

CNR IBIMET	VIA CAPRONI 8 - 50145 FIRENZE	ACCORDO PER LO SVILUPPO DEL PROGETTO "FILIERA DELL'ENERGIA DA BIOMASSA"	
Relazione tecnico-scientifica	Finale	Data: 30/06/2012	Foglio 1 di 150

## **PROGETTO "FILIERA DELL'ENERGIA DA BIOMASSA"**

**PROGRAMMA DI RICERCA "VALUTAZIONE E PROMOZIONE DELL'IMPIEGO  
DELLE ENERGIE ALTERNATIVE E DEI MATERIALI NON ALIMENTARI NELLA  
FILIERA AGROAMBIENTALE"  
RIENTRANTE NEL PROGETTO PILOTA "MADE IN ITALY"**

Dipartimento guida CNR: Agroalimentare

**GIUGNO 2012**

## Partner del progetto

*Istituto di Biometeorologia – Consiglio Nazionale delle Ricerche*



*Centro Interdipartimentale di Bioclimatologia – Università di Firenze*



*Confederazione Generale dell'Agricoltura Italiana*



*Fondazione per il Clima e la Sostenibilità*



**A cura di:**

Simone Orlandini

Daniele Grifoni

Marco Napoli

Marco Mancini

Anna Dalla Marta

Gaetano Zipoli

Francesca Orlando

Federico Guasconi

Francesca Calastrini

Caterina Busillo

Francesca Guarnieri

Luca Fibbi

Roberto Bianchi

Sara Bianchi

Giuseppe D'Amore

Roberta Papili

Donato Rotundo

**Hanno collaborato alla realizzazione del report**

Leonardo Rocchi  
Roberto Berti  
Francesca Chellini  
Stefania Cinganelli  
Giulia Bartolozzi  
Anna Maria Vignini

**Direzione Amministrativa:**

Monica Giannini  
Elvira Giannozzi

Report del progetto disponibile in formato elettronico sul sito <http://www.agroenergia.net/>

# INDICE

## **LE BIOMASSE**

### **Tipologie, fonti di provenienza e potenzialità**

#### **I residui dell'agricoltura**

**Le tipologie e le fonti di provenienza**

**Le potenzialità produttive**

#### **Le colture dedicate**

**Le tipologie e le fonti di provenienza**

**Le potenzialità produttive**

### **Tecnologie di trasformazione**

#### **I processi di conversione**

#### **I biocombustibili**

#### **Processi termochimici**

##### **La combustione del legno**

*Le caldaie termiche a biomassa*

*Cogeneratori alimentati a combustibili solidi*

#### **Processi biologici**

##### **La digestione anaerobica e produzione di biogas**

*Impianti per la produzione di biogas*

##### **La fermentazione alcolica**

#### **Processi fisici**

##### **L'estrazione degli oli**

### **La logistica: raccolta, movimentazione e stoccaggio**

#### **Il recupero dei residui**

#### **Lo stoccaggio delle biomasse energetiche**

### **Le potenzialità energetiche dei residui ligno-cellulosici**

### **I benefici ambientali**

#### **La metodologia LCA**

##### **Struttura e fasi**

*Prima fase: definizione scopi, obiettivi e campo di applicazione (ISO 14041)*

*Seconda fase: analisi di inventario o Life Cycle Inventory-LCI (ISO 14041)*

*Terza fase: la valutazione d'impatto o Life Cycle Impact Assessment (ISO 14042)*

*Quarta fase: interpretazione e miglioramento (ISO 14043)*

*La comunicazione dei risultati dell'LCA*

#### **LCA nella filiera legno energia**

##### **Energia Da Biomassa E Sostenibilità Ambientale: Un Caso Di Studio In Toscana**

*Introduzione*

*Metodologia*

*Risultati e conclusioni*

#### **Il bilancio dell'acqua: il water footprint**

## **IL SOLARE**

### **La radiazione solare per utilizzo energetico**

#### **Introduzione**

#### **Solare termico per riscaldamento**

**Pannelli solari termici non vetrati**

**Pannelli solari termici vetrati**

#### **Solare fotovoltaico**

**Effetto fotovoltaico**

**Cella fotovoltaica**

**Celle cristalline**

**Celle in film sottile**

**Modulo fotovoltaico**

#### **Solare fotovoltaico a concentrazione e inseguitori solari**

**Solare termodinamico**

### **Stima della radiazione solare**

#### **Premessa**

#### **DSSF stimata da satellite**

**Archivio dati di radiazione DSSF**

**Procedura di estrazione dei dati di radiazione DSSF**

*Descrizione generale*

*Tempi di calcolo*

**Analisi della distribuzione della radiazione solare sul territorio italiano: spazializzazione del dato satellitare DSSF**

**Confronto della radiazione stimata da satellite (DSSF) con quella stimata dal modello meteorologico WRF**

**Validazione dei dati DSSF**

#### **Metodologia impiegata per la stima della radiazione su superficie inclinata e con effetto dell'orizzonte reale**

**Scomposizione della radiazione H<sub>g</sub> stimata da satellite nelle componenti diffusa e diretta**

**Introduzione dell'effetto dell'orizzonte reale e del piano comunque inclinato sulla radiazione DSSF stimata da satellite**

#### **Cartografia relativa al fotovoltaico**

**Cartografia relativa alla radiazione globale**

**Cartografia relativa alla producibilità elettrica**

**Cartografia relativa al rendimento economico dell'investimento in fotovoltaico**

## **L'EOLICO**

**Il vento per l'utilizzo energetico**

**Energia eolica**

**La distribuzione di Weibull**

**La legge di Betz**

**La funzione densità di potenza**

**Gli aerogeneratori nell'ambito mini-microeolico**

**Stima delle potenzialità eoliche**

**Premessa**

**Archivio meteorologico WRF-NMM**

**Validazione delle stime di vento WRF-NMM**

**Cartografia**

**Cartografia relativa al vento medio**

**Annuo**

**Mensile**

**Cartografia relativa alla producibilità eolica**

**Annua**

**Mensile**

**Rendimento economico dell'investimento nell'ambito del mini-microeolico**

## **ALLEGATI**

**Allegato 1: Carte di producibilità medie annue di solare**

**Allegato 2: Carte di rendimento economico medio annuo dei sistemi fotovoltaici**

**Allegato 3: Lezione – Cambiamenti climatici, energie rinnovabili e sostenibilità**

**Allegato 4: Lezione – Il sistema di incentivazione delle energie rinnovabili elettriche**

**Allegato 5: Lezione – Tracciabilità delle biomasse e sostenibilità dei bioliquidi**

# LE BIOMASSE

## Tipologie, fonti di provenienza e potenzialità

### I residui dell'agricoltura

Il settore agroforestale produce una grande quantità di residui organici che in parte rientrano nei cicli produttivi come sottoprodotti in altri casi vanno a costituire scarti di processo che devono essere gestiti e/o smaltiti. Il problema del loro riutilizzo in agricoltura è sentito già da molto tempo, tanto che nel 1915 la casa editrice Hoepli pubblicava un manuale intitolato "Residui Agricoli – utilizzazione e recuperi – cascami di fibre tessili, residui vegetali, residui animali" per suggerire le possibili utilizzazioni dei residui e dei sottoprodotti derivanti da agricoltura e agroindustria. Nel panorama attuale le biomasse costituiscono un'interessante prospettiva per la produzione di energia e per il raggiungimento dell'obiettivo strategico nazionale di produzione del 17% di energia da fonti rinnovabili come stabilito nella direttiva 2009/28/CE.

Le fonti di provenienza possono essere molteplici e le caratteristiche chimico-fisiche delle varie tipologie di biomasse sono estremamente differenti, ma questo elemento attualmente non costituisce un limite alla loro trasformazione attraverso processi di conversione energetica, siano essi di tipo fisico, biochimico o termochimico.

Il principale limite alla loro utilizzazione è attualmente rappresentato dall'elevata polverizzazione delle proprietà agricola e quindi delle quantità di residui che ciascun azienda ha a disposizione, che spesso riduce la convenienza economica di un recupero sistematico effettuato con appropriate macchine operatrici e con sistemi logistici di movimentazione organizzati. In tal senso è auspicabile la nascita di un mercato organizzato con lo stesso modello utilizzato per le biomasse alimentari, quindi con molti punti di ritiro e concentrazione delle produzioni, ben distribuiti nel territorio. Per i residui delle coltivazioni può essere auspicabile anche la nascita di una figura nuova quale il contoterzista che si dedica a questa attività e che ricava parte della marginalità dalla valorizzazione economica del sottoprodotto e parte dal servizio di gestione dei residui reso all'azienda.

### Le tipologie e le fonti di provenienza

Le principali fonti di provenienza, delle biomasse residuali, sono costituite dall'attività forestale, agricola di coltivazione e allevamento oltre che dall'industria di trasformazione. I sottoprodotti di queste produzioni primarie in molti casi trovano un reimpiego nei processi produttivi, ma economicamente il loro utilizzo è giustificato solamente dalla necessità di gestione delle biomasse e non dalla convenienza economica. Le principali tipologie di biomasse residuali provenienti dal settore agroforestale sono di seguito elencate e raccolte per fonte di provenienza:

- agricoltura:
  - residui delle coltivazioni erbacee (paglie cereali, paglie colza, paglie di fagioli e ceci, stocchi girasole, stocchi e tutoli mais, foglie e colletti di barbabietola da zucchero, steli tabacco, ecc.);



- residui delle coltivazioni arboree (potature di fruttiferi, olivo, fruttiferi a guscio, sarmenti vite, ecc.);
- deiezioni degli allevamenti (letame e liquami di suini, bovini, ovini, caprini, avicoli, cunicoli, ecc.);
- foreste:
  - residui delle utilizzazioni destinate a legna da ardere (ramaglia, cimeli, ecc.);
  - residui delle opere di ripulitura e manutenzione delle sponde dei corsi d'acqua,
  - residui della prima lavorazione del legno da opera (segatura, trucioli, refili, sciaveri, ecc.);
- agroindustria:
  - residui oleifici (sanse, foglie);
  - residui cantine (vinacce, raspi);
  - residui industria conserviera (semi, buccette, foglie, gusci, noccioli, ecc.);
  - residui zuccherifici ( melasso, fettucce).

Tutte le categorie di biomassa elencate sono una risorsa distribuita sul territorio e ciò può rappresentare un punto di forza per lo sviluppo di un sistema di micro generazione distribuita, oppure necessitano di essere concentrate per essere utilizzate da impianti di dimensioni maggiori.

Per una corretta valutazione delle risorse presenti occorre effettuare prima una stima delle potenzialità, ossia della quantità totale che annualmente viene prodotta, per poi quantificare quanta di questa può essere effettivamente resa disponibile dal comparto agroforestale.

## **Le potenzialità produttive**

La stima delle potenzialità può essere fatta quantificando le superfici coltivate, le produzioni medie di residui che annualmente si hanno nelle differenti aree vocazionali, il numero di capi allevati, la quantità di prodotti trasformati, ecc. I valori ottenuti prescindono da fattori variabili, quali l'influenza climatica sul ciclo vegeto produttivo delle piante, le superfici annualmente coltivate e quindi le politiche di mercato, il sistema di allevamento, ecc. Il valore stimato fornisce quindi un'indicazione di massima che, per molte tipologie residuali, può variare notevolmente di anno in anno e da territorio a territorio.

Anche il passaggio a biomasse effettivamente disponibili risente di molte variabili, spesso non prevedibili, quali l'attuale utilizzo del sottoprodotto, il prezzo di mercato di impieghi alternativi, il costo di recupero e del trasporto, il frazionamento delle proprietà e quindi la difficoltà nel recupero di piccole quantità, ecc.

Nel caso più specifico dei residui colturali una stima delle biomasse lignocellulosiche, di coltivazioni arboree ed erbacee, è stata effettuata a partire dalle superfici coltivate riportate nelle statistiche ISTAT per il periodo 2006-2010, al fine di ottenere un valore medio rappresentativo e slegato da eventi economici o climatici che hanno influito sulla diffusione delle diverse colture nelle singole annate.

I valori di produttività ad ettaro sono stati ricavati da studi bibliografici ed in particolare dal CESTAAT (Centro Studi sull'Agricoltura, l'Ambiente e il Territorio) e da valori bibliografici riportanti dati relativi alle differenti colture. Per alcune colture è poi possibile legare la produttività dei residui a quella della produzione primaria sempre ricavabile dai dati ISTAT. Quest'ultimo

passaggio consente di tenere conto della produttività delle differenti aree (province) e quindi di valutare meglio le vocazionalità territoriali.

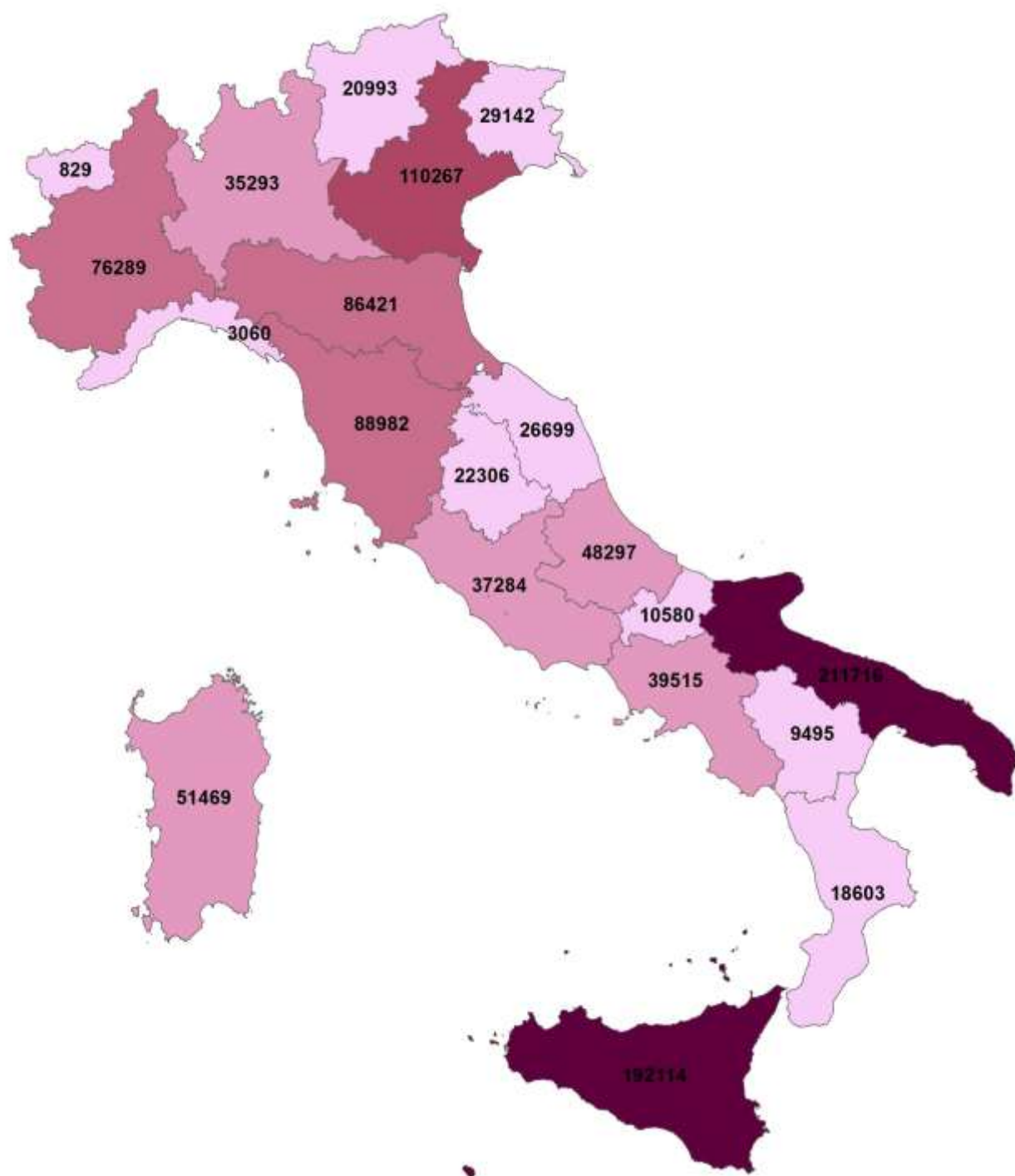
Per standardizzare le informazioni, tutti i valori di produzione sono stati riportati in termini di unità di peso di sostanza secca (s.s.). Le potenzialità produttive sono, quindi, state espresse in tonnellate di sostanza secca lignocellulosica (tss/anno) producibili ogni anno in ciascuna provincia o comune.

Le categorie analizzate, e di seguito riportate in forma cartografica, sono:

- residui di colture erbacee (frumento, segale, orzo, avena, riso, sorgo, cereali minori, mais, girasole, soia, colza)
- sarmenti di vite
- potature di olivo
- potature di fruttiferi (comprendente melo, pero, albicocco, susino, pesco, ciliegio, nettarina, nocciolo, mandorlo, actinidia, arancio, mandarino, clementina, limone)



Figura 1.1. Residui potenziali di colture erbacee (tonnellate di sostanza secca): frumento, segale, orzo, avena, riso, sorgo, cereali minori, mais, girasole, soia, colza.



*Figura 1.2. Residui potenziali di sarmenti di vite (tonnellate di sostanza secca)*



*Figura 1.3. Residui potenziali di potature d'olivo (tonnellate di sostanza secca).*



Figura 1.4. Residui potenziali di potature di fruttiferi (tonnellate di sostanza secca): melo, pero, albicocco, susino, pesco, ciliegio, nettarina, nocciolo, mandorlo, actinidia, arancio, mandarino, clementina, limone.

## Le colture dedicate

### Le tipologie e le fonti di provenienza

Le colture dedicate sono rappresentate da differenti specie appositamente coltivabili per la produzione di differenti vettori energetici, quali combustibili ligno-cellulosici, biocarburanti liquidi e gassosi. Per la produzione di biomasse ligno-cellulosiche le principali tipologie di coltivazioni utilizzabili sono:

- cedui a turno breve o short rotation forestry (SRF) che sono coltivazioni di specie arboree, ad elevata densità, caratterizzate da rapidità di crescita e che vengono ceduate ad intervalli frequenti (2-5 anni) per la produzione di cippato; le specie principalmente impiegate sono il Pioppo (*Populus* spp.), la Robinia (*Robinia pseudoacacia*), l'Eucalipto (*Eucalyptus* spp.), il Salice (*Salix alba*);
- erbacee poliennali ossia colture erbacee capaci di dare produzioni annuali per più anni; le più rappresentative sono la canna comune (*Arundo donax*), il cardo (*Cynara cardunculus*), il miscanto (*Miscanthus* spp.), il kenaf (*Hibiscus cannabinus*);
- erbacee annuali Sorgo da fibra (*Sorghum bicolor*)

Per la produzione di biocarburanti le categorie di colture più idonee sono:

- colture oleaginose ossia colture da cui ricavare olio vegetale puro quale girasole (*Helianthus annuus*) e colza (*Brassica napus*);
- colture zuccherino-amilacee idonee a produrre bioetanolo dalla fermentazione, quali il mais (*Zea mays*), sorgo zuccherino (*Sorghum vulgare*), barbabietola da zucchero (*Beta vulgaris* var *saccharifera*), frumento (*Triticum* spp.).

Nella scelta degli obiettivi si deve sicuramente tenere conto degli aspetti agronomici e degli aspetti ambientali che implicano le differenti coltivazioni. La vocazionalità dei differenti territori può infatti influire notevolmente sui risultati ottenibili con le differenti specie così come la tecnica agronomica impiegata.

### Le potenzialità produttive

Le colture energetiche dedicate richiedono l'impiego di terreni agricoli e quindi sono considerate competitive delle colture alimentari. Attualmente questa competizione sta suscitando molte perplessità circa l'opportunità di ricorrere all'uso di biomasse agro energetiche provenienti da coltivazioni soprattutto per l'aumento dei prezzi che le derrate alimentari possono subire, oltre che per la competizione che possono creare alle altre filiere produttive quali quelle cerealicole, zootecniche, ecc.

Per queste colture risulta quindi difficile l'individuazione delle superfici dedicabili e quindi la stima delle potenzialità produttive nel territorio nazionale.

Per ovviare a tale problema è stato condotto uno studio partendo dai terreni ritirati dalla produzione, calcolati dalla differenza di superficie agricola utilizzata (SAU) rilevati nei censimenti agricoli del 2000 e del 2010 (per il 2010 sono i primi dati disponibili). È stato quindi ipotizzato l'impiego di questi terreni tendenzialmente marginali, in quanto non più convenientemente coltivabili a colture

tradizionali, per la produzione di biomasse ligno-cellulosiche utilizzabili come biocombustibili. In alternativa si è considerato l'impiego del 10% della SAU.

La produttività è stata stabilita fissa, di 7,5 tonnellate di sostanza secca ad ettaro, indipendentemente dalla specie coltivata, che invece dipende dalla vocazionalità del territorio e dalla tecnica agronomica.

La produttività considerata è sicuramente bassa rispetto alle produzioni ottenibili da pioppo, miscanto, canna, ecc., coltivate intensivamente, ed è alta per coltivazioni a bassi input su terreni marginali. Il quadro ottenuto è quindi legato ad un metodo di coltivazione semintensivo ipotizzato nel presente studio. Altresì non viene considerata nessuna differenza di vocazionalità pedoclimatica fra Sud, Centro e Nord Italia.

Nelle strategie da considerare, a livello ambientale, occorre tener presente i molteplici benefici della coltivazione di colture poliennali a bassi input: Si possono, infatti, imputare a tali coltivazioni, l'aumento di sostanza organica, la riduzione dell'erosione dei suoli legato alle ridotte lavorazioni del terreno che richiedono, all'aumento di biodiversità, al presidio ed alla gestione del territorio. Per contro la loro produttività è fortemente influenzata dalla disponibilità idrica.

Di seguito si riportano i valori potenziali di biomassa producibili sul territorio nazionale.

	produzione su ritirati produzione	produzione su 10%SAU
	ton_ss	ton_ss
Piemonte	153916	786263
Valle d'Aosta	118019	41538
Lombardia	410414	738653
Trentino Alto Adige	252096	285377
Veneto	337172	604739
Friuli Venezia Giulia	135451	164932
Liguria	156011	32275
Emilia Romagna	469086	800080
Toscana	753831	566471
Umbria	289380	245901
Marche	146491	354798
Lazio	544340	486354
Abruzzo	0	337491
Molise	135739	147396
Campania	289463	410598
Puglia	0	960657
Basilicata	189389	384211
Calabria	25829	413554
Sicilia	0	1038032
Sardegna	0	864567
TOTALE	4406626	9663889

*Tabella 1.1. Produzione potenziale di biomasse lignocellulosiche ottenibile nelle differenti regioni italiane dalla coltivazione di colture poliennali o da short rotation forestry, nei terreni ritirati dalla produzione o nel 10% di superfici agricole utilizzate (ton\_ss = tonnellate di sostanza secca).*





*Figura 1.5. Produzione potenziale di biomasse lignocellulosiche (in tonnellate di sostanza secca) ottenibile nelle differenti regioni italiane Italia dalla coltivazione di colture poliennali o da short rotation forestry, nei terreni ritirati dalla produzione nel periodo 2000-2010.*



*Figura 1.6. Produzione potenziale di biomasse lignocellulosiche (in tonnellate di sostanza secca) ottenibile nelle differenti regioni italiane dalla coltivazione di colture poliennali o da short rotation forestry nel 10% di superfici agricole utilizzate.*

Prendendo, invece, in considerazione la possibilità di coltivare colture destinabili alla produzione di biocarburanti liquidi, nei terreni ritirati dalla produzione e nel 10% di SAU, le colture energetiche utilizzabili sono essenzialmente riconducibili a colture oleaginose per la produzione di oli vegetali puri (prevalentemente colza, girasole e lino) e colture amilacee destinate alla produzione di bioetanolo (prevalentemente mais e barbabietola da zucchero).

Per valutare la produzione potenziale di biocarburanti, partendo dalla coltivazione colture annuali dedicate, sono state stimate le produzioni ottenibili in un sistema intensivo (con apporto di irrigazione) ed uno semintensivo (senza apporto di irrigazione). Le produzioni di granella di mais e girasole sono state convertite rispettivamente in bioetanolo e olio vegetale puro impiegando un coefficiente di trasformazione del 30% per il bioetanolo e del 39% per l'olio vegetale puro. La produzione media di biocarburanti ottenibile nei differenti sistemi colturali è di circa 0,8 ton/Ha (semi-intensivo) e 2,7 ton/Ha (intensivo). Per stimare il potenziale produttivo nazionale è stata ipotizzata la coltivazione semi-intensiva dei terreni ritirati dalla produzione e la coltivazione intensiva del 10% SAU. Sono così stati ottenuti due scenari orientativi in grado di definire il range produttivo possibile.

	produzione su ritirati produzione	produzione su 10%SAU
	ton	ton
Piemonte	16418	283055
Valle d'Aosta	12589	14954
Lombardia	43777	265915
Trentino Alto Adige	26890	102736
Veneto	35965	217706
Friuli Venezia Giulia	14448	59376
Liguria	16641	11619
Emilia Romagna	50036	288029
Toscana	80409	203930
Umbria	30867	88524
Marche	15626	127727
Lazio	58063	175088
Abruzzo	0	121497
Molise	14479	53062
Campania	30876	147815
Puglia	0	345836
Basilicata	20202	138316
Calabria	2755	148879
Sicilia	0	373692
Sardegna	0	311244
TOTALE	470040	3479000

Tabella 1.2. Produzione potenziale di biocarburanti ottenibile dalla coltivazione semi-intensiva dei terreni ritirati dalla produzione e dalla coltivazione intensiva del 10% di SAU.



*Figura 1.7. Produzione potenziale di biocarburanti (in tonnellate di bioliquidi) ottenibile dalla coltivazione semi-intensiva dei terreni ritirati dalla produzione..*



*Figura 1.8. Produzione potenziale di biocarburanti (in tonnellate di bioliquidi) ottenibile dalla coltivazione intensiva del 10% di SAU.*

Occorre però considerare che l'impiego di coltivazioni irrigate richiede disponibilità di acqua onde non entrare in competizione con le attuali colture irrigate. La politica di produzione di biocarburanti da coltivazioni intensive deve, sicuramente, essere accompagnata da una corretta politica di gestione dell'acqua.

# Tecnologie di trasformazione

## I processi di conversione

I processi di conversione energetica delle biomasse sono principalmente tre:

- *conversione biologica* : avviene attraverso reazioni chimiche dovute alla presenza di enzimi, funghi e altri microrganismi che si sviluppano nella biomassa tenuta a particolari condizioni. Si applica generalmente su biomasse con tenore di umidità superiore al 30% e rapporto C/N<30; i principali processi biologici sono la fermentazione alcolica e la digestione anaerobica;
- *conversione termochimica* : avviene attraverso l'azione del calore e la conseguente combustione della biomassa. Si applica generalmente su biomasse con tenore di umidità inferiore al 30% e rapporto C/N>30;
- *estrazione*: può essere un semplice processo fisico di pressione per l'estrazione di oli vegetali puri da semi oleosi ottenuti da colture dedicate; un successivo processo di esterificazione viene impiegato per la produzione di biodiesel.

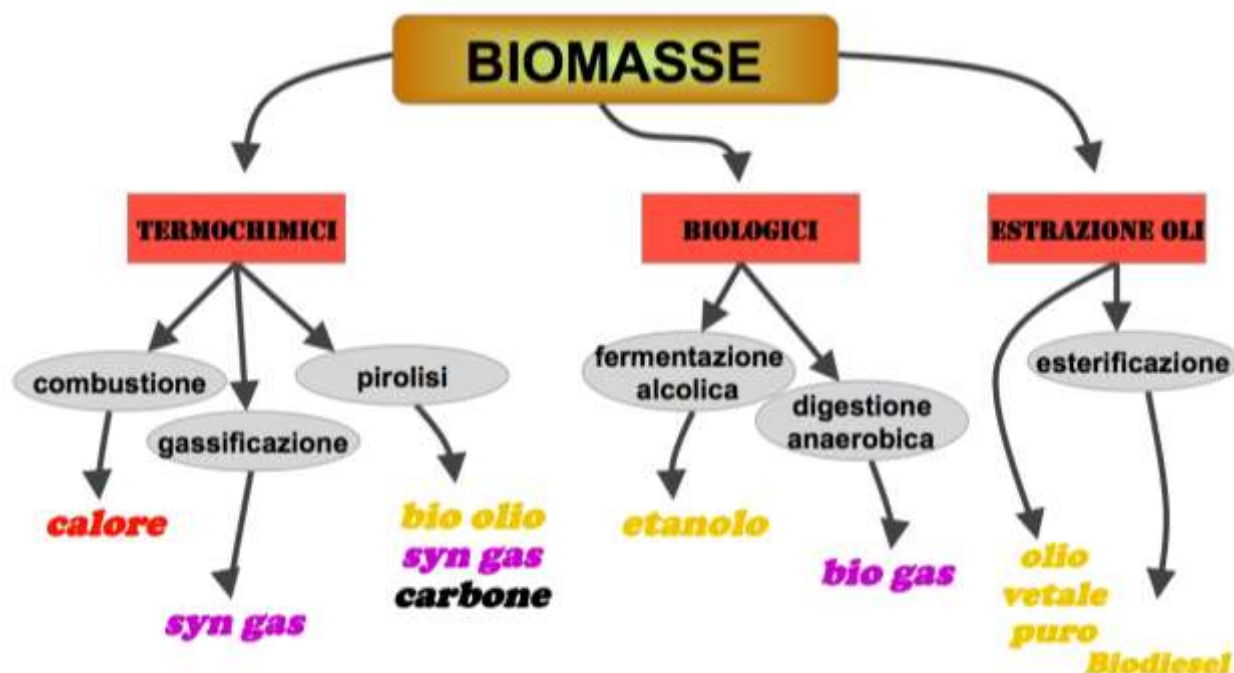


Figura 1.9. Processi di conversione energetica delle biomasse

## I biocombustibili

I biocombustibili che si originano a partire dalle biomasse possono essere suddivisi in tre principali categorie in base al loro stato fisico: solido, liquido o gassoso.

- *Biocombustibili solidi*: costituiti principalmente da prodotti a matrice legnosa destinati alla combustione diretta (legna da ardere di varie pezzature, cippato, ecc.) o previa trasformazione in forme densificate (pellet e bricchetti). Sono utilizzati principalmente come sostituti degli idrocarburi commerciali (gasolio, metano, GPL) soprattutto per la produzione di calore nei settori residenziale ed industriale, ed attraverso sistemi di cogenerazione possono fornire calore ed elettricità. Sono caratterizzati dall'avere basso potere calorifico rispetto agli idrocarburi liquidi, gassosi ed anche solidi (carbone, lignite, ecc) e sono adatti alla loro sostituzione soprattutto nelle caldaie.
- *Biocombustibili liquidi*: prodotti derivanti per lo più da colture dedicate attraverso processi di estrazione (olio vegetale puro) ed esterificazione (biodiesel) degli oli vegetali o processi di fermentazione e distillazione di materiali zuccherini (bioetanolo). Sono di particolar interesse per la produzione di biocarburanti nel settore dei trasporti. Sono classificabili in due tipologie principali: 1) Prodotti sostitutivi della benzina e 2) Prodotti sostitutivi del gasolio. I primi sono costituiti da alcoli (principalmente etanolo) ottenuti, mediante processi di fermentazione e distillazione controllata, dalla conversione di prodotti agricoli. Per la produzione di etanolo viene oggi utilizzata principalmente canna da zucchero (Brasile) oppure granoturco (USA) ma è possibile l'utilizzo di altre colture quali il sorgo zuccherino o la barbabietola da zucchero. I prodotti sostitutivi del gasolio sono, invece, in maggioranza costituiti da oli vegetali che presentano caratteristiche di potere calorifico e viscosità paragonabili a quelli del gasolio e sono prodotti principalmente per spremitura di semi oleosi quali ad esempio, colza, girasole, soia, lino oppure da piante tropicali (palma da olio, jatropha curcas). Per poter essere utilizzati nei moderni motori degli autoveicoli come sostituti del gasolio per autotrazione gli oli vegetali devono subire un processo chimico di transesterificazione, che converte gli oli vegetali in biodiesel per uso commerciale. Il biodiesel in genere viene addizionato al gasolio per autotrazione in diverse percentuali ma può essere utilizzato anche allo stato puro. Gli oli vegetali puri possono anche essere utilizzati in motori a combustione interna stazionari ai fini della generazione elettrica o della cogenerazione.
- *Biocombustibili gassosi*: prodotti derivanti da processi di fermentazione anaerobica di miscele di biomasse umide a componente organica quali reflui zootecnici, civili o agro-industriali spesso addizionate con produzioni agricole facilmente fermentescibili quali mais, barbabietola da zucchero, ecc. Le colonie batteriche in mancanza di ossigeno producono gas a basso potere calorifico costituito al 45-55% da metano che può essere combusto direttamente in motori a combustione esterna o microturbine per fare cogenerazione oppure può essere filtrato e trattato (estrazione CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, particelle ecc.), quindi convertito in biometano ed immesso in rete.

Con il termine biocarburante si fa riferimento a tutti quei biocombustibili liquidi e gassosi (es. bioetano, biodiesel, biometano) atti ad essere utilizzati per l'alimentazione di motori a combustione interna (ciclo Diesel e ciclo a Otto) o in turbine stazionarie. Il loro impiego è tradizionalmente legato al settore dei trasporti in sostituzione dei combustibili fossili per autotrazione, anche se, nel



corso degli ultimi anni, si è assistito ad una rapida evoluzione del loro campo di applicazione anche in direzione della generazione elettrica e termica ed in particolar modo della cogenerazione. A questo proposito l'olio vegetale puro (PVO) ed il biogas sono tra i biocarburanti che trovano applicazione prevalente nel settore della generazione e cogenerazione.

I biocombustibili solidi sono invece tradizionalmente legati al settore del riscaldamento e della generazione elettrica e diffusamente impiegati negli impianti di teleriscaldamento e cogenerazione.

## **Processi termochimici**

### **La combustione del legno**

La combustione della sostanza organica avviene essenzialmente attraverso il passaggio successivo di tre stadi che sono essiccazione, degradazione, combustione.

Nel primo stadio l'acqua contenuta nel legno subisce il processo di evaporazione che ha un costo energetico che grava sulla resa energetica del processo stesso. Ne consegue che tanto maggiore è l'umidità di partenza e tanta maggiore è la quota di energia di processo utilizzata per far evaporare l'acqua.

Il secondo stadio prevede la degradazione termica, ossia i processi di pirolisi (o piroscissione) e gassificazione, ossia processi di decomposizione termochimica di materiali organici, ottenuti mediante l'applicazione di calore e in completa assenza di ossigeno. In condizioni anaerobiche (totale assenza di ossigeno), il materiale subisce la scissione dei legami chimici originari con formazione di molecole più semplici.

Nell'ultima fase, invece, si ha l'ossidazione dei gas e delle molecole semplici ridotte, con liberazione di energia. A seconda della composizione chimica della matrice organica, della temperatura raggiunta e della quantità di ossigeno disponibile si possono avere differenti tipi di prodotti residuali quali cenere, carbone (biochar), catrame, oli, syngas, oltre alle emissioni quali CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> polveri, composti organici volatili, ossidi di azoto e di zolfo, ecc.

### ***Le caldaie termiche a biomassa***

Le caldaie termiche alimentate a biomassa lignocellulosica quale legno, cippato, pellet trinciati di residui delle coltivazioni (vite, olivo, paglie, ecc.) producono, per combustione, calore che può riscaldare aria, acqua o entrambe attraverso appositi scambiatori.

Particolarmente importante è l'affinità fra caldaia e biocombustibile, infatti per le differenti tipologie di biocombustibile occorrono caldaie con differenti sistemi di alimentazione e combustione e specifiche tarature del sistema. Non esistono caldaie polifaghe in assoluto, anche se normalmente i sistemi più grandi sono maggiormente versatili verso le variazioni di composizione del materiale di alimentazione grazie alla loro inerzia termica ed alla grandezza della camera di combustione che permette di essiccare rapidamente anche legnami a più elevato contenuto di umidità. Le caratteristiche del combustibile che maggiormente influenzano l'efficienza della caldaia sono rispettivamente: contenuto idrico, potere calorifico, pezzatura, ceneri del legname, ceneri residuali, fusibilità delle ceneri, contenuto di cloro e zolfo.

Le principali caratteristiche tecnologiche che distinguono le caldaie commerciali sono:



- *tipologia di caldaia*: le caldaie si dividono in due tipologie principali che sono a griglia fissa ed a griglia mobile. Le prime sono normalmente di piccola taglia e la griglia con il letto di braci è fissa. Le caldaie a griglia mobile sono di taglia più grande e gli elementi che costituiscono la griglia si muovono lungo un piano inclinato favorendo l'avanzamento di braci e cippato, evitando così la formazione di scorie di fusione o incrostazioni anche in presenza di materiale più umido.
- *tecnologia di combustione*: nella quasi totalità delle moderne caldaie a biomassa è utilizzata la tecnologia denominata a fiamma inversa o fiamma rovesciata. In queste caldaie la fiamma si sviluppa dall'alto verso il basso normalmente grazie all'azione di un ventilatore posizionato a valle della griglia che genera una depressione. Questa tecnologia aumenta l'efficienza di combustione in maniera considerevole rispetto ad una comune stufa a legna, ma richiede una pulizia regolare della caldaia e per questo motivo le moderne caldaie a biomassa sono dotate di sistemi automatici di pulizia dello scambiatore. Alcune adottano ancora tecnologia a fiamma diretta in cui la fiamma è libera e si sviluppa verso l'alto.
- *sistema di alimentazione*: è il sistema con cui si il combustibile viene addotto alla camera di combustione. Possono esserci varie tecnologie fra cui a) sistema automatico con deposito o serbatoio e agitatore (cippato, pellet, trinciato) e coclea convogliatrice; b) sistema pneumatico idoneo soprattutto per pellet e nocciolino; sistema a caduta libera dal deposito, utilizzato soprattutto sulle piccole stufe alimentate a pellet o nocciolino; sistema manuale (legna o pellet).
- *sistema di pulizia dello scambiatore* : automatico o manuale

L'efficienza termica delle caldaie è molto elevata e nel migliore dei casi si avvicina al 90%, con un notevole progresso rispetto all'efficienza dei tradizionali camini che in molti casi avevano rendimenti attorno al 15%.

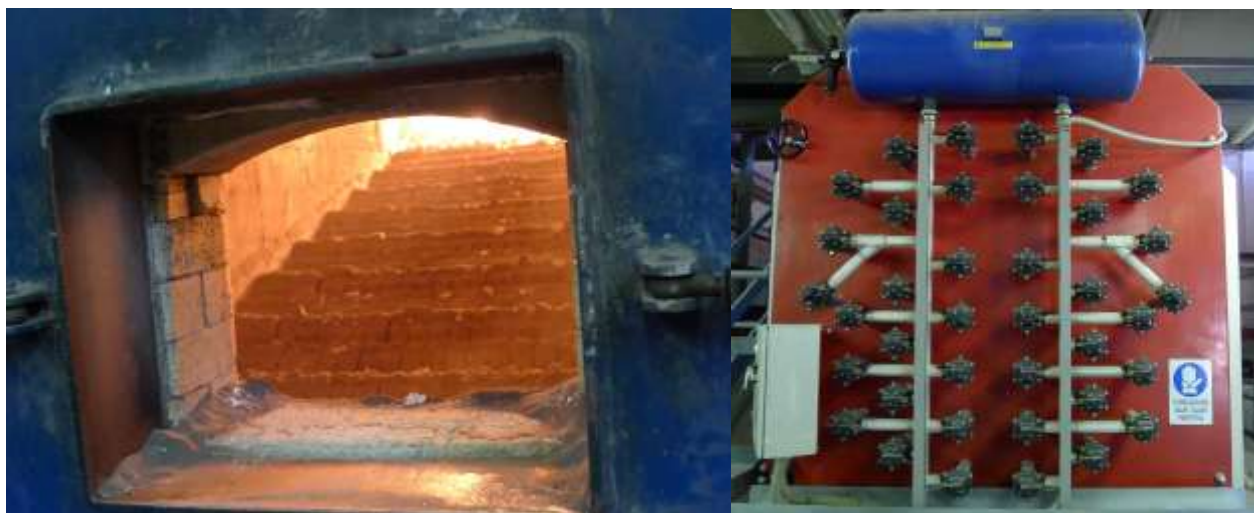


Figura 1.10. Particolari della caldaia da 4 MW di potenza termica della Bionergia Fiemme

### ***Cogeneratori alimentati a combustibili solidi***

La produzione combinata di energia elettrica e calore (cogenerazione) a partire da biocombustibili solidi avviene attraverso due differenti sistemi cogenerativi dove essenzialmente la biomassa viene:

- direttamente combusta in una caldaia con produzione di calore e cessione dello stesso ad un vettore energetico che alimenta il ciclo termodinamico del sistema di produzione di energia elettrica; appartengono a questa categoria i cicli termodinamici utilizzando i seguenti fluidi:
  - vapore d'acqua (turbine a vapore)
  - fluido organico (turbine per cicli Rankine)
  - aria calda (turbine ad aria calda)
  - gas inerti quali elio ed azoto (motori Stirling)
- scomposta chimicamente in molecole volatili in appositi reattori termochimici (pirogassificatori) con produzione di gas a basso potere calorifico (syngas) i quali possono essere direttamente combusti in motori alternativi a combustione interna o turbine a gas previa filtrazione delle particelle incombuste (catrami, polveri, etc).

