per la società e per gli agricoltori e, per questo, risultano incentivati dai governi. Vi sono comunque delle limitazioni legate essenzialmente al clima (in particolare all'andamento delle precipitazioni), che influenzano in maniera sostanziale le produzioni. L'impiego di acque reflue opportunamente trattate rappresentano un valido strumento per aumentare le produzioni delle SRF, le quali allo stesso tempo garantiscono la purificazione delle acque. Nonostante le numerose sperimentazioni effettuate nei paesi del centro-nord Europa, che dimostrano gli enormi vantaggi economici e ambientali che derivano dai *vegetation filter systems*, in Italia la loro diffusione è limitata. Diventa necessario dotarsi di strumenti che facilitino e promuovano la loro realizzazione. Un modello di analisi spaziale in ambiente GIS risulta idoneo per investigare sulla fattibilità di tali sistemi.

Sulla scorta delle considerazioni fatte, il lavoro ha proposto un modello di analisi spaziale grazie al quale è stato possibile valutare la fattibilità agronomica ed economica di impianti SRF multifunzionali in ambiente

mediterraneo e, nello specifico, in Basilicata. Attraverso il modello adottato è stato possibile effettuare un'analisi d'idoneità d'uso del suolo per la realizzazione di SRF, con pioppi e salici, e, sulla base dei WWTP presenti in regione, individuare le aree che meglio si prestano ad essere fertirrigate. Partendo dalla localizzazione geografica e dal volume di acque depurate degli impianti di trattamento presenti in regione ne risulta che la distanza

tra i suoli e i WWTP è l'elemento discriminante la fattibilità. Da 163 WWTP presenti, risultano 25 i depuratori capaci di fertirrigare 864 ettari di SRF. Ciò dimostra che vi sono in regione grandi potenzialità per lo sviluppo delle bioenergie con indubbi vantaggi economici, evidenziando una ampia disponibilità di siti con NPV positivi e tempi di ritorno contenuti tra i 3 ed i 10 anni.

Tabella 1. Funzioni di analisi spaziale.
 Table 1. Spatial analyst function.

<i>Function</i>	<i>Description</i>
Distance allocation	Performs spatial allocation using either distance surfaces, calculating the distance/proximity of each pixel to the nearest of a set of target pixels or points.
Zonal statistic	Summarizes the values of a raster within the zones of another dataset (either raster or vector) and reports the results as a table or a raster.
Join	Joins the item definitions and values of two tables based on a shared item.
Field calculator	Allows performing calculations on the basis of existing attribute values or defined functions.
Map calculator	Enables solving complex spatial problems, working with raster, through the use of mathematical and logical expressions.
Group	Classifies pixels according to contiguous groups. For each cell in the output, the identity of the connected group to which that cell belongs is recorded. A unique number is assigned to each group.
Sample	Creates a table that shows the values of cells from a raster, or set of rasters, for defined locations. The locations are defined by raster cells or by a set of points.

Tabella 2. Criteri e pesi.
 Table 2. Criterion and weights.

<i>Species</i>	<i>Criterion Map (j)</i>	<i>Ordered criterion values</i>	<i>Reordered criterion weights u_j</i>	<i>Ordered weights v_j</i>
<i>Populus spp.</i>	Elevation	0.9430	0.0242	0.1556
	Soil depth	0.9340	0.1646	0.2789
	Mean temperature in the coldest month	0.8390	0.0354	0.0390
	Soil reaction	0.7820	0.1143	0.1083
	Mean annual temperature	0.7780	0.0354	0.0297
	Carbonates	0.4990	0.2381	0.1708
	Soil texture	0.4550	0.2381	0.1397
	Average annual precipitation	0.4490	0.0534	0.0285
	Slope	0.3300	0.0178	0.0093
	Average precipitation in summer months	0.0200	0.0787	0.0402
<i>Salix spp.</i>	Elevation	0.9630	0.0221	0.1487
	Soil depth	0.9340	0.0449	0.1102
	Soil texture	0.6570	0.0671	0.1074
	Carbonates	0.4990	0.0311	0.0403
	Mean temperature in the coldest month	0.4830	0.1476	0.1528
	Mean annual temperature	0.4490	0.1013	0.0842
	Slope	0.3300	0.0166	0.0128
	Soil reaction	0.2960	0.0671	0.0493
	Average annual precipitation	0.1650	0.2101	0.1358
	Average precipitation in summer months	0.0200	0.2921	0.1586