I sistemi del primo tipo sono caratterizzati dalla presenza di una caldaia, in genere ad elevata efficienza, ma sono condizionati dal basso rendimento elettrico del ciclo termodinamico che si attesta attorno al 20% per i cogeneratori di taglia più grande caratterizzati da maggiore efficienza.

I sistemi del secondo tipo sono in teoria in grado di raggiungere rendimenti elettrici dell'ordine del 30%, ma in realtà dipendono in maniera sostanziale dalla qualità del gas prodotto dal pirogassificatore che a sua volta è fortemente influenzato dalla composizione della biomassa in ingresso che deve essere costante ed omogenea nel tempo.

In entrambi i sistemi l'energia elettrica viene prodotta da alternatori accoppiati a motori alternativi oppure a turbine o microturbine a gas come avviene nei sistemi di cogenerazione di tipo commerciale alimentati a gas, biogas, oli vegetali, ecc.

Poiché in Europa in genere gli incentivi economici per le fonti rinnovabili vengono concessi alla produzione di energia elettrica i sistemi di cogenerazione vengono in genere dimensionati per massimizzare la produzione elettrica e quindi ottimizzare il ritorno sull'investimento. Per l'energia termica si parla quindi di recupero e valorizzazione. E' infatti molto difficile individuare fabbisogni termici continui che possano sfruttare questa risorsa. L'impiego dell'energia termica aumenta l'efficienza dell'impianto con conseguenti benefici economici ed ambientali. Molto spesso l'utilizzazione è costituita sia per utenze industriali che residenziali dal riscaldamento invernale degli edifici che rappresentano un'utenza discontinua nel tempo. Alcuni impianti di teleriscaldamento, quale quello che serve il comune di Calenzano, rappresentano un esempio di cogenerazione. In agricoltura sempre più si sta ragionando sull'impiego dell'energia termica su vari processi aziendali quali l'essiccazione, la produzione di frigoriferi per il raffreddamento e la conservazione, il riscaldamento di acqua impiegata per le pulizie di strumentazioni latte/casearie, ecc. in modo da valorizzare questo vettore energetico anche nel periodo primaverile/estivo.

I sistemi di cogenerazione di grossa taglia (superiori a 500 kW<sub>e</sub>) sono in genere progettati per funzionare almeno 7000 delle 8760 ore annue, con un utilizzo del tempo dell'ordine dell'80%. I cogeneratori di taglia più piccola, essendo caratterizzati da rendimenti elettrici più bassi e da costi di investimento più elevati in termini di €/kW<sub>e</sub> installato, sono in genere progettati per un funzionamento discontinuo in quanto devono poter valorizzare anche l'energia termica. In genere

sistemi di questo tipo possono funzionare per un numero di ore equivalenti compreso fra le 2000 e le 6000 ore annue a seconda delle tariffe elettriche e termiche dell'energia applicabili o del costo del combustibile utilizzato.

I sistemi cogenerativi sono di vario tipo, le tecnologie attualmente più utilizzate sono di seguito descritte.

### **Sistemi di cogenerazione a ciclo ORC**

ORC è l'acronimo di Organic Rankine Cycle ovvero "ciclo Rankine a fluido organico". Il ciclo Rankine è un ciclo termodinamico che converte il calore in lavoro. Il calore viene fornito esternamente a un circuito chiuso, che in origine usava l'acqua come fluido di lavoro.

Sebbene il Ciclo Rankine possa utilizzare anche l'acqua come fluido di lavoro, la sua applicazione più interessante si è sviluppata con l'utilizzo di appositi fluidi organici (normalmente un olio siliconico) in quanto ciò consente di sfruttare anche basse differenze di temperatura a livelli di temperatura inferiori ai 100°C ove l'acqua non vaporizzando non può essere utilizzata.

Per questi motivi gli ORC si sono rapidamente diffusi come "recuperatori" di produzione elettrica in molte applicazioni dove è disponibile calore di scarto a bassa temperatura oppure dove c'è un elevato fabbisogno termico continuo, come ad esempio negli essiccatori di legname delle segherie.

La trasformazione in energia meccanica avviene tramite espansione del vapore di fluido organico all'interno di una turbina, accoppiata ad un alternatore elettrico, e successiva condensazione dello stesso con conversione allo stato liquido in un condensatore ad aria oppure ad acqua.

Il recupero di calore utile dal condensatore per soddisfare il fabbisogno termico è possibile, ma in genere le temperature di recupero del calore sono basse (inferiori a 50°C).

### **Il motore stirling**

Il motore Stirling, o motore alternativo a combustione esterna funziona con un ciclo chiuso di espansione/compressione guidato dalla differenza di temperatura esistente tra una sorgente calda ed un punto freddo. Il ciclo chiuso normalmente utilizza come fluido di lavoro termodinamico un gas inerte quale l'aria, che però è stata sostituita nelle versioni moderne dei motori Stirling da elio oppure azoto che permettono di raggiungere efficienze maggiori. All'atto del raggiungimento di una opportuna differenza di temperatura fra sorgente calda e punto freddo si innesca una pulsazione ciclica che viene trasformata in moto alternato dei pistoni.



*Figura 1.11. Motore Stirling di Castel Daiano*

Può funzionare con qualsiasi tipo di sorgente di calore, ad esempio con calore solare concentrato oppure con calore fornito da una caldaia di combustione di biomassa legnosa, carbone, biogas, gas e/o combustibili liquidi. Ad oggi sono poche le applicazioni pratiche di questa tecnologia. Fra queste ritroviamo l'impianto realizzato a Castel d'Aiano (BO) dal Centro Innovazione per la Sostenibilità Ambientale (CISA) di Porretta Terme (BO).

Il sistema è costituito da un gassificatore di biomassa a tecnologia updraft da 200 kW<sub>t</sub> e da un motore Stirling della Stirling Denmark da 35 kW<sub>e</sub> e 140 kW<sub>t</sub>. Il gassificatore updraft gassifica il cippato trasformandolo completamente in un gas sintetico (syngas) a basso potere calorifico (1,26 kWh/Nm<sup>3</sup>).

Il syngas, difatti, esce dal gassificatore updraft ad una elevata temperatura di circa 700°C e viene, quindi, inviato alla camera di combustione esterna al motore Stirling dove viene completamente bruciato tramite un apposito bruciatore studiato per gas a basso potere calorifico. La temperatura di combustione del gas sintetico all'interno della camera di combustione è compresa nell'intervallo fra 800°C e 1250°C.

Il gassificatore presenta, inoltre, il non trascurabile vantaggio di poter gassificare direttamente biomassa legnosa con contenuto di umidità che può arrivare al 60% (tenore di umidità del cippato fresco di bosco) senza necessità di pre-essiccazione.

### **Sistemi di cogenerazione con turbine ad aria calda**

La microturbina modificata con ciclo ad aria calda ed alimentazione a biomasse è una innovazione tecnologica apparsa sul mercato dei sistemi di cogenerazione di piccola taglia alimentati a biomassa legnosa solida da pochi anni, a seguito della realizzazione di un innovativo scambiatore di aria calda ad alta temperatura, realizzato per primo dalla società MetalRef Hi-Tech di Pescia (PT).

Si differenzia da una normale microturbina a gas metano per aver sostituito il bruciatore di metano con uno scambiatore di calore ad alta temperatura installato all'interno di una caldaia a biomassa lignocellulosica. Questa apparecchiatura è in grado di fornire all'aria l'energia necessaria per la fase di espansione e la conseguente generazione di energia elettrica all'alternatore.

L'impianto è costituito da una caldaia alimentata a biomassa lignocellulosica ed il processo di conversione energetica della biomassa è di tipo termochimico e sfrutta la combustione in eccesso d'aria della biomassa legnosa all'interno di una caldaia.

Il ciclo termodinamico ha inizio mediante la compressione dell'aria da parte della sezione di compressione della microturbina seguito dal forte riscaldamento dell'aria ottenuto mediante trasferimento di calore da parte di uno scambiatore fumi-aria ad alta temperatura installato all'interno della caldaia stessa che aumenta considerevolmente l'entalpia della stessa e da una successiva espansione dell'aria calda attraverso la microturbina che consente di generare energia elettrica all'alternatore accoppiato alla stessa.

Il calore dei fumi della caldaia, che ha elevata temperatura, può essere recuperato in appositi scambiatori per produrre aria e acqua calda.

Il sistema ha il vantaggio di funzionare bene anche in impianti di piccola taglia (circa 100 kW<sub>e</sub>) con rese elettriche che si attestano attorno al 15% e con versatilità nella gestione dell'impianto.

### **Sistemi di cogenerazione con gassificatori**

La gassificazione è una tecnologia di conversione termochimica mediante la quale un combustibile solido viene trasformato in un combustibile gassoso di sintesi, comunemente denominato "syngas".

La gassificazione può essere applicata sia a combustibili fossili (ad esempio carbone) che a combustibili classificati come rinnovabili, quali la biomassa legnosa, che producono syngas con composizione diversa ma con problematiche tecnico-gestionali simili.

Il syngas è costituito da una miscela dei seguenti elementi e composti chimici: monossido di carbonio (CO), idrogeno molecolare (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), vapore d'acqua (H<sub>2</sub>O), azoto molecolare (N<sub>2</sub>), tracce di idrocarburi (etilene, etano), contaminanti (ceneri, tar, char, olii).

Il syngas può essere prodotto mediante combustione parziale della biomassa (utilizzando aria od ossigeno) oppure mediante gassificazione pirolitica (utilizzando vapore). In generale si può dire che nella gassificazione sono presenti, a seconda della tecnologia utilizzata, 4 fasi:

- essiccazione                      eliminazione di acqua dalla biomassa
- pirolisi                              formazione gas di pirolisi, char e tar
- ossidazione (incompleta)      fornisce calore per la fase di riduzione
- riduzione (endotermica)      produzione syngas

Il vantaggio della gassificazione è costituito dalla facilità di accensione, trasporto e completa combustione del gas di sintesi prodotto mentre lo svantaggio è costituito dal minor potere calorifico del gas prodotto rispetto a quello del materiale di partenza. In seguito ad un processo di raffreddamento e condensazione i composti organici condensabili formano una fase liquida scura (bio olio o tar). Fra i sottoprodotti possiamo ritrovare, anche, un residuo solido ricco in carbonio (biochar).

Il syngas prodotto necessita di purificazione prima dell'utilizzo; questa normalmente avviene con impiego di molteplici tecnologie quali filtraggi chimico-fisici ed elettrostatici e lavaggi in acqua.

A questo punto il syngas può essere impiegato in appositi motori endotermici, in motori a combustione esterna o con microturbine.

## **Processi biologici**

### **La digestione anaerobica e produzione di biogas**

La digestione anaerobica per la produzione di biogas è un processo chimico-biologico in cui la sostanza organica viene trasformata in biogas ad opera di differenti ceppi di microorganismi tra cui i metanigeni, quando si trovano in ambiente anaerobico. Il processo è svolto da un consorzio batterico e nessun ceppo batterico da solo è in grado condurre autonomamente la completa degradazione anaerobica della sostanza organica. Ciascuna popolazione opera un livello di degradazione e produce come cataboliti degli intermedi di reazione che fungono da substrato per la popolazione successiva nella catena trofica. I primi ad operare sono i batteri idrolitici che spezzano le macromolecole biodegradabili in sostanze più semplici, seguono i batteri acidogeni, che utilizzano come substrato i composti organici semplici liberati dai batteri idrolitici e producono acidi organici a catena corta. Poi intervengono i batteri acetogeni che producono acido acetico, acido formico, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>; batteri omoacetogeni che sintetizzano acetato partendo da anidride carbonica e idrogeno; batteri metanigeni, distinti in due gruppi: i) quelli che producono metano ed

anidride carbonica da acido acetico, detti acetoclastici; ii) quelli che producono metano partendo da anidride carbonica e idrogeno, detti idrogenotrofi.

Il processo di fermentazione anaerobica avviene in ambiente liquido e può essere quindi schematizzato nei seguenti quattro stadi:

- *idrolisi*: degradazione delle macromolecole organiche in molecole semplici (fino a monomeri);
- *fermentazione (acidogenesi)*: trasformazione delle molecole semplici in etanolo;
- *acetogenesi*: trasformazione degli alcoli e degli acidi grassi volatili in acetati, idrogeno e anidride carbonica;
- *metanogenesi*: trasformazione degli acetati, idrogeno e anidride carbonica in metano;
- *riduzione dell'anidride carbonica*: secondo la reazione  $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- *decarbossilazione dell'acido acetico*: secondo la reazione  $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{CO}_3$

Nel processo di produzione del biogas possono essere distinte tre differenti fasi:

- *fase aerobica*: nella quale i batteri utilizzano l'ossigeno disponibile (disciolto o dell'atmosfera interna al digestore) per crescere e moltiplicarsi; in questa fase l'energia liberata dalle intense attività microbiche innalza la temperatura della massa fino a 50-70°C, il pH diviene leggermente acido fino a valori di 6, l'anidride carbonica presente aumenta, la sostanza organica inizia ad essere degradata, il carico organico carbonioso (COD) è elevato;
- *fase anaerobica facoltativa*: quando l'ossigeno è finito i batteri utilizzano l'ossigeno legato alle molecole organiche; in questa fase si produce ulteriore anidride carbonica, una grande quantità di acidi organici e poca energia termica, il pH è compreso fra 5,5 e 6,5;
- *fase anaerobica metanigena*: rappresenta lo stadio finale della degradazione della sostanza organica durante il quale i batteri convertono le molecole organiche in metano e anidride carbonica.

I fattori che intervengono nel processo di digestione anaerobica e che consentono di controllarne l'efficienza sono molteplici: composizione chimica della biomassa, omogeneizzazione della massa, carico, grado di umidità, disponibilità di sostanze nutritive, capacità tampone, grado di umidità, temperatura, tempo di ritenzione, ecc.

Il biogas essendo insolubile nella biomassa si libera dal sistema, nella parte atmosferica del digestore e può essere raccolto.

### ***Impianti per la produzione di biogas***

Gli impianti per la produzione di biogas essenzialmente sono costituiti da:

- sistema di alimentazione: per convogliare la biomassa nel digestore (l'alimentazione può partire un serbatoio di pretrattamento al digestore);
- digestore (vasca o serbatoio chiusi ermeticamente per far svolgere la fermentazione anaerobica)
- sistema di riscaldamento e miscelatori per riscaldare ed omogeneizzare la massa all'interno del digestore;
- sistema di trattamento del biogas per la filtrazione, la deumidificazione, la desolfurazione, e nel caso di biometano sistema per l'eliminazione dell'anidride carbonica "upgrading" (rimozione della  $\text{CO}_2$ );

- serbatoio di stoccaggio del digestato.

A seconda dei gruppi batterici impiegati possiamo distinguere i sistemi mesofili (ottimo di temperatura fra 30 e 40°C) e termofili (ottimo di temperatura fra 40 e 55°C).

Per quanto riguarda l'umidità della biomassa possiamo distinguere due tecniche di digestione anaerobica, la digestione a secco (dry digestion) quando il contenuto in sostanza secca della biomassa è superiore al 20% (letame, FORSU) e digestione a umido (wet digestion), che è la più diffusa, quando il contenuto in sostanza secca è inferiore al 10%.

I digestori possono essere monostadio o bistadio. Nel primo caso le differenti fasi in cui si sviluppa il processo di degradazione anaerobica avvengono all'interno dello stesso digestore mentre nel secondo la fase di idrolisi e acido genesi avviene all'interno di un primo comparto, mentre la successiva fase di metanizzazione avviene in un secondo comparto.

La biomassa utilizzata può essere di differenti matrici (scarti dell'industria alimentare, deiezioni animali, FORSU, colture dedicate, ecc.). Sostanzialmente la resa in biogas è condizionata dalla quantità e dalla tipologia di carboidrati, proteine e lipidi contenuti nelle matrici di partenza. Tradizionalmente in agricoltura questa era rappresentata dagli effluenti zootecnici, ma sempre più questi sono stati integrati con biomasse coltivate (mais ceroso, tritale, sorgo, etc) che hanno consentito di aumentare l'efficienza dell'impianto

Il biogas prodotto può poi essere impiegato, previo trattamento di filtrazione, deumidificazione, desolfurazione e deidrogenazione, per la cogenerazione termoelettrica attraverso l'impiego di differenti tecnologie quali turbine, motori endotermici o a combustione esterna.

Altresì può essere ulteriormente epurato dell'anidride carbonica fino a raggiungere concentrazioni del 96-98% ed essere immesso in rete come biometano.

Il digestato può poi essere impiegato come fertilizzante con il limite del contenuto di azoto che è sottoposti a direttiva di regolamentazione. Per questo spesso viene effettuato un trattamento di separazione solido liquido che consente di diminuire i volumi di stoccaggio e di ottenere prodotti di più facile gestione. Il liquido viene impiegato per la fertilizzazione mentre il solido costituisce un ammendante organico appetibile nel mercato e che può quindi diminuire il carico di azoto aziendale.



*Figura 1.12. Bioreattore*

## **La fermentazione alcolica**

La fermentazione di matrici ricche di zuccheri, quali glucidi ed amido, porta alla formazione di alcool fra cui predominante è l'etanolo.

Dal punto di vista impiantistico le componenti essenziali sono quelle per l'estrazione degli zuccheri, o dei succhi zuccherini, il molino per la macinazione e l'idrolisi degli amidi, la vasca di fermentazione alcolica, il sistema di separazione solido/liquido ed il distillatore.

Attualmente questo tipo di vettore energetico trova il suo impiego più razionale per la produzione di biocarburanti, come componente della benzina o nella preparazione di ETBE (etere etilbutilico).

## **Processi fisici**

### **L'estrazione degli oli**

L'olio vegetale puro è il frutto dell'estrazione dell'olio da semi oleosi quali colza, girasole normalmente tramite processi fisici.

Il processo di produzione dell'olio vegetale puro può essere schematizzato nelle seguenti fasi:

- *essiccazione e stoccaggio dei semi oleosi*: la conservabilità dei semi oleosi è limitata rispetto a quella dei cereali; in particolare il girasole ha la tendenza ad impaccarsi durante la conservazione, ossia a formare agglomerati che sono di difficile gestione per la movimentazione (passaggio si coclee e griglie); altro problema è causato dalle alte temperature che possono causare fenomeni di irrancidimento con abbassamento dei valori di pH e dall'elevata umidità con conseguente formazione di muffa;
- *vagliatura soffiatura e decorticazione*: per mezzo di vagli e soffiatori si eliminano le impurità; la decorticazione è un processo che in alcuni casi viene fatto per migliorare il processo ed il prodotto;
- *pressatura*: avviene in continuo per mezzo di presse a cilindro forato o a colatoio con coclee che effettuano la pressatura e spremitura dei semi e quindi l'estrazione degli oli. Il processo può avvenire a caldo o a freddo (con temperature ambientali non troppo basse) e quindi con rese e costi energetici differenti. In alternativa può essere estratto chimicamente tramite solventi quali l'esano);
- *sedimentazione e filtrazione*: prima l'OVP viene stoccato in serbatoi in modo che le parti solide sedimentano, successivamente si filtra mediante filtri a cartone o per centrifugazione.

L'olio vegetale puro può essere impiegato come carburante nei motori diesel previa modifiche ed adattamenti degli stessi, viste le peculiarità quali la maggiore viscosità, la corrosività, l'elevato punto d'infiammabilità e la formazione di depositi ed incrostazioni. In Italia è stato riconosciuto come carburante con il Decreto Legislativo 30 maggio 2005 n° 128. L'impiego in agricoltura è possibile in regime agevolato per un totale di 50 q/anno in regime di esonero del deposito fiscale.

Altresì è possibile trasformarlo, tramite processi chimico/fisici in biodiesel direttamente impiegabile nei motori diesel. Il processo di trasformazione avviene mediante trans-esterificazione. In questo passaggio gli oli reagiscono con il metanolo, in presenza di un catalizzatore, per formare estere metilico e glicerina. Successivamente si operano i processi di pulitura, distillazione e condizionamento per ottenere il biodiesel.



Dalla spremitura dei semi si ottiene invece, come sottoprodotto, un pannello proteico.

L'olio vegetale può essere utilizzato in appositi motori endotermici per la cogenerazione termoelettrica.

## La logistica: raccolta e stoccaggio

Dal punto di vista logistico la raccolta, lo stoccaggio e la conservazione delle biomasse ad uso energetico è molto simile a quella messa a punto per le biomasse ad uso alimentare.

Per capire meglio la strada percorsa in quest'ultimo decennio, dobbiamo prendere in considerazione il fatto che il modello di sviluppo della produzione di energia rinnovabile da biomasse ligno-cellulosiche si sta evolvendo in due direzioni. Da un lato, va verso la nascita di impianti di piccole dimensioni, soprattutto ad uso termico, spesso legati allo stesso produttore di cippato per l'impiego diretto in azienda. Dall'altro, sono in corso di progettazione e realizzazione impianti di dimensioni maggiori che, pur rientrando nei termini di filiera corta, hanno bisogno di maggiori garanzie sull'approvvigionamento e di efficienti modelli logistici e di tecnologie adeguate per le fasi di trasporto e stoccaggio.

Nonostante le criticità, la costituzione di impianti cogenerativi in grado di coinvolgere una rete di più aziende sul territorio, può tradursi in una nuova opportunità per il settore agricolo locale legata sia alla produzione di cippato, capace di valorizzare biomasse residuali quali gli scarti di potatura, sia alla produzione di biomassa da colture energetiche dedicate, rappresentate, nel nostro territorio, soprattutto dalle oleaginose.

Particolarmente impegnativa è la filiera delle biomasse ligno-cellulosiche ed in particolare quella dei cippati provenienti dai residui delle coltivazioni. A tale riguardo la logistica di recupero, trasporto e conservazione delle potature di vite ed olivo non è ancora stata analizzata nel dettaglio, mentre molti passi avanti sono stati fatti nel campo forestale sia per le tecniche di produzione di cippato sia per quelle di allestimento del cantiere. Il recupero delle potature richiede una logistica differente da quella forestale dato che siamo di fronte a biomasse meno dense nel territorio (circa 15 q/ha per vite ed olivo a fronte di 600-1000 q/ha per cedui) e presenti tutti gli anni. Questa differenza non permette l'allestimento di cantieri troppo complessi, ma piuttosto risulta necessaria una meccanizzazione idonea alla riduzione dei costi di recupero, di movimentazione e di trasporto. Dati che derivano da lavori in campo forestale, in bibliografia, ci indicano che l'estrazione dal bosco e il trasporto fino all'utente finale possono incidere per oltre la metà del costo totale. Mentre non sono presenti lavori articolati che analizzino la filiera di recupero di biomassa di vite ed olivo in maniera completa. Dal punto di vista ambientale l'impiego energetico dei residui di potatura delle coltivazioni arboree, quali olivo, vite e fruttiferi risulta auspicabile, compatibilmente con la realtà ecologica del territorio. Gli aspetti da tener presente per valutare la sostenibilità ambientale delle biomasse solide riguardano, principalmente, le emissioni legate: all'estrazione o coltivazione della materia prima, al cambiamento negli stock di carbonio del suolo, ai processi di trasformazione, trasporto e distribuzione, alla combustione al momento dell'uso. In tale ottica ben si intende come le biomasse legnose, derivanti da potature, assumano un elevato valore ambientale poiché non implicano un cambio d'uso del suolo, e quindi una possibile riduzione del serbatoio di carbonio del terreno; non comportano per la loro coltivazione input energetici aggiuntivi al sistema produttivo, al contrario delle biomasse dedicate, e richiedono per le tipiche fasi della trasformazione (es. cippatura e pellettizzazione) un minore consumo energetico rispetto ai processi necessari alla produzione dei biocarburanti. Pertanto, come evidenziato dalla relazione dell'Unione Europea, se si utilizzano residui legnosi, forestali o agricoli, il taglio di GHG è elevato e corrisponde in generale a un valore superiore all'80% rispetto ai combustibili fossili. D'altro canto però, in relazione alla bassa densità

energetica e agli elevati volumi della materia prima, un aspetto critico è rappresentato dalle emissioni di GHG necessarie per movimentare, trasportare e distribuire la biomassa legnosa dalle aree di approvvigionamento ai punti di utilizzo. Un ulteriore aspetto critico riguarda l'impiego dei residui di coltivazioni erbacee, quali paglie, stocchi di girasole, stocchi e tutoli di mais, che va in diretta concorrenza con il principale apporto di sostanza organica al terreno, e, quindi, con lo stoccaggio del carbonio nel terreno, e con la principale risorsa di fertilità biologica dei nostri suoli. Tali aspetti vanno quindi ad evidenziare la necessità, al fine di mantenere la sostenibilità ambientale di valorizzare l'impiego delle potature arboree e di valutare meglio l'impiego dei residui delle coltivazioni erbacee. Per la prima tipologia, inoltre, risulta utile la valorizzazione nell'ambito di filiere corte che prevedano l'impiego di modelli logistico-gestionali capaci di minimizzare i costi energetici legati al trasporto e distribuzione del prodotto sul territorio.

Infine, se si considera che i costi in termini di emissioni di GHG sono primariamente correlati ai costi energetici e che gli input energetici sono direttamente implicati nella determinazione dei costi di produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, risulta chiaro come la sostenibilità economica della produzione ed impiego di biomasse legnose a scopi energetici segua di pari passo quella ambientale. Pertanto, trovare soluzioni ai limiti energetici-ambientali equivale a fornire incentivi allo sviluppo del relativo mercato e al superamento dei vincoli di natura economica per i soggetti coinvolti nella filiera.



*Figura 1.13. I residui delle potature spesso vengono bruciati in loco*

## **Il recupero dei residui delle biomasse energetiche**

L'opportunità di raccogliere le biomasse da potature agricole (vite, olivo, fruttiferi, ecc.) è limitatata dalla logistica e dai costi di recupero e stoccaggio. Per i semi oleosi (principalmente girasole, specie ad alta vocazione nei nostri territori) l'impedimento maggiore è invece la messa a punto di adeguate

tecniche di conservazione per periodi di almeno 10 mesi, senza andare incontro a fenomeni di "impaccamento" e "inrancidimento".

Negli ultimi anni si è assistito all'aumento dell'interesse verso la valorizzazione dei residui colturali in genere, ed in particolare di quelli derivanti da potature. Questo è avvenuto sia per la disponibilità di macchine adatte al recupero del prodotto sia perché sussistono i presupposti economici per il loro impiego ai fini della produzione di energia.

Le quantità e la qualità delle ramaglie residue dipendono da diversi fattori, quali varietà, sviluppo delle piante, forma d'allevamento, intensità e periodicità di potatura. Se la potatura viene effettuata con intervalli più lunghi di due anni, avviene tradizionalmente una riutilizzazione dei ciocchi più grandi come legna da ardere. Con l'eccezione di questo caso la gestione degli scarti di potatura, viene considerata come un problema di smaltimento, piuttosto che come un'operazione potenzialmente produttiva. Lo smaltimento del materiale ritenuto non commerciabile nella visione tradizionale, ed ancora largamente praticato, può avvenire in due modi: triturazione in campo ed interrimento successivo od allontanamento in capezzagna e bruciatura. Il primo caso è stato sconsigliato per motivi fitosanitari, quindi la bruciatura è tuttora una pratica molto utilizzata.

Per procedere invece alla valorizzazione del sottoprodotto possiamo avere due alternative: l'utilizzazione delle ramaglie per la produzione di compost di qualità, oppure l'immissione del legno residuo in una filiera per la produzione di energia.

Prevalentemente si utilizzano due metodologie per la raccolta dei residui di potatura in campo: la triturazione immediata con produzione e successiva movimentazione di cippato di legno, oppure la compattazione delle ramaglie con la produzione di presse di diversa forma e dimensioni e la loro successiva movimentazione.

Per il recupero delle potature di vite, olivo, fruttiferi, esistono varie esperienze e prove di macchine e tecniche, e a titolo di esempio riportiamo alcuni articoli, che trattano l'argomento, prodotti negli ultimi anni:

- New shredding machine for recycling pruning residuals; L. Recchia, M. Daou, M. Rimediotti, E. Cini, M. Vieri. Biomass and Bioenergy 33, 2009;
- Guadagnare con i residui legnosi grazie alla trituratrice spagnola; G. Picchi, R. Spinelli, J. Lobo. Informatore Agrario 17/2009;
- Residui di potatura di vite per fare energia; A. Cristoforetti, S. Silvestri. L'Informatore Agrario 10/2009;
- Vendere calore si può e conviene; D. Del Zotto. Terra e Vita 44/2009;
- Raccolta dei residui di potatura conviene per i viticoltori; R. Spinelli N. Magagnotti. L'Informatore Agrario 6/2009;
- Quale Macchina scegliere per raccogliere i residui di potature; M. Valer. L'Informatore Agrario, 8/2010;
- I residui legnosi dell'agricoltura; R. Spinelli, C. Lombardini. L'Informatore Agrario 19/2010;
- Harvesting Vineyard pruning residues for energy use; R. Spinelli, N. Magagnotti, C. Nati. Biosystems Engineering 105, 2010;
- Industrial harvesting of olive tree pruning residue for energy biomass; R. Spinelli, G. Picchi. Bioresource Technology 101, 2010;
- Il cippato di vite nella caldaia annulla i costi per gasolio o gpl; V. Francescato, M. Golfetto. L'Informatore Agrario 11/2010;



*Figura 1.14. sistemi mobili per la cippatura fuori campo.*

## **Il cantiere e i macchinari per la raccolta delle biomasse energetiche**

Le macchine per la valorizzazione del residuo di potatura sono derivate dalle analoghe macchine per la trinciatura e per l'imballaggio dei foraggi attraverso opportune modifiche.

Il cantiere di lavoro può prevedere quattro differenti soluzioni logistiche:

- macchine imballatrici con successivo recupero in campo del prodotto "confezionato";
- macchine trincia raccoglitrice che trasferiscono il prodotto in un carrello di carico trainato da una trattrice che opera in parallelo;
- macchine trincia-raccoglitrice dotate di vano di carico;
- macchine scippatrici a fermo per operare su residui fuori campo.

Le macchine imballatrici si adattano bene ad una riutilizzazione del legno ai fini energetici anche a piccola scala, con riutilizzazione aziendale del prodotto e/o in un piccolo bacino d'utenza. Di conseguenza si hanno imballatrici a balle prismatiche e rotoimballatrici o su grossi sacchi. Le tipologie di macchine impiegate dipendono essenzialmente sia da fattori aziendali quali orografia e, sistemi di coltivazione, ecc. sia da fattori extra-aziendali, ovvero dalla forma di utilizzazione a cui sono destinati i residui legnosi.

Per uso aziendale del prodotto sono molto diffuse le imballatrici che producono presse quadrate o parallelepipedo, dal peso inferiore a 30 kg e con dimensioni tali da essere utilizzate facilmente nei forni per la cottura. Riferendosi ad un modello di rotoimballatrice tra le più conosciute, che può essere azionata da un solo operatore, si vede che le rotoballe (presse che hanno un volume di circa 2,2 m<sup>3</sup> e una massa di circa 3 t, con produttività di circa 60-70 balle al giorno), invece, garantiscono maggiore economicità di lavoro, specialmente per quanto riguarda la loro movimentazione, ma di contro possono essere convenientemente impiegate solo quando esiste un mercato "energetico" per la loro utilizzazione. Un limite all'impiego di queste macchine a livello di filiera è rappresentato dal fatto che il materiale prodotto richiede una successiva lavorazione di cippatura in cantiere separato.



*Figura 1.15. Rotoballa di sarmenti di vite per la raccolta in vigneto.*



*Figura 1.16. Cantiere di trinciatura a bordo campo.*

Un modello logistico differente prevede, invece, lo sminuzzamento del materiale nei pressi a bordo campo o presso i punti di stoccaggio.

Lo sminuzzamento del materiale si rende necessario nel caso di lunga conservazione, specialmente per i residui raccolti tra fine inverno e inizio primavera, caratterizzati generalmente da elevati tenori di umidità, dove risulta utile anche la movimentazione della biomassa per un'essiccazione naturale.

Per la trinciatura in campo, le soluzioni tecnologiche disponibili prevedono trinciatrici dotate di convogliatore per il carico e un carrello che può essere posto o in linea (utilizzando una sola trattore), oppure (nei vigneti e negli oliveti intensivi a parete) può essere messo in parallelo sull'interfilare adiacenti (utilizzando quindi due trattori). In commercio sono attualmente disponibili anche trinciatrici semiportate dotate di vano di carico e trasporto del materiale entro il campo. Tutte queste soluzioni sono idonee nei casi in cui lo stoccaggio del materiale avviene nelle immediate vicinanze (pochi chilometri) dal luogo di produzione, mentre nel caso in cui la distanza



aumenti, per evitare che il processo di trasporto incida fortemente sui costi di produzione, viste le piccole dimensioni dei carrelli per vigneti o oliveti, occorre trasferire il materiale su carrelli di maggiori dimensioni o su scarrabili associati a camion o trattrici agricole.



*Figura 1.17. sistemi di movimentazione degli scarrabili con trattrici agricole, per interventi in campo anche in stagioni piovose.*

Una tecnologia, ancora poco sviluppata, ma che può semplificare la logistica del recupero sono le macchine trincia caricatori. In questo sistema la biomassa tritata si comporta come un fluido e può essere movimentata più agevolmente rispetto alle presse tradizionali. In Italia ci stiamo indirizzando adesso verso questa nuova tecnologia, e le tre principali tipologie di macchinari che vengono adattati sono: le trincia sarmenti modificate, le sminuzzatrici modificate e le pota-raccogliatrici.

Come detto in precedenza, l'aspetto che presenta maggiore criticità è senz'altro quello della fase logistica, infatti come per molti prodotti di basso valore rispetto al volume, l'anello delicato della filiera è il costo di trasporto.

In quest'ottica risulta interessante pensare alle biomasse con la stessa logica delle "smart grid", ossia delle cosiddette "reti intelligenti", adottata per la distribuzione di energia elettrica. Nel campo elettrico questa nuova tecnologia consente, infatti, agli eventuali surplus di energia di essere ridistribuiti, in modo dinamico ed in tempo reale, dalle zone eccedenti ad altre aree deficitarie. La possibilità di poter stoccare i surplus o movimentarli, secondo un modello dinamico e con criteri gestionali controllabili, permetterebbe di entrare in una logica di rete intelligente assolutamente vantaggiosa tenuto conto che la produttività di biomasse è variabile di anno in anno in funzione di numerosi fattori influenti, primo fra tutti quello climatico.

Emblematico risulta il caso dei sottoprodotti, che è ancora più delicato, visto che vanno valorizzate proprio quelle produzioni che di per se non hanno ancora un valore. Inoltre va considerata la forma e il modo in cui verrà trasportato il prodotto ottenuto verso il centro di stoccaggio. In questa analisi si prende in considerazione un prodotto trinciato e compattato, come visto prima. In questo caso le ipotesi percorribili per trasportare i residui colturali ai centri di stoccaggio possono essere due: in proprio o tramite trasportatore in conto terzi. Nel primo caso le aziende agricole generalmente utilizzano come mezzo di trasporto una trattoria con carrello trasportatore, ed i costi da considerare sono relativi ai consumi ed agli ammortamenti. Tale soluzione può essere adottata per brevi distanze, generalmente inferiori ai 10 Km. Nel secondo caso è da prevedere il ricorso ad un camion.

## Lo stoccaggio delle biomasse energetiche

Per quanto riguarda lo stoccaggio, la conservazione e la movimentazione delle biomasse, il costo delle operazioni è attualmente un problema aperto sia per le biomasse alimentari sia per quelle ad uso energetico. Gli attuali costi di mercato delle biomasse impongono, infatti, una revisione delle possibili soluzioni atte alla produzione, stoccaggio e conservazione, al fine di rendere meno onerose e più flessibili, nel tempo e nel territorio, i modelli logistico-gestionali, le tecniche e le tecnologie adottate. Le biomasse agroforestali hanno, infatti, in genere un prezzo di commercializzazione che non consente ricavi adeguati rispetto alle spese sostenute dagli stoccatore e ai costi per i trasporti eccedenti le brevi distanze tra centro di produzione e di stoccaggio. Questo fattore si ripercuote, naturalmente, sui produttori primari, gli agricoltori, che vedono penalizzato il prezzo di vendita della biomassa da questo aggravo.

I tradizionali sistemi di stoccaggio sono rappresentati da magazzini piani in muratura (capannoni), da semplici piazzali più o meno delimitati da muretti di contenimento (terminal) o da forme intermedie quali le trincee utilizzate per gli insilati.

Per quanto riguarda il cippato, l'essiccazione e la conservazione eseguite correttamente evitano i fenomeni degradativi che ne diminuiscono il potere calorifico e di conseguenza il valore commerciale.

Il magazzino per lo stoccaggio è nel migliore dei casi costituito da una semplice copertura. Recentemente è stato proposto l'impiego del telo geotessile che permette la perdita di umidità e impedisce il passaggio di acqua meteorica. Le prove attualmente svolte riguardano però il cippato prodotto da specie forestali la cui dimensione e la cui porosità dei cumuli è spesso maggiore di quello prodotto da vite ed olivo. Per quest'ultimi la raccolta avviene spesso in un periodo piovoso, quale la fine dell'inverno, e la movimentazione dei cumuli e la conservazione in luogo riparato diminuisce di molto i fenomeni degradativi.

Nei terminal forestali è stato calcolato che il costo di gestione e stoccaggio del cippato si aggira intorno ad 1 euro a m<sup>3</sup>:

Il tema della conservazione del cippato è ampiamente trattato in bibliografia, alcuni articoli divulgativi che affrontano l'argomento sono di seguito riportati:

- Il cippato fresco si stagiona sotto il telo geotessile; V. Francescato, A. Paniz, E. Antonini. L'Informatore Agrario 33/2007;
- Il cippato conservato al coperto mantiene più potere calorifico; R. Spinelli, P. Kofman, N. Mangagnotti. L'Informatore Agrario 05/2007;
- Come migliorare il cippato attraverso lo stoccaggio; L. Pari, F. Sissot. L'Informatore Agrario 29/2009;
- L'essiccazione naturale del cippato di pioppo; F. Gallucci, F. Sissot, E. Giannini. L'Informatore Agrario 29/2009;





*Figura 1.18. Silos a trincea e terminal per lo stoccaggio del cippato.*

## Le potenzialità energetiche dei residui ligno-cellulosici

Una valutazione delle potenzialità energetiche è stata fatta per i principali residui del settore agroforestale e per le colture dedicate producibili.

Per i residui delle coltivazioni sono stati presi in considerazione i soli residui delle coltivazioni arboree. I residui delle coltivazioni erbacee, quali paglie, stocchi e tutoli di mais, stocchi di girasole sono, infatti, utilizzati a scopo zootecnico o tritati e lasciati sul terreno e per molti suoli questo apporto di sostanza organica costituisce un prezioso contributo alla fertilità chimica, fisica e biologica. L'impiego energetico di questi residui richiede, quindi, un'attenta valutazione circa i benefici ambientali ottenibili. Molto differente è il ragionamento per le potature di olivo, vite e fruttiferi. Attualmente dalle potature viene recuperata la legna di maggiore pezzatura mentre la restante parte viene trinciata ed interrata in loco o più spesso allontanata e bruciata. Quest'ultima pratica è molto diffusa soprattutto a causa delle indicazioni che sono state date in tal senso negli anni passati al fine di prevenire le malattie delle colture stesse.

Per quanto riguarda, invece, le deiezioni animali e il biogas molti sono gli studi pubblicati, ma nella presente ricerca non sono stati presi in considerazione in quanto spesso la componente principale dei biodigestori deriva da colture dedicate, quindi risulta difficile farla rientrare nella categoria dei residui.

Nella presente ricerca per le colture dedicate destinabili alla produzione di biocombustibili ligno-cellulosici è stata valutata la conversione energetica delle produzioni potenziali ottenibili dai terreni ritirati dalla produzione e quelle ottenibili sul 10% della SAU (come valutato nel capitolo delle potenzialità produttive).

La loro conversione energetica è stata ipotizzata in impianti di cogenerazione termoelettrica di piccola taglia.

Per avvicinarsi, quanto più possibile, ad un valore energia producibile reale le produzioni potenziali dei residui delle arboree sono state decurtate della quota tecnicamente non recuperabile (perdite di raccolta), della parte di pezzatura maggiore attualmente già recuperata e delle piccole superfici tecnicamente ed economicamente non interessabili dal recupero. E' stato quindi ipotizzato il recupero di circa il 70%.

Per la conversione energetica è stato preso in considerazione un cogeneratore di piccole dimensioni con resa elettrica del 18% e termica recuperabile del 45%.

I valori ottenuti sono stati tradotti in termini di utenze termiche ed elettriche. Per tale ipotesi sono stati considerati i consumi elettrici e termici medi per m<sup>2</sup> di abitazione e la superficie media delle abitazioni. Gli indici utilizzati si riferiscono alle elaborazioni dell'AEEG e di altre fonti bibliografiche.

Dai risultati emerge che dal corretto sfruttamento dei residui di potatura possono essere prodotti circa 2.260.000 MWh elettrici e 5.660.000 MWh termici che rispettivamente possono corrispondere alle necessità di 846.000 e 666.000 utenze abitative medie.

Rendimento elettrico impianto cogenerazione	18%
Rendimento termico recuperabile	45%
Potere calorifico inferiore medio( MJ/kgss)	18.2
Consumo elettrico tipico utenza residenziale (kWh/m2 anno)	31.5
Consumo termico tipico utenza residenziale (kWh/m2 anno)	100
Superficie residenziale considerata pera utenza tipica (m2)	85

Regione	Combustibile ligno-cellulosico (t)	Producibilità annua		Utenze servibili	
		elettrica (MWh)	termica (MWh)	elettrica (n°)	termica (n°)
Piemonte	93947	85457	213643	31917	25134
Valle d'Aosta	1080	982	2455	367	289
Lombardia	33159	30304	75760	11318	8913
Trentino Alto Adige	51100	46207	115518	17258	13590
Veneto	114617	104576	261441	39057	30758
Friuli Venezia Giulia	24087	22057	55143	8238	6487
Liguria	8731	7938	19844	2965	2335
Emilia Romagna	150535	136419	341048	50950	40123
Toscana	163256	148773	371933	55564	43757
Umbria	43978	40069	100173	14965	11785
Marche	32094	29293	73231	10940	8615
Lazio	151254	137144	342860	51221	40337
Abruzzo	81903	74634	186584	27874	21951
Molise	25856	23525	58812	8786	6919
Campania	164950	149293	373232	55758	43910
Puglia	538406	489676	1224190	182886	144022
Basilicata	59940	54290	135726	20276	15968
Calabria	230423	208825	522063	77993	61419
Sicilia	434401	394259	985649	147249	115959
Sardegna	89526	81497	203742	30438	23970
<b>TOTALE</b>		<b>2265219</b>	<b>5663047</b>	<b>846020</b>	<b>666241</b>

Tabella 1.3. Produzione potenziale di energia termica ed elettrica ottenibile dalla termovalorizzazione dei residui di potatura di coltivazioni arboree nelle differenti regioni italiane e utenze elettriche e termiche servibili.

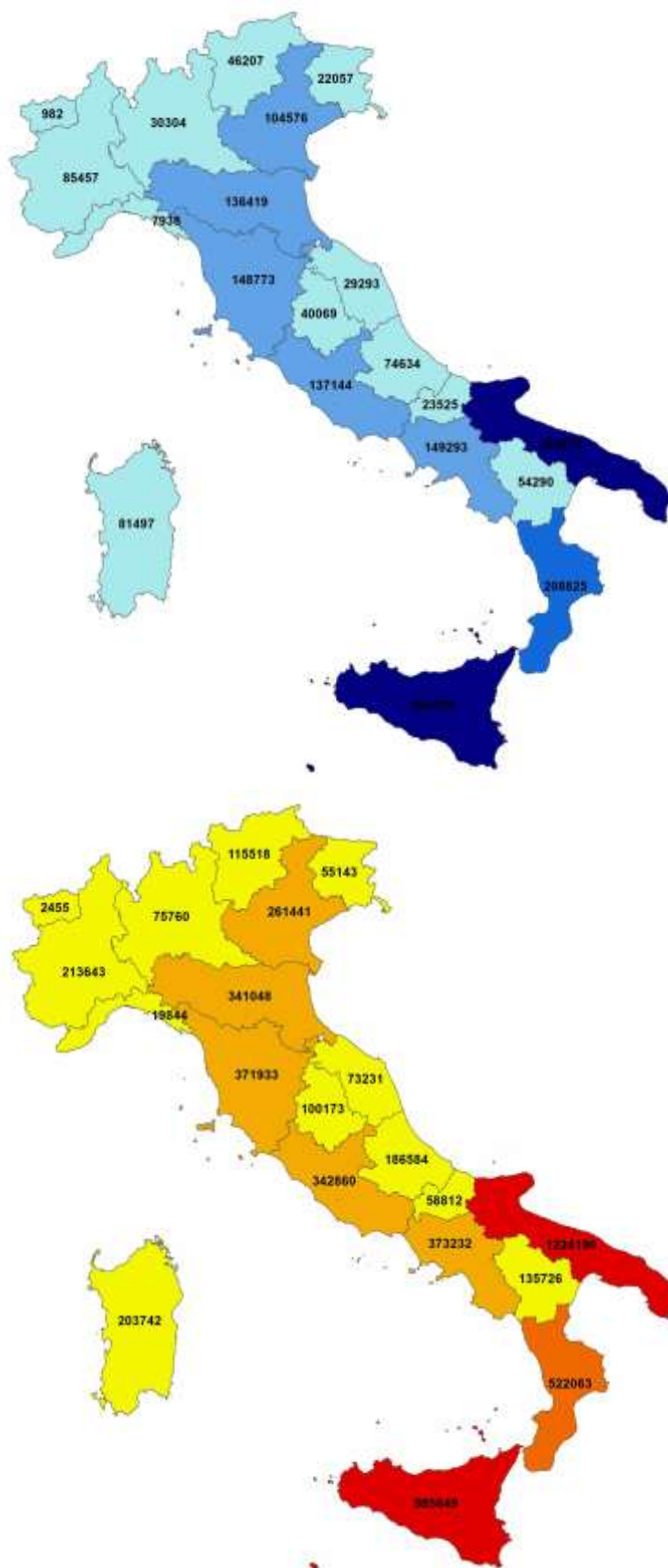
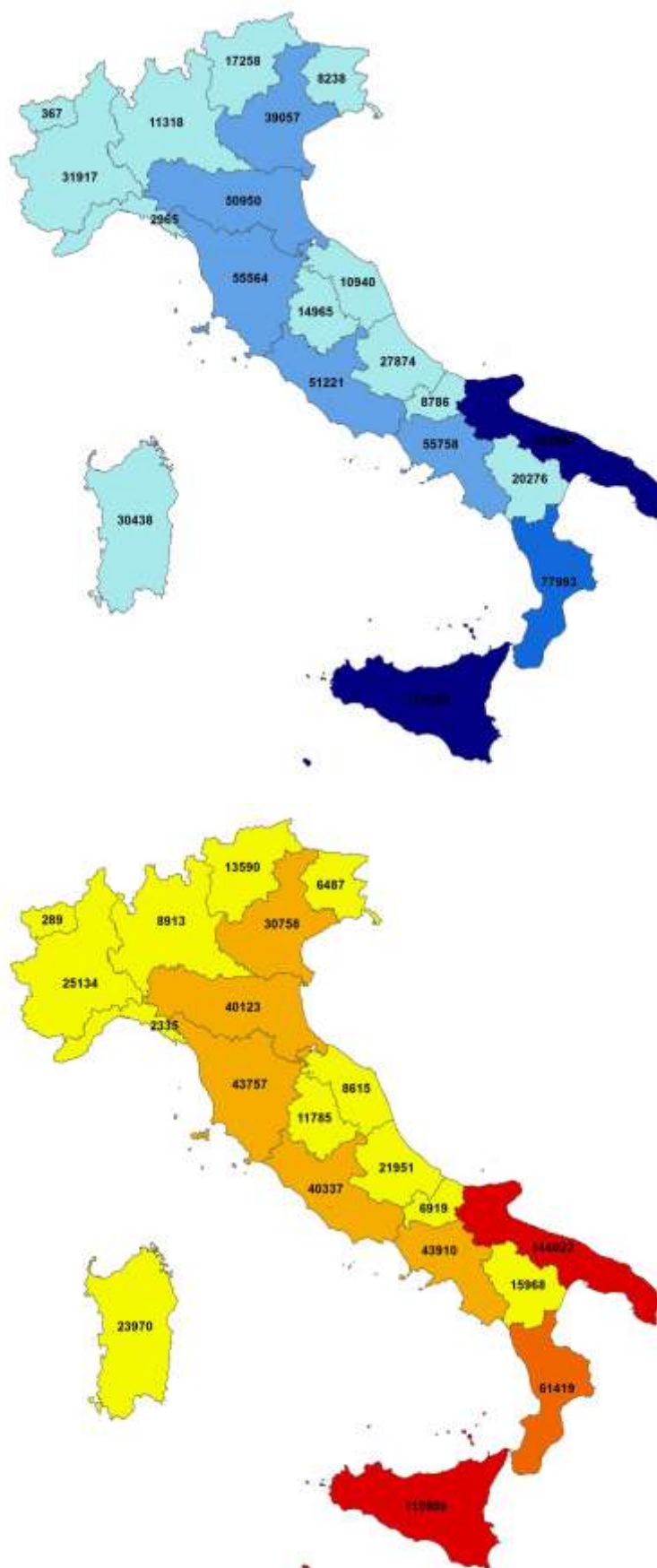


Figura 1.19. Produzione potenziale di energia elettrica (sopra) e termica (sotto), in MW ora, ottenibile dalla termovalorizzazione dei residui di potature di piante da frutto (vite, olivo e fruttiferi) nelle differenti regioni italiane.



*Figura 1.20. Numero di utenze abitative che potrebbero essere servite elettricamente dalla termovalorizzazione di biocombustibili ligno-cellulosici producibili da residui di potature di piante da frutto (vite, olivo e fruttiferi) nelle differenti regioni italiane.*



L'energia ricavabile dal biocombustibile prodotto da colture dedicate è, invece, in quantità molto differente a seconda che si considerino i terreni ritirati dalla produzione o il 10% della superficie agricola coltivabile.

Dall'analisi emerge che l'energia elettrica potenziale ricavabile a livello nazionale dalla conversione energetica è di circa 3.950.000 MWh annui nei terreni ritirati dalla produzione a fronte di circa 8.673.000 se consideriamo il 10% della SAU.

Equivalentemente per l'energia termica potenziale risultano circa 9.887.000 MW nei terreni ritirati dalla produzione a fronte di 21.682.000 nel 10% della SAU.

Per le utenze abitative medie dal punto di vista elettrico possono essere soddisfatte 1.477.000 e 3.239.000 unità a seconda che si considerino i terreni ritirati dalla produzione o parte della SAU. A livello di necessità termiche è invece teoricamente possibile fornire servizio a circa 1.163.000 o 2.550.000 abitazioni in base alle superfici coltivate considerate.

Rendimento elettrico impianto cogenerazione	18%
Rendimento termico recuperabile	45%
Potere calorifico inferiore medio( MJ/kgss)	18.0
Consumo elettrico tipico utenza residenziale (kWh/m2 anno)	31.5
Consumo termico tipico utenza residenziale (kWh/m2 anno)	100
Superficie residenziale considerata per utenza tipica (m2)	85

Regione	Combustibile ligno-cellulosico (t)	Producibilità annua		Utenze servibili	
		elettrica (MWh)	termica (MWh)	elettrica (n°)	termica (n°)
Piemonte	153916	138137	345341	51592	40628
Valle d'Aosta	118019	105920	264800	39559	31153
Lombardia	410414	368338	920845	137568	108335
Trentino Alto Adige	252096	226251	565628	84501	66544
Veneto	337172	302605	756512	113018	89001
Friuli Venezia Giulia	135451	121565	303912	45402	35754
Liguria	156011	140017	350041	52294	41181
Emilia Romagna	469086	420995	1052487	157234	123822
Toscana	753831	676548	1691370	252679	198985
Umbria	289380	259713	649282	96998	76386
Marche	146491	131473	328681	49103	38668
Lazio	544340	488534	1221336	182459	143687
Abruzzo	0	0	0	0	0
Molise	135739	121823	304557	45499	35830
Campania	289463	259788	649469	97026	76408
Puglia	0	0	0	0	0
Basilicata	189389	169973	424933	63482	49992
Calabria	25829	23181	57953	8658	6818
Sicilia	0	0	0	0	0
Sardegna	0	0	0	0	0
<b>TOTALE</b>		<b>3954859</b>	<b>9887148</b>	<b>1477072</b>	<b>1163194</b>

Tabella 1.4. Produzione potenziale di energia termica ed elettrica ottenibile dalla termovalorizzazione di biocombustibili ligno-cellulosici producibili nei terreni ritirati dalla produzione nelle differenti regioni italiane e utenze elettriche e termiche servibili.

Rendimento elettrico impianto cogenerazione	18%
Rendimento termico recuperabile	45%
Potere calorifico inferiore medio( MJ/kgss)	18.0
Consumo elettrico tipico utenza residenziale (kWh/m2 anno)	31.5
Consumo termico tipico utenza residenziale (kWh/m2 anno)	100
Superficie residenziale considerata per utenza tipica (m2)	85

Regione	Combustibile ligno-cellulosico (t)	Producibilità annua		Utenze servibili	
		elettrica (MWh)	termica (MWh)	elettrica (n°)	termica (n°)
Piemonte	786263	705655	1764138	263550	207546
Valle d'Aosta	41538	37280	93200	13923	10965
Lombardia	738653	662926	1657316	247591	194978
Trentino Alto Adige	285377	256120	640301	95657	75330
Veneto	604739	542742	1356854	202705	159630
Friuli Venezia Giulia	164932	148023	370059	55284	43536
Liguria	32275	28966	72415	10818	8519
Emilia Romagna	800080	718056	1795139	268181	211193
Toscana	566471	508397	1270992	189877	149528
Umbria	245901	220692	551729	82424	64909
Marche	354798	318424	796060	118926	93654
Lazio	486354	436493	1091233	163023	128380
Abruzzo	337491	302892	757230	113125	89086
Molise	147396	132285	330712	49406	38907
Campania	410598	368504	921260	137630	108383
Puglia	960657	862170	2155426	322006	253580
Basilicata	384211	344821	862053	128785	101418
Calabria	413554	371156	927890	138620	109164
Sicilia	1038032	931613	2329033	347941	274004
Sardegna	864567	775932	1939830	289797	228215
<b>TOTALE</b>		<b>8673147</b>	<b>21682869</b>	<b>3239271</b>	<b>2550926</b>

Tabella 1.5. Produzione potenziale di energia termica ed elettrica ottenibile dalla termovalorizzazione di biocombustibili ligno-cellulosici producibili nel 10% della superficie agricola utilizzabile nelle differenti regioni italiane e utenze elettriche e termiche servibili.

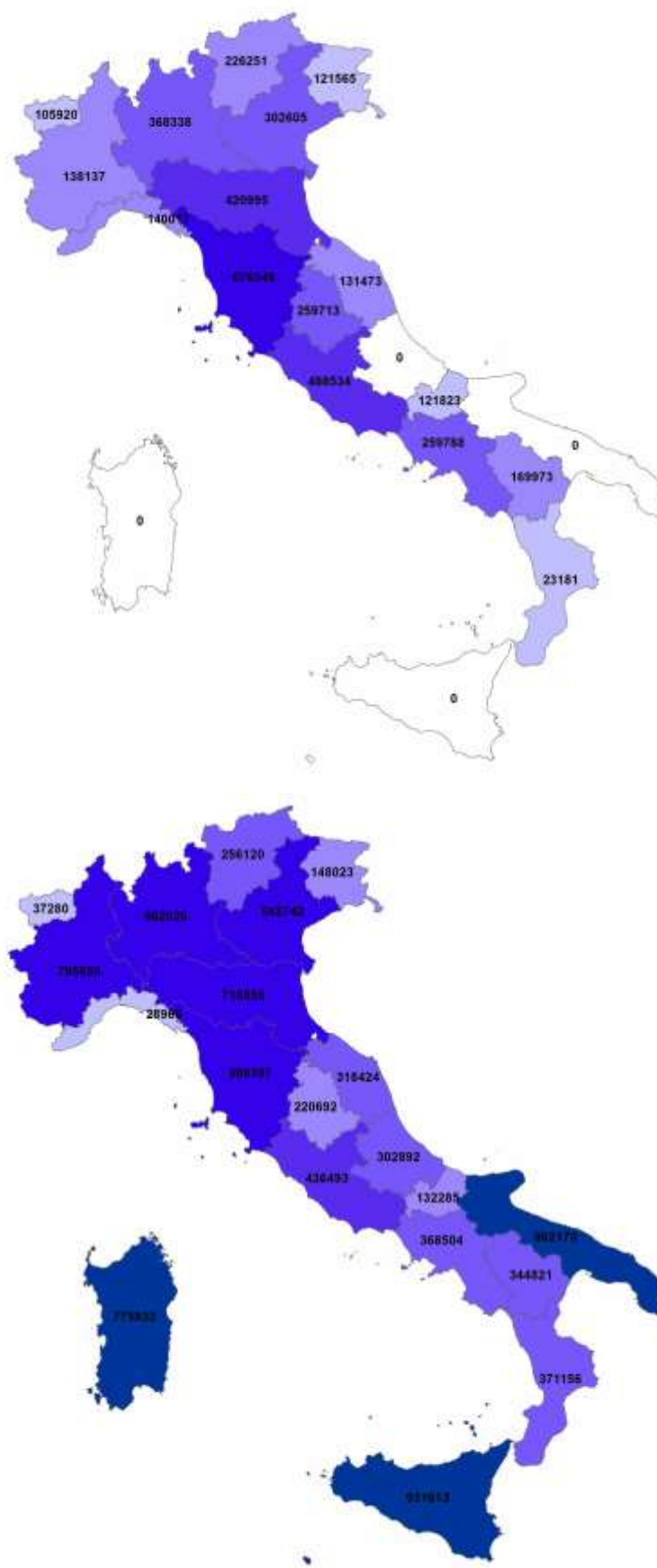


Figura 1.21. Produzione potenziale di energia elettrica (MWh) ottenibile dalla termovalorizzazione di biocombustibili ligno-cellulosici producibili nei terreni ritirati dalla produzione (sopra) e nel 10% della superficie agricola utilizzabile (sotto) nelle differenti regioni italiane.



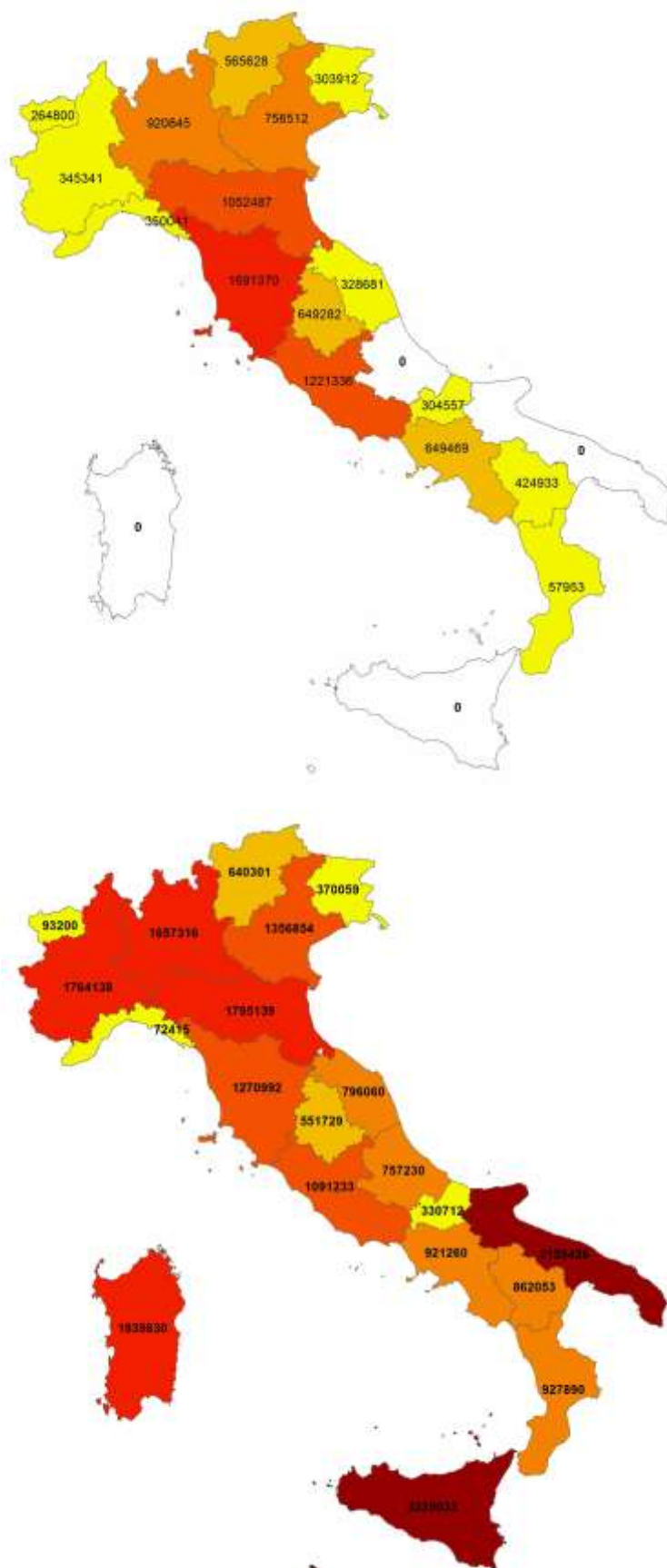


Figura 1.22. Produzione potenziale di energia termica (MWh) ottenibile dalla termovalorizzazione di biocombustibili ligno-cellulosici producibili nei terreni ritirati dalla produzione (sopra) e nel 10% della superficie agricola utilizzabile (sotto) nelle differenti regioni italiane.

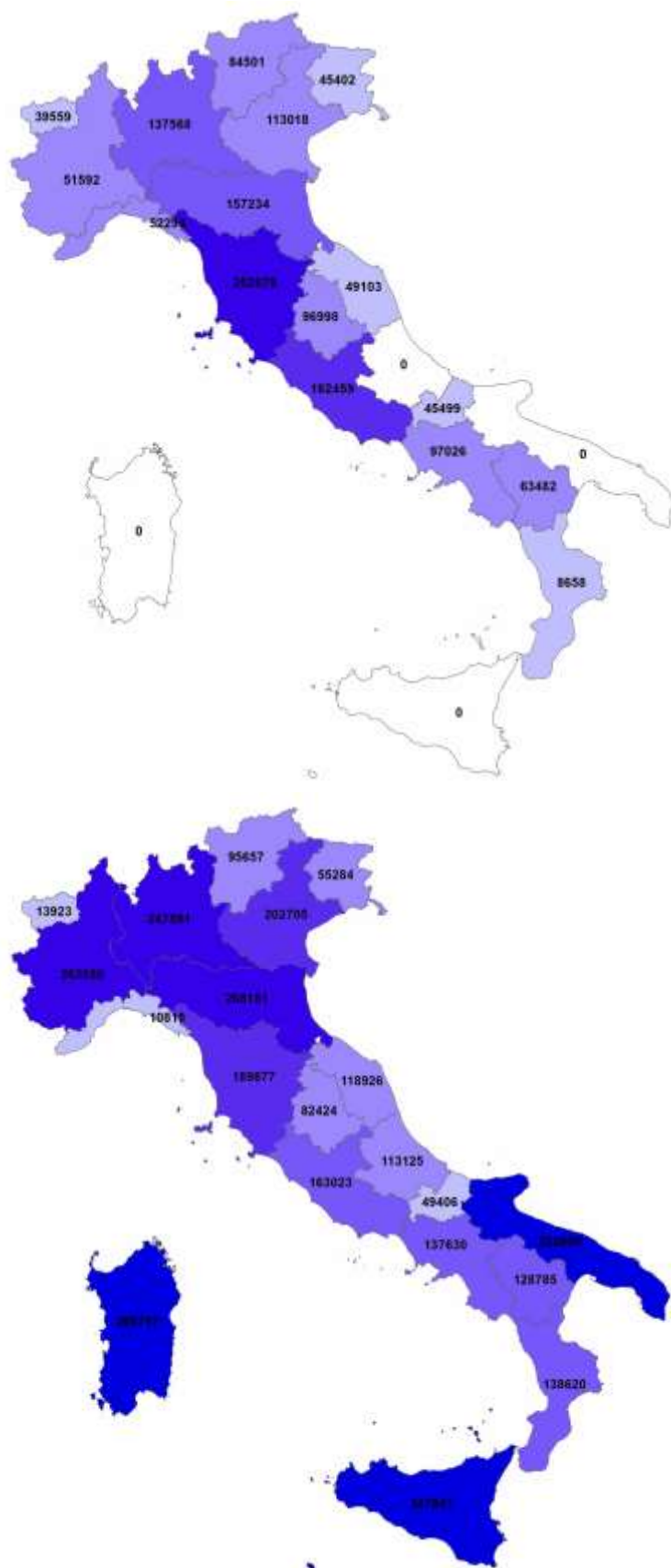


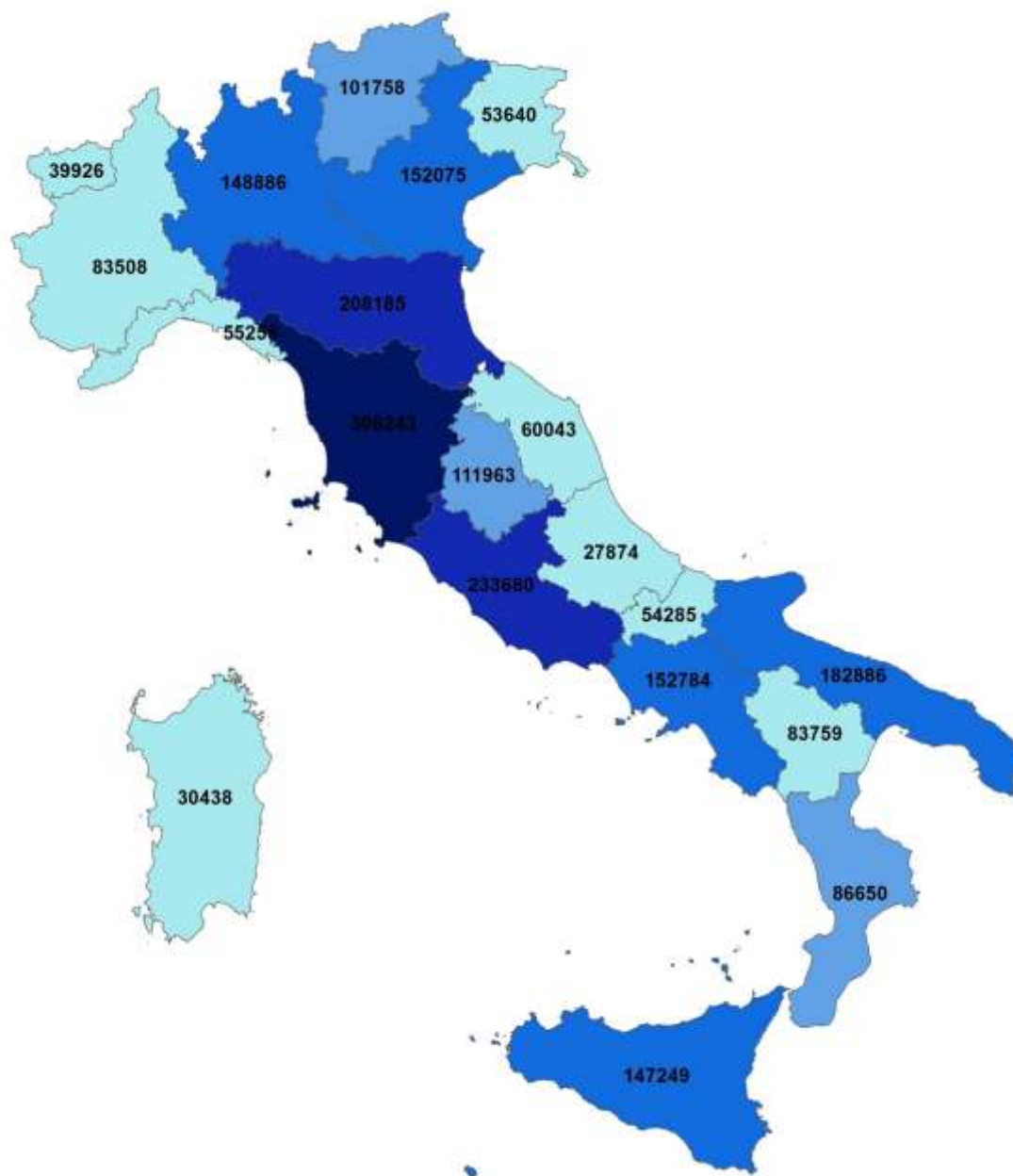
Figura 1.23. Numero di utenze abitative che potrebbero essere servite elettricamente dalla termovalorizzazione di biocombustibili ligno-cellulosici producibili con colture dedicate, nel 10% della superficie agricola utilizzabile nelle differenti regioni italiane.



Figura 1.24. Numero di utenze abitative che potrebbero essere servite termicamente dalla termovalorizzazione di biocombustibili ligno-cellulosici producibili con colture dedicate, nel 10% della superficie agricola utilizzabile nelle differenti regioni italiane.

Se ai residui di potatura di piante arboree si somma la biomassa derivante da colture dedicate, in particolare quelle ottenibili da un sistema di coltivazione semintensivo, ottenibili su terreni ritirati dalla produzione, si ottiene una produzione potenziale di energia elettrica su territorio nazionale di circa 7.909.000 MWh e 19.744.000 MWh termici con i quali potrebbero essere soddisfatte le esigenze rispettivamente di 2.954.000 e 2.326.000 unità abitative.

Occorre considerare che le biomasse considerate sono tutte ottenute senza entrare in competizione con altre filiere produttive e, non considerando i residui di coltivazioni erbacee, non si generano competizioni con l'impiego di questi sia esso nella filiera zootecnica, sia nell'apporto di sostanza organica ai suoli.



*Figura 1.25. Numero di utenze abitative che potrebbero essere servite elettricamente dalla termovalorizzazione di biocombustibili ligno-cellulosici producibili con colture dedicate nei terreni ritirati dalla produzione e dai residui di potature di piante da frutto.*



*Figura 1.26. Numero di utenze abitative che potrebbero essere servite termicamente dalla termovalorizzazione di biocombustibili ligno-cellulosici producibili con colture dedicate nei terreni ritirati dalla produzione e dai residui di potature di piante da frutto.*

## I benefici ambientali

Verso la fine degli anni Ottanta del secolo scorso, per la prima volta nella storia dell'umanità, la richiesta di risorse naturali ha superato la capacità di rigenerazione, e si è determinato così uno squilibrio che impedisce tuttora alla biosfera di rigenerarsi allo stesso ritmo con il quale viene consumata (tale percentuale di "consumo" è andata aumentando, fino a superare, nel 1999, il valore del 120%). La consapevolezza che ciascuna attività dell'uomo comporta un'alterazione del fragile e complesso equilibrio del pianeta ha spinto, negli ultimi anni, a una valutazione della singola attività o del singolo processo in termini di sviluppo sostenibile ovvero in termini di impatti complessivi come, per esempio, sulla disponibilità delle risorse naturali, sui cambiamenti climatici, sull'uso del suolo, sulla salute umana ma anche sulla dignità e libertà umana.

Il concetto di sviluppo sostenibile ruota infatti intorno a quattro componenti fondamentali:

- sostenibilità economica: intesa come capacità di generare reddito e lavoro per il sostentamento della popolazione;
- sostenibilità sociale: intesa come capacità di garantire condizioni di benessere umano (sicurezza, salute, istruzione) equamente distribuite per classi e genere;
- sostenibilità ambientale: intesa come capacità di mantenere qualità e riproducibilità delle risorse naturali;
- sostenibilità istituzionale: intesa come capacità di assicurare condizioni di stabilità, democrazia, partecipazione, giustizia.

## La metodologia LCA

L'analisi del ciclo di vita è una valutazione che nasce a seguito della crescente attenzione, da parte dei soggetti pubblici e privati, ai temi energetici, ai cambiamenti climatici, ai consumi idrici, allo sfruttamento del suolo e, più in generale, al tema della sostenibilità ambientale dei processi produttivi e all'esigenza di garantire, nei vari settori, il rispetto delle risorse naturali. In particolare, negli ultimi decenni, è aumentato l'interesse verso lo sviluppo di metodi e tecniche che permettano di comprendere, valutare e conseguentemente ridurre i possibili impatti ambientali dei processi produttivi realizzati e che, contemporaneamente, consentano di attribuire ai prodotti un valore ambientale oggettivo, riconoscibile e spendibile sul mercato.

Anche da un punto di vista imprenditoriale la sostenibilità dei processi produttivi sta assumendo sempre più un valore significativo. Fino a pochi anni fa i problemi relativi alla compatibilità ambientale delle attività produttive erano fortemente sottovalutati, a causa di una percezione limitata ai soli aspetti antieconomici e, soprattutto, alla mancanza di normative in grado di incidere in maniera significativa ad un rinnovamento attento alle problematiche ambientali. La diffusione di una "coscienza ambientale" a tutti i livelli della società, la crescente domanda di prodotti di qualità ottenuti con processi sostenibili da parte dei consumatori, una nuova possibilità di sviluppo per le imprese che fanno della loro responsabilità ambientale un fattore di competitività, l'entrata in vigore di normative europee che hanno standardizzato la metodologia di valutazione, sono tutti elementi che hanno contribuito ad avviare un nuovo approccio centrato sulla compatibilità tra sistema produttivo ed ambiente e teso verso lo sviluppo sostenibile.

In questo nuovo approccio è necessario accompagnare il processo di produzione dei vari prodotti e servizi da una corretta stima degli impatti ambientali che il processo stesso comporta; tale stima può essere svolta attraverso una Valutazione del Ciclo di Vita (LCA – Life Cycle Assessment). Questa metodologia consente di determinare e quantificare i carichi energetici ed ambientali, concreti e potenziali, presenti nella varie fasi del ciclo di produzione e consumo della bioenergia, considerate correlate e interdipendenti. Attraverso l'LCA, quindi, si quantificano gli effetti ambientali dei flussi in entrata e in uscita dal sistema produttivo ricorrendo ad opportuni indicatori d'impatto. Tale tecnica, applicata nell'ambito delle energie rinnovabili, permette di confrontare il profilo ambientale delle varie bioenergie con quello di energie fossili che svolgono analoghe funzioni. Questa comparazione fornisce utili indicazioni per la scelta delle tecnologie che meglio s'integrano con il concetto di sviluppo sostenibile.

Attualmente la metodologia LCA è sempre più utilizzata ed affermata anche se la sua istituzione e codificazione è abbastanza recente. Le origini dell'LCA, infatti, si possono far risalire agli inizi degli anni Sessanta, e precisamente al 1963, quando fu presentata alla World Energy Conference una relazione, compilata da Harold Smith, riguardante le richieste di energia per la produzione di intermedi chimici, con alcuni marginali richiami alla valutazione degli impatti sull'ambiente.

Nel 1969, un gruppo di ricercatori nordamericani condusse studi, denominati REPA (Resource and Environmental profil Analysis), che avevano come obiettivo la caratterizzazione del ciclo di vita di alcuni materiali impiegati in importanti produzioni industriali. Tra le molte ricerche REPA merita ricordare quelle commissionate dalla Coca-Cola Company al Midwest Research Institute (USA) che, confrontando diversi tipi di contenitori per le bevande, aveva lo scopo di determinare quale fosse l'involucro con il minor impatto sull'ambiente in termini di emissioni e di consumo di materie prime. Il calcolo fu realizzato quantificando le materie prime, il combustibile e i rilasci nell'ambiente per la produzione di ogni singolo contenitore. La metodologia applicata oltre a considerare le implicazioni ambientali introduceva la valutazione dell'energia intesa come risorsa naturale e, quindi, limitata.

Nel frattempo anche in Europa furono condotti studi simili, rivolti soprattutto ai sistemi d'imballaggio e denominati procedure di Ecobalance.

In seguito, la prospettiva di un rapido esaurimento dei combustibili fossili e di eventuali modificazioni climatiche, da attribuire soprattutto all'eccesso di calore immesso nell'atmosfera da parte dei processi di combustione, spinsero gli studi a calcoli meticolosi sui consumi energetici e sui rifiuti termici delle industrie e, soprattutto, alla messa a punto sia di metodologie sia di strumenti che potessero in qualche modo correggere l'approccio della teoria economica classica a questo tipo di fenomeni. Negli anni ottanta, crebbe così l'interesse per l'LCA quale metodo per la valutazione quantitativa degli impatti riguardo a differenti tematiche ambientali (impoverimento delle risorse, riscaldamento globale, ecc.) nell'ottica di un approccio di sviluppo sostenibile.

Negli anni 80, in Europa, venne pubblicato il manuale di Analisi Energetica di Boustead e Hancock che riporta la prima descrizione di carattere operativo del procedimento, considerato una pietra miliare nella storia della metodologia LCA (Boustead e Hancock, 1979).

Alla fine degli anni Ottanta permaneva, tuttavia, una situazione di elevata confusione: rapporti riguardanti LCA condotti sugli stessi prodotti contenevano spesso risultati contrastanti. Il motivo di ciò era da attribuirsi alla scarsa uniformità delle valutazioni, per cui gli studi effettuati si basavano su dati, metodi e terminologie fra di loro differenti. Divenne presto evidente la necessità di una



metodologia univoca e standardizzata. Il dibattito scientifico fu portato avanti sotto il patrocinio della SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) e uno dei risultati più importanti fu la pubblicazione di un quadro di riferimento internazionalmente accettato (SETAC, 1993).

Il diffondersi dell'utilizzo della metodologia LCA è, tuttavia, frutto anche dell'unificazione e standardizzazione della normativa di riferimento, da parte dell'ISO (International Standards Organization) e segnatamente del suo Technical Committee 207 (TC207), mediante l'emanazione, a partire dal 1997, della normativa tecnica della serie ISO 14000 e successivamente, tra il 1998 e il 2000, le norme specifiche di prodotto di prodotto della serie 14040; attualmente le due norme di riferimento per un'analisi del ciclo di vita sono la ISO 14040:2006-Principles and framework e la ISO 14044- Requirements and guidelines.