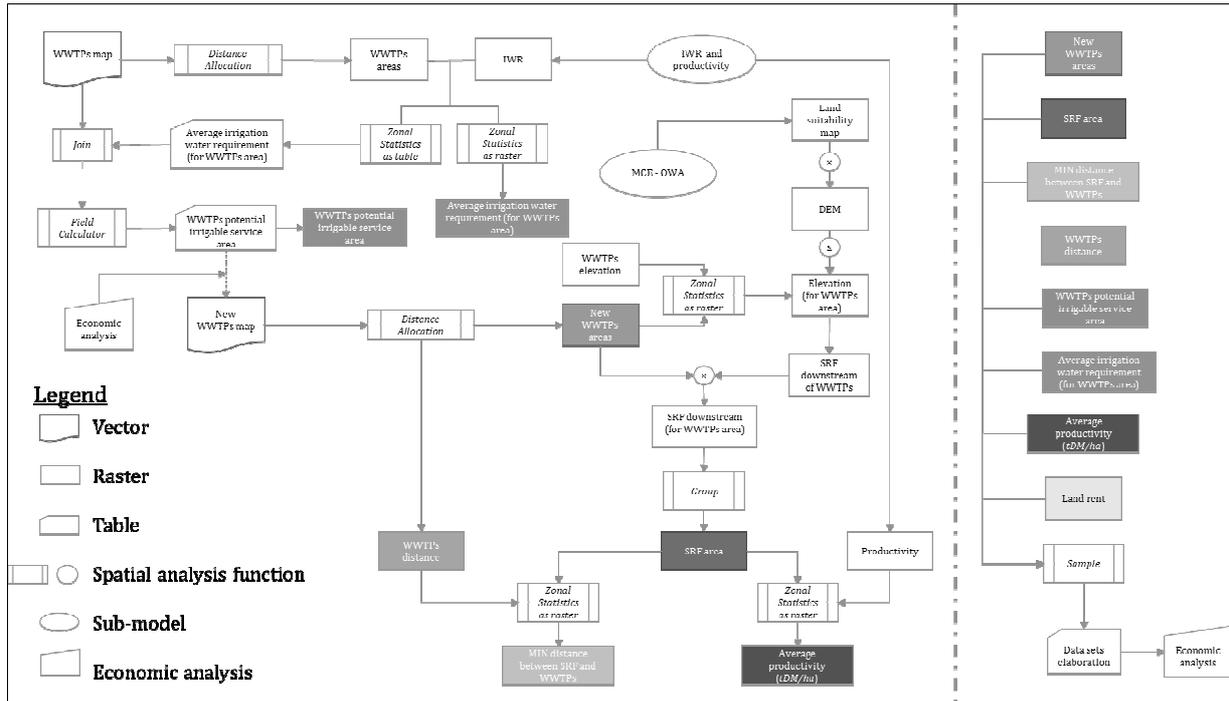


Figura 1. Albero gerarchico del modello di analisi spaziale.
 Figure 1. Hierarchical tree of spatial analyst model.