Attualmente la Commissione europea considera l'approccio LCA come l'unico in grado di fornire una base scientifica per comprendere il carico ambientale di prodotti e processi in ottica complessiva; l'LCA è lo strumento accettato dalla comunità scientifica internazionale per l'identificazione delle strategie, private e pubbliche, volte alla ricerca di efficienza ambientale, per la riduzione del consumo di risorse ed energia e per minimizzare gli effetti sull'ambiente secondo gli attuali standard aziendali (Baldo et al, 2008).

Secondo la SETAC *"...l'LCA è un processo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell'ambiente, e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti. L'analisi riguarda l'intero ciclo di vita del prodotto ("dalla culla alla tomba"): dall'estrazione e trattamento delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e collocazione finale del prodotto dopo l'uso [...]"* (SETAC, 1993).

Da questa definizione risulta evidente come il concetto di valutazione, che sta alla base del metodo, sia strettamente connesso con quello di confronto, perciò, l'LCA dovrebbe essere inteso correttamente come una comparazione il più possibile completa tra due o più prodotti, gruppi di prodotti, sistemi, metodi o approcci alternativi, volta a rivelare i punti deboli, a migliorare le qualità ambientali, a promuovere prodotti e processi ecologici, a comparare approcci alternativi e dare fondamento alle azioni suggerite nell'ottica del miglioramento continuo e dello sviluppo sostenibile. L'affermarsi dell'LCA è, quindi, in qualche modo legato al verificarsi di tre eventi principali:

- la crescente consapevolezza che i problemi ambientali non possono più essere affrontati per singoli comparti (aria, acqua, suolo) ma richiedono una valutazione e interventi globali;
- la nuova attenzione alle politiche di prodotto come importante componente delle politiche ambientali;
- la presenza di un'opinione pubblica che richiede informazioni ambientali e di consumatori che scelgono le merci e i servizi che vengono loro offerti in base a criteri di qualità ambientali.

La metodologia LCA offre numerose possibilità di utilizzo:

- la valutazione dell'impatto ambientale di prodotti differenti, aventi la medesima funzione;
- la valutazione dell'impatto ambientale dell'uso differente dello stesso prodotto;



- l'identificazione, all'interno del ciclo produttivo o del ciclo di vita del prodotto, dei momenti in cui si registrano gli impatti più significativi, a partire dai quali possono essere indicati i principali percorsi verso possibili miglioramenti, intervenendo sulla scelta dei materiali, delle tecnologie e degli imballaggi;
- il sostegno alla progettazione di nuovi prodotti;
- la segnalazione di direzioni strategiche per lo sviluppo, che consentano risparmi, sia per l'azienda, sia per il consumatore;
- la dimostrazione di aver ottenuto un ridotto impatto ambientale ai fini dell'attribuzione del marchio ecologico comunitario (Ecolabel, EPD);
- il perseguimento di strategie di marketing in relazione al possesso di Ecolabel;
- il sostegno nella scelta dei procedimenti per il disinquinamento;
- il supporto nella scelta delle soluzioni più efficaci e idonee per il trattamento e la gestione integrata dei rifiuti;
- la base oggettiva di informazioni e di lavoro per l'elaborazione dei regolamenti che riguardano l'ambiente;
- il sostegno alle politiche ambientali territoriali;

L'LCA, quindi, non è solo uno strumento per la salvaguardia dell'ambiente, ma può diventare anche un importante mezzo per il rafforzamento delle dinamiche competitive, mediante adeguate azioni di marketing, nonché per la riduzione e il controllo dei costi (Blengini e Busto, 2009; i Canals et al, 2006) e per il sostegno alle politiche ambientali territoriali (Recchia et al, 2010).

Inevitabilmente il tipo di informazione fornita sarà un indicatore di tipo semplificato, in quanto ipotesi e assunzioni di lavoro tendono per loro natura a semplificare o trascurare parti di sistema reale, coerentemente con quanto stabilito dagli obiettivi del lavoro e con le risorse a disposizione. Nonostante questo, con la LCA è possibile ottenere una comprensione adeguata circa l'impatto ambientale di un certo prodotto. Lo scopo, i confini ed il livello di dettaglio di un LCA dipendono dall'oggetto dello studio e dall'uso per il quale è stato predisposto; tuttavia, sebbene la profondità e l'ampiezza dell'indagine possano variare molto a seconda dei casi, lo schema cui si fa riferimento rimane sempre il medesimo.

Del resto ogni tecnica di valutazione presenta necessariamente delle limitazioni, che è indispensabile conoscere e tenere in adeguata considerazione durante il procedimento di analisi, in particolare la valutazione del ciclo di vita presenta i seguenti limiti:

- i modelli utilizzati per l'analisi inventariale o per valutare impatti ambientali sono limitati dalle assunzioni implicitamente contenute in esso;
- l'accuratezza di uno studio di LCA può essere limitata dall'accessibilità o dalla disponibilità di informazioni rilevanti o di qualità elevata (scarsità dei dati e scarsa conoscenza del fenomeno oggetto di studio);
- la mancanza di una dimensione spaziale e temporale nell'inventario dei dati utilizzati per la valutazione dell'impatto introduce incertezza sui risultati dell'impatto;
- non è possibile un'assoluta e completa rappresentazione di ogni effetto sull'ambiente in quanto esso si basa su un modello scientifico che costituisce una semplificazione di un sistema fisico vero.

In generale, le informazioni ottenute attraverso uno studio di LCA dovrebbero essere usate come componente di un processo decisionale molto più ampio ed essere utilizzate per comprendere nel loro insieme gli scambi globali. Confrontare i risultati di differenti studi di LCA, è possibile solamente se le assunzioni e il contesto di ciascuno studio sono i medesimi; per questo motivo le assunzioni alla base di ogni studio dovrebbero essere sempre esplicitamente dichiarate.

## Struttura e fasi

Da un punto di vista metodologico, la definizione di LCA proposta originariamente dalla SETAC, successivamente ripresa dalle norme ISO 14040 e 14044, è la seguente: *“una LCA è un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici e ambientali relativi a un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”*.

La definizione specifica riportata nella normativa ISO 14040 esprime la LCA come una *“compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto”*.

Una LCA applicata a un sistema produttivo o di prodotti indirizza dunque lo studio di efficienza del sistema in oggetto verso la salvaguardia della salute dell'ambiente e dell'uomo nonché verso il risparmio di risorse. Per sistema di prodotti si intende un insieme di procedure, la cui funzione principale è la produzione di beni utili: esso è separato dal sistema ambiente da confini fisici ben definiti ed è ad esso collegato grazie allo scambio di input e di output. In quest'ottica l'ambiente non è quello naturale definito dall'ecologia, ma è tutto ciò che sta all'esterno del sistema di prodotti considerato.

Risulta quindi chiaro come gli input del sistema siano parametri che intervengono nel dibattito sui problemi del risparmio delle risorse mentre gli output riguardino i problemi di inquinamento e, si comprende, come la definizione della funzione del sistema e dei confini dello stesso rappresentino le operazioni chiave per la buona riuscita di uno studio di LCA.

In sintesi, più che descrivere il prodotto una LCA descrive il sistema che lo genera o, in altre parole, la funzione del sistema stesso. Questo è importante da chiarire, per evitare il rischio di identificare l'analisi del ciclo di vita dei processi con un'analisi del ciclo di vita dei prodotti.

Il modello del sistema oggetto di indagine in una LCA risulta sempre una semplificazione della realtà, poiché non include una rappresentazione completa delle interazioni con l'ambiente, ma solo quelle più significative. Importante è analizzare il processo, sia che interessi la sfera della produzione o quelle della distribuzione e utilizzazione, in maniera affidabile ed efficace in modo da progettare il miglioramento del sistema indagato (P. Roy et al, 2009).

La struttura moderna della LCA proposta dalla norma ISO 14040 e successive è sintetizzabile in quattro momenti principali:

- Definizione degli scopi e degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio (*Goal and Scope Definition*): è la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l'affidabilità dei dati, le assunzioni e i limiti.

- **Analisi di inventario (*Life Cycle Inventory Analysis*, LCI):** è la parte del lavoro dedicata allo studio del ciclo di vita del processo o attività; lo scopo principale è di ricostruire la via attraverso cui il fluire dell'energia e dei materiali permette il funzionamento del sistema produttivo in esame tramite tutti i processi di trasformazione e trasporto. Redigere un inventario di ciclo di vita significa costruire un modello del sistema reale che si intende studiare: si compila quindi un inventario degli ingressi, cioè i materiali, energia, risorse naturali ed un inventario delle uscite, cioè emissioni in aria, acqua e suolo.
- **Analisi degli impatti (*Life Cycle Impact Assessment*, LCIA):** è lo studio dell'impatto ambientale provocato dal processo o attività ed ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi di risorse calcolati dall'inventario. E' la fase in cui si produce il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di inventario al giudizio di pericolosità ambientale. Gli impatti calcolati sono potenziali, diretti ed indiretti, associati agli input e agli output.
- **Interpretazione e miglioramento (*Life Cycle Interpretation*):** è la parte conclusiva di una LCA che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati, valutandoli in modo da non attuare azioni tali da peggiorare lo stato di fatto. In pratica è la definizione delle linee di intervento.

La descrizione della struttura concettuale dell'Analisi del Ciclo di Vita è riportata all'interno del documento UNI ISO 14040 e collegati, e si articola secondo lo schema:

<b><i>Goal and Scope Definition ISO 14041</i></b>	<b><i>Life Cycle Inventory ISO 14041</i></b>	<b><i>Life Cycle Impact Assessment ISO 14042</i></b>	<b><i>Life Cycle Interpretation ISO 14043</i></b>
Definizione degli obiettivi dello studio	Preparazione raccolta dati e definizione del diagramma di flusso	Selezione e definizione delle Categorie di Impatto	Identificazione degli impatti più significativi
Definizione del campo di applicazione dello studio	Raccolta dati	CLASSIFICAZIONE Assegnazione di una o più categorie d'impatto ai dati raccolti nell'inventario	Valutazione della metodologia e dei risultati (completezza, sensibilità, consistenza)
Funzioni del prodotto Unità funzionale Flusso di riferimento	Procedimenti di calcolo dei flussi di input ed output	CARATTERIZZAZIONE Quantificazione dell'impatto	Analisi di sensibilità
Confini iniziali del sistema	Analisi di sensibilità e correzione dei confini del sistema	NORMALIZZAZIONE Analisi tecnica della significatività (opzionale)	Reiterazione del ciclo di vita in caso che i tre punti precedenti non siano soddisfatti
Categorie di dati	Allocazione dei flussi e dei rilasci	VALUTAZIONE Assegnazione di un peso relativo alle varie categorie d'impatto (opzionale)	Conclusioni e raccomandazioni Relazione sullo studio
Scelta iniziale dei flussi in ingresso e uscita	Interpretazione dei risultati e analisi dell'incertezza		
Requisiti di qualità dei dati	Relazione sullo studio		
Revisione critica			

Tabella 1.6. Struttura concettuale della Valutazione del Ciclo di Vita

***Prima fase: definizione scopi, obiettivi e campo di applicazione (ISO 14041)***

La dichiarazione esplicita degli obiettivi e delle finalità dello studio rappresenta il primo importante momento di pianificazione di un'analisi del ciclo di vita di un prodotto o processo.

A tal proposito la norma ISO 14040 definisce: *“Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l'applicazione. L'obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio”*.

E' evidente come gli obiettivi dello studio influenzino notevolmente le scelte e le ipotesi di lavoro, in quanto a seconda delle motivazioni, del pubblico a cui è destinato, delle risorse a disposizione e delle aspettative nei risultati, possono risultare scenari anche molto diversi. Pertanto, è molto importante definire con precisione i confini della ricerca e, quindi, quelli del sistema oggetto di studio nonché del grado di approfondimento cui verte lo studio. Occorre cioè definire, una volta noti gli obiettivi dell'analisi, il “campo di applicazione dello studio”, che rappresenta una sorta di carta d'identità dello studio con indicati i requisiti, i limiti e le ipotesi iniziali.

Per definire il “campo di applicazione dello studio” occorre cioè dare la definizione di “sistema”, di “unità funzionale” e di “confini del sistema”.

Nell'LCA viene definito “sistema” un qualsiasi insieme di dispositivi che realizzano una o più operazioni industriali aventi una specifica funzione; il sistema è determinato da confini fisici rispetto al sistema ambiente e con questo ha rapporti di scambio caratterizzati da una serie di input e di output. Nel caso più generale di un sistema di prodotti, si tratta di un sistema i cui input consistono in materie prime e in energia primaria e i cui output consistono in reflui (calore disperso, emissioni in acqua e aria, rifiuti solidi) che ritornano al sistema ambiente (biosfera). Un sistema, quindi, al cui interno sono presenti tutti i processi di trasformazione: dai produttori agli utenti, attraverso i prodotti finali. Tra i suoi output non esistono prodotti utili ma solo reflui.

I sistemi di prodotti e/o processi contengono un gran numero di operazioni collegate tra loro, anche in modo complesso, dai flussi di materiali, di energia e di prodotti finiti. Per effettuare un inventario di ciclo di vita di un sistema è necessario definire innanzitutto le singole operazioni che lo compongono in qualità di operazioni unitarie: ognuna di queste riceve i propri input dalle operazioni unitarie a monte, mentre i suoi output serviranno ad alimentare quelle seguenti, secondo lo schema di produzione. Definire i confini del sistema significa determinare le unità di processo che devono essere considerate dallo studio. Tali unità devono essere esplicitamente elencate per evitare di non paragonare sistemi che non sono confrontabili. Le funzioni del sistema rappresentano le caratteristiche e le prestazioni del processo e/o prodotto.

*“L'unità funzionale costituisce una misura della prestazione del flusso in uscita. Il suo scopo principale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata e in uscita. Tale riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati di una LCA. Tale comparabilità è particolarmente critica quando si valutano sistemi differenti, perché ci si deve assicurare che i confronti siano fatti su una base analoga. Un sistema può avere un gran numero di funzioni*

*possibili e la funzione scelta per lo studio dipende dall'obiettivo e dal campo di applicazione. La corrispondente unità di misura deve essere definita e misurabile"* (ISO 14040).

L'unità funzionale, quindi, indica il riferimento rispetto al quale normalizzare i dati che compongono il bilancio ambientale del sistema in esame. L'unità funzionale deve essere rappresentativa di una prestazione quantificabile e oggettivamente riscontrabile di un prodotto e/o processo, al fine di consentire la comparabilità dei risultati dell'LCA. La scelta di tale unità è arbitraria e dipende essenzialmente dallo scopo per cui i sottosistemi e il sistema globale sono stati progettati, e può essere intesa come un indice delle prestazioni svolte dal sistema. La sua definizione risulta quindi fondamentale per la buona riuscita dello studio.

Oltre all'unità funzionale, la norma ISO 14040 introduce il concetto di "flusso di riferimento" che in pratica è la quantità di bene o di servizio necessario per ottenere l'unità funzionale scelta.

I "confini del sistema" determinano invece le unità di processo che devono essere incluse nell'LCA e le loro interrelazioni; spesso è utile rappresentarle attraverso un diagramma di flusso (flow chart) per visualizzare facilmente il campo di azione delineato. Una prima delimitazione dei confini avverrà nell'ambito della ricerca degli ambienti fisici e dei processi produttivi che si ritiene di dover considerare per l'analisi. Successivamente sarà possibile escludere componenti che si dimostreranno non rilevanti o per cui risulta troppo oneroso ottenere un'informazione dettagliata, oppure includerne altre alle quali inizialmente non si era attribuita un'adequata importanza. Resta inteso comunque che la scelta del confine dell'analisi debba essere adeguatamente motivata e sempre segnalata nello studio. E' possibile ora ribadire che ogni LCA contiene di fatto delle semplificazioni e limitazioni per renderla gestibile rispetto a una LCA dell'intero sistema globale che non sarà mai riproducibile per intero. Dunque l'obiettivo iniziale di una LCA è quello di ripercorrere a ritroso tutte le filiere produttive del sistema indagato fino all'estrazione delle materie prime nel modo più completo possibile e stimare l'errore che si compie trascurando alcune unità di processo. La ISO è molto chiara in proposito : *"i criteri adottati nello stabilire i confini del sistema devono essere identificati e giustificati nel campo di applicazione dello studio"*.

E' importante sottolineare che anche il periodo di riferimento dell'analisi costituisce un vincolo nella scelta dei confini dell'analisi come pure la qualità dei dati e affidabilità dei dati a disposizione o che possono essere rilevati. Questa verifica è importante per stabilire l'affidabilità dei risultati dello studio; spesso, infatti, qualora la precisione delle informazioni sia scarsa o nulla, è necessario ricorrere alla letteratura. Sia nel caso in cui un analista LCA sia dotato di uno strumento di calcolo software che include una base di dati da cui attingere le informazioni, sia nel caso si abbiano a disposizione anche dati che possono essere utilizzate come sorgente di informazioni da inserire nel proprio modello, è importante poter qualificare la rappresentatività statistica del dato, la sua origine e tutti gli elementi necessari a una sua riproducibilità.

Infine, evidenziamo che attualmente gli studi in atto stanno cercando di trovare un codice che consenta di utilizzare contemporaneamente grandezze energetiche, ambientali ed economiche. L'approccio metodologico dell'LCA prevede ora soltanto l'impiego di grandezze energetiche ed ambientali con l'intento di collegarle a quelle economiche solo in un momento successivo e in modo indipendente.

### ***Seconda fase: analisi di inventario o Life Cycle Inventory-LCI (ISO 14041)***

Questa fase è indubbiamente la più delicata e dispendiosa in termini di tempo di una LCA, in quanto rappresenta la base informativa su cui si innestano le fasi successive. Seguendo la definizione della ISO 14041, è proprio in questa fase che sono *"..individuati e quantificati i flussi in ingresso e in uscita da un sistema-prodotto, lungo tutta la sua vita..."*. Saranno quindi identificati e determinati i consumi di risorse (materie prime, prodotti riciclati e acqua), di energia (termica ed elettrica) e le emissioni in aria, acqua e suolo. Al termine la struttura assumerà l'aspetto di un vero e proprio bilancio ambientale. Il procedimento per condurre l'analisi d'inventario è iterativo. Man mano che i dati raccolti diventano più approfonditi ed il sistema è meglio conosciuto, possono essere identificati nuovi requisiti o limitazioni, che potranno anche comportare cambiamenti nelle procedure di raccolta dei dati, affinché siano ancora soddisfatti gli obiettivi dello studio.

L'inventario può essere suddiviso in quattro moduli:

- diagramma di flusso del processo (process flow-chart): il diagramma di flusso del processo consiste in una rappresentazione grafica e qualitativa di tutte le fasi rilevanti e di tutti i processi coinvolti nel ciclo di vita del sistema analizzato. È composto da sequenze di processi (boxes), collegati da flussi di materiali (arrows, frecce). La sua caratteristica fondamentale è quella di dividere un sistema in vari sottosistemi, esplicitare azioni d'interconnessione (le uscite di un sottosistema a monte sono le entrate di un sottosistema a valle) ed individuare le parti del processo dotate di maggiore rilevanza, soprattutto in termini ambientali, per evitare di attribuire il medesimo grado di attenzione indiscriminatamente a tutte le fasi;
- raccolta dati (data collection): normalmente la raccolta dei dati richiede un impegno elevato, in termini di tempo e di risorse, a causa della quantità di informazioni, spesso di difficile reperibilità, e della necessità di rilevare dati qualitativamente significativi.

Alcune ricerche evidenziano che i risultati di un'analisi del ciclo di vita di un prodotto o di un processo dipendono, soprattutto, dalla qualità dei dati usati come input e, pertanto, dal contesto di riferimento (Chiaramonti e Recchia, 2010).

I dati raccolti possono essere distinti in tre categorie:

- dati primari, provenienti da rilevamenti diretti;
- dati secondari, ricavati sia dalla letteratura, come database di software specifici (BUWAL, CETIOM, CBS, IVAM) e manuali tecnici, sia da altri studi e da calcoli ingegneristici;
- dati terziari, provenienti da stime e da operazioni analoghe, da dati relativi a test realizzati in laboratorio, da statistiche ambientali e da valori medi.

Quando si raccoglie il set di dati è necessario controllare che questi siano concreti e coerenti: un metodo di valutazione semplice consiste nell'effettuare un bilancio per ogni processo, tenendo conto del fatto che l'ammontare degli input deve essere pari al rilascio degli output.

Oltre agli impatti relativi al processo, devono essere definiti anche i dati riguardanti:

- impatti e consumi relativi all'energia elettrica importata nel sistema: è necessario chiarire quale sia il contesto di riferimento (Regionale, Nazionale, Comunitario) per procedere alla valutazione del mixing di combustibili che concorrono alla produzione del kW elettrico sfruttato, l'efficienza globale del sistema ed i relativi impatti sull'ambiente;

- impatti e consumi relativi al sistema di trasporto: i prodotti possono essere trasportati con differenti mezzi, a ciascuno dei quali corrisponde un certo impatto per unità di prodotto trasportato.

Definizione delle condizioni al contorno (system boundaries):

- definire il confine tra il sistema studiato e l'ambiente;
- definire il carico sull'ambiente del sistema indagato, rappresentato da tutte le prestazioni e le immissioni che avvengono durante l'intero ciclo di vita;
- definire il confine fra i processi ritenuti rilevanti e quelli irrilevanti: in questa fase si stabilisce ciò che deve essere incluso e ciò che invece deve essere trascurato. Si tiene in considerazione lo scopo dello studio, precedentemente definito, e ci si basa su considerazioni pratiche, fondate sull'opportunità di non coinvolgere elementi che di fatto non hanno alcuna rilevanza sostanziale sui risultati finali. Per esempio, nella definizione di una filiera di legno da biomasse residuali (potature di vite e di olivo) le fasi di taglio e di stoccaggio possono non essere considerate in quanto operazioni che sarebbero state fatte comunque e, pertanto, non rilevanti ai fini della definizione del processo considerato (Recchia e Cini, 2005).

Elaborazioni dei dati (data processing):

raccolti i dati, questi vengono correlati a tutte le unità di processo che concorrono alla produzione dell'unità funzionale in studio (ad esempio l'ammontare di energia elettrica utilizzata nella produzione, i Kg per Km di prodotto e di co-prodotto che necessitano di trasporto, quanti Kg di materie prime sono state utilizzati, ecc..) dove, per ciascuna unità di processo, si determinerà un'appropriata unità di misura per il flusso di riferimento (ad esempio 1 Kg di materiale o 1 MJ di energia). Successivamente i dati riguardanti l'impatto vengono trasformati e riferiti all'unità funzionale di prodotto, attraverso la definizione di un fattore di contribuzione che esprime il contributo di ciascun processo rispetto alla produzione di un'unità funzionale, espressa attraverso l'unità di misura prescelta (ad es. 175 KWh/1000 Kg)

Questo procedimento dovrà essere eseguito per tutte le sostanze presenti in ciascun processo.

Un problema che può presentarsi durante questa fase riguarda la ripartizione, definita allocazione, dei consumi e degli impatti relativi a prodotti differenti generati da uno stesso processo produttivo. È evidente l'importanza della conoscenza nel dettaglio del processo produttivo al fine di poter attribuire ad ogni prodotto ottenuto la quota spettante di materia prima ed energia consumata, quindi i rispettivi impatti in aria, acqua e rifiuti solidi. Quando ciò non risulti possibile, perché ad esempio, in uno stesso processo sono lavorate più categorie di prodotti, si procede ad una ripartizione dei consumi e dei relativi impatti attraverso una suddivisione che può tenere conto dei seguenti criteri:

- le quantità consumate sono assegnate in base al peso dei diversi prodotti, cioè per via ponderale;
- in base al valore economico di ciascun prodotto;
- in funzione dell'importanza dei vari prodotti.

Nel caso della cogenerazione, ad esempio, gli impatti ambientali valutati possono essere allocati tra i due prodotti, energia elettrica e energia termica, sulla base del loro contenuto di exergia. L'exergia descrive l'energia disponibile che è contenuta nell'elettricità e nel calore e che può essere quindi utilizzata.

Occorre tuttavia considerare che mentre nel caso dell'elettricità il suo contenuto di exergia è equivalente alla sua energia (1 KWh di elettricità ha valore di exergia 1), nel caso del calore, al contrario, l'exergia è data dalla sua energia moltiplicata per il fattore di Carnot il quale dipende dalla temperatura del calore generato e da quella dell'ambiente circostante:

Per questo motivo, nel caso della cogenerazione questo tipo di allocazione attribuisce maggiore importanza, in termini di valutazione degli impatti, alla produzione di energia elettrica la cui exergia risulta essere maggiore (Roedl, 2008; Pehnt, 2008).

I trasporti costituiscono un elemento vitale per la maggioranza dei processi produttivi industriali e spesso la quantità di energia a essi legata (e le conseguenti emissioni) rappresenta una parte significativa dell'energia complessiva spesa nel processo in esame. E' stato comunque dimostrato, attraverso compiuti studi sull'argomento, che se il trasporto su strada è contenuto entro i 100 km l'impatto ambientale che ne risulta non è molto significativo e non incide particolarmente sugli impatti del sistema nella sua interezza.

Un altro aspetto molto importante è quello che riguarda la quantificazione degli aspetti positivi associati al recupero di alcune tipologie di rifiuti. Per valutare i benefici del recupero di materia o di energia è consueto l'utilizzo della metodologia degli "impatti evitati". Dato un sistema che permette un recupero, mediante questo approccio si sottraggono dagli impatti ambientali generati quelli associati alla produzione dei flussi recuperati. Il risultato di questo approccio è quindi la valutazione degli impatti ambientali di un sistema tenuto conto anche, in termini quantitativi, dei benefici associati agli eventuali recuperi. A tal proposito è ancora da osservare come dovendo effettuare una sottrazione di impatti possa verificarsi un risultato negativo. Ovviamente questo dato deve essere interpretato osservando che in presenza di valore negativo il sistema produce minori impatti rispetto al sistema tradizionale.

### ***Terza fase: la valutazione d'impatto o Life Cycle Impact Assessment (ISO 14042)***

La norma ISO definisce *"impatto ambientale una qualsiasi modificazione causata da un dato aspetto ambientale, ossia da qualsiasi elemento che può interagire con l'ambiente"*.

Un impatto è associato a uno o più effetti ambientali: per esempio la CO<sub>2</sub> emessa durante la combustione di una certa quantità di carbone provoca un impatto che contribuisce all'effetto serra. Poiché non è possibile correlare inequivocabilmente uno specifico impatto ai suoi effetti ambientali, ci si deve limitare ad affermare che l'impatto è ciò che prelude a un effetto, senza pretende di poter quantificare rigorosamente il secondo sulla base del primo. Mentre possiamo ottenere il valore numerico degli impatti dai risultati della fase di analisi di inventario, i corrispondenti effetti ambientali potranno essere stimati sulla base di ipotesi e convenzioni.

Gli effetti dovuti alle sostanze rilasciate nell'ambiente si verificano nelle immediate vicinanze del punto di emissione oppure possono avere una ricaduta su tutto il pianeta. Quindi, gli effetti ambientali si suddividono in effetti globali (per es. le emissioni di CO<sub>2</sub>), regionali o locali (emissioni di rumore); lo stesso effetto può essere analizzato a livello globale e locale come nel caso, ad esempio, dell'impatto di un sistema microcogenerativo sulla qualità dell'aria (Pehnt, 2008). La struttura concettuale della "valutazione di impatto" fa riferimento alla norma ISO 14042 che la definisce e la standardizza nelle fasi descritte di seguito:



1. **Selezione e definizione delle categorie di impatto:** in questa prima fase sono identificate le categorie d'impatto prodotte dal sistema in esame. Per la definizione di queste categorie occorre rispettare tre caratteristiche:

- completezza: comprendere tutte le categorie, a breve e a lungo termine, su cui il sistema potrebbe influire;
- indipendenza: evitare intersezioni tra le categorie per non determinare conteggi multipli;
- praticità: la lista formulata non dovrà essere troppo dettagliata per non contemplare un numero eccessivo di categorie.

Per la scelta delle categorie può essere utile consultare il Working Group on LCIA della SETAC, all'interno della quale sono proposte e descritte numerose tipologie di impatto, come:

- estrazione di risorse abiotiche, comprendono tre differenti tipologie di elementi naturali: i depositi (combustibili fossili e minerali) considerati risorse limitate in quanto non rinnovabili nel breve periodo; le risorse (quali acque sotterranee, sabbia e ghiaia); le risorse rinnovabili (acque superficiali, energia solare, vento, correnti oceaniche);
- estrazione di risorse biotiche, cioè tipologie specifiche di biomassa raccolte sia in maniera sostenibile, sia in maniera non sostenibile (per es. deforestazione indiscriminata);
- uso del territorio, la cui gestione errata porta ad una riduzione del numero di specie animali e vegetali presenti, rispetto alle condizioni naturali;
- effetto serra, che comporta un aumento della temperatura nella bassa atmosfera conseguenza della presenza di alcuni gas, quali l'anidride carbonica, il metano, il biossido di azoto, che intrappolano le radiazioni infrarosse;
- impoverimento dell'ozono stratosferico, che ha come conseguenza l'incremento dell'incidenza dei raggi ultravioletti, dannosi per l'uomo e, in generale, per tutti gli ecosistemi;
- ecotossicità, provocata dalle emissioni dirette di sostanze tossiche, come metalli pesanti, idrocarburi, pesticidi e sostanze liberate nel corso della degradazione dei prodotti;
- smog fotochimico, in cui si considerano tutti gli impatti derivanti dalla formazione di ozono troposferico, causata dalle reazioni di componenti organici (VOC) in presenza di luce e di ossidi di azoto (NOx);
- tossicità umana, imputabile alla presenza di sostanze chimiche e biologiche, e dipendente sia dal tipo di esposizione, sia dalla metodologia attraverso la quale avvengono le emissioni nell'ambiente;
- acidificazione, causata dal rilascio di protoni negli ecosistemi acquatici e terrestri, principalmente attraverso la pioggia, con effetti per lo sviluppo della vita.
- arricchimento in nutrienti, causato da un eccesso di nitrati, fosfati, sostanze organiche degradabili e di tutti quegli elementi nutritivi che portano ad un incremento nella produzione di plancton, alghe e piante acquatiche in genere.

Le varie tipologie di impatto possono essere raggruppate in alcune principali categorie (salute umana, qualità dell'ecosistema, sfruttamento delle risorse, ambiente di lavoro, ecc..) che possono differenziarsi a seconda della metodologia utilizzata. Ad esempio,

l'Ecoindicator 99 si basa su una metodologia "damage-oriented", l'EPS200 valuta gli impatti da un punto di vista economico e EDIP si basa invece su targets ambientali specificati nei diversi protocolli internazionali. Queste diverse metodologie non solo individuano diverse categorie di impatti ma utilizzano anche approcci diversi in fase di caratterizzazione o normalizzazione degli impatti (Fantozzi e Buratti, 2010).

2. **Classificazione:** è la fase di assegnazione dei dati raccolti nell'inventario ad una o più categorie di impatto ambientale (impact categories), noti gli effetti e i danni potenziali delle emissioni alla salute umana, all'ambiente, all'impoverimento delle risorse, ecc.

Alla fine di questa fase, all'interno di ciascuna categoria di impatto, saranno contenuti tutti gli input e output del ciclo di vita che contribuiscono allo sviluppo dei diversi problemi ambientali. La stessa sostanza o materiale potrebbe essere contenuta all'interno di più categorie di impatto.

3. **Caratterizzazione:** essa si affianca alla fase della classificazione ed ha lo scopo di quantificare l'impatto generato. Essa trasforma, attraverso una serie di calcoli, le sostanze presenti nell'inventario, e precedentemente classificate, in indicatori di carattere numerico, attraverso la definizione del contributo relativo di ogni singola sostanza emessa e/o risorsa usata. Alcuni studi rilevano che esiste una correlazione significativa fra gli indicatori che valutano il consumo di materiali grezzi, poiché molti indicatori sono riferiti al consumo di combustibili fossili, e ciò può consentire di ridurre il numero degli indicatori utilizzati nell'analisi degli impatti. Non significativa è invece la correlazione tra risorse consumate e emissioni derivate per cui occorre utilizzare vari indicatori per valutare opportunamente gli impatti dell'uso delle risorse (Berger e Finkbeiner, 2010).

L'operazione viene effettuata moltiplicando i pesi delle sostanze emesse, e/o consumate nel processo, per i relativi fattori di caratterizzazione (weight factors), propri di ogni categoria di impatto. In sintesi, il fattore di caratterizzazione misura l'intensità dell'effetto della sostanza sul problema ambientale considerato, ed è stabilito da un'Authority sulla base di considerazioni di carattere prettamente scientifico.

Si elencano di seguito, a titolo esemplificativo, i fattori peso per le varie categorie di impatto proposti da CML, nell'ottobre 1992:

- -Per la categoria estrazione di risorse abiotiche, il *rapporto utilizzo/riserva*  $W_j$ , espresso dalla relazione:  $W_j = G_j/R_j$  dove:  $G_j$  è il consumo corrente globale del minerale  $j$ ;  $R_j$  è la riserva del minerale  $j$ .
- -Per la categoria estrazione di risorse biotiche, non è ancora stata realizzata una determinazione attendibile: si potrebbe definire un indicatore basato sulla rarità e sul tasso di rigenerazione della risorsa.
- -Per l'effetto serra viene usato il parametro *Potenziale di Riscaldamento Globale* (*Global Warming Potential, GWP*), che definisce la potenziale influenza di una sostanza, valutata in termini relativi rispetto alla  $CO_2$ , secondo orizzonti temporali di 20, 100 e 500 anni; questo per tenere conto del fatto che le varie sostanze si decompongono e inattivano solo in periodi di tempo molto lunghi.
- -Per l'impoverimento dell'ozono è stato introdotto il parametro *Potenziale di Riduzione dell'Ozono stratosferico* (*Ozone Depletion Potential, ODP*): la sostanza di confronto rispetto alla quale si valuta l'effetto delle altre è il CFC11.

- -Per l'effetto dell'ecotossicità sono stati introdotti i seguenti parametri: ECA (*Aquatic Ecotoxicity*) [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ], per la valutazione della tossicità delle acque; ECT (*Terrestrial Ecotoxicity*) [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ], per la valutazione della tossicità del terreno. Per semplicità si utilizza un solo parametro, l'ECA, poiché la maggior parte delle emissioni nel terreno contamina le falde acquifere.
- -Per la tossicità umana sono stati ideati gli indici: HCA (*Human-toxicological Classification value for Air*), indice di classificazione per le sostanze emesse in aria; HCW (*Human-toxicological Classification value for Water*), indice di classificazione per le sostanze emesse in acqua; HCS (*Human-toxicological Classification value for Soil*), indice di classificazione per le sostanze emesse nel terreno. Essi forniscono un'indicazione di massima e non hanno la pretesa di essere del tutto precisi e affidabili.
- -Per lo smog fotochimico si usa il parametro *Potenziale di Creazione di Ozono Fotochimico* (*Photochemical Ozone creation potentials, POCP*), per i componenti organici. Tale parametro è espresso per le diverse sostanze in termini di equivalenza con l'etilene ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ).
- -Per la categoria acidificazione è usato il fattore *Potenziale di Acidificazione* (*Acidification Potential, AP*), stimato per ogni sostanza in termini di  $\text{SO}_2$  oppure in termini di mole di  $\text{H}^+$ .
- -Per l'eutrofizzazione si usa il *Potenziale di Eutrofizzazione* (*Eutrophication Potential, EP*) espresso in termini di impoverimento in  $\text{O}_2$ , oppure in  $\text{PO}_4$ .

Gli indicatori citati, sono, per la maggior parte, gli stessi utilizzati all'interno del metodo degli Eco-indicator 99, presente all'interno del codice di calcolo Sima Pro 7.2, utilizzato nello studio di seguito riportato.

Il risultato della fase di caratterizzazione è il profilo ambientale, costituito da una serie di punteggi di impatto ambientale relativi a ciascuna categoria, ottenuti sommando tra loro tutti i singoli contributi precedentemente calcolati. Solitamente viene rappresentato graficamente attraverso una serie di istogrammi oppure attraverso un network con frecce di diverso spessore a indicare quale attività comporta l'impatto maggiore.

La Figura di seguito rappresenta la relazione tra le categorie ambientali più importanti e le principali aree di protezione.

TEMI AMBIENTALI	PRINCIPALI AREE DI PROTEZIONE		
	Risorse	Salute Umana	Conservazione dell'ambiente
<b>ESAURIMENTO RISORSE</b>			
Biotiche	++		
Abiotiche	++		
<b>INQUINAMENTO</b>			
Effetto serra (GWP)		+	++
Distruzione ozono (ODP)		+	+
Tossicità umana (HT)		+	
Tossicità dell'ambiente (ECT/ECA)		+	++
Ossidanti fotochimici		++	++
Eutrofizzazione (NP)			++
Acidificazione (AP)		+	++
<b>DEGRADAZIONE DEGLI ECOSISTEMI</b>			
Discariche			++

Tabella 1.7. Matrice di impatto delle categorie ambientali sulle principali aree di protezione (++ indica un impatto potenziale diretto, + indica un impatto potenziale indiretto)

4. **Normalizzazione:** in questa fase i valori ottenuti dalla caratterizzazione vengono normalizzati, cioè divisi per un "valore di riferimento" o "effetto normale" rappresentato generalmente da dati medi su scala mondiale, europea o regionale, riferiti ad un determinato intervallo di tempo (per es. dati medi relativi all'esaurimento fonti energetiche, effetto serra, ossidanti fotochimici, acidificazione, tossicità umana, ecc..). Attraverso la normalizzazione si può stabilire la magnitudo, ossia l'entità dell'impatto ambientale del sistema studiato rispetto a quello prodotto nell'area geografica prescelta come riferimento.

Secondo le norme ISO la fase di normalizzazione non è obbligatoria per un LCA completo.

5. **Valutazione:** l'obiettivo della fase di valutazione è quello di poter esprimere, attraverso un indice finale, l'impatto ambientale associato al prodotto nell'arco del suo ciclo di vita. I valori degli effetti normalizzati vengono perciò moltiplicati per i "fattori di peso" della valutazione, relativi alle varie categorie di danno, spesso riportati in guide tecniche, che esprimono l'importanza intesa come criticità, attribuita a ciascun problema ambientale.

Esistono diversi modelli di valutazione che possono essere così suddivisi:

- -modelli di tipo Comprensivo: includono un elevato numero di parametri differenti, rinunciando spesso ad un'elevata precisione e alla quantificazione degli effetti.
- -modelli di tipo Quantitativo: trattano i dati di impatto con grande precisione, limitandosi ad un numero circoscritto di parametri.
- -modelli di tipo Pragmatico: si pongono come intermedi tra gli altri due, definendo con una certa precisione i parametri che consentono una corretta valutazione del prodotto, tenendo comunque conto dei relativi costi e dei tempi di esecuzione.

Alla base del calcolo di tali fattori vi è il principio della "distanza dallo scopo": essa afferma che quanto più è grande il divario tra lo stato attuale e quello ideale cui si tende, tanto maggiore risulta la gravità di un effetto. È evidente quanto sia soggettivo tale giudizio, che può variare per aree geografiche, sensibilità e scuole di pensiero differenti. In alcuni casi si utilizzano fattori di peso tutti uguali tra loro, in alternativa si assumono quelli forniti da alcune banche dati.

Sommando i valori degli effetti così ottenuti si ottiene un unico valore adimensionale, l'indice ambientale finale, detto ecoindicatore, che quantifica l'impatto ambientale associato al prodotto.

La fase di valutazione d'impatto, a differenza della fase di inventario che ha raggiunto un buon grado di standardizzazione, è ancora caratterizzata da aspetti controversi che necessitano di ulteriori approfondimenti scientifici. Inoltre la soggettività legata alla scelta dei metodi di valutazione d'impatto difficilmente consentirà di raggiungere un consenso internazionale.

Ulteriori analisi aggiuntive di qualità dei dati della LCIA utili per meglio comprendere la significatività, l'incertezza e la sensibilità dei risultati possono essere:

- analisi di gravità, procedura statistica che identifica i dati aventi il maggiore contributo per il risultato dell'indicatore;
- analisi di incertezza, per determinare in che modo le incertezze nei dati e nelle ipotesi incidono sull'affidabilità dei risultati della LCIA;
- analisi della sensibilità, procedura per determinare in che modo le modifiche delle scelte metodologiche e dei dati incidono sui risultati dell'LCIA.

Un tentativo di rispondere alle esigenze di standardizzazione e di uniformazione dei contenuti degli studi di LCA è stato realizzato da ANPA (Agenzia nazionale protezione ambiente) nelle "Linee guida per la Dichiarazione Ambientale di Prodotto" (EDP, 2001) in cui sono descritti i requisiti per l'esecuzione di tutte le fasi di una valutazione del ciclo di vita e sono identificate una serie di categorie d'impatto predeterminate.

#### ***Quarta fase: interpretazione e miglioramento (ISO 14043)***

All'interno di questa fase, attraverso un'analisi di sensibilità, sono interpretati e rappresentati i risultati delle fasi di inventario e di valutazione degli impatti, in modo da avere una percezione dello studio facilmente fruibile e comprensibile, in riferimento all'obiettivo dello studio. La fase di interpretazione del ciclo di vita comprende diversi elementi che sono:

- identificazione dei fattori significativi, in conformità con la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione. Esempi di fattori significativi possono essere dati dell'inventario (energia, emissioni, rifiuti, ecc), categorie di impatto (per es. uso delle risorse, cambiamento climatico), contributi significativi nelle fasi del ciclo di vita (processi unitari individuali o i gruppi di processi);
- valutazione che comprende l'utilizzo delle tre seguenti tecniche: a) controllo di completezza (bisogna considerare tutte le informazioni rilevanti e in caso contrario fornire una giustificazione); b) controllo di sensibilità (valutare l'affidabilità dei risultati, stimando se e come l'incertezza dei dati si riflette sulle conclusioni); c) controllo di sensibilità (verificare la coerenza delle ipotesi, dei metodi e dei dati con l'obiettivo e il campo di applicazione);
- conclusioni, limitazioni e raccomandazioni. Questa fase andrebbe svolta in maniera interattiva con gli altri elementi della fase di interpretazione in modo da valutare e comunicare i fattori significativi, la metodologia e i risultati per i controlli di completezza, sensibilità e coerenza, trarre conclusioni preliminari e controllare che queste siano coerenti

con l'obiettivo ed il campo di applicazione dello studio e nel caso di coerenza redigere un rapporto conclusivo.

La fase di interpretazione dei risultati è accompagnata quasi sempre dalla valutazione dei miglioramenti, la fase dell'LCA nella quale, dopo aver individuato gli ambiti più critici, vengono valutate e selezionate le opzioni e i miglioramenti per ridurre gli impatti ed i carichi ambientali dell'unità funzionale in studio di unità funzionali aventi la medesima funzione. Così, per esempio, può essere valutato l'impatto ambientale di un sistema di teleriscaldamento alimentato con tre diversi sistemi (gas naturale, elettricità, pellet) al fine di scegliere la fonte energetica a minor impatto ambientale (Ghafghazi et al, 2011).

Si possono, in questa sezione, rappresentare anche scenari diversi da quello considerato e confrontare così i risultati ottenuti. Così, ad esempio, si può confrontare l'impatto ambientale derivato dall'uso dei residui forestali per la produzione di carburanti o per la produzione di manufatti (Rivela et al., 2006).

Tale fase non ha ancora raggiunto un livello metodologico pari a quello delle precedenti, tuttavia rimane un momento importante poiché consente, ove possibile, un miglioramento dell'impatto ambientale in termini di diminuzione della richiesta d'energia, delle emissioni, dell'uso di risorse, ecc.

È importante rilevare che l'LCA, come tutte le metodologie basate sul confronto, non propone una soluzione assoluta, ma identifica un insieme di alternative tra le quali poi, il decisore, sceglierà a suo giudizio la migliore.

La norma ISO definisce questa fase dell'LCA come il momento in cui realizzare una valida correlazione tra i risultati dell'analisi di inventario e di quella degli impatti. La norma inoltre richiama fortemente il fatto che solo una chiara e comprensibile, completa e consistente presentazione dei risultati delle fasi precedenti è in grado di fornire quelle indicazioni utili a impostare i possibili miglioramenti del sistema in esame.

### ***La comunicazione dei risultati dell'LCA***

Questa fase, parte integrante di uno studio LCA, consente di presentare i risultati e le conclusioni in una forma che sia adeguata al tipo di pubblico previsto. Se lo studio è completo e non si limita alla fase LCI ma si estende anche alla fase LCIA e viene presentato a terzi, il rapporto conclusivo dovrebbe comprendere:

- relazione con i risultati di LCI;
- la descrizione della qualità dei dati;
- le finalità delle categorie da proteggere;
- le categorie di impatto considerate;
- i modelli di caratterizzazione impiegati;
- i fattori ed i meccanismi ambientali;
- il profilo dei risultati degli indicatori.

## **LCA nella filiera legno energia**

Storicamente i modelli per gli studi di LCA sono nati e si sono sviluppati principalmente nel settore industriale ma da qualche decennio l'interesse si è esteso anche nel settore agricolo ed alimentare, nonché nelle filiere di energie rinnovabili visto il ruolo che ha il settore agro-forestale nelle emissioni di sostanze clima-alteranti e quello che può avere nella mitigazione dei cambiamenti climatici.

In particolare, a titolo esemplificativo, ci sono studi che esplorano il carico ambientale di specie forestali a rapida crescita e la loro conversione energetica in comparazione con sistemi energetici tradizionali che utilizzano combustibili fossili (Roedl, 2010); studi che valutano gli impatti ambientali di filiere legno energia realizzate con diversi sistemi e macchinari di lavorazione (Valente et al, 2011); studi che valutano gli impatti ambientali legati alla microcogenerazione messa a confronto con sistema a produzione separata di energia elettrica e termica (Roselli et al, 2011; Chicco e Mancarella, 2009); studi che si pongono l'obiettivo di ottimizzare i consumi energetici delle diverse fasi di un ciclo di produzione con il sistema cogenerativo (Bayrak e Gungor, 2010).

In questo contesto è stato svolto uno studio mirato di una filiera corta locale, nel territorio toscano.

## **Energia Da Biomassa E Sostenibilità Ambientale: Un Caso Di Studio In Toscana**

### ***Introduzione***

Nel contesto climatico attuale, la possibilità di utilizzare biomassa proveniente dal settore agro-forestale per la produzione di agro-energia è un argomento di grande interesse in un'ottica di riduzione delle emissioni di gas clima-alteranti. Tuttavia, anche alla produzione di bioenergia, come la produzione di cippato da biomasse forestali locali, occorre associare e valutare gli impatti legati alla filiera e al trasporto del prodotto, nonché alla produzione di materiali inquinanti come le polveri sottili che si sviluppano durante la combustione, e confrontare tali impatti con quelli relativi all'uso di combustibili fossili per evidenziare, in termini ambientali, eventuali benefici.

Lo scopo di questo studio è stato di analizzare una filiera legno-energia tipica del settore agro-forestale del Mugello (Toscana) attraverso la metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*). Successivamente, è stato valutato, in termini di impatti ambientali, come l'introduzione di un sistema innovativo nella produzione di cippato influisca sulla filiera energetica analizzata.

### ***Metodologia***

E' stata individuata un'area di studio comprensiva di una parte forestale, in cui si sviluppa la produzione di cippato a partire da biomasse locali, e di un'azienda agricola che utilizza il cippato per la produzione di energia termica ed elettrica. La parte forestale è localizzata in una foresta privata di Firenzuola (Firenze) nell'Appennino Tosco-Romagnolo all'interno dell'Oasi di Covigliaio, e di un sito SiC (Sito di importanza Comunitaria) che si estende tra due passi Appenninici, passo della Futa e della Raticosa. L'Azienda Agricola "Riccianico", in cui si trova l'impianto termico a cippato, è di tipo agro-zootecnico con allevamento di 180 bovine da latte e si trova poco distante dal cantiere forestale.

La sostenibilità ambientale è stata analizzata con la metodologia LCA utilizzando il software SimaPro7.3.2 con metodo EcoIndicator99. In particolare sono stati analizzati:

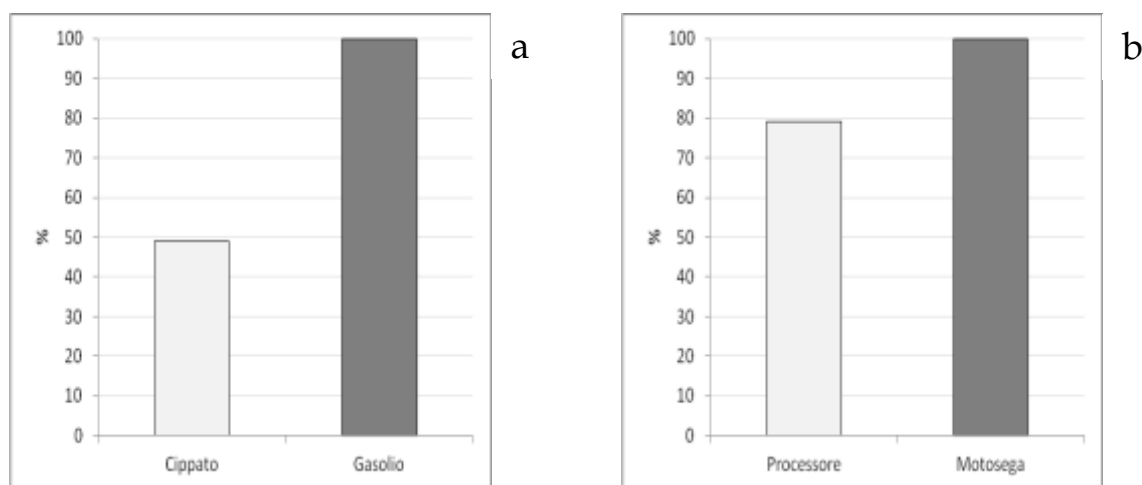
a) il carico ambientale della produzione di un kWh equivalente ottenuta in impianto termico aziendale alimentato a cippato rispetto all'uso di combustibile fossile;

b) il carico ambientale della produzione di una tonnellata di cippato ottenuta con filiera tradizionale (motosega) e con una filiera innovativa, con l'utilizzo di un processore per il taglio e il depezzamento dei tronchi nei diradamenti di fustaie transitorie di faggete.

I dati necessari all'analisi sono stati raccolti direttamente in campo per le fasi di abbattimento, esbosco, cippatura, trasporto, combustione in caldaia e in impianto cogenerativo.

### ***Risultati e conclusioni***

I risultati dimostrano che la produzione di 1 kWh equivalente ha un impatto ambientale molto diverso a seconda che avvenga tramite combustione in caldaia di cippato o di gasolio (Fig. .... a). In particolare, si nota che da un punto di vista di emissioni di gas serra (espresso come danno sul "climate change") l'uso di cippato può portare a una riduzione delle emissioni di circa il 50% rispetto al combustibile fossile. Analizzando la filiera di produzione del cippato è inoltre possibile vedere come il tipo di tecnologia utilizzata per l'abbattimento degli alberi e l'esbosco abbia un effetto significativo sul risultante carico ambientale (Fig. .... b). In questo caso, l'utilizzo di un processore innovativo, soprattutto grazie alla elevata produttività di lavoro e all'ottimizzazione del cantiere forestale, risulta produrre un carico emissivo circa 20% minore rispetto all'utilizzo della tradizionale motosega.

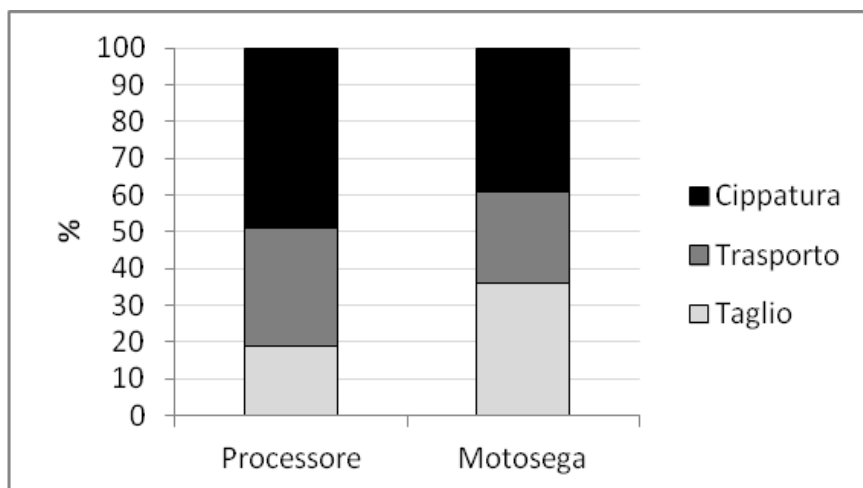


*Confronto LCA filiere Cippato-Energia e Gasolio-Energia (a) e confronto LCA della produzione di cippato con utilizzo di processore innovativo e di motosega tradizionale (b). Metodo Eco-indicator 99 (I) V2.08 Europe EI 99 I/I / Caratterizzazione. Gli impatti riportati in figura si riferiscono esclusivamente alla categoria "Climate change".*

Analizzando più nel dettaglio la filiera della produzione del cippato è possibile vedere come il carico ambientale si suddivide tra le diverse fasi di taglio degli alberi, trasporto (esbosco) e cippatura.

L'utilizzo del processore innovativo è in grado di abbattere il carico emissivo di circa il 17% rispetto all'utilizzo della più tradizionale motosega. Considerando che le altre fasi rimangono pressoché inalterate, è possibile affermare che l'utilizzo del processore è in grado di ridurre le emissioni di gas clima alteranti del processo produttivo.





*Contributo al carico emissivo delle diverse fasi di produzione del cippato con utilizzo del processore e della motosega per il taglio degli alberi. Metodo Eco-indicator 99 (I) V2.08 Europe EI 99 I/I / Caratterizzazione. Gli impatti riportati in figura si riferiscono esclusivamente alla categoria "Climate change".*

I risultati del lavoro dimostrano che l'utilizzo di biomassa forestale per la produzione di energia termica è in grado di ridurre le emissioni di gas serra legate al processo di produzione e di combustione. Inoltre, si può vedere come l'introduzione di nuove tecnologie possa contribuire a migliorare ulteriormente tale performance attraverso una maggiore sostenibilità dell'intero processo di produzione.

## Il bilancio dell'acqua: il water footprint

L'acqua è una risorsa unica e fondamentale per la vita e lo svolgimento delle attività dell'uomo e rappresenta per questo un elemento estremamente critico per il benessere dell'intera società. Una gestione sostenibile ed efficiente della risorsa idrica deve quindi essere una priorità fondamentale nelle politiche di tutti i paesi. L'agricoltura, che rappresenta uno dei principali settori in quanto a consumo di acqua, è in grado di influenzare le risorse idriche ed entra quindi spesso in conflitto con molti altri settori chiave, come ad esempio la produzione industriale, il trasporto e il turismo. L'aumento della popolazione e il conseguente incremento nella domanda globale di prodotti alimentari sta comportando un bisogno sempre maggiore di un'agricoltura più efficiente e di conseguenza l'irrigazione sta diventando una pratica sempre più necessaria al soddisfacimento di tali condizioni.

Come sappiamo, accanto ai fabbisogni alimentari a cui l'agricoltura deve far fronte, negli ultimi anni l'opportunità di utilizzare colture dedicate per la produzione di biocarburanti ha destato un crescente interesse in virtù della potenziale riduzione delle emissioni di gas serra associata ad un loro utilizzo. Ciononostante molti studi evidenziano che una sostituzione dei carburanti fossili a larga scala con i biocarburanti derivati da colture dedicate potrebbe portare a una pressione eccessiva sulla richiesta di produttività delle coltivazioni e conseguentemente sulla risorsa idrica, a seconda del clima, delle tecniche agronomiche applicate, del tipo di coltura e di suolo. Per queste ragioni, gli studi inizialmente dedicati al calcolo dei bilanci emissivi dei gas serra, si stanno ora spostando verso la valutazione della sostenibilità basata anche sulla quantificazione dei volumi di acqua consumati durante la fase di coltivazione delle colture energetiche dedicate.

In questo contesto, la metodologia più utilizzata si basa sul calcolo del "water footprint" (WF) definito come il volume totale di acqua utilizzato per produrre un bene o un servizio, che nel caso di una coltura rappresenta il volume di acqua evapotraspirato e/o inquinato durante il processo di coltivazione. Il WF si compone di tre parti: green, blue e gray. La prima parte è rappresentata dall'acqua immagazzinata nel suolo (precipitazione) e resa disponibile dall'ambiente, la seconda dall'acqua superficiale o di falda somministrata attraverso l'irrigazione e la terza rappresenta il volume di acqua necessario a diluire l'eventuale inquinamento prodotto nel corpo acquifero. In agricoltura la fonte principale di inquinamento delle acque è rappresentata dai fertilizzanti azotati, per cui il "gray WF" viene normalmente calcolato sulla base dei limiti imposti dalla legge sul contenuto massimo di composti azotati nelle acque di superficie e di falda. La "green WF" ossia l'acqua disponibile nel suolo legata principalmente alle precipitazioni è una variabile che di anno in anno, per ogni ciclo colturale, si differenzia fortemente a causa del peculiare andamento climatico e conseguentemente ai cambiamenti climatici sta diventando uno dei fattori che più incide nelle variazioni temporali del WF.

Il WF non si vuole sostituire ad analisi specifiche e complesse quali, ad esempio, il bilancio idrico, ma vuole rappresentare un indicatore del consumo di acqua potabile, inteso non come il semplice prelievo ma, come un utilizzo che non preveda una restituzione all'ecosistema. Una delle caratteristiche principali dell'indice di WF è la sua multidimensionalità. Infatti, esso non solo può essere utilizzato per calcolare il consumo idrico ma fornisce anche informazioni sul tipo di risorsa usata. L'utilizzo dell'irrigazione piuttosto che lo sfruttamento delle sole precipitazioni, infatti, comporta un impatto diverso non solo dal punto di vista ambientale ma anche sociale ed economico.

In questo senso, l'analisi della sostenibilità rappresenta una fase importante nella valutazione globale del WF di un prodotto, poiché attraverso il confronto tra i volumi di acqua utilizzati e quelli disponibili è possibile individuare alcuni punti critici. Questi possono essere rappresentati sia da aree geografiche e/o periodi dell'anno in cui il WF della produzione non è sostenibile (periodi siccitosi o eccesso di precipitazioni, abbassamento della falda, zone aride, etc.), sia da fasi non sostenibili nel processo produttivo (coltivazione, trattamento della materia prima, trasformazioni, trasporto, etc.). In questa fase è inoltre molto importante identificare i criteri di sostenibilità più adatti, siano essi ambientali (qualità delle acque, portate dei fiumi, altezza della falda, etc.), sociali (allocazione della risorsa idrica nei diversi prodotti e settori) ed economici (analisi costi-benefici).

Anche se negli ultimi anni diversi sono stati gli studi riguardo al WF di molti prodotti agricoli, quali cotone, tè e caffè, pomodoro, riso e grano, poco ancora è stato fatto sul fronte delle bioenergie. Alcuni lavori hanno esplorato le implicazioni di una produzione globale di biocarburanti in Cina e India, dimostrando come la continua espansione della coltivazione di mais da bioetanolo in US abbia implicazioni anche pesanti sulla risorsa idrica e sulla sostenibilità del suo utilizzo. Altri hanno portato le evidenze dei forti legami che esistono tra consumo di acqua e produzione di biocarburanti che sarebbe necessaria affinché vengano rispettati i target dettati dall'Unione Europea, e recepiti da Stati Membri e regioni, in termini di produzione e uso di biocarburanti per il settore dei trasporti. A tutto questo si aggiunge l'incertezza legata al cambiamento e alla variabilità climatica che stanno portando verso un aumento della temperatura, una riduzione della radiazione solare e un cambiamento nella distribuzione delle precipitazioni. Questi fattori influenzano in larga parte la produzione agricola e l'efficienza dell'uso dell'acqua delle colture. In questo contesto, l'utilizzo di indici specifici quali il WF può essere di supporto ad una gestione efficiente della risorsa idrica necessaria ad evitare situazioni di insostenibilità o di conflitto derivanti da scelte poco oculate. La coltivazione di colture da biomassa, infatti, ha sicuramente un ottimo potenziale per quanto riguarda la produzione di energia rinnovabile ma per rispettare i criteri di sostenibilità, questa attività deve essere pianificata con attenzione e rigore tecnico-scientifico e solo laddove siamo in presenza di aree idonee e non vulnerabili.

# IL SOLARE

## La radiazione solare per utilizzo energetico

### Introduzione

La radiazione solare che giunge alle soglie dell'atmosfera terrestre è pari alla cosiddetta costante solare, ovvero a  $1367 \text{ W/m}^2$  distribuiti secondo lo spettro solare. Nel suo tragitto nell'atmosfera la radiazione solare viene in parte attenuata e filtrata, alcune componenti vengono più attenuate di altre prima di giungere sulla superficie terrestre. In figura 2.1 lo spettro solare esterno all'atmosfera (radiazione extraterrestre) e a livello del mare.

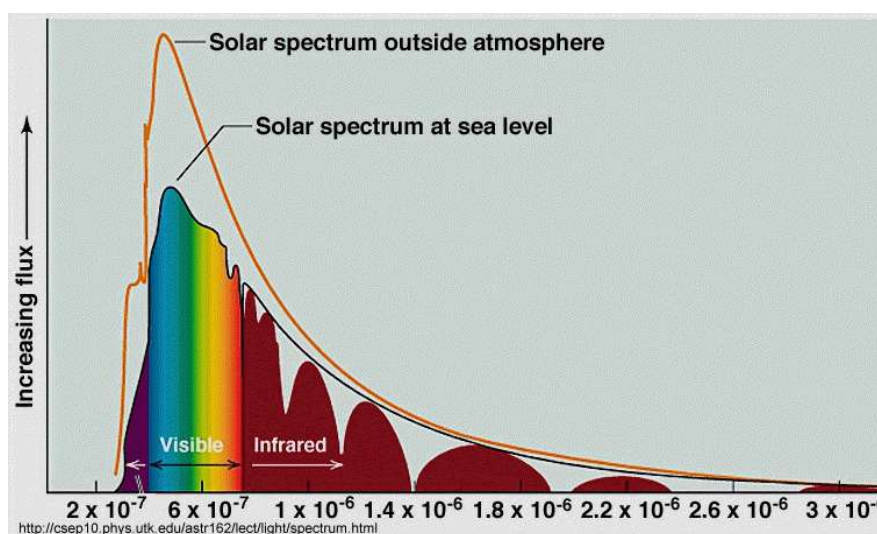


Figura 2.1. Spettro solare extraterrestre (linea rossa) e al livello del mare (linea nera).

Il consumo globale di energia da parte dell'uomo corrisponde a circa 300 TWh/giorno, ovvero una quantità di energia pari alla quantità di calore prodotta dalla radioattività terrestre, che è responsabile dei terremoti, dei fenomeni vulcanici e dello spostamento delle placche continentali. Orbene, la quantità di energia solare che arriva sulla superficie terrestre, circa 3000 PWh/giorno, è pari a circa diecimila volte l'energia usata dall'umanità nel suo complesso; tale energia risulta poco concentrata e di difficile conversione, nel senso che il suo utilizzo richiede, oltre alla sua intercettazione su aree molto vaste, anche l'impiego di tecnologie sofisticate in grado di convertirla in energia facilmente sfruttabile con efficienze accettabili. Le tecnologie che permettono di convertire l'energia solare in energia facilmente utilizzabile, come il calore, o trasportabile, come l'energia elettrica, sono essenzialmente riconducibili al "solare termico", "solare fotovoltaico" e "solare a concentrazione".

### Solare termico per riscaldamento

I pannelli solari termici permettono di riscaldare l'acqua sanitaria per l'uso quotidiano senza utilizzare gas o elettricità. Si basano su un principio molto semplice: utilizzare il calore proveniente dal Sole e utilizzarlo per il riscaldamento o la produzione di acqua calda che può arrivare fino a  $70^\circ$  in estate, ben al di sopra dei normali  $40^\circ$ - $45^\circ$  necessari per una doccia. Un pannello solare termico (o collettore solare) è composto da un radiatore in grado di assorbire il calore dei raggi solari e

trasferirlo al serbatoio di acqua. La circolazione dell'acqua dal serbatoio al rubinetto domestico è realizzata mediante circolazione naturale o forzata, in quest'ultimo caso il pannello solare integra una pompa idraulica con alimentazione elettrica.

### **Pannelli solari termici non vetrati**

sono privi di vetro; hanno il vantaggio di essere poco costosi e di avere un ottimo rendimento in condizioni ottimali di irraggiamento quando la temperatura esterna è alta. A causa della mancanza dell'isolamento il loro rendimento diminuisce rapidamente all'allontanarsi dalle condizioni ottimali. L'acqua passa direttamente all'interno dei tubi del pannello dove viene riscaldata dai raggi solari ed è pronta per essere usata. Il limite di questi pannelli è che, non essendo coibentati, funzionano con una temperatura ambiente di almeno 20 °C (al di sotto il bilancio tra energia accumulata ed energia dispersa è sfavorevole), e la temperatura massima dell'acqua non supera i 40 °C..

### **Pannelli solari termici vetrati**

Hanno una struttura attorno all'assorbitore che ne limita le dispersioni sia per convezione con l'aria che per irraggiamento dato che il vetro che ricopre la parte superiore dell'assorbitore è progettato per questa funzione. Hanno un rendimento leggermente inferiore ai non vetrati in condizioni ottimali ma in condizioni meno favorevoli hanno un rendimento decisamente più alto arrivando a produrre acqua calda per uso sanitario circa da marzo a ottobre; i pannelli solari termici vetrati selettivi consistono in un particolare trattamento dell'assorbitore che lo rende più ricettivo al calore, per questo sono più efficienti nei periodi meno favorevoli, mentre quelli non selettivi hanno semplicemente l'assorbitore colorato di nero in modo da attirare maggiormente la radiazione solare. I pannelli vetrati possono essere anche ad acqua.

## **Solare fotovoltaico**

### **Effetto fotovoltaico**

Le celle fotovoltaiche sfruttano per la trasformazione dell'energia solare in energia elettrica il principio del "effetto fotovoltaico", ovvero il fenomeno fisico che si realizza in un materiale, nel momento in cui un elettrone presente nella banda di valenza passa alla banda di conduzione a causa dell'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico. Fu Albert Einstein, nel 1905, a pubblicare la teoria fisica con cui veniva spiegato l'insieme di fenomeni fisici che vanno sotto il nome di "effetto fotoelettrico" e del quale fa parte anche l'effetto fotovoltaico. Quando una radiazione elettromagnetica investe un materiale può, in certe condizioni, cedere energia agli elettroni più esterni degli atomi del materiale e, se questa è sufficiente, l'elettrone risulta libero di allontanarsi dall'atomo di origine. L'assenza dell'elettrone viene chiamata in questo caso lacuna (gap). Affinché un elettrone possa passare dalla banda di valenza, corrispondente allo stato legato più esterno dell'atomo, alla banda di conduzione, in cui è libero dall'attrazione del nucleo, è necessario fornirgli una quantità di energia superiore alla banda proibita del materiale (band gap). In base all'energia richiesta per superare il band gap, si distinguono i materiali isolanti, da quelli

conduttori; mentre i primi presentano valori di band gap elevati (superiori all'energia del fotone incidente) i materiali conduttori richiedono valori di energia è molto bassi.

## **Cella fotovoltaica**

La cella fotovoltaica o cella solare è l'elemento base nella costruzione di un modulo fotovoltaico. La versione più diffusa di cella fotovoltaica, quella in materiale cristallino, è costituita da una lamina di materiale semiconduttore, il più diffuso dei quali è il silicio, e si presenta in genere di colore nero o blu e con dimensioni variabili dai 4 ai 6 pollici. Piccoli esemplari di celle fotovoltaiche in materiale amorfo sono in grado di alimentare autonomamente dispositivi elettronici di consumo, quali calcolatrici, orologi e simili. Analogamente al modulo, il rendimento della cella fotovoltaica si ottiene valutando il rapporto tra l'energia elettrica prodotta dalla cella e l'energia della radiazione solare che investe l'intera sua superficie. Valori tipici per gli esemplari in silicio multicristallino comunemente disponibili sul mercato si attestano attorno al 18%.

Le tipologie costruttive di celle fotovoltaiche più comuni sono le celle in silicio cristallino e le celle in film sottile.

## **Celle cristalline**

- Silicio monocristallino: sono ottenute a partire da un unico grande cristallo di silicio. Hanno colore uniforme e scuro tra il blu notte e il nero. Generalmente di forma quadrata con spigoli smussati, particolare che permette di distinguerli dagli altri tipi e che formano dei piccoli rombi bianchi tra le celle. Rendono meglio delle celle in silicio policristallino in condizioni di esposizione ottimale (luce perpendicolare e assenza di nuvole). L'efficienza è intorno al 16%-17%, ma al contempo il costo di realizzazione è alto. Inoltre la forma delle celle di silicio monocristallino comporta una perdita di spazio nella realizzazione del pannello. Il costo energetico per la produzione dei wafer di silicio monocristallino è molto alto, di conseguenza l'Energy Pay-Back Time (EPBT), ovvero il tempo necessario affinché ogni modulo produca energia elettrica in quantità pari a quella utilizzata per produrlo, si aggira intorno ai 6 anni.
- Silicio policristallino: a differenza del silicio monocristallino, in questo caso la cella non presenta una struttura omogenea, ma piuttosto risulta organizzata in grani localmente ordinati. Il processo di produzione risulta più semplice, con una sensibile riduzione dei costi, ma comporta una riduzione di efficienza delle celle (15%-16%). Le celle sono unite tra di loro senza spazi intermedi. In condizioni di scarso soleggiamento o di non perpendicolarità dei raggi solari, hanno un rendimento maggiore di quelle in silicio monocristallino. Va detto che la semplificazione nel processo produttivo non comporta una sensibile riduzione dell'EPBT. Il vantaggio delle strutture policristalline è la possibilità di tagliare wafer in forme (rettangolari, quadrate, ecc.) adatte ad essere assemblate insieme senza perdita di spazio. Tipicamente per un metro quadro di pannelli di questo tipo si hanno potenze pari a 130-140 Watt di picco (Wp).
- Silicio string ribbon: questa tecnologia prevede che due fili sottili vengono tirati dal basso verso l'alto attraverso un crogiolo piatto con silicio fuso. Durante questo procedimento tra i

fili si crea una banda di silicio di circa 0.2 millimetri di spessore e 80 millimetri di larghezza. La banda di silicio che si solidifica nel raffreddamento viene tirata lentamente verso l'alto in modo tale che si prolunghi in modo continuo. Regolarmente vengono tagliati circa 150 millimetri di sezione della banda che poi vengono trasformati in celle solari preparate da silicio fuso colato in strati piani. Queste celle presentano un'efficienza non elevata, compresa tra il 13.5% e il 15%, ma hanno il vantaggio di ridurre al minimo la quantità di silicio necessaria. Considerando che il silicio puro a basso costo comincia a scarseggiare, questa tecnologia presenta un vantaggio, infatti mentre con i metodi di produzione tradizionali servono 11 g di silicio per produrre 1 Wp, con questa tecnologia bastano 7 g.

### **Celle in film sottile**

- Silicio amorfo: questa tecnologia prevede che il silicio venga depositato in fase di vapore, su un supporto sul quale formerà un film sottile. Il quantitativo di energia necessario alla produzione è abbastanza basso. Il rendimento di questi moduli non è molto elevato (6-8%); rendono nettamente meno delle celle cristalline. Per contro rispetto al monocristallino ha bassa dipendenza dell'efficienza dalla temperatura e alta efficienza con bassa luminosità, ovvero ha maggiore capacità di trasformare la luce solare quando il sole è forte e quando il sole è debole.
- Tellururo di cadmio (CdTe): al pari di quelli in silicio amorfo, sono pannelli a film sottile economici e con basso rendimento termodinamico. Il rendimento è pari al 10-11%. Data la documentata tossicità del cadmio, è stato inserito nella lista dei materiali vietati nelle produzioni elettriche o elettroniche e ne verrà vietato l'utilizzo nella produzione di celle fotovoltaiche a partire dal 2013 (modifica alla Direttiva Restriction of Hazardous Substances Directive del 24 Novembre 2010).
- Alle sopracitate tecnologie si deve aggiungere quelle che riguardano l'utilizzo di altri materiali quali il Solfuro di cadmio (CdS), Arseniuro di gallio (GaAs), Diseleniuro di indio rame (CIS), Diseleniuro di indio rame gallio (CIGS).

### **Modulo fotovoltaico**

Il modulo fotovoltaico è un dispositivo capace di convertire la luce solare direttamente in energia elettrica. I moduli in silicio mono o policristallini rappresentano la maggior parte del mercato; sono tecnologie costruttivamente simili, e prevedono che ogni cella fotovoltaica sia cablata in superficie con una griglia di materiale conduttore che ne canalizzi gli elettroni. Ogni singola cella viene connessa alle altre mediante nastri metallici, in modo da formare opportune serie e paralleli elettrici. Attualmente, nei test di laboratorio, l'efficienza delle singole celle che compongono i moduli può raggiungere il 30%, ma, per problemi tecnici, nella pratica l'efficienza si riduce generalmente al 16% per pannelli in silicio cristallino e al 10% per pannelli in film sottile.

Per ovviare a queste basse efficienze sono in via di sviluppo le celle in film sottile multi-giunzione, queste consistono nel sovrapporre più strati di film sottile di diversi materiali, di semiconduttori scelti leggermente diversi fra loro (devono avere gap di energia diversi), così che ciascuno strato

possa assorbire in modo ottimale i fotoni di un certo range di energia. Questo sistema consentirebbe, a livello teorico, di raggiungere un rendimento dell' 86,8% (Green, 2002), ma per ragioni tecnologiche, ad oggi, il rendimento massimo ottenuto in laboratorio si è arrestato al 41,1% riuscendo a sovrapporre tre strati di materiali diversi a film sottile in una cella a giunzione tripla, costituita da fosforo di indio gallio, arseniuro di gallio-indio e substrato di germanio. Attualmente i prodotti commerciali più efficienti, si attestano sul 19-20%.

### **Solare fotovoltaico a concentrazione e inseguitori solari**

Questa tecnologia consiste nel concentrare l'energia raccolta da un'ampia superficie su una superficie di minor dimensione ricoperta da celle fotovoltaiche. Il vantaggio è costituito dal fatto di utilizzare le celle ad un punto di rendimento più alto e di conseguenza la possibilità di ridurre i costi iniziali dovendo acquistare un minor numero di celle a parità di energia prodotta. Per contro il problema è legato al surriscaldamento a valori intollerabili delle celle stesse, dovuto alla concentrazione dei raggi solari e per questo si deve affiancare un sistema di raffreddamento.

L'uso di inseguitori solari consente di ottimizzare l'inclinazione dei moduli fotovoltaici per ottenere un massimo rendimento di conversione dell'energia solare. Gli inseguitori consentono la variazione dell'inclinazione del pannello verso sud (tilt), per ottenere la potenza massima nei vari mesi dell'anno, e un inseguimento del sole durante il movimento diurno est-ovest.

### **Solare termodinamico**

Questa tecnologia sfrutta la concentrazione dell'energia solare per scaldare un fluido termovettore, che a sua volta cede il calore ad un processo attraverso il quale viene convertito in energia elettrica. Oltre alla captazione di energia termica solare già presente nei comuni impianti solari termici, aggiunge quindi un ciclo termodinamico per la trasformazione dell'energia termica in energia elettrica tramite turbina a vapore e alternatore come avviene nelle comuni centrali termoelettriche.

Grazie alla possibilità di accumulo del calore in appositi serbatoi, rispetto al solare termico e fotovoltaico, consente la possibilità di produrre elettricità anche durante la notte o con cielo coperto da nuvolosità. Il problema che presentano questo tipo di impianti, sono le notevoli superfici libere da occupare in rapporto alla produzione elettrica. Il componente principale è il collettore concentratore, ovvero il dispositivo capace di raccogliere e convogliare la radiazione solare verso il ricevitore che può raggiungere temperature molto elevate (400 ~ 600 °C). I concentratori si distinguono, in base alla loro geometria e disposizione rispetto al ricevitore, in parabolici lineari, a torre con ricevitore centrale e parabolici a disco.

- **Concentratori parabolici lineari:** si tratta di specchi parabolici a struttura lineare che consentono un orientamento monodimensionale verso il sole e che concentrano i raggi solari verso un tubo ricevitore, posto nel fuoco del paraboloide, in cui è fatto scorrere un fluido termovettore (generalmente oli minerali) per il successivo accumulo di energia in appositi serbatoi di accumulo. L'accumulo è in contatto termico con uno scambiatore di calore, che attraverso una caldaia genera vapore; questo viene utilizzato per muovere delle turbine collegate a loro volta a degli alternatori (il complesso turbina-alternatore è detto anche turboalternatore) per produrre così corrente elettrica.



Dal 2001 l'ENEA sta sviluppando il progetto Archimede, il quale prevede l'utilizzo di sali fusi come fluido termovettore. Per far ciò sono stati riprogettati i tubi ricevitori, in modo tale da renderli resistenti a temperature maggiori di 600 °C, necessarie a mantenere i sali fluidi. Questi sono quindi accumulati ad una temperatura di 550 °C in un serbatoio per l'accumulo, che essendo dimensionato in modo tale da garantire la produzione elettrica con un'autonomia di 8 ore, consente la generazione di vapore svincolandosi dalla captazione dell'energia solare (di notte o con scarsa insolazione). L'impianto, lavorando a una temperatura di regime di 550 °C, consente la produzione di vapore alla stessa temperatura e pressione di quello utilizzato nelle centrali elettriche a coproduzione (turbina a gas e riutilizzo dei gas di scarico per produrre vapore), consentendo consistenti riduzioni di costi e sinergie con le stesse. Attualmente è stato realizzato un impianto con tali caratteristiche in Spagna e un impianto dimostrativo, su scala industriale, presso la centrale termoelettrica ENEL ubicata a Priolo Gargallo (Siracusa).

- Impianto a torre centrale: questo tipo di impianti a concentrazione sono costituiti da una serie di specchi inseguitori solari indipendenti che riflettono i raggi del sole verso un ricevitore posto alla sommità di una torre. Nel ricevitore scorre il fluido termovettore che trasferisce il calore a un generatore di vapore, che alimenta un turboalternatore. Con questo sistema si possono raggiungere fattori di concentrazione, e quindi temperature, superiori rispetto ai collettori parabolici lineari.

L'elevato costo che ad oggi hanno i collettori solari, dato dal fatto che la tecnologia non ha raggiunto il pieno sviluppo e non è ancora stata avviata una produzione di massa, rende il costo dell'energia prodotta con tale tecnologia è 5 volte superiore a quello ottenibile da altre fonti. È ipotizzabile che una volta avviata la produzione verso un'economia di scala i costi di realizzazione si abbassino al punto da rendere tale sistema competitivo con le attuali tecnologie dominanti.

## Stima della radiazione solare

### Premessa

La disponibilità di dati di radiazione rilevati a terra da stazioni meteorologiche risulta piuttosto limitata, anche in considerazione della non certificata qualità dei dati rilevati. Inoltre l'ottenimento di carte di radiazione mediante la spazializzazione dei pochi dati disponibili, determinerebbe errori significativi nelle zone prive di stazioni. In considerazione di ciò l'approccio seguito nel presente progetto è stato quello di affidarsi a dati di radiazione stimati a livello territoriale mediante opportune metodologie. In particolare è stata valutata l'opportunità di impiegare dati stimati da satellite e da modello meteorologico. Da un confronto con dati rilevati a terra il dato stimato da satellite è risultato decisamente più coerente rispetto a quello stimato da modello meteorologico. Il possibile impiego di tali dati ai fini della stima della radiazione a livello regionale era già stato verificato nell'ambito di alcuni progetti finanziati dalla Regione Toscana (Vaccari et al., 2009). Nel presente lavoro l'archivio di tali dati satellitari è stato ulteriormente aggiornato e le procedure per l'estrazione e l'analisi dei dati sono state ulteriormente perfezionate ed estese a livello nazionale. I dati satellitari sono inoltre stati oggetto di ulteriori elaborazioni volte a rendere i dati più coerenti con le caratteristiche del territorio e con il loro impiego ai fini energetici; questo si è reso necessario in quanto i dati satellitari sono relativi ad una superficie orizzontale ed inoltre non tengono conto dell'orizzonte reale conseguente alla presenza dell'orografia.