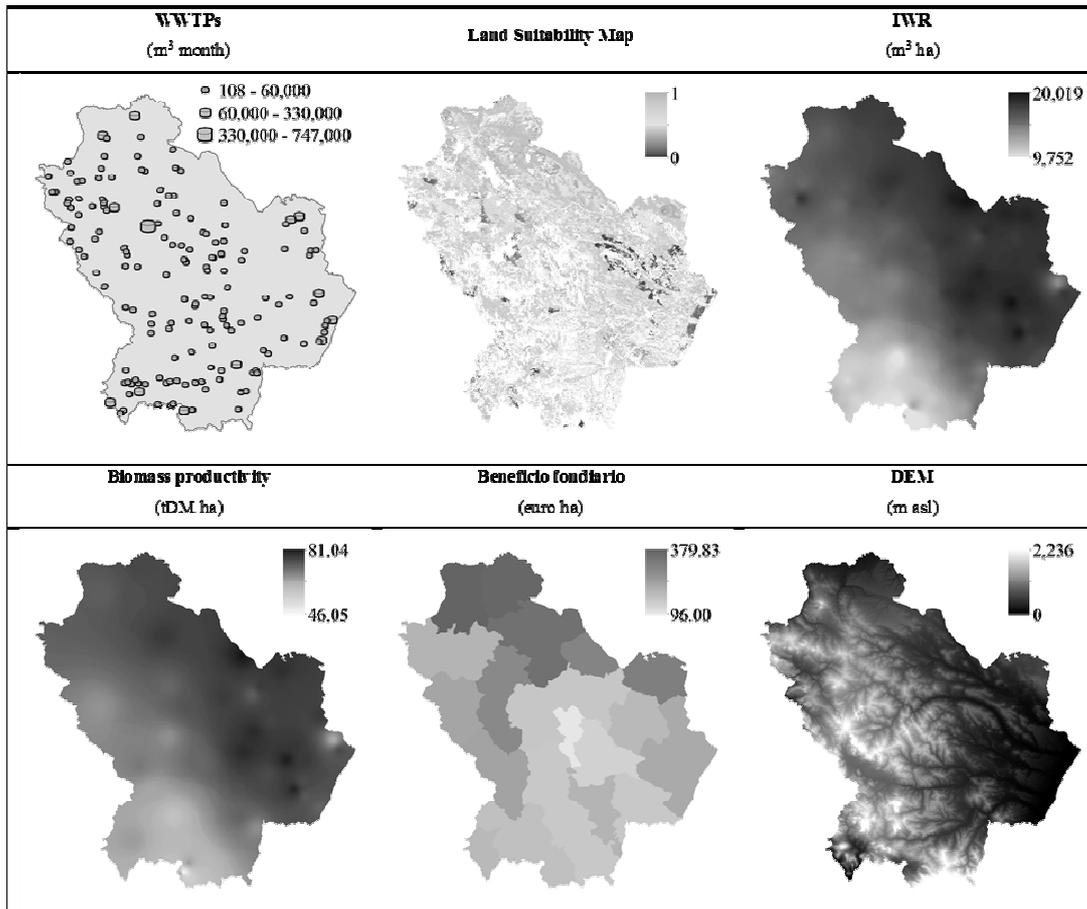


Figura 2. Dati di input.
 Figure 2. Input data.