### DSSF stimata da satellite

Le tecniche per la stima della radiazione da satellite sono basate su modelli ed algoritmi; una delle tecniche più recenti, è quella sviluppata da Météo-France e da LSA SAF (Land Surface Analysis Satellite Applications Facility, Portogallo), il cui prodotto è il DSSF (down-welling surface short-wave radiation flux), ovvero la quantità di energia radiativa nella lunghezza d'onda che ricade all'interno del range 0.3-4.0  $\mu\text{m}$  su una superficie orizzontale (risoluzione temporale 30 minuti, copertura Europa, circa 5 km di risoluzione spaziale alle nostre latitudini). I valori di questo prodotto sono stati validati con ottime performance con dei dati misurati a terra e facenti parte del database Baseline Surface Radiation Network (BSRN), lavoro congiunto del World Climate Research Programme (WCRP) e del Global Energy and Water Experiment (GEWEX) e sono ampiamente utilizzati a livello internazionale. Per come elaborati, i dati DSSF, tengono in considerazione la nuvolosità presente al momento dell'acquisizione dell'immagine e pertanto consentono di stimare la copertura nuvolosa verificatasi nell'area e nel periodo di studio, dato che, per le successive analisi del progetto, presenta un indubbio vantaggio. Tali dati pur tenendo conto della variazione di quota causata dalla presenza di orografia (e quindi del minor strato di atmosfera che i raggi solari devono percorrere prima di giungere al suolo), non considerano l'effetto orizzonte reale dell'orografia stessa (e quindi gli eventuali ombreggiamenti da essa derivati).

La sotto riportata immagine illustra l'estensione del dominio spaziale coperto dal satellite MSG2 relativamente all'area centrata sull'Europa, costituito da 651 righe e da 1701 colonne.

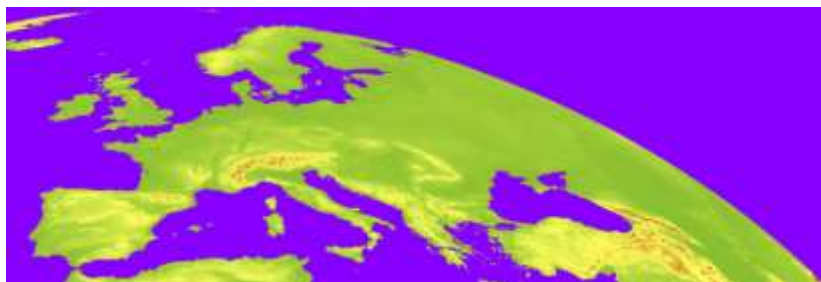


Figura 2.2. Dominio coperto dalla procedura di stima della DSSF

Per ulteriori dettagli sui dati di radiazione stimati da satellite si rimanda al sito <http://landsaf.meteo.pt>.

## Archivio dati di radiazione DSSF

Nell'ambito del presente progetto è stato perfezionato e ampliato l'archivio di dati di radiazione DSSF, ottenuto a partire dai *file* originali in formato HDF5 messi a disposizione da LSA-SAF e scaricati dal relativo sito. Per le specifiche dei dati si rimanda al sito <http://landsaf.meteo.pt>. I dati DSSF sono stati archiviati per anno e per mese. Il periodo coperto va dallo 01/03/2005 al 31/12/2011, e copre pertanto un totale di più di 6 anni. Sono stati inoltre archiviati i *file* "statici" contenenti le informazioni geofisiche del dominio spaziale coperto dal satellite (latitudine, longitudine e modello digitale del terreno).

L'archivio risiede su macchina Unix denominata "Aria" fisicamente posizionata presso il Consorzio LAMMA (Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica ambientale per lo sviluppo sostenibile della Regione Toscana). Parallelamente a quello in formato HDF5, sulla macchina è stato preparato un archivio speculare in formato ASCII, strutturato analogamente a quello HDF5, ottenuto estraendo la variabile "DSSF" dai *file* originali HDF5 tramite il comando `<h5dump>`.

## Procedura di estrazione dei dati di radiazione DSSF

### Descrizione generale

La procedura è costituita da uno *script bash* denominato `<Elaborazione_DSSF.bash>` e da due eseguibili compilati in FORTRAN PG90, denominati `<CREA_MAPPE_DSSF.exe>` e `<CREA_SERIE_DSSF.exe>`, invocati all'interno della stessa procedura *bash*.

Il primo eseguibile è finalizzato alla creazione delle mappe di radiazione media sul dominio, mentre il secondo ha lo scopo di creare le serie temporali di radiazione (semioraria) nei punti scelti.

I *file* di *input* che l'utente deve preparare – comuni a qualsiasi scelta – sono il *file* del dominio temporale scelto e uno specifico *file* di controllo in base al quale avviene la scelta se creare le mappe delle radiazioni medie sul dominio spaziale oppure le serie temporali nei punti scelti. Nel primo caso, sarà necessario preparare il *file* del dominio spaziale da estrarre, mentre nel secondo occorrerà specificare l'elenco dei punti in corrispondenza dei quali estrarre le serie temporali.

La procedura accede preliminarmente alle informazioni generali del grigliato globale del satellite MSG2, quali i valori di latitudine, longitudine e quota altimetrica relativi a ciascun punto dell'intero dominio spaziale. In un *file* in ingresso denominato `<Date.txt>` l'utente deve specificare il dominio temporale scelto, a partire dal quale la procedura provvederà a crearsi internamente l'elenco di tutti

i *file* di radiazione da estrarre, completi di percorso e nome, generando un *file* denominato <ListaFile.asc>. La lista di *file* presente in <ListaFile.asc> guiderà il successivo ciclo della procedura *bash*, finalizzato ad accedere ad ogni passo a ciascuno dei *file* in elenco.

A seconda delle scelte operate nel *file* di controllo, verrà lanciato l'eseguibile per la creazione delle mappe <CREA\_MAPPE\_DSSF.exe>, oppure quello per la creazione delle serie temporali <CREA\_SERIE\_DSSF.exe>. Nel primo caso, l'eseguibile leggerà in ingresso il *file* del sottodominio spaziale scelto dall'utente e denominato <Dominio\_Mappe.txt>, mentre nel secondo l'eseguibile leggerà in ingresso il *file* contenente l'elenco dei punti da estrarre e denominato <Punti.txt>. In particolare, nel *file* <Dominio\_Mappe.txt> dovranno essere specificati i valori iniziali e finali delle righe e delle colonne da estrarre rispetto al grigliato globale, mentre nel *file* <Punti.txt> dovranno essere riportati, per ogni punto in elenco, le coordinate (Lat, Long) ed il relativo nome (etichetta). Relativamente a quest'ultima opzione, all'interno dell'eseguibile <CREA\_SERIE\_DSSF.exe> è stata implementata una specifica *subroutine* in grado d'individuare la cella (riga, colonna) del grigliato globale corrispondente alle coordinate (Lat, Long) dello specifico punto processato.

In uscita, la procedura produrrà tre tipi di risultati: due *file* di dati DSSF elaborati ed un *file* di *log* complessivo della procedura. I *file* generati sono tutti in formato ASCII. Le procedure qui descritte sono state ulteriormente perfezionate ed applicate a livello nazionale.

### Tempi di calcolo

La procedura di elaborazione dei dati DSSF viene eseguita su una macchina Unix con 4 GB di RAM, processore Xeon D2.66 Hz, su cui è operativo il sistema Centos 5.3. I suoi tempi di calcolo sono mediamente dell'ordine di 10 minuti per il processamento di un mese di dati, ossia all'incirca  $1440 \div 1488$  *file*. Questo significa, ad es., all'incirca  $10 \times 12 = 120$  minuti per il calcolo della mappa delle medie annuali, o  $10 \times 6 = 60$  minuti per il calcolo della mappa delle medie dal 2005 al 2010 di ciascun mese (medie mensili "climatologiche").

I tempi di calcolo sono gli stessi per entrambe le opzioni di calcolo (creazione delle mappe o delle serie temporali). In particolare, anche specificando nel *file* <Punti.txt> un rilevante numero di punti da estrarre (20 o più), i tempi di calcolo della procedura ne risentono in maniera minima.

## **Analisi della distribuzione della radiazione solare sul territorio italiano: spazializzazione del dato satellitare DSSF**

I data-set DSSF medi giornalieri mensili, relativi al periodo giugno 2005 – maggio 2011, sono stati processati e spazializzati per la generazione di carte di radiazione giornaliera media mensile sul territorio Italiano; la spazializzazione è stata effettuata utilizzando una risoluzione pari a 300 m rispetto a quella originale di circa 5km (questo al fine di poter successivamente aggiungere l'effetto orizzonte reale dell'orografia).

La scelta del metodo di spazializzazione da adottare ha comportato l'esame delle principali tecniche disponibili sia di tipo deterministico che stocastico.

Tra i metodi deterministici, tralasciando i poligoni di Thiessen che risultano creare delle discontinuità fittizie e abrupte, sono state testate la metodologia Inverse Distance Weighted (IDW) e la Spline.

L'IDW fornisce una stima dei dati disponibili in uno specifico intorno, dove la stima nel punto non noto è funzione dei punti limitrofi in cui la variabile è nota e a cui, secondo la legge di Tobler (1970) è attribuito un peso in funzione della loro distanza reciproca. Il modello IDW è un metodo esatto, ovvero tra i valori di input e i valori di output lo scarto è 0.

Il Regularized Spline with Tension, un metodo di interpolazione di tipo deterministico. Partendo da una serie di dati puntuali sparsi sul territorio, questo metodo consente di calcolare i dati mancanti sulla base di una legge di corrispondenza radiale (Mitasova, Hofierka, 1993; Mitsova, Mitsova, Brown, 1995; Talmi, Gilat, 1977). L'interpolatore Spline suddivide l'intervallo di definizione, nel nostro caso l'area di studio, in più sotto intervalli (aree) per ciascuno dei quali viene scelto un polinomio di grado  $x$ . Il metodo di interpolazione Spline impone che due polinomi consecutivi siano continui e che quindi si leghino senza bruschi salti di valore. Si osserva che la tecnica Regularized Spline with Tension, per la spazializzazione dei dati puntuali di radiazione solare e nuvolosità osservata da stazioni, è implementata nel sistema europeo PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), realizzato dal Joint Research Center dell'Unione Europea.

Il Thin Plate Spline è una ulteriore variante dell'interpolazione Spline che, sebbene formulata in modo differente, può essere considerata formalmente equivalente al Kriging (Wahba, 1990). Questa metodologia porta a ridurre al minimo la rugosità della superficie interpolata, attraverso l'adozione dell'opportuno ordine della derivata da cui è definita. Il Thin Plate Spline è stato utilizzato per interpolare i valori giornalieri (Xia et al., 2000) e giornalieri medi mensili (Hutchinson et al, 1984) di radiazione globale con risultati soddisfacenti.

Tra i metodi di interpolazione stocastica sono stati presi in considerazione il Kriging e il Cokriging. Attraverso un'analisi strutturale dei dati, si determina il variogramma empirico, il quale costituisce la base di partenza per analizzare la variabilità spaziale del fenomeno. In particolare il Cokriging si serve di una o più variabili ausiliarie, correlate con la prima (Wackernagel, 2001), per creare un variogramma il più dettagliato e realistico possibile. Nel caso in questione, per ciascun ciclo dell'algoritmo, il modello digitale delle elevazioni (DEM) è stato utilizzato come variabile ausiliaria. Una volta individuato il variogramma empirico, per ciascun punto del dominio sono stati determinati i pesi necessari alla stima del valore della variabile.

Per ciascun mese la griglia di punti del data-set DSSF è stata suddivisa in due porzioni, contenenti ognuna il 50% dei punti, in modo tale da utilizzare la prima porzione come sub-data-set per la spazializzazione dei dati e la seconda griglia per la successiva validazione.

	ME (%)	MAE (%)	RMSE (%)
Inverse Distance Weighted	0.017%	2.321%	3.435%
Regularized Spline with Tension	0.008%	1.342%	2.331%
Thin_Plate_Spline	0.011%	1.349%	2.347%
Kriging	0.284%	2.115%	3.249%
Cokriging	0.387%	1.908%	2.999%

Tabella 2.1: Errore medio percentuale (ME), Errore medio percentuale in valore assoluto (MAE), Errore percentuale quadratico medio (RMSE) per i modelli di spazializzazione della radiazione presi in considerazione.

Dall'analisi dei risultati ottenuti (Tabella 2.1) la scelta del metodo di spazializzazione da adottare si è orientata pertanto verso procedure di spazializzazione legate al fattore distanza orizzontale, dato

che il dato di radiazione fornito dal satellite è poco dipendente dalla quota e da altre caratteristiche topografiche quali la distanza dal mare. Nonostante sia stata impostata una funzione anisotropica, il Kriging e il Cokriging sono risultati i modelli meno soddisfacenti; sebbene entrambi presentino valori degli indici di errore in linea con gli altri modelli deterministici, al contempo presentano elevati errori in corrispondenza degli outliers. Analoghi problemi sono stati riscontrati sia per la metodologia Thin Plate Spline che per la metodologia IDW, attraverso la quale sono state inoltre realizzate delle carte caratterizzate da una forte discontinuità. L'elevato numero di punti presenti e la loro omogenea distribuzione nel territorio ha orientato la scelta del metodo di spazializzazione a favore dell'interpolazione Regularized Spline with Tension.

### **Confronto della radiazione stimata da satellite (DSSF) con quella stimata dal modello meteorologico WRF**

Prima di procedere all'utilizzo dei dati di radiazione stimati da satellite (DSSF) si è proceduto all'effettuazione di un confronto fra tali dati e quelli derivati dall'impiego di un modello meteorologico (modello WRF) operativo presso il Consorzio LAMMA. Tale modello, nel prevedere i vari campi meteorologici (nuvolosità inclusa) procede anche alla stima della radiazione solare su superficie orizzontale ed è pertanto confrontabile con il DSSF.

Nel database del LaMMA sono presenti i dati del modello operativo su tutto il dominio di integrazione a partire dal 2004. Per il presente studio, volto alla verifica della radiazione globale incidente su superficie orizzontale, sono stati estratti dal DB i dati, con base oraria ( $\text{W/m}^2$ ) per il periodo 2007-2010 per la stazione di Sesto Fiorentino (LAMMA - Polo Scientifico), dati regolarmente registrati mediante solarimetro calibrato. Si è proceduto pertanto ad un confronto della radiazione globale su superficie orizzontale ottenuta da satellite, da modello e da stazione meteorologica. Nelle figure 3, 4, 5 e 6 vengono riportati i confronti fra i dati stimati da satellite (DSSF), quelli stimati da modello WRF e quelli misurati dalla stazione. I dati sono espressi come cumulati giornalieri ( $\text{kWh m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$ ). Si ricorda che per convertire i kWh in MJ è necessario moltiplicare i kWh per 3.6.

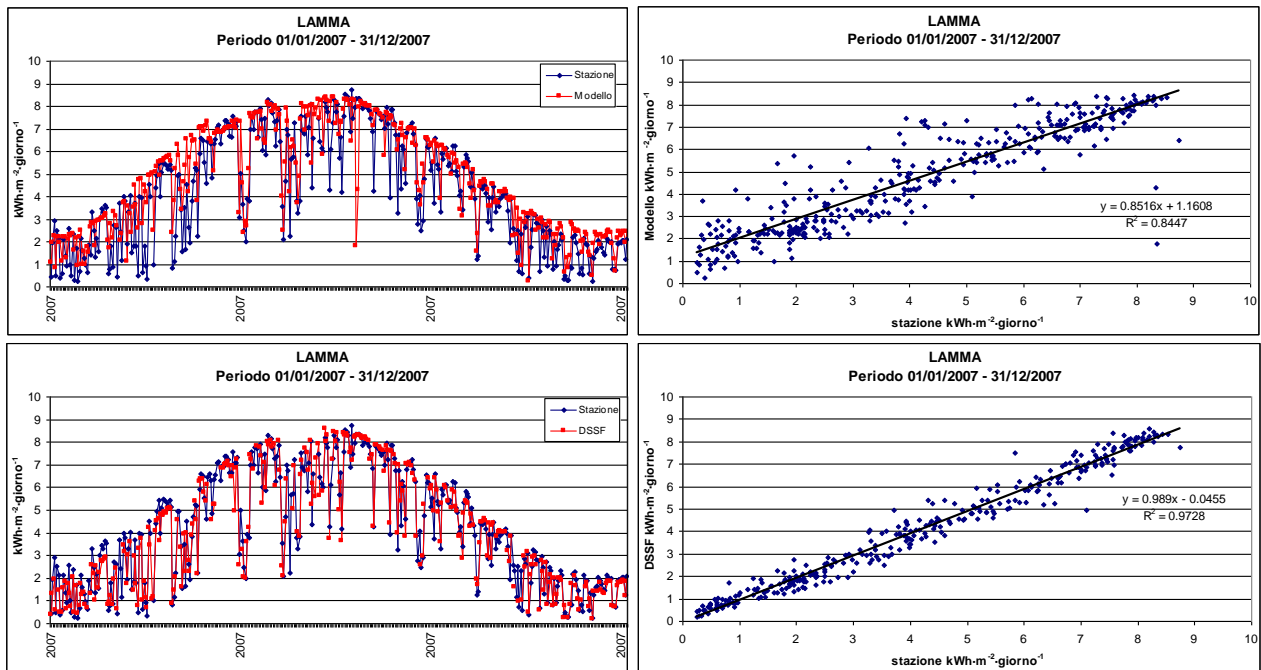


Figura 2.3. Confronto fra i dati (integrali giornalieri) rilevati nel 2007 dalla stazione del LAMMA Polo Scientifico (Sesto Fiorentino) e quelli stimati da modello meteorologico WRF e da satellite (dati DSSF). Sono inoltre riportate le regressioni relative.

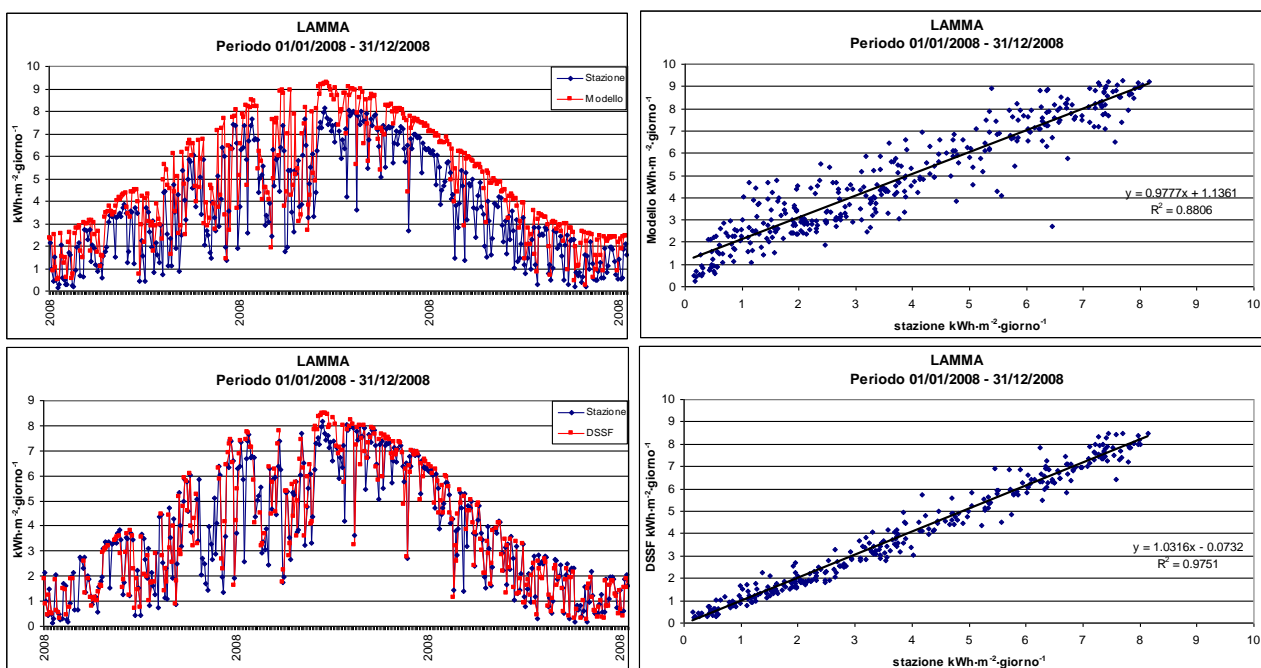


Figura 2.4. Confronto fra i dati (integrali giornalieri) rilevati nel 2008 dalla stazione del LAMMA Polo Scientifico (Sesto Fiorentino) e quelli stimati da modello meteorologico WRF e da satellite (dati DSSF). Sono inoltre riportate le regressioni relative.

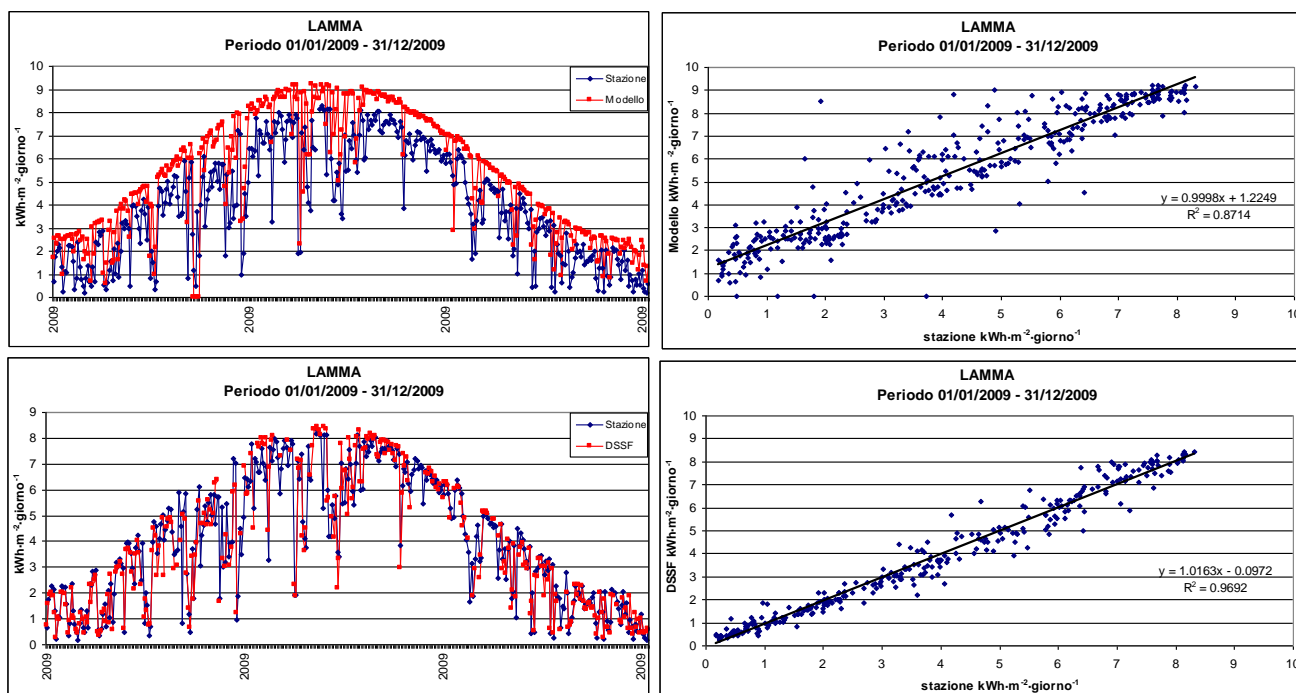


Figura 2.5. Confronto fra i dati (integrali giornalieri) rilevati nel 2009 dalla stazione del LAMMA Polo Scientifico (Sesto Fiorentino) e quelli stimati da modello meteorologico WRF e da satellite (dati DSSF). Sono inoltre riportate le regressioni relative.

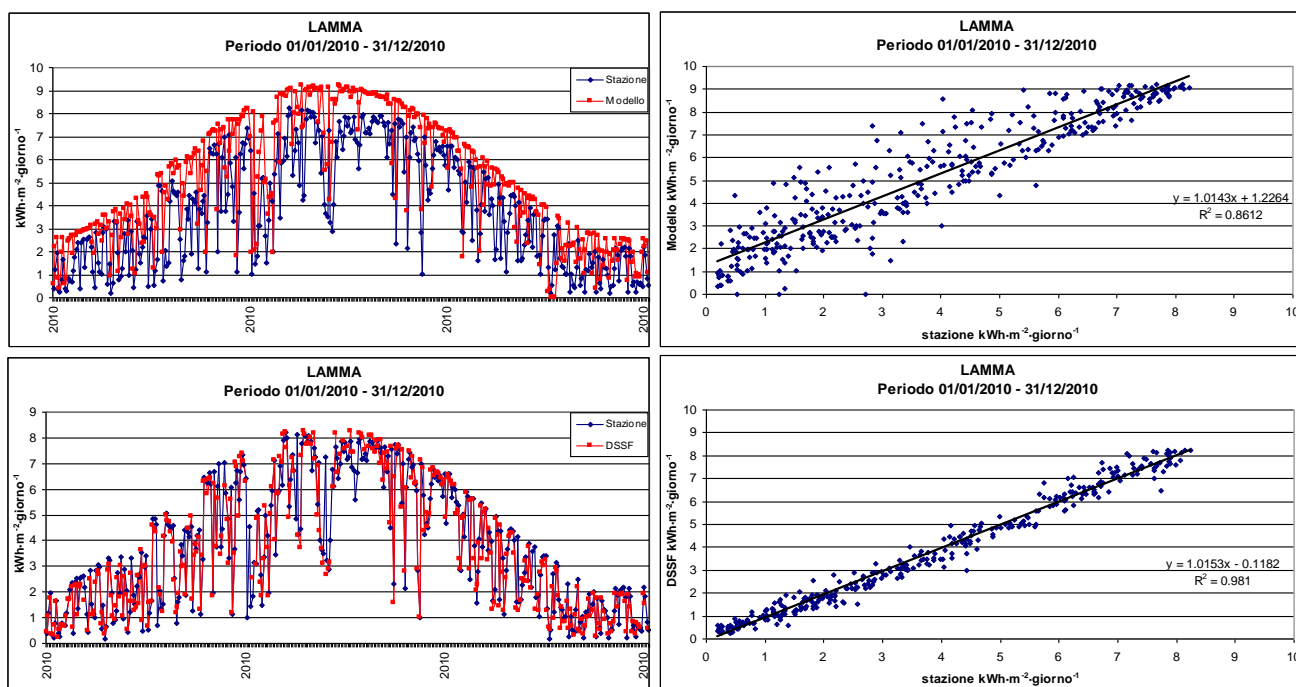


Figura 2.6. Confronto fra i dati (integrali giornalieri) rilevati nel 2010 dalla stazione del LAMMA Polo Scientifico (Sesto Fiorentino) e quelli stimati da modello meteorologico WRF e da satellite (dati DSSF). Sono inoltre riportate le regressioni relative.

Dai grafici sopra riportati emerge una ottima corrispondenza fra i dati di radiazione stimati da satellite (DSSF) e quelli della stazione LAMMA. Per quanto concerne i dati stimati da modello WRF emerge la presenza di una generale sovrastima e in ogni caso risulta evidente una maggiore dispersione nella regressione.



In tabella 2.2 si riportano i valori di radiazione globale medi giornalieri misurati e stimati ( $\text{MJ/m}^2$ ) per i 4 anni e i relativi indici Mean Error (ME) e Mean Absolute Error (MAE) calcolati per i valori stimati rispetto agli osservati.

	Media giornaliera annuale stazione ( $\text{kWh m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ )	Media giornaliera annuale modello ( $\text{kWh m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ )	Media giornaliera annuale DSSF ( $\text{kWh m}^{-2} \text{ giorno}^{-1}$ )	ME Modello (%)	MAE Modello (%)	ME DSSF (%)	MAE DSSF (%)
2007	4.20	4.76	4.12	12.76%	17.99%	-2.2%	7.47%
2008	3.77	4.82	3.93	27.91%	30.06%	1.30%	7.65%
2009	4.05	5.30	3.85	30.18%	32.08%	-0.9%	7.94%
2010	3.81	5.09	3.68	33.65%	35.65%	-1.6%	6.99%

Tabella 2.2. Confronto fra gli indici di skil della radiazione stimata da modello meteorologico e da satellite (DSSF)

Tali risultati non precludono per un futuro un possibile impiego del modello meteorologico WRF per la stima della radiazione solare, in particolare per applicazioni previsionali nel breve/medio periodo, tuttavia al momento la stima da satellite risulta decisamente migliore; modifiche della configurazione del modello meteorologico potrebbero migliorare notevolmente le sue prestazioni, tuttavia questo richiederebbe uno studio specifico.

## Validazione dei dati DSSF

Oltre alle validazioni disponibili sul sito <http://landsaf.meteo.pt> ed al precedente confronto effettuato presso la stazione meteo del LAMMA nel precedente paragrafo (risultato decisamente buono), gli integrali giornalieri di radiazione stimata da satellite DSSF sono stati analizzati e validati rispetto ai dati delle stazioni dell'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (UCEA: <http://www.cra-cma.it/dati.htm>) distribuite sul territorio nazionale sul periodo giugno 2005, settembre 2011. Di seguito viene fornito un resoconto, in termini di ME (Mean Error) e MAE (Mean Absolute Error) (Tabella 2.3 e 2.4). Nell'analisi di tali risultati va considerata la non certificata attendibilità dei dati di radiazione rilevata dalle stazioni, in ogni caso le stazioni oggetto del confronto sono state selezionate dal data base UCEA a seguito di un semplice controllo di qualità effettuato confrontando fra loro le radiazioni giornaliere rilevate dalle stazioni in giornate estive risultate serene su tutto il territorio nazionale e scartando quelle che avevano rilevato radiazioni manifestamente diverse da un plausibile valore di radiazione stimato da modello di trasferimento radiativo (scarto superiore del 20-30%).

Dai dati risultati emergono valori di ME generalmente inferiori al 10%. Alcuni dei valori più alti potrebbero essere spiegati anche dalla difficoltà insita nella misura stessa della radiazione mediante radiometri a terra; una buona misura della radiazione presuppone un adeguato posizionamento dello strumento e soprattutto una accurata calibrazione dello stesso aggiornata periodicamente. Uno degli scopi della stima satellitare della radiazione risiede proprio nel cercare di eliminare dalla misura del dato la soggettività strumentale applicando una stessa procedura di calcolo sull'intero dominio spaziale. In ogni caso gli errori globali nella stima della radiazione da satellite risultano ragionevolmente inferiori a quelli che si presenterebbero calcolando la radiazione solare a livello nazionale spazializzando i pochi dati disponibili a terra.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
<b>ALBENGA</b>	-6.2%	-0.8%	-3.3%	-1.2%	-8.0%	-6.8%	-4.0%	-5.4%	-9.3%	-6.4%	-17.3%	-8.5%
<b>CAMPOCHI</b>	-2.3%	-0.4%	0.8%	4.2%	3.0%	3.8%	4.2%	4.5%	3.5%	2.5%	3.5%	0.9%
<b>CESENA</b>	44.4%	21.5%	7.6%	6.7%	3.9%	3.6%	3.6%	2.6%	6.7%	9.1%	22.8%	28.5%
<b>CHILIVANI</b>	-4.3%	-2.8%	2.2%	2.3%	7.9%	4.6%	7.7%	10.3%	5.6%	0.9%	-1.8%	-3.7%
<b>GUALDO</b>	18.4%	14.0%	9.0%	3.7%	3.0%	1.2%	4.5%	2.8%	5.4%	5.9%	14.5%	12.7%
<b>LIBERTINIA</b>	-13.8%	-6.5%	-0.2%	11.8%	12.9%	13.8%	13.5%	14.3%	12.9%	1.0%	-6.9%	-19.1%
<b>MARSCIANO</b>	-15.5%	-7.4%	-7.0%	-7.5%	-7.8%	-4.4%	-1.0%	-4.4%	-5.5%	-19.1%	-12.2%	-18.2%
<b>MONSAMPO</b>	-4.9%	1.0%	0.4%	-0.2%	1.3%	-1.4%	2.3%	0.5%	0.0%	-2.5%	-8.0%	-10.2%
<b>MONTANAS</b>	-2.0%	3.6%	2.6%	-0.2%	-1.5%	2.5%	4.9%	2.7%	1.2%	-4.7%	-10.5%	-9.2%
<b>MONTEROT</b>	4.4%	2.2%	2.2%	-0.9%	-0.3%	-0.9%	0.8%	-0.3%	-0.7%	-1.6%	2.2%	7.0%
<b>PALO DEL</b>	10.1%	8.8%	9.3%	11.4%	16.0%	10.0%	12.1%	12.4%	12.6%	15.2%	11.6%	7.4%
<b>PIETRANER</b>	-3.7%	-1.8%	0.8%	11.3%	16.9%	13.0%	11.6%	10.3%	12.6%	5.8%	-2.1%	-3.6%
<b>PIUBEGA</b>	11.4%	15.9%	12.0%	11.3%	7.4%	7.0%	8.2%	7.8%	6.5%	12.9%	13.7%	8.5%
<b>POMARANC</b>	1.9%	1.6%	0.3%	-1.1%	-3.6%	-2.6%	-3.4%	-2.5%	-3.6%	-8.8%	-9.3%	2.3%
<b>POTENZA</b>	34.3%	15.4%	8.9%	7.5%	4.5%	5.8%	3.9%	6.1%	9.7%	19.3%	25.7%	30.3%
<b>ROMA</b>	-1.0%	-0.7%	0.4%	1.0%	3.2%	5.2%	6.0%	6.3%	9.1%	2.0%	0.4%	-2.5%
<b>ROVIGO</b>	33.2%	12.8%	9.8%	5.7%	4.5%	5.0%	5.5%	3.9%	3.8%	8.4%	16.9%	16.3%
<b>SANTA</b>	-4.3%	-2.3%	-0.8%	-0.2%	3.5%	2.7%	2.8%	0.5%	1.2%	-3.1%	-0.8%	-2.7%
<b>SANTO</b>	-0.2%	-1.5%	-0.6%	3.8%	4.0%	5.7%	5.0%	3.9%	4.6%	0.7%	0.1%	-0.7%
<b>VERCELLI</b>	50.9%	23.1%	10.2%	-7.0%	1.4%	2.1%	0.8%	-3.1%	-1.9%	-0.9%	4.8%	16.8%
<b>VIGALZANO</b>	-4.9%	-1.9%	-2.1%	-2.1%	-4.0%	-3.3%	-3.3%	-2.9%	-1.1%	-2.7%	-7.1%	-8.1%
<b>Media</b>	6.9%	4.5%	3.0%	2.9%	3.2%	3.2%	4.1%	3.3%	3.5%	1.6%	1.9%	2.1%

Tabella 2. 3: Analisi dell'errore medio percentuale (M%E) del dato di radiazione solare media giornaliera mensile della radiazione solare osservata da satellite rispetto al valore registrato dalle stazioni UCEA.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
<b>ALBENGA</b>	18.1%	16.5%	15.4%	12.9%	15.3%	12.0%	11.2%	8.7%	14.2%	18.7%	27.3%	22.7%
<b>CAMPOCHI</b>	18.1%	14.4%	18.2%	16.1%	11.3%	10.4%	8.2%	9.4%	12.2%	14.8%	16.4%	27.0%
<b>CESENA</b>	46.8%	22.8%	17.0%	13.2%	8.8%	10.8%	8.2%	7.5%	12.9%	17.9%	36.2%	39.3%
<b>CHILIVANI</b>	10.1%	8.2%	14.2%	8.3%	16.4%	10.7%	9.0%	11.2%	7.9%	9.1%	12.9%	22.3%
<b>GUALDO</b>	26.5%	17.6%	18.0%	11.0%	10.3%	8.5%	7.7%	8.4%	14.0%	16.0%	29.1%	31.6%
<b>LIBERTINIA</b>	15.2%	9.3%	13.1%	18.3%	15.3%	15.6%	14.7%	15.6%	15.9%	11.4%	15.1%	21.7%
<b>MARSCIANO</b>	22.9%	15.9%	18.1%	14.7%	12.8%	11.1%	9.1%	9.6%	11.9%	20.2%	24.7%	30.0%
<b>MONSAMPO</b>	10.2%	9.1%	13.7%	9.2%	8.5%	9.5%	7.6%	4.9%	7.5%	11.5%	15.6%	19.4%
<b>MONTANAS</b>	25.3%	16.9%	13.2%	10.8%	11.2%	10.7%	8.2%	8.5%	10.7%	17.1%	26.1%	27.3%
<b>MONTEROT</b>	12.1%	9.6%	13.0%	10.2%	9.3%	8.9%	7.0%	5.8%	8.2%	10.7%	13.6%	17.5%
<b>PALO DEL</b>	13.5%	13.5%	17.8%	16.2%	19.1%	13.5%	12.9%	12.8%	15.7%	17.9%	22.7%	18.7%
<b>PIETRANER</b>	9.0%	11.0%	13.2%	13.6%	19.3%	14.3%	12.0%	10.8%	14.2%	11.6%	13.6%	12.5%
<b>PIUBEGA</b>	24.9%	17.1%	19.1%	15.5%	11.1%	11.2%	10.1%	9.9%	15.9%	15.9%	22.4%	25.4%
<b>POMARANC</b>	20.3%	13.3%	15.8%	12.3%	11.7%	9.8%	6.9%	8.5%	12.0%	14.8%	19.5%	21.6%

<b>POTENZA P</b>	34.7%	17.1%	18.8%	13.2%	10.3%	13.7%	10.0%	10.9%	15.1%	22.5%	34.2%	39.6%
<b>ROMA COLL</b>	13.3%	10.2%	14.1%	9.8%	8.3%	9.6%	8.2%	7.5%	13.3%	11.5%	14.8%	17.8%
<b>ROVIGO</b>	35.2%	15.8%	17.5%	11.5%	11.8%	12.0%	11.1%	9.7%	12.1%	15.9%	31.1%	29.7%
<b>SANTA FIST</b>	17.0%	12.6%	15.0%	10.2%	9.3%	9.8%	7.0%	6.4%	9.5%	12.6%	22.7%	24.8%
<b>SANTO PIET</b>	10.4%	10.7%	13.7%	9.0%	8.0%	8.4%	6.5%	5.7%	9.2%	14.2%	16.0%	15.0%
<b>VERCELLI</b>	58.5%	31.5%	21.0%	18.8%	12.4%	15.9%	11.3%	9.5%	10.9%	13.5%	23.4%	24.3%
<b>VIGALZANO</b>	12.3%	9.1%	13.2%	8.6%	11.3%	11.4%	9.6%	10.2%	10.9%	11.8%	18.3%	18.3%
<b>Media</b>	21.6%	14.4%	15.8%	12.5%	12.0%	11.3%	9.4%	9.1%	12.1%	14.7%	21.7%	24.1%

Tabella 2.4: Analisi dell'errore medio percentuale (MAE) del dato di radiazione solare media giornaliera mensile della radiazione solare osservata da satellite (DSSF) rispetto al valore registrato dalle stazioni UCEA.

Anche in termini di MAE, specialmente nel semestre Aprile-Settembre, che contribuisce maggiormente all'integrale annuo di radiazione, sono intorno al 10% o inferiori. I maggiori scarti osservati nei mesi invernali possono essere imputati non solo ad eventuali difficoltà nella procedura di stima da satellite di evidenziare nubi basse e/o nebbie, ma anche dalla difficoltà dei radiometri a rilevare la radiazione solare ad angoli di elevazione solare bassi.