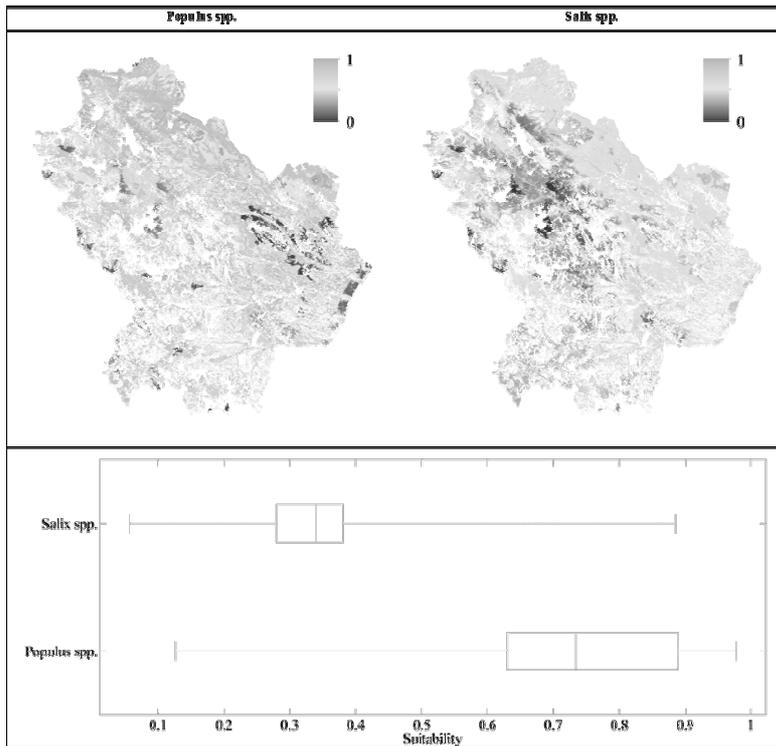


Figura 3. Mappa d' idoneità e Box-plot dei valori d' idoneità.
 Figure 3. Land suitability map and Box-plot of suitability values.

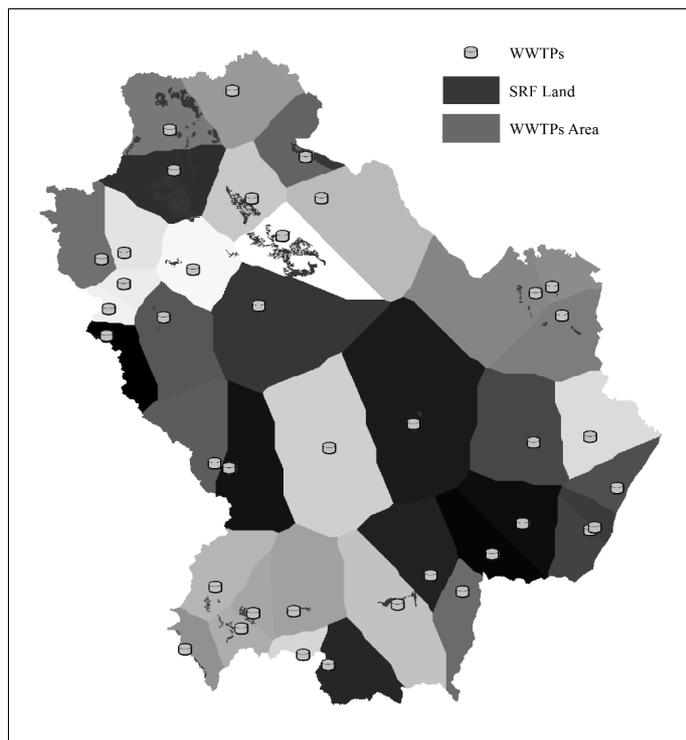


Figura 4. Localizzazione sul territorio delle aree SRF con NPV positivo.
 Figure 4. Geographical location of SRF areas with positive NPV.

SUMMARY

Linkages between wastewater and bioenergy: an empirical analysis

Energy crops irrigated with non-conventional water resources on large scale could decrease negative impacts from fossil fuel use, at the same time saving

potable supplies and reducing pollution in surface water, particularly in water scarcity environments as the Mediterranean basin. Willow and poplar short rotation forestry (SRF) irrigated with wastewater, known as “vegetation filter systems”, are an attractive alternative to conventional forestry and water purification systems for attaining environmental and energy goals set in the European Union and increasing

farmers' income. Energy planning issues are complex problems with multiple decision makers and criteria. Given the spatial nature of the problem, the research proposes a spatial decision support system in GIS (*Geographic Information System*) to evaluate the agronomic and economic feasibility of vegetation filter systems in Basilicata region, southern Italy.

Results show that the distances between the areas of SRF and treatment plants are the key factor. From 163 wastewater treatment plants only 25 are cost-effective and capable to irrigate 864 acres of SRF. This shows that there is great potential in the region for the bioenergy development with economic advantages, highlighting the wide availability of sites with net benefits of up to 46,000 €/ha and payback period between 3 and 10 years.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV., 2012 – *Tariffa unificata di riferimento dei prezzi per l'esecuzione delle opere pubbliche*. Ed. Regione Basilicata, Potenza, Italy.
- Banca d'Italia, 2013 – *Supplementi al bollettino Statistico. Indicatori monetari e finanziari*. Anno XXIII - 13 nov. 2013.
http://www.bancaditalia.it/statistiche/stat_mon_cred_fin/banc_fin/pimemf/2013/sb60_13/suppl_60_13.pdf (Accessed 5 December 2013).
- Berndes G., Borjesson P., Ostwald M., Palm M., 2008 – *Multifunctional biomass production systems - an overview with presentation of specific applications in India and Sweden*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2 (1): 16-25.
<http://dx.doi.org/10.1002/bbb.52>
- BIOPROS, 2008 – *Short Rotation Plantations: Guidelines for efficient biomass production with the safe application of wastewater and sewage sludge*. http://www.susana.org/docs_ccbk/susana_download/2-1790-biopros-d20-guidelines-english.pdf (Accessed 10 April 2014).
- Börjesson P., Berndes G., 2006 – *The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden*. *Biomass and Bioenergy*, 30 (5): 428-438.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.11.018>
- Chen S.J., Hwang C.L., 1992 – *Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4>
- Cienciala E., Lindroth A., 1995 – *Gas-exchange and sap flow measurements of Salix viminalis trees in short-rotation forest - II. Diurnal and seasonal variations of stomatal response and water use efficiency*. *Trees*, 9 (5): 295-301. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00202019>
- Cozzi M., Di Napoli F., Viccaro M., Romano S., 2013 – *Use of forest residues for building forest biomass supply chains: technical and economic analysis of the production process*. *Forests*, 4 (4): 1121-1140.
<http://dx.doi.org/10.3390/f4041121>
- Cozzi M., Di Napoli F., Viccaro M., Fagarazzi C., Romano S., 2014 – *Ordered Weight Averaging multi-criteria procedure and cost-effectiveness analysis for Short Rotation Forestry siting in the Basilicata Region, Italy*. *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, in press.
- Dimitroiu I., Aronsson P., 2011 – *Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeters - plant response and treatment efficiency*. *Biomass and Bioenergy*, 35 (1): 161-170.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.019>
- Dimitriou I., Rosenqvist H., 2011 – *Sewage sludge and wastewater fertilization of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production – biological and economic potential*. *Biomass and Bioenergy*, 35 (2): 835-842.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.010>
- ENAMA, 2008 – *Studio Progetto Biomasse ENAMA*, parte 1, capitolo 1. Roma, Italia.
- ENEA, 2006 – *Sistemi Informativi Geografici. Un percorso attraverso concetti e nozioni fondamentali per addentrarsi nel vasto mondo della Scienza della Informazione Geografica*. Roma, Italia.
- Ericsson K., Rosenqvist H., Nilsson L.J., 2009 – *Energy crop production costs in the EU*. *Biomass and Bioenergy*, 33 (11): 1577-1586.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.08.002>
- ESRI, 2001 – *ArcGIS Spatial Analyst: Advanced GIS Spatial Analysis Using Raster and Vector Data*. An ESRI White Paper. Redlands, CA, USA.
- FAO, 1986 – *Irrigation Water Management. Training manual no. 3*. Food and Agriculture Organisation, Rome, Italy.
- FAO, 1998 – *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 56*. Food and Agriculture Organisation, Rome, Italy.
- F.I.M.A.V., 2012 – *Tariffe delle lavorazioni agricole per conto terzi 2012*. Verona, Italia.
- Fischer M., Trnka M., Kučera J., Fajman M., Žalud Z., 2011 – *Biomass productivity and water use relation in short rotation poplar coppice (Populus nigra x P. maximowiczii) in the conditions of Czech Moravian Highlands*. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 59 (6): 141-152.