## Metodologia impiegata per la stima della radiazione su superficie inclinata e con effetto dell'orizzonte reale

I dati di radiazione stimata DSSF sono stati impiegati per la creazione di carte di radiazione globale espressa come integrale medio giornaliero su superficie orizzontale per ciascun mese dell'anno ( $H_{go}$  espressa in  $kWh\ m^{-2} \cdot giorno^{-1}$  e con risoluzione spaziale pari a circa 5 km) sul periodo maggio 2005 – giugno 2011 (6 anni completi). Tali dati non considerano l'eventuale inclinazione del piano ricevente la radiazione e neppure l'eventuale effetto dell'orografia nella definizione dell'orizzonte reale. Di seguito viene presentata la metodologia impiegata per la stima della radiazione incidente su superficie comunque inclinata considerando anche l'effetto dell'orizzonte reale a partire dai dati DSSF.

### Scomposizione della radiazione $H_{go}$ stimata da satellite nelle componenti diffusa e diretta

A partire dai dati di  $H_{go}$  (dati DSSF spazializzati ad una risoluzione di 300 m sul territorio regionale) sono state determinate le componenti diretta e diffusa della radiazione solare secondo la metodologia proposta da Liu e Jordan (1960). In figura 2.7 la radiazione  $H_{go}$  giornaliera media annua spazializzata sul territorio italiano con risoluzione di 300 m

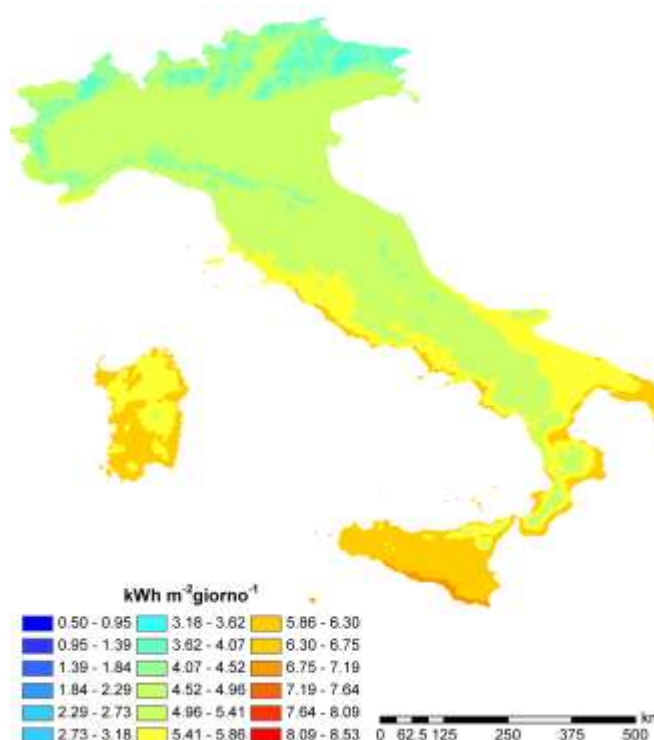


Figura 2.7. radiazione  $H_{go}$  giornaliera media annua spazializzata sul territorio italiano con risoluzione di 300 m

Il metodo sviluppato da Liu e Jordan (1960) si basa sull'ipotesi che il rapporto tra l'irradiazione solare diffusa sul piano orizzontale ( $H_{dfo}$ ) e quella globale su base giornaliera ( $H_{go}$ ) sia funzione del  $K_t$  (indice di chiarezza) secondo la seguente formula:

$$(H_{dfo}/H_{go}) = (1.39 - 4.027 \cdot K_t + 5.531 \cdot K_t^2 - 3.108 \cdot K_t^3) \quad (1)$$

A tal fine è stato necessario il calcolo dell'indice di chiarezza ( $K_t$ ). Tale indice viene definito, per una determinata località geografica, come il rapporto tra la radiazione solare globale e la radiazione extraterrestre incidenti sul piano orizzontale. Questo indice assume valori prossimi a zero nel caso di cielo in prevalenza molto nuvoloso o coperto, mentre valori più alti (comunque inferiori ad 1) nel caso di cielo sereno. La radiazione extraterrestre giornaliera media su superficie orizzontale per ciascun mese dell'anno ( $H_{ex}$ ) e per ciascun cella del dominio considerato (espressa in kWh m<sup>-2</sup> \* giorno<sup>-1</sup>) è stata calcolata seguendo l'algoritmo proposto da Bird and Riordan (1984), opportunamente implementato. Si è pertanto proceduto al calcolo dell'indice di chiarezza medio mensile per ciascuna cella del dominio considerato, sul periodo marzo 2005 – febbraio 2011, effettuando il rapporto tra  $H_{go}$  e  $H_{ex}$ . In figura 2.8 si riportano le mappe di  $K_t$  calcolato per il mese di dicembre e per quello di Luglio: i più bassi valori di luglio evidenziano una minore nuvolosità rispetto a dicembre.

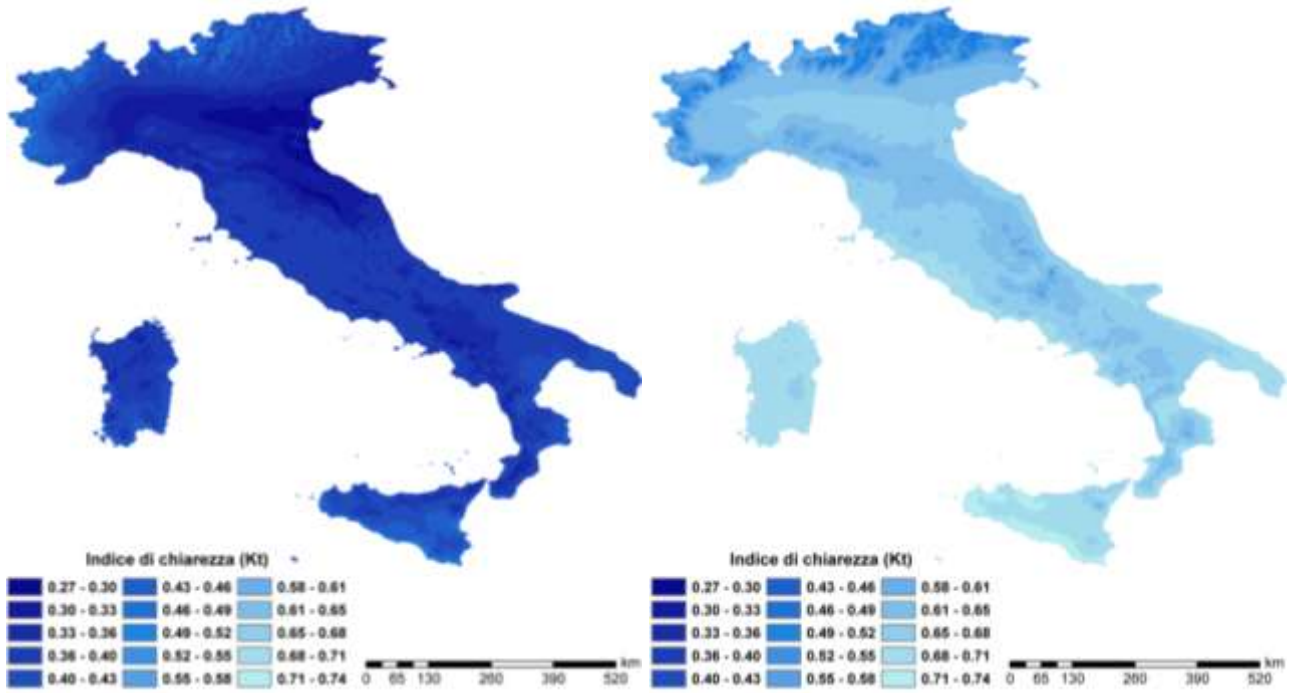


Figura 2.8. Valore del Kt medio del mese di Dicembre (sx) e del mese di Luglio (dx) alla risoluzione di 300m

Sono state prodotte le carte di radiazione diffusa media giornaliera su superficie orizzontale per ciascun mese dell'anno ( $H_{dfo}$  espressa in  $\text{kWh m}^{-2} \cdot \text{giorno}^{-1}$  e con risoluzione spaziale pari a 300 m) moltiplicando, per ogni cella del dominio, il valore ottenuto dall'equazione 1 per i dati di radiazione  $H_{go}$  (equazione 2) e quindi le carte di radiazione diretta media giornaliera su superficie orizzontale per ciascun mese dell'anno ( $H_{dro}$  espressa in  $\text{kWh m}^{-2} \cdot \text{giorno}^{-1}$  e con risoluzione spaziale pari a 300 m) (equazione 3).

$$H_{dfo} = (1.39 - 4.027 \cdot Kt + 5.531 \cdot Kt^2 - 3.108 \cdot Kt^3) \cdot H_{go} \quad (2)$$

$$H_{dro} = H_{go} - H_{dfo} \quad (3)$$

Sono state ottenute così le carte di radiazione diretta e diffusa media giornaliera su superficie orizzontale di ciascun mese dell'anno sull'Italia. La scomposizione della radiazione globale in componente diffusa e diretta si è resa necessaria in quanto le due componenti risultano avere caratteristiche di diffusione nello spazio molto diverse con conseguenze non trascurabili sulla quantità di radiazione incidente su superfici inclinate o in zone d'ombra.

Al fine di procedere alla verifica dell'algoritmo di Liu e Jordan e quindi alla sua applicabilità sul territorio nazionale sono stati utilizzati i dati di radiazione globale, diffusa e diretta rilevati presso la stazione meteorologica del LAMMA nel periodo gennaio 2008 – dicembre 2010. E' stato calcolato il Kt mensile per l'intero periodo mediante il rapporto fra la radiazione globale giornaliera media mensile misurata al LAMMA e la corrispondente radiazione extraterrestre calcolata come visto precedentemente. Applicando l'algoritmo sono state stimate le componenti diffusa e diretta giornaliera media mensile su superficie orizzontale. Tali variabili sono state oggetto di confronto con i dati misurati rilevando un'ottima corrispondenza tra gli andamenti dei dati mensili misurati e

stimati di radiazione diretta (dati non mostrati). Risultati analoghi sono stati ottenuti anche per la componente diffusa della radiazione essendo essa la differenza fra la radiazione globale e la radiazione diretta (dati non mostrati). Purtroppo non è stato possibile effettuare il confronto per altre località a causa della difficoltà di reperimento dei dati di radiazione diffusa.

### **Introduzione dell'effetto dell'orizzonte reale e del piano comunque inclinato sulla radiazione DSSF stimata da satellite**

La metodologia impiegata per la stima dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata (per superficie comunque inclinata si considera anche il caso limite di superficie orizzontale) è stata sviluppata a partire dalle linee guida riportate nella normativa UNI 8477/1, adottata a livello nazionale recante istruzioni per il *"Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta"*. Obiettivo del lavoro è stato anche quello di valutare l'effetto della morfologia del territorio sulla radiazione incidente.

In linea generale la radiazione globale incidente su un piano comunque inclinato di un angolo  $\beta$  rispetto all'orizzontale e orientato verso sud ( $H_{gi}$ ) risulta dalla combinazione della componente diretta della radiazione ( $H_{dri}$ ), della componente diffusa ( $H_{dfi}$ ) e della eventuale radiazione riflessa ( $H_{ri}$ ) (quest'ultima risulta assente nel caso  $\beta = 0$ ).

$$H_{gi} = H_{dri} + H_{dfi} + H_{ri} \quad (4)$$

I dati di  $H_{go}$  stimati da satellite come più volte messo in evidenza precedentemente, sono relativi ad una superficie orizzontale e non tengono in considerazione l'effetto del possibile ombreggiamento dovuto alla presenza dell'orografia.

Per aggiungere l'effetto dell'orografia e quello relativo all'inclinazione del piano ai dati DSSF stimati da satellite è stato utilizzato l'algoritmo di calcolo proposto da Bird and Riordan (1984). Esso permette di calcolare per ciascun istante e per qualsiasi punto del globo lo spettro di radiazione globale, diretta e diffusa su una superficie orizzontale o inclinata in condizioni di cielo sereno (previa definizione di alcuni parametri che caratterizzano lo stato medio dell'atmosfera).

Questo algoritmo è stato migliorato integrandolo con il calcolo dell'orizzonte reale per il punto di interesse a partire da un DTM (Digital Terrain Model). Si considera che, come nella realtà, la volta celeste possa essere in parte oscurata dall'orizzonte che circonda il punto su cui si calcola la radiazione. Rispetto all'algoritmo originale sono state apportate le seguenti modifiche e integrazioni. La radiazione diretta viene bloccata quando l'altezza apparente del sole è inferiore all'orizzonte reale nella direzione dove si trova il sole. In maniera analoga viene anche oscurata la radiazione diffusa circumsolare (zona del cielo intorno al sole dove la radiazione diffusa è maggiormente concentrata). Inoltre la radiazione diffusa isotropica è ridotta in base alla frazione di volta celeste oscurata dall'orizzonte reale, mentre viene considerato che la parte di volta celeste sotto l'orizzonte reale possa riflettere la radiazione verso la superficie bersaglio in base all'albedo stabilito.

Il calcolo della radiazione teorica avviene quindi secondo i seguenti passaggi:

determinazione dell'orizzonte reale; determinazione dell'alba, del tramonto e della lunghezza del giorno tenendo conto dell'orizzonte reale; calcolo della radiazione su piano orizzontale; eventualmente se richiesto calcolo della radiazione su una superficie inclinata. L'algoritmo di

calcolo proposto da Bird and Riordan (1984) è stato pertanto impiegato per il calcolo delle seguenti variabili che sono successivamente state utilizzate nella metodologia di calcolo:

- radiazione extraterrestre ipotizzata incidente sulla superficie terrestre con effetto del DTM su superficie orizzontale e/o comunque inclinata ( $H_{\text{exdtm}}$ )
- radiazione extraterrestre ipotizzata incidente sulla superficie terrestre senza effetto del DTM su superficie orizzontale ( $H_{\text{ex}}$ )
- radiazione diffusa con effetto del DTM e albedo del suolo pari a zero su superficie orizzontale e/o comunque inclinata ( $H_{\text{dfDTM0}}$ )
- radiazione diffusa senza effetto del DTM e albedo del suolo pari a zero su superficie orizzontale ( $H_{\text{df0}}$ )

Le sopra citate variabili sono espresse in termini di integrale giornaliero medio mensile, tuttavia il loro calcolo è stato effettuato impiegando nei calcoli un intervallo temporale di 10 minuti, richiedendo tempi di calcolo rilevanti (circa 2 mesi).

Viene in questa sede definito come indice di soleggiamento reale della radiazione diretta ( $R_b$ ) il rapporto esistente tra il valore dell'integrale giornaliero medio mensile della radiazione extraterrestre con incluso l'effetto ombreggiamento del DTM su superficie comunque inclinata ( $H_{\text{exdtm}}$ ) e il valore solare extraterrestre in assenza di DTM su superficie orizzontale ( $H_{\text{ex}}$ ):

$$R_b = H_{\text{exdtm}}/H_{\text{ex}} \quad (5)$$

In questo modo si determina l'effetto della presenza del DTM e dell'eventuale inclinazione della superficie sulla distribuzione della radiazione diretta, essendo la radiazione extraterrestre costituita esclusivamente da questa tipologia di radiazione. Per il caso di superficie orizzontale, nelle aree dove il DTM non determina effetto ombreggiamento il coefficiente  $R_b$  sarà pari ad 1, mentre valori inferiori saranno presenti altrove.

Viene inoltre definito come indice di distribuzione reale della radiazione diffusa ( $R_{bf}$ ) il rapporto esistente tra il valore dell'integrale giornaliero medio mensile della radiazione diffusa su superficie orizzontale con albedo zero ( $H_{\text{dfDTM0}}$ ) e il valore solare della radiazione diffusa in assenza di ostruzioni e superficie orizzontale con albedo zero ( $H_{\text{df0}}$ ). In questo modo si determina l'effetto della presenza del DTM sulla distribuzione della componente diffusa della radiazione:

$$R_{bf} = H_{\text{dfDTM0}}/H_{\text{df0}} \quad (6)$$

Tornando alla equazione 4, le singole componenti sono state calcolate per ciascun punto del dominio spaziale come segue:

$$H_{\text{dri}} = H_{\text{dro}} \cdot R_b \quad (7)$$

$$H_{\text{dfi}} = H_{\text{dfo}} \cdot R_{bf} \cdot ((1+\cos(\beta)) / 2) \quad (8)$$

$$H_{\text{ri}} = H_{\text{goDTM}} \cdot \rho \cdot ((1-\cos(\beta)) / 2) \quad (9)$$

dove:

$\beta$  = angolo di inclinazione della superficie

$H_{goDTM}$  = radiazione globale su superficie orizzontale con effetto DTM, ovvero la somma di  $H_{dri} + H_{dri}$  calcolate per il caso di  $\beta = 0$   
 $\rho$  = albedo

L'albedo è stato determinato a partire dalla cartografia tematica Corine Land Cover del 2006, sulla quale ad ogni classe di copertura del suolo è stato attribuito il relativo valore di albedo trovato in letteratura.

## **Cartografia relativa al fotovoltaico** **Cartografia relativa alla radiazione globale**

Impiegando la metodologia sopra descritta sono state create carte di radiazione globale su superficie orizzontale e inclinata verso sud di  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $32.5^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$  con l'inclusione dell'effetto ombreggiamento dovuto all'orografia. Le mappe sono espresse in termini di radiazione giornaliera media mensile per i vari mesi dell'anno e in termini di radiazione giornaliera media annua per quanto riguarda il dato annuo ( $\text{kWh m}^{-2} \cdot \text{giorno}^{-1}$ ). Le mappe vanno considerate stime in quanto la metodologia applicata presenta alcune approssimazioni e perché basata sui dati misurati di 6 anni, non necessariamente destinati a ripetersi.

Di seguito si riportano alcune delle mappe prodotte alla risoluzione spaziale di 300 m. Le mappe sono state elaborate per le diverse inclinazioni verso sud in quanto alle varie latitudini l'inclinazione ottimale per l'ottenimento del massimo integrale annuo (ipotizzando di lasciare il pannello in posizione statica nell'anno) può essere diversa; inoltre il posizionamento dei pannelli potrebbe essere vincolato a determinate angolazioni (inclinazione del tetto, ecc.) per cui può essere utile avere le stime per vari angoli per una stessa località.

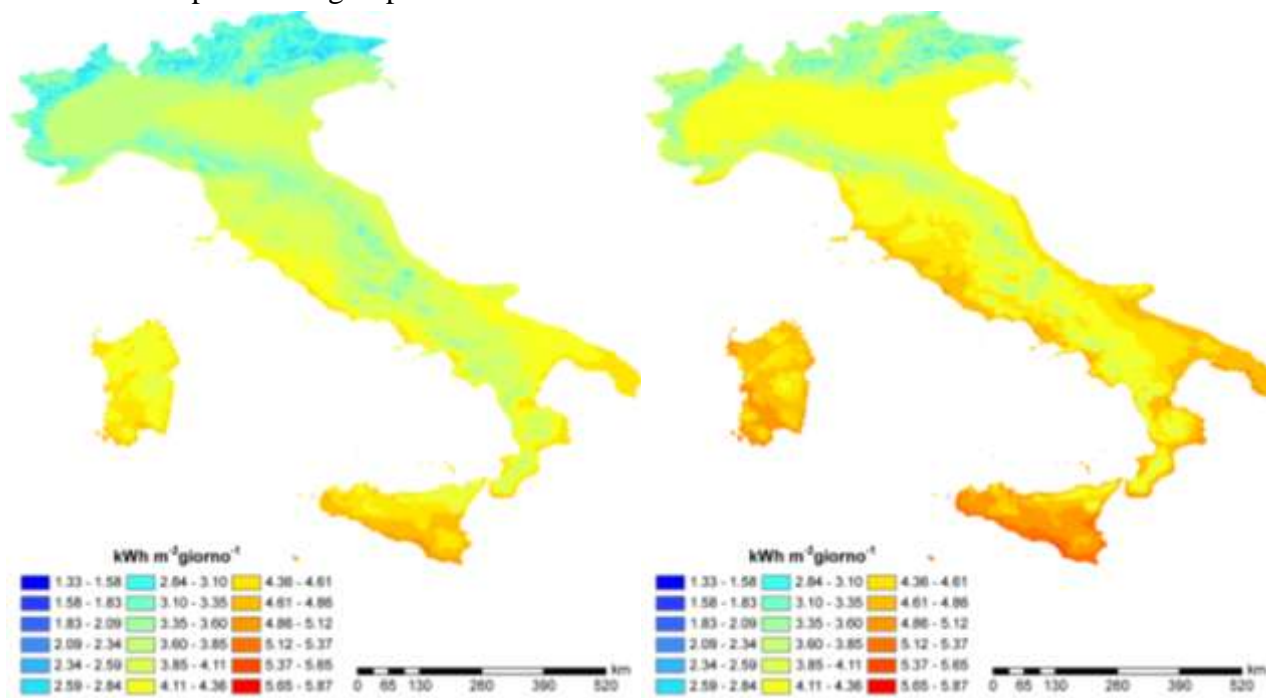


Figura 2.9. Radiazione globale giornaliera media, su superficie orizzontale e su superficie inclinata di  $25^\circ$  verso sud, nell'anno.



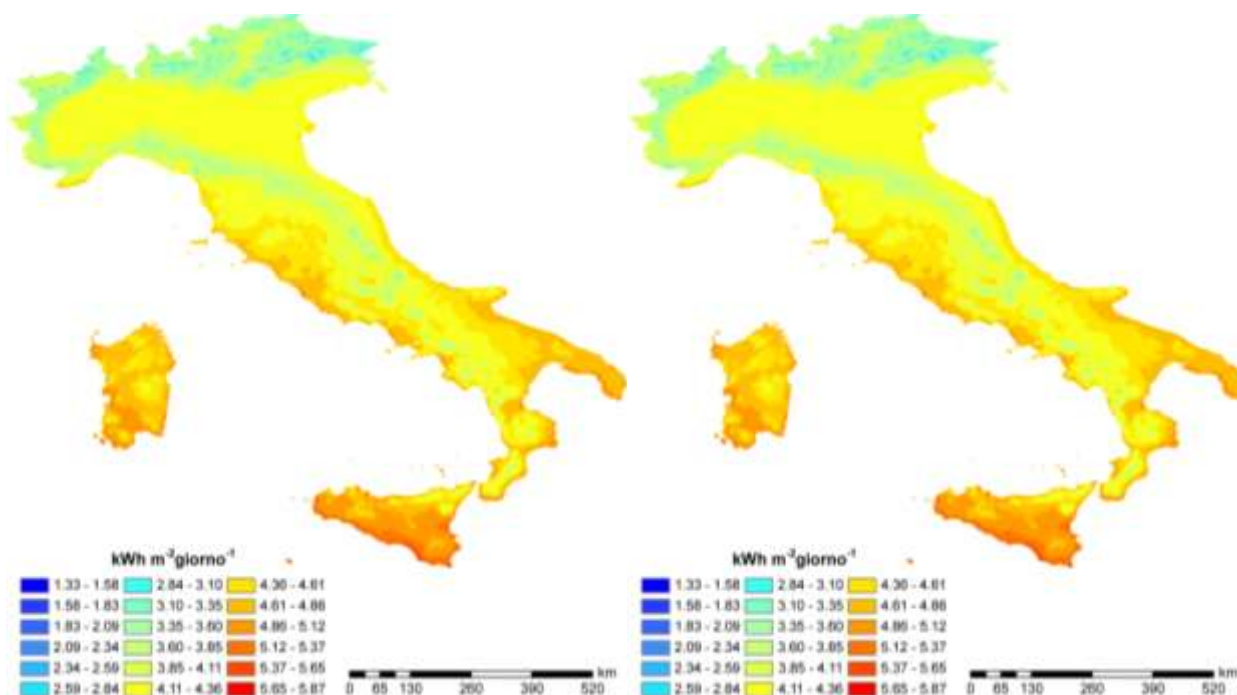


Figura 2.10: Radiazione globale giornaliera media, su superficie inclinata di  $30^\circ$  e  $32.5^\circ$  verso sud, nell'anno.

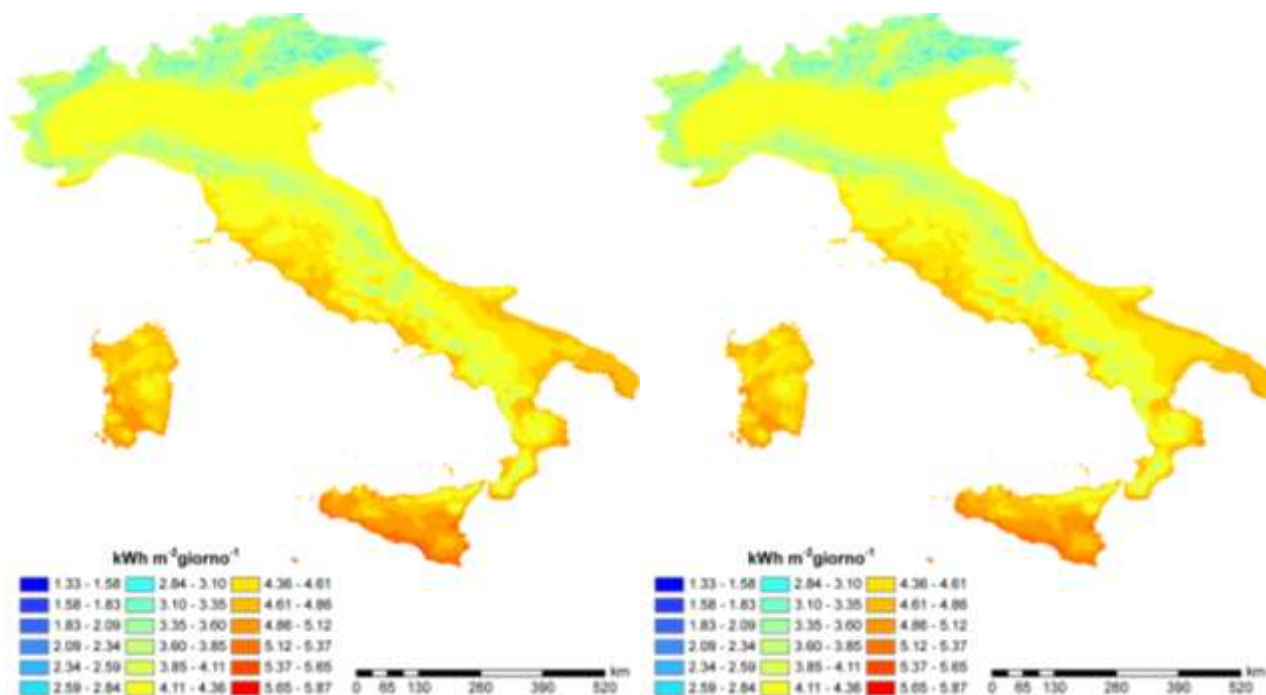


Figura 2.11. Radiazione globale giornaliera media, su superficie inclinata di  $35^\circ$  (sinistra) e  $40^\circ$  (destra) verso sud, nell'anno.

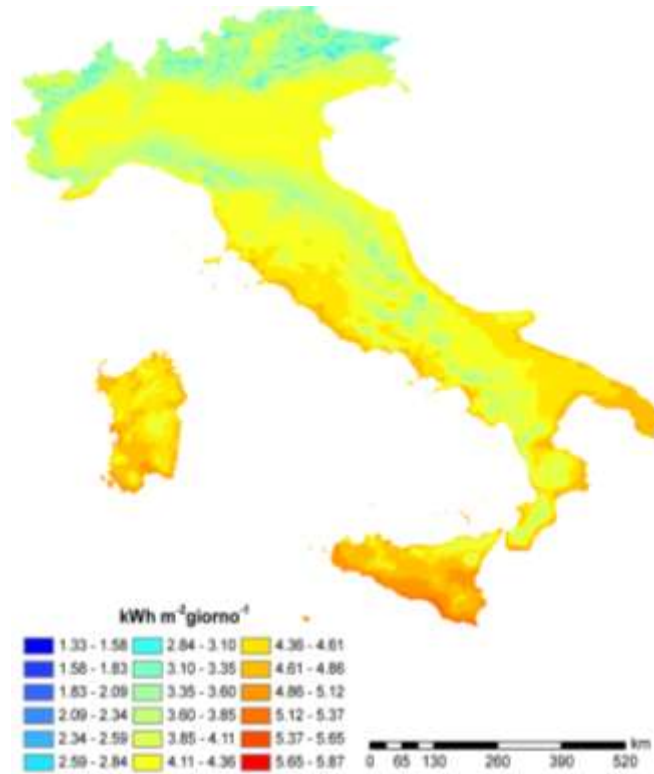


Figura 2.12. Radiazione globale giornaliera media, su superficie inclinata di  $45^\circ$  verso sud, nell'anno.



Figura 2.13. Inclinazione ottimale del pannello basata sull'integrale giornaliero medio annuo.

Le mappe sono comunque espresse in  $\text{kWh m}^{-2} \cdot \text{giorno}^{-1}$ . La mappa di figura 2.13 indica, fra quelle esaminate nel presente lavoro, quali sono le inclinazioni verso sud ottimali per la massimizzazione della radiazione integrata annualmente.

## Cartografia relativa alla producibilità elettrica

Di seguito si riportano le carte relative alla producibilità elettrica ipotizzando un modulo da 1 kW<sub>hp</sub> (potenza di picco in kW<sub>hp</sub>) e una efficienza del sistema pari al 75% (Suri et al. 2007; Hult et al. 2010; Djurdjevic 2011). Le mappe sono espresse in kWh anno<sup>-1</sup> prodotti per ciascun kW<sub>hp</sub> di potenza di picco installato. Le mappe vanno considerate stime in quanto la metodologia applicata presenta alcune approssimazioni e perché basata sui dati misurati di 6 anni, non necessariamente destinati a ripetersi.

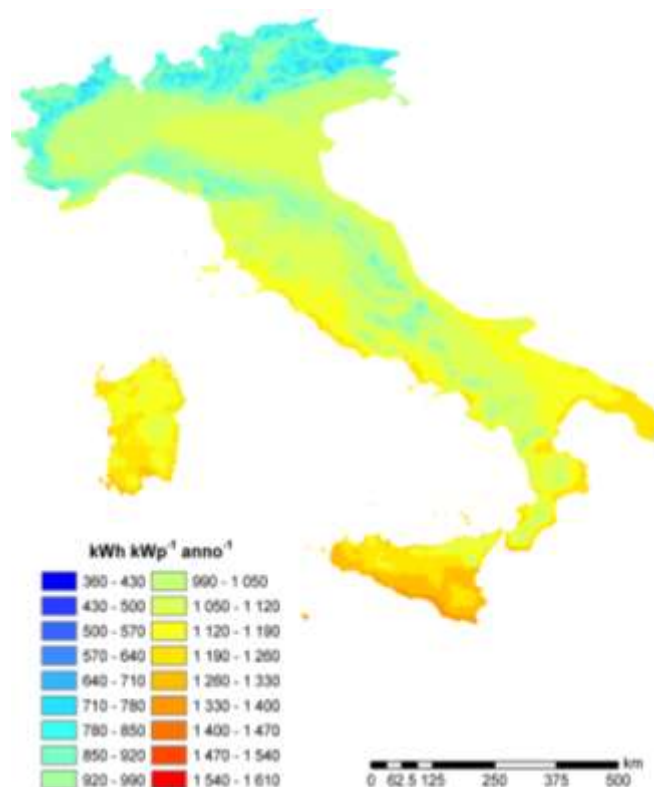


Figura 2.14. Producibilità elettrica per un modulo da 1 kW<sub>hp</sub> di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie orizzontale

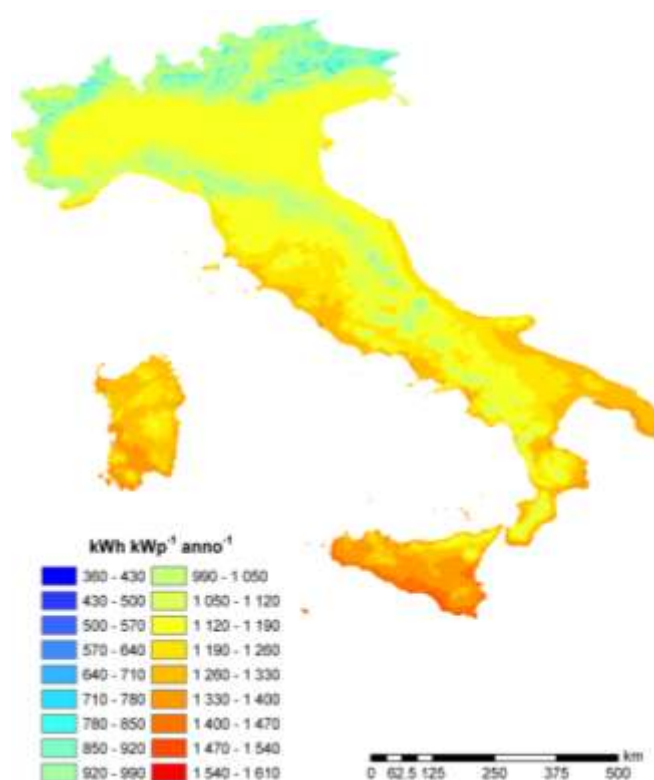


Figura 2.15. Producibilità elettrica per un modulo da 1 kWh di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie inclinata di 25° verso sud

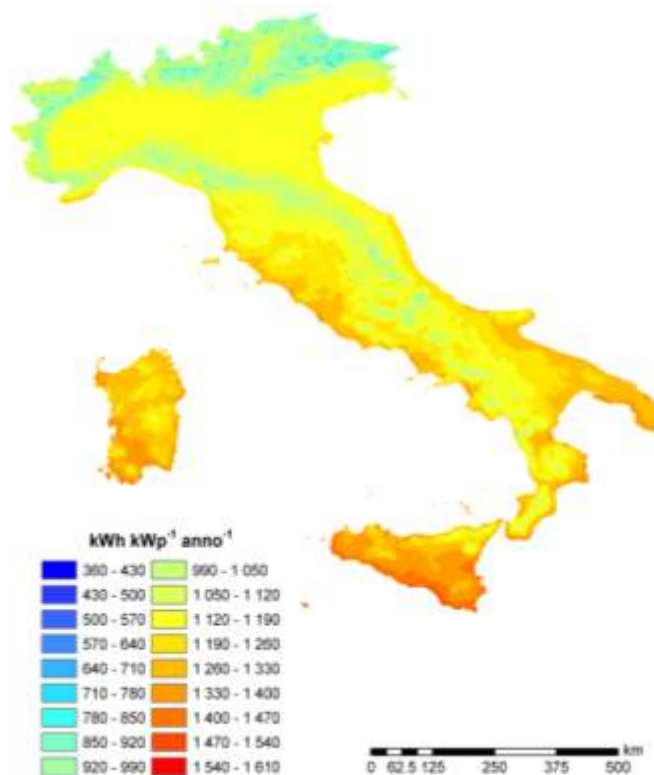


Figura 2.16. Producibilità elettrica per un modulo da 1 kWh di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie inclinata di 30° verso sud

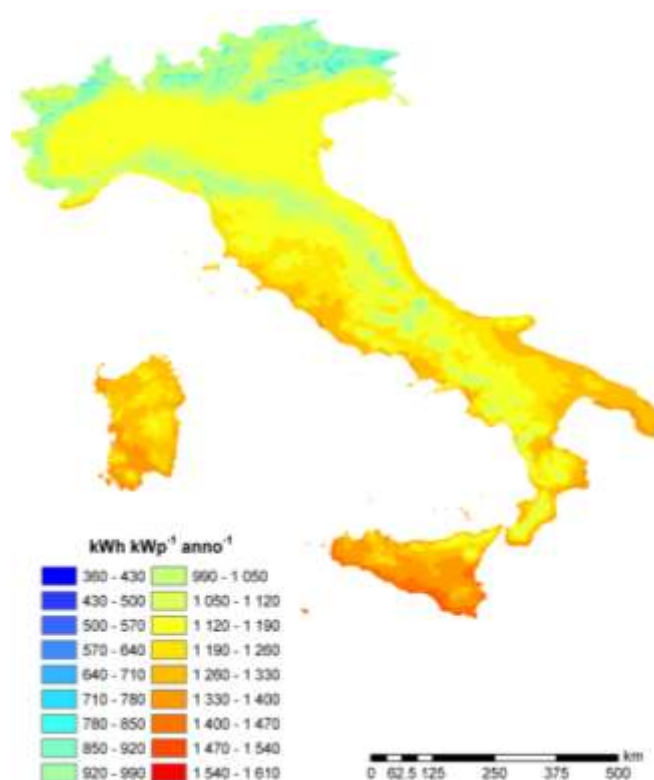


Figura 2.17. Producibilità elettrica per un modulo da 1 kWh di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie inclinata di 32.5° verso sud

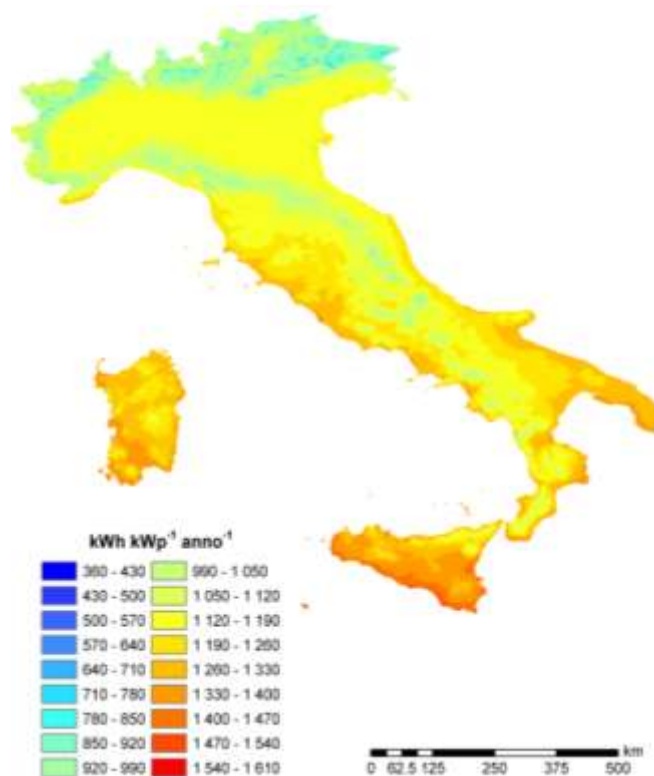


Figura 2.18. Producibilità elettrica per un modulo da 1 kWh di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie inclinata di 35° verso sud

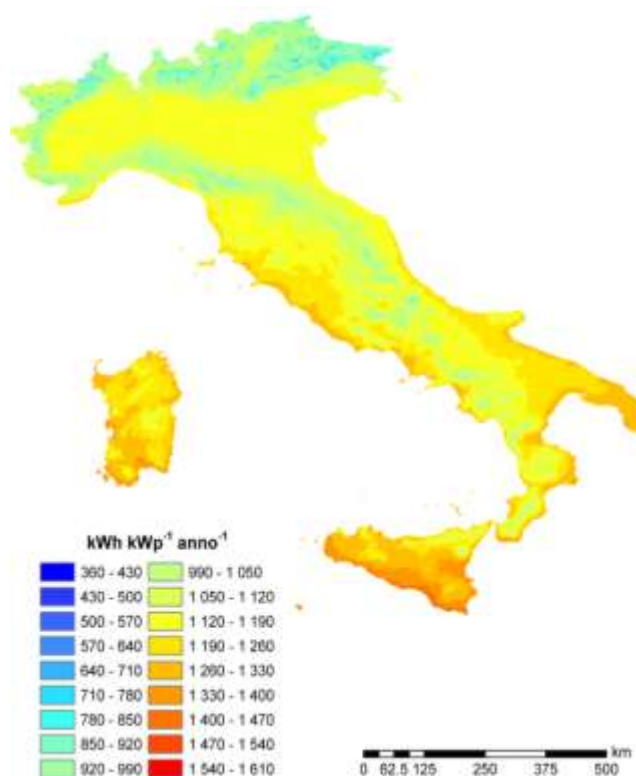


Figura 2.19. Producibilità elettrica per un modulo da 1 kWh di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie inclinata di 40° verso sud

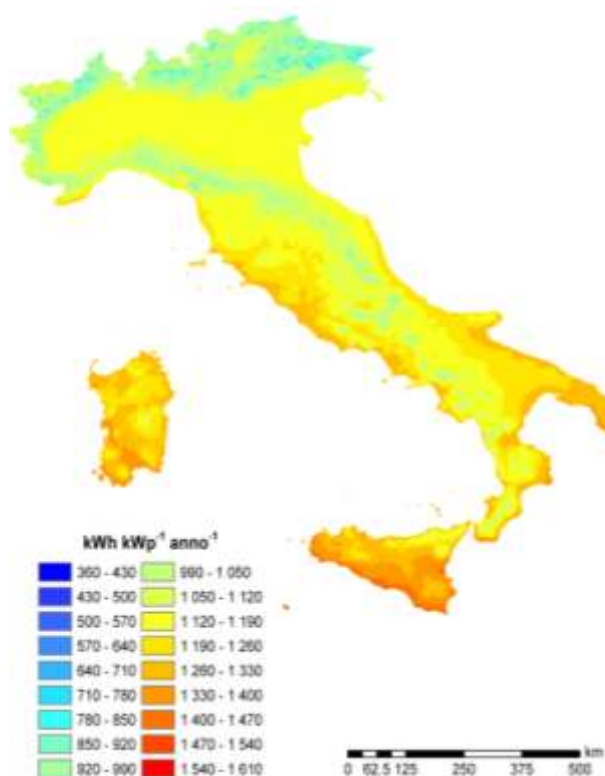


Figura 2.20. Producibilità elettrica per un modulo da 1 kWh di potenza di picco con efficienza pari al 75% posto su superficie inclinata di 45° verso sud

In appendice 1 si riportano le mappe di producibilità elettrica annuali qui riportate a maggior dettaglio grafico, oltre alle mappe su base mensile.