<http://dx.doi.org/10.11118/actaun201159060141>
- Forrester D.I., Theiveyanathan S., Collopy J.J., Marcar N.E., 2010 – *Enhanced water use efficiency in a mixed Eucalyptus globulus and Acacia mearnsii plantation*. *Forest Ecology and Management*, 259 (9): 1761-1770.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.036>
- Guidi W., Piccioni E., Bonari E., 2008 – *Evapotranspiration and crop coefficient of poplar and willow short-rotation coppice used as vegetation filter*. *Bioresource Technology*, 99 (11): 4832-4840.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.055>
- Holm B., Heinsoo K., 2013 – *Municipal wastewater application to Short Rotation Coppice of willows - Treatment efficiency and clone response in Estonian case study*. *Biomass and Bioenergy*, 57: 126-135.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.001>
- Janssen R., Rietveld P., 1990 – *Multicriteria analysis and geographical information systems: an application to agricultural land use in the Netherlands*. In: Geographical information systems for urban and regional planning. A cura di Scholten H.J. and Stillwell J.C.H. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, pp. 129-139.
http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-1677-2_12
- Linderson M.L., Iritz Z., Lindroth A., 2007 – *The effect of water availability on stand-level productivity, transpiration, water use efficiency and radiation use efficiency of field-grown willow clones*. Biomass and Bioenergy, 31 (7): 460-468.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.014>
- Malczewski J., 2004 – *GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview*. Progress in Planning, 62 (1): 3-65.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002>
- Malczewski J., 2006 – *Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 8 (4): 270-277.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2006.01.003>
- Pistocchi C., Guidi W., Piccioni E., Bonar, E., 2009 – *Water requirements of poplar and willow vegetation filters grown in lysimeter under Mediterranean conditions: Results of the second rotation*. Desalination, 246 (1-3): 137-146.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.047>
- Romano S., Cozzi M., 2006 – *Il governo del territorio e la conservazione delle risorse: l'uso dei modelli geografici multicriteriali per la valutazione del rischio socio economico e ambientale degli incendi boschivi*. Rivista di Economia Agraria, 61 (3): 365-400.
- Romano S., Cozzi M., Viccaro M., Di Napoli F., 2013a – *The green economy for sustainable development: a spatial multicriteria analysis-ordered weighted averaging approach in the siting process for short rotation forestry in the Basilicata Region, Italy*. Italian Journal of Agronomy, 8 (3): 158-167.
<http://dx.doi.org/10.4081/ija.2013.e21>
- Romano S., Cozzi M., Di Napoli F., Viccaro M., 2013b – *Building agro-energy supply chains in the Basilicata region: technical and economic evaluation of interchangeability between fossil and renewable energy sources*. Energies, 6 (10): 5259-5282.
<http://dx.doi.org/10.3390/en6105259>
- Rosenqvist H., Dawson M., 2005a – *Economics of willow growing in Northern Ireland*. Biomass and Bioenergy, 28 (1): 7-14.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.06.001>
- Rosenqvist H., Dawson M., 2005b – *Economics of using wastewater irrigation of willow in Northern Ireland*. Biomass and Bioenergy, 29 (2): 83-92.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.04.001>
- Saaty T.L., 1980 – *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Spinelli R., Nati C., Magagnotti N., 2006 - *SRF di pioppo. Macchine e sistemi per la raccolta*. Sherwood, 128: 56-59.
- USDA, 1993 – *Irrigation water requirements, in National Engineering Handbook*, Part 623 (ed.); United States Department of Agriculture Soil Conservation Service (USDA): Washington DC, USA.
- Yager R.R., 1996 – *Quantifier guided aggregation using OWA operators*. International Journal of Intelligent Systems, 11 (1): 49-73.
[http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-111X\(199601\)11:1<49::AID-INT3>3.0.CO;2-Z](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-111X(199601)11:1<49::AID-INT3>3.0.CO;2-Z)
- Zadeh L.A., 1965 – *Fuzzy sets*. Information and Control, 8 (3): 338-353.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)