## **Cartografia relativa al rendimento economico dell'investimento in fotovoltaico**

Partendo dall'indagine dei prezzi di mercato, è stato valutato un costo indicativo di un impianto fotovoltaico di primaria qualità (pannelli di fascia medio-alta), con potenza 10 kWp (pari ad una superficie di circa 80 m<sup>2</sup>), ossia sufficiente a coprire il fabbisogno di una piccola azienda, su un tetto facilmente accessibile, in buone condizioni (quindi senza opere murarie aggiuntive) e installato in modo parzialmente integrato, ossia appoggiato sulla copertura in senso complanare in euro 26.000,00 con iva al 10% inclusa. La vita utile dell'impianto è calcolata in almeno 20 anni e, a partire dal decimo anno, è buona norma prevedere interventi di manutenzione straordinaria per la sostituzione di alcuni componenti elettrici, soprattutto dell'inverter. Stando a quanto descritto dal manuale sulla tariffa agevolata "conto energia" di Terna, i costi di esercizio e manutenzione annui sono abitualmente stimati in circa 1-1,5 % del costo dell'impianto. Nel calcolo del rendimento è stato considerato un costo medio annuo pari al 1% della spesa iniziale. È stato valutato il costo annuo, nella percentuale dello 0.6% del costo iniziale dell'impianto, derivante dalla stipula di contratti assicurativi, utili a garantire l'impianto a fronte di eventi "straordinari" come il furto o il danneggiamento in seguito ad eventi meteorologici estremi. Allo stato attuale, (finanziaria 2012) la tariffa "conto energia" prevede, per la tipologia di installazione sopra indicata, un incentivo vendita dell'energia prodotta pari a € 0,247 per kWh a cui si deve sommare lo sconto, a cui il produttore ha diritto sulla propria bolletta, pari al valore dell'energia consumata (fino ad un massimo pari all'energia prodotta) e remunerata in base alla tariffa applicata dal gestore di rete, che indicativamente è pari a € 0,144 per kWh. È stato calcolato il rendimento economico medio annuale, al netto del costo iniziale, per un impianto da 10, 5 e 15 kWp con superficie inclinata a 32.5° ed esposizione a sud, nel caso in cui i consumi siano pari all'intera produzione (Fig. 21), nell'ipotesi in cui i consumi siano pari a quelli di una famiglia media (circa 2300 kWh annui) (Fig. 23, 25, 27) e nell'ipotesi di un consumo annuo di 5000 kWh (Fig. 22, 24, 26). I consumi annui nell'ipotesi di un completo riutilizzo dell'energia prodotta sono ricavabili dai valori delle mappe di producibilità elettriche moltiplicate per la potenza degli impianti considerati. Le mappe vanno considerate stime in quanto la metodologia applicata presenta alcune approssimazioni e perché basata sui dati misurati di 6 anni, non necessariamente destinati a ripetersi.

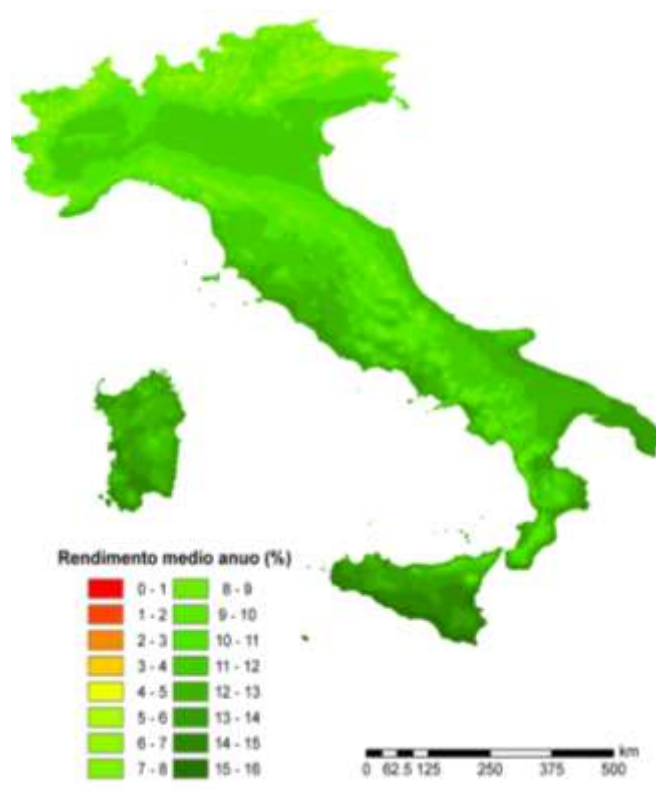


Figura 2.21: Rendimento economico medio annuo di un sistema fotovoltaico da 10 kWhp su piano inclinato di 32.5° verso sud: ipotesi di completo riutilizzo dell'energia elettrica prodotta.

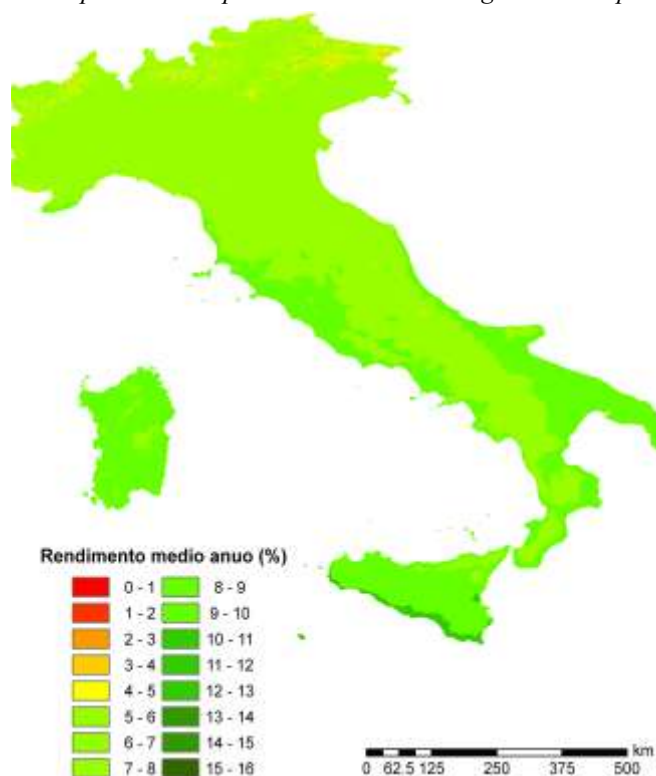


Figura 2.22. Rendimento economico medio annuo di un sistema fotovoltaico da 10 kWhp su piano inclinato di 32.5° verso sud: ipotesi di utilizzo dell'energia elettrica prodotta per 5000 kWh.



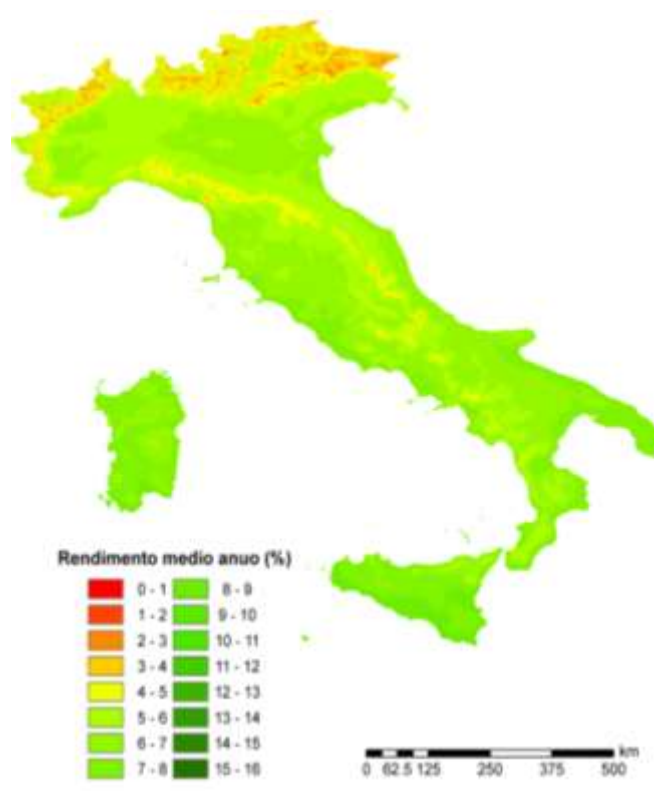


Figura 2.23. Rendimento economico medio annuo di un sistema fotovoltaico da 10 kWhp su piano inclinato di 32.5° verso sud: ipotesi di utilizzo dell'energia elettrica prodotta per 2300 kWh.

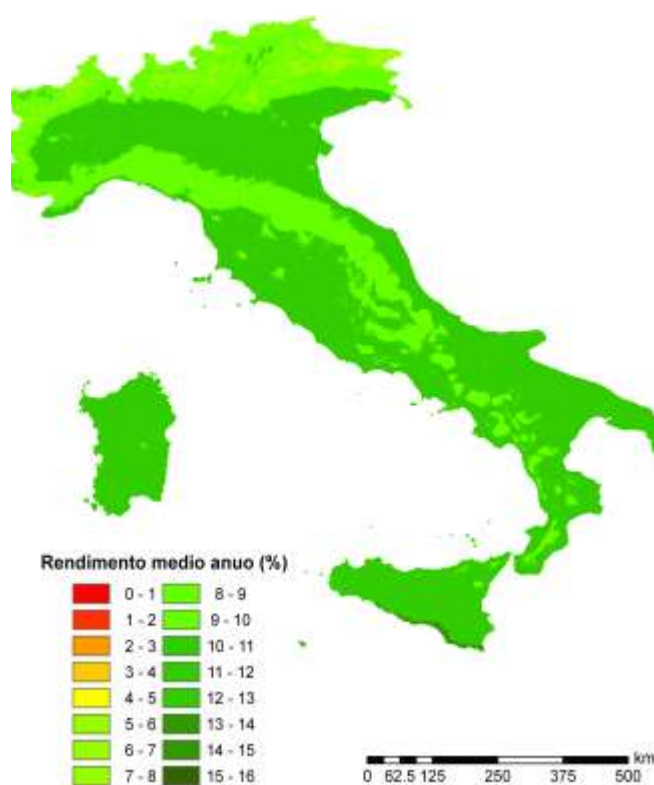


Figura 2.24. Rendimento economico medio annuo di un sistema fotovoltaico da 5 kWhp su piano inclinato di 32.5° verso sud: ipotesi di utilizzo dell'energia elettrica prodotta per 5000 kWh.

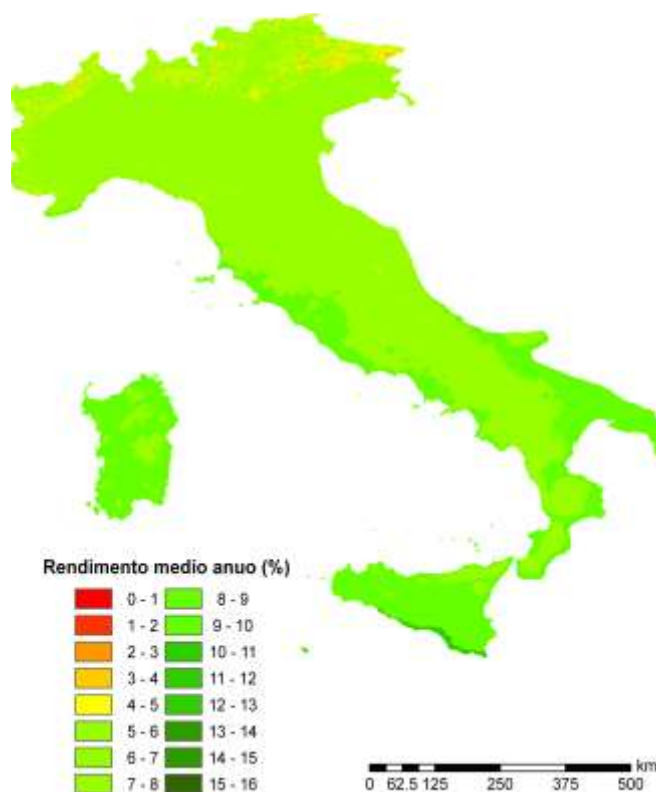


Figura 2.25. Rendimento economico medio annuo di un sistema fotovoltaico da 5 kWhp su piano inclinato di 32.5° verso sud: ipotesi di utilizzo dell'energia elettrica prodotta per 2300 kWh.

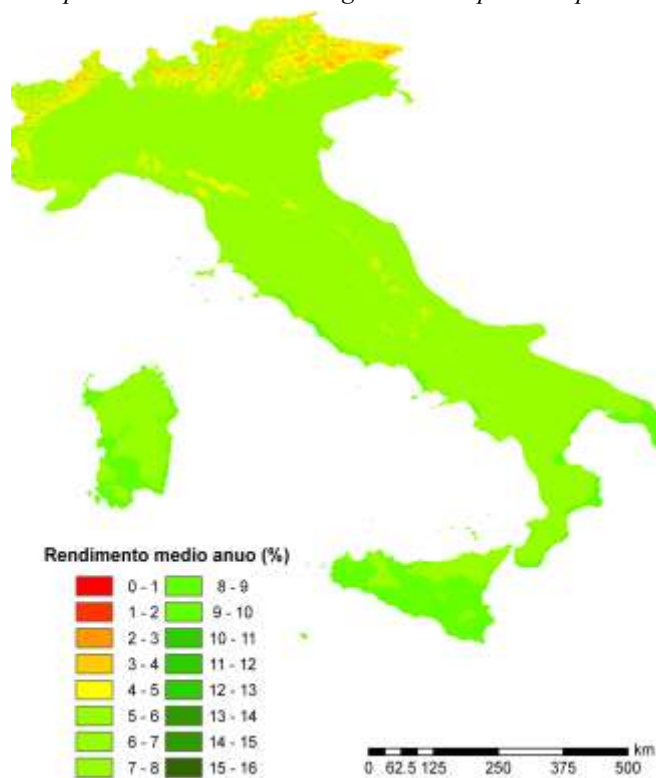


Figura 2.26. Rendimento economico medio annuo di un sistema fotovoltaico da 15 kWhp su piano inclinato di 32.5° verso sud: ipotesi di utilizzo dell'energia elettrica prodotta per 5000 kWh.

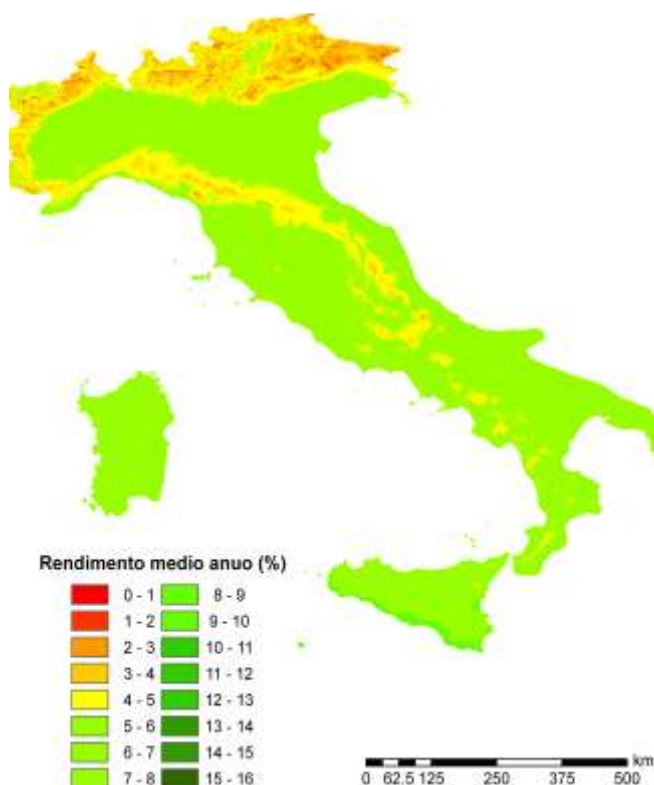


Figura 2.27. Rendimento economico medio annuo di un sistema fotovoltaico da 15 kWhp su piano inclinato di 32.5° verso sud: ipotesi di utilizzo dell'energia elettrica prodotta per 2300 kWh.

Per i moduli di 5 e 15 kWhp non si riporta il rendimento in caso di utilizzo totale dell'energia prodotta in quanto uguale al modulo di 10 kWhp. In appendice 2 sono riportate tutte le mappe di rendimento economico medio annuo dei sistemi fotovoltaici da 10, 5 e 15 kWhp calcolate per superficie orizzontale ed inclinata di 25°, 30°, 35°, 40° e 45° verso sud, oltre alle qui presentate, ma in risoluzione grafica maggiore (solo nella relazione finale). Di seguito la mappa dei rendimenti per sistema da 10, 5 e 15 kWhp con l'indicazione dei rendimenti relativi all'inclinazione ottimale per la massimizzazione del rendimento annuo (scelta fra quelle considerate nel presente lavoro).

## Bibliografia

- Bird R. and Riordan C., 1984. "Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres." Prepared under Task No. 3434.10 FTP No. 460 Solar Energy Research Institute A Division of Midwest Research Institute 1617 Cole Boulevard Golden, Colorado 80401 Prepared for the U.S. Department of Energy Contract No. DEAC0283CH10093, [http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/spectral/model/spectral\\_model\\_index.html](http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/spectral/model/spectral_model_index.html)
- Hutchinson, M. F., Booth, T. H., Nix, H. A., McMahon, J. P., 1984. Estimating monthly mean values of daily total solar radiation for Australia. *Solar Energy*, 32, 277±290.
- Liu B, Jordan R., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Solar Energy*. 4:1–16.
- Mitasova, H., Hofierka, J., 1993. Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modelling and Surface Geometry Analysis. *Mathematical Geology*, 25 (6), 657–669.
- Mitasova, H. Mitas, L., Brown, W.M., 1995. Modeling spatial and temporally distributed phenomena: new methods and tools for GRASS GIS. *International Journal of Geographic Information Systems*, 9 (4), 443–446.
- Norma UNI 8477/1 recante istruzioni per il "Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta".
- Talmi, A., Gilat, G., 1977. Method for Smooth Approximation of Data. *Journal of Computational Physics*, (23), 93–123.
- Tobler W.R., 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region, *Economic Geography* 46.
- Vaccari F. P., Taddei S. e Brugnoli G., 2009. STAR – Solare Termico ad Alto Rendimento. Report Finale del Progetto STAR finanziato dalla Regione Toscana.
- Wackernagel, H., 2001. Multivariate geostatistics. In: El-Shaarawi A., Piegorsch W. (eds) *Encyclopedia of Environmetrics*, vol. 3, 1344-1347, Wiley, Chichester.
- Xia, Y., Winterhalter, M., Fabian, P., 2000. Interpolation of Daily Global Solar Radiation with Thin Plate Smoothing Splines. *Theor. Appl. Climatol.* 66, 109-115.

## L'EOLICO

### Il vento per l'utilizzo energetico

#### Energia eolica

Fra le fonti energetiche rinnovabili, il vento è una risorsa disponibile, ecologica e sostenibile. In questi ultimi anni in Europa sono notevolmente aumentati i siti per la produzione di energia elettrica dal vento. Ciò ha contribuito a migliorare le tecnologie ed a ridurre i costi degli impianti eolici: attualmente infatti sono disponibili sul mercato macchine eoliche di tutte le taglie, sicure e tecnologicamente affidabili.

Per l'industria eolica è di enorme importanza poter descrivere in termini statistici la distribuzione nel tempo della velocità del vento: queste informazioni sono necessarie nella progettazione degli aerogeneratori, per ottimizzare le turbine eoliche e minimizzare così i costi della generazione. Anche nella valutazione della convenienza dell'investimento è importante avere queste informazioni per poter stimare i guadagni dalla generazione di energia elettrica.

Di seguito sono descritte alcune funzioni matematiche utilizzate in ambito eolico per rappresentare la distribuzione statistica del vento, la legge di Betz, la densità di potenza.

#### La distribuzione di Weibull

La distribuzione di Weibull, in particolare la funzione densità di probabilità a due parametri, è comunemente utilizzata per rappresentare la statistica delle velocità medie del vento  $v$ :

$$p(v) = \frac{k}{A} * \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} * \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right]$$

La distribuzione di Weibull è controllata da due parametri, il fattore di scala ( $A$ ) e il fattore di forma ( $k$ ). Il fattore di scala ( $A$ ), espresso in m/s, è legato alla velocità media attraverso la seguente relazione, dove  $\Gamma$  è la funzione di Eulero [1]:

$$A = \frac{v}{\Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

Il fattore di forma ( $k$ ), adimensionale, modifica la simmetria della distribuzione: valori molto vicini ad 1 rappresentano distribuzioni molto asimmetriche, mentre valori elevati ( $k > 2 \div 3$ ) creano distribuzioni simmetriche simili a gaussiane. Il caso particolare, analiticamente più semplice ( $k=2$ ), prende il nome di distribuzione di Rayleigh, e può essere usato per valutazioni di massima quando si dispone della

sola velocità media [1]. In figura 3.1 è mostrato l'effetto della velocità media (e quindi di  $A$ ) e del fattore di forma ( $k$ ) sulla distribuzione di Weibull.

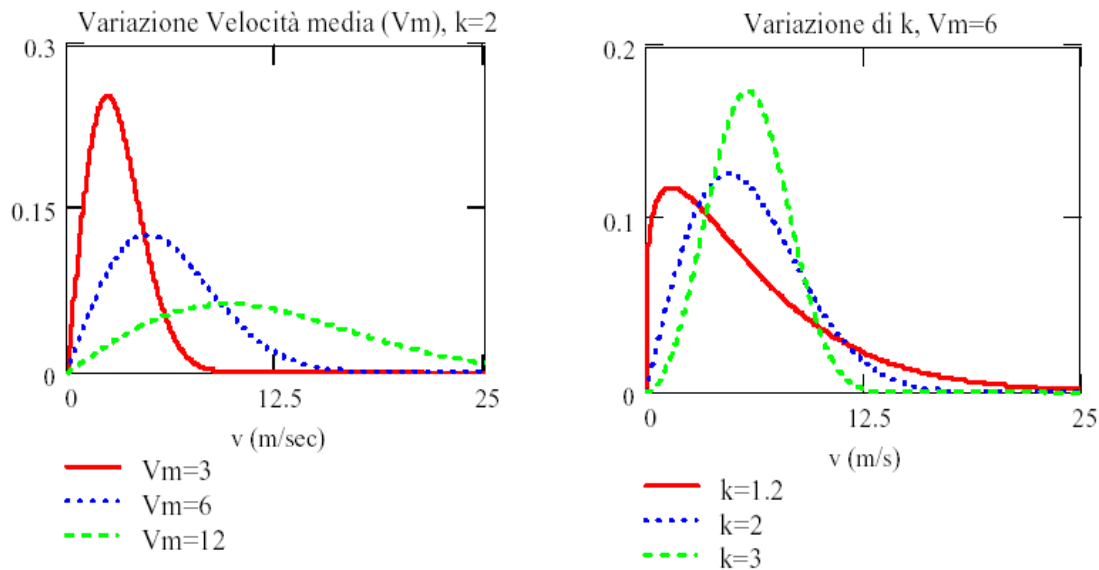


Figura 3.1 – Effetto della velocità media ( $V_m$ ) e del fattore forma ( $k$ ) sulla distribuzione di probabilità di Weibull al variare della velocità del vento[1].

## La legge di Betz

La tecnologia eolica si basa sul principio di trasformazione dell'energia cinetica della massa d'aria in movimento ad una data velocità, in energia meccanica (e successivamente elettrica) per mezzo di turbine, o aerogeneratori.

In pratica però, l'energia massima che può essere estratta da una macchina eolica è inferiore a quella teoricamente disponibile. Questo risultato si ottiene dalla legge di Betz, secondo la quale si può convertire al massimo 16/27 (o il 59.3%) dell'energia cinetica del vento in energia meccanica, considerando una turbina ideale ad asse orizzontale ed altre ipotesi semplificative [2]. In termini di potenza, la legge di Betz si esprime tramite la seguente equazione:

$$P = \frac{1}{2} 0.593 A \rho v^3$$

Dove:

$P$  è la potenza estraibile dalla massa d'aria di densità  $\rho$  [ $\text{kg/m}^3$ ], in movimento alla velocità  $v$ ;

0.593 è la costante di Betz che esprime la massima potenza estraibile dalla massa d'aria in movimento;

$A$  è l'area spazzata dalla turbina.

La formula sopra riportata evidenzia una serie di aspetti: la potenza ottenibile dagli aerogeneratori dipende dall'area spazzata; la potenza estraibile dipende dal cubo della velocità della massa d'aria intercettata dall'area spazzata.

Le macchine eoliche reali non riescono comunque a raggiungere tale produzione massima, in quanto sono soggette a perdite sia di tipo meccanico ed elettrico che di tipo aerodinamico [3]. Nel caso di una turbina reale, noto il suo coefficiente di prestazione (sempre inferiore al limite 0.593), la potenza elettrica erogata dal generatore  $P_g$  è espressa da:

$$P_g = \eta_g \eta_m c_p \frac{1}{2} A \rho v^3$$

dove:

- $\eta_g$  : rendimento del generatore elettrico;
- $\eta_m$  : rendimento delle componenti meccaniche;
- $c_p$  : coefficiente di potenza;
- $A$  : area spazzata dal rotore ( $m^2$ );
- $\rho$  : densità dell'aria ( $Kg/m^3$ );
- $v$  : velocità del vento a monte della turbina (m/s).

### La funzione densità di potenza

Moltiplicando la potenza ottenibile per ciascun valore della velocità del vento per la probabilità di ciascuna velocità del vento (curva di Weibull), si ottiene la densità di potenza, ossia la distribuzione della potenza eolica al variare della velocità del vento (figura 3.2).

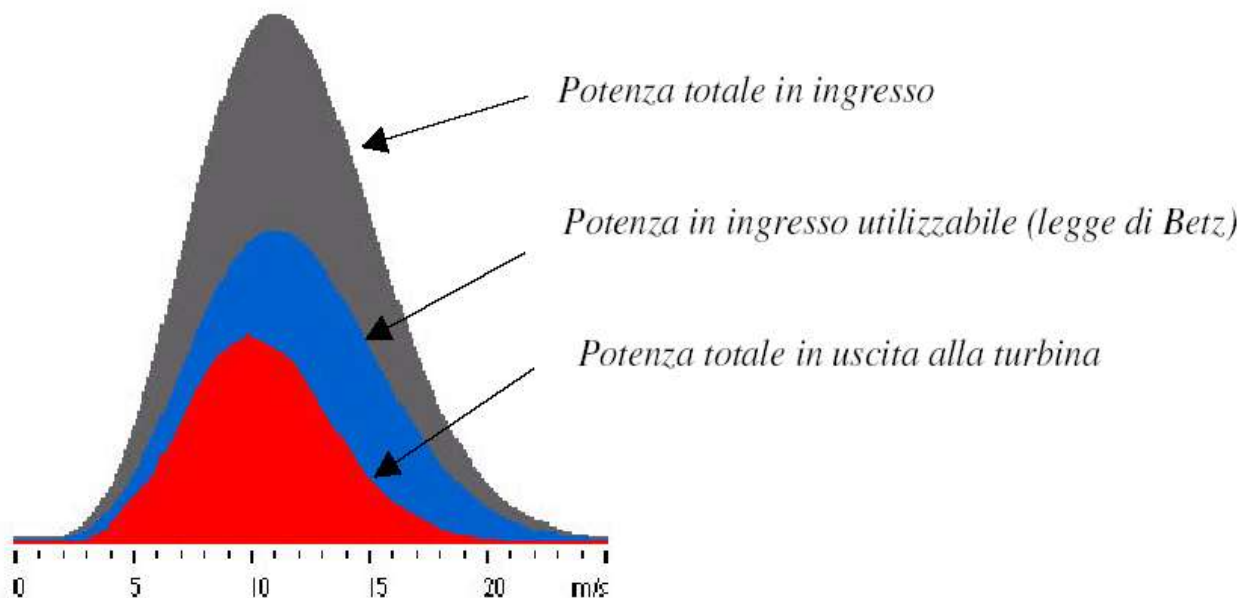


Figura 3.2 – Distribuzione della densità di potenza eolica al variare della velocità del vento.

L'area sottesa dalla curva in grigio rappresenta la densità di potenza cinetica posseduta dal vento che investe la turbina; l'area sottesa dalla curva in blu indica la densità di potenza massima che può essere teoricamente convertita in densità di potenza meccanica; l'area sottesa dalla curva in rosso equivale alla potenza totale estratta in uscita dalla turbina, ossia alla densità di potenza elettrica [4].

All'aumentare della velocità del vento quindi aumenta in modo più che proporzionale la potenza teoricamente estraibile, ma aumentano in pari misura anche le sollecitazioni sulla macchina.

Di solito le turbine eoliche sono progettate sulla base di tre valori di velocità:

- velocità di cut-in, o di avvio tra i 2 e 4 m/s, è la velocità alla quale la turbina comincia a produrre energia;
- velocità di taglio o nominale, tra i 10 e 14 m/s, è la velocità alla quale la turbina produce la massima potenza possibile;
- velocità di cut-off, o di arresto, tra i 20 ed i 25 m/s.

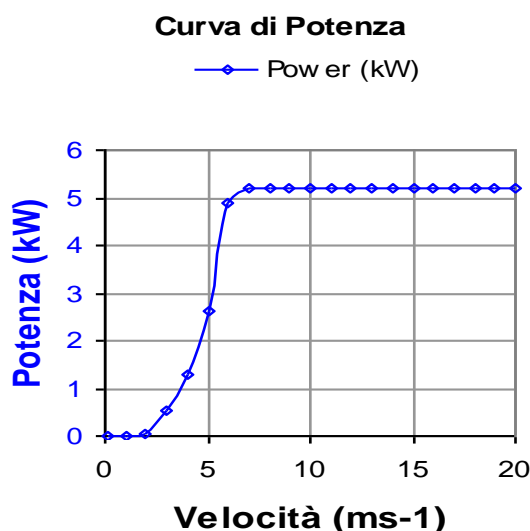


Figura 3.3 – Esempio di curva di potenza di una turbina eolica da 6kW.

Un aerogeneratore commerciale è caratterizzato dalla sua curva di potenza. Questa rappresenta la sua capacità di produzione in funzione della velocità del vento a livello del mozzo ed è fornita dal costruttore [5]. Il grafico di figura 3.3 riporta la curva di potenza di una turbina eolica da 6 kW. Nell'asse delle ascisse è indicata la potenza elettrica erogata, mentre l'asse delle ordinate riporta le diverse velocità del vento. La soglia minima (cut-in wind speed) di velocità del vento richiesta per l'avvio della turbina è in questo caso di 2 m/s. La velocità nominale (rated wind speed), cioè la velocità del vento con la quale la macchina raggiunge la potenza nominale di targa, è pari a 7 m/s. Non tutte le turbine sono progettate per mantenere costante la potenza erogata, con velocità del vento superiori a quella nominale, così come in figura 3. Altri aerogeneratori oltrepassata la soglia massima tollerata, si mettono in sicurezza interrompendo la produzione di elettricità, per evitare il rischio di danneggiamenti. La curva di potenza può variare anche in funzione della temperatura e dell'altitudine del sito. Per questo si considerano condizioni standard: temperatura pari a 15°C, quota 0 m sul livello del mare (1013 mBar di pressione), densità dell'aria pari a 1.225 kg/m<sup>3</sup>.

## Gli aerogeneratori nell'ambito mini-microeolico

Gli impianti mini-microeolici (con potenza inferiore a 100 kW) sono indicati per fornire elettricità a zone remote o difficilmente raggiungibili dalla rete elettrica. La possibilità di espansione del mini-microeolico in Italia è ampia: pur se con diverse potenzialità, le applicazioni possibili sono

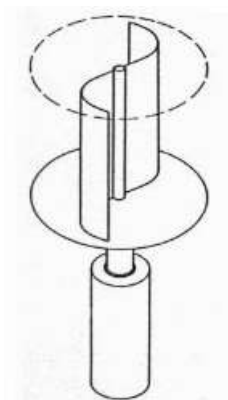


numerose. Gli aerogeneratori di piccola taglia sono molto versatili e si installano con minori difficoltà rispetto a impianti medi e grandi. L'impatto ambientale del mini-microeolico è basso, dato che le turbine hanno dimensioni ridotte, necessitano di spazi limitati e sono relativamente poco visibili. Tuttavia, quando sono installate in prossimità delle utenze, occorre valutare bene l'impatto acustico.

Le macchine mini-microeoliche, pur essendo simili agli aerogeneratori più grandi, costituiscono un settore tecnologicamente distinto: il mini-microeolico è rivolto a specifici mercati di nicchia, con applicazioni che richiedono soluzioni tecniche semplificate e concepite ad hoc. Generalmente gli impianti al di sotto di 20-30 kW servono a produrre energia elettrica per autoconsumo, mentre in quelli di taglia maggiore una parte dell'energia prodotta è destinata alla vendita.

Gli aerogeneratori possono essere classificati sulla base del meccanismo di trasformazione dell'energia cinetica del vento, in due modi, ad impulso (drag) o di tipo aerodinamico (lift).

Gli aerogeneratori ad impulso sono ad asse verticale, con le pale distribuite su tutta l'area spazzata. La macchina Savonius (fig.4), forse il più noto esempio di questo tipo, è una macchina molto semplice dal punto di vista costruttivo e di funzionamento. Oltre alle caratteristiche di semplicità, essa ha il vantaggio di essere molto robusta e di avere una forte coppia di spunto, cosa che ne consente l'avviamento anche con venti debolissimi. Di contro è applicabile solo per potenze ridotte poiché la turbina lavora bene con venti deboli, mentre il suo rendimento crolla con venti forti. Il rendimento globale massimo è pari al 20%.



*Fig.3.4 – Macchina ad impulso: schema di macchina Savonius.*

Le macchine aerodinamiche possono essere ad asse orizzontale o verticale, caratterizzate da pale che coprono solo una piccola parte dell'area spazzata e con un'elevata efficienza di conversione.

Gli aerogeneratori ad asse verticale, tipo Darrieus, o sue varianti (fig.5), si applicano in genere per piccolissime potenze. Questi aerogeneratori sono caratterizzati da grande semplicità di costruzione e da alto rendimento, che si attesta intorno al 40%. Il regime di rotazione è molto elevato, la coppia di spunto molto bassa ('cut-in') permette di sfruttare venti deboli. Inoltre, in queste turbine il funzionamento è indipendente dalla direzione del vento, consentendo di operare anche in condizioni di vento turbolento. Il basso impatto acustico e visivo le rende particolarmente adatte all'uso in ambito residenziale [6].

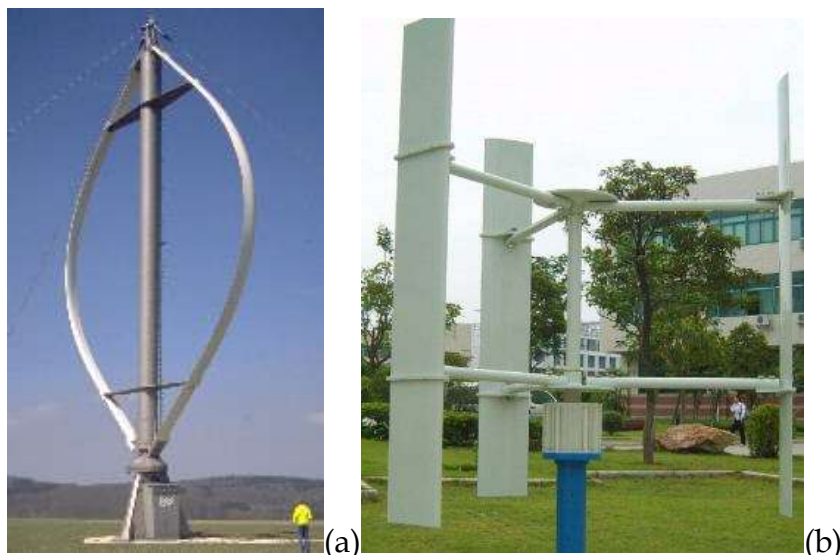
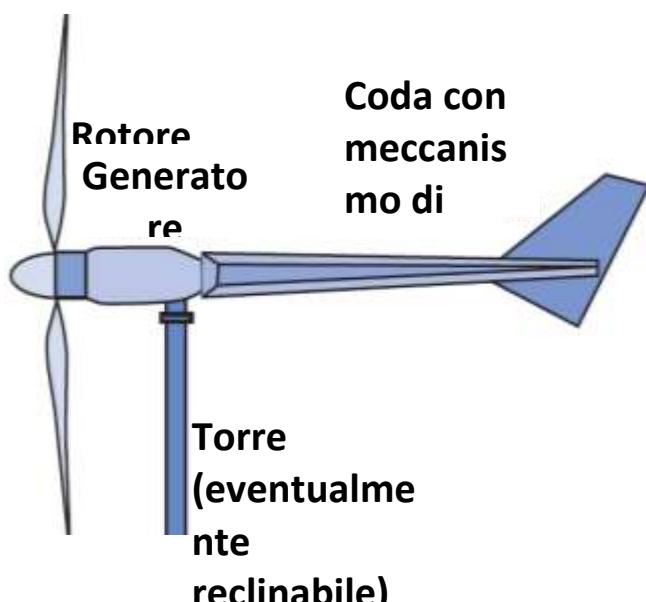


Fig.3.5 – Aerogeneratori ad asse verticale: macchina Darrieus(a) detta ibrida perché presenta contemporaneamente caratteristiche di altre macchine: asse di rotazione verticale – analogamente alla Savonius – e pale di tipo aerodinamico, come gli altri aerogeneratori. Variante di una pala Darrieus (b).

Le turbine ad asse orizzontale costituiscono la tipologia più diffusa. Il rotore, in configurazione sopravento o sottovento, viene installato su una torre, che consente di sfruttare un vento di maggiore intensità e risentire in misura minore degli effetti della turbolenza. Questo tipo di turbine permette di controllare la potenza alle alte velocità sfruttando la deformazione delle pale ('aerodynamic stall effect') o tramite sistemi di 'cut-off', ossia di messa fuori esercizio. Esistono diverse configurazioni di aerogeneratori ad asse orizzontale: monopala, bipala, tripala, multipala. All'aumentare del numero di pale diminuisce la velocità di rotazione e aumenta il rendimento. Escludendo il monopala e il multipala che hanno applicazioni particolari, il mercato si è concentrato sul bipala e tripala, orientandosi prevalentemente su quest'ultima configurazione in quanto caratterizzata da coppia motrice più uniforme (e quindi di durata maggiore), da un rendimento maggiore, nonché di un minore disturbo visivo [7].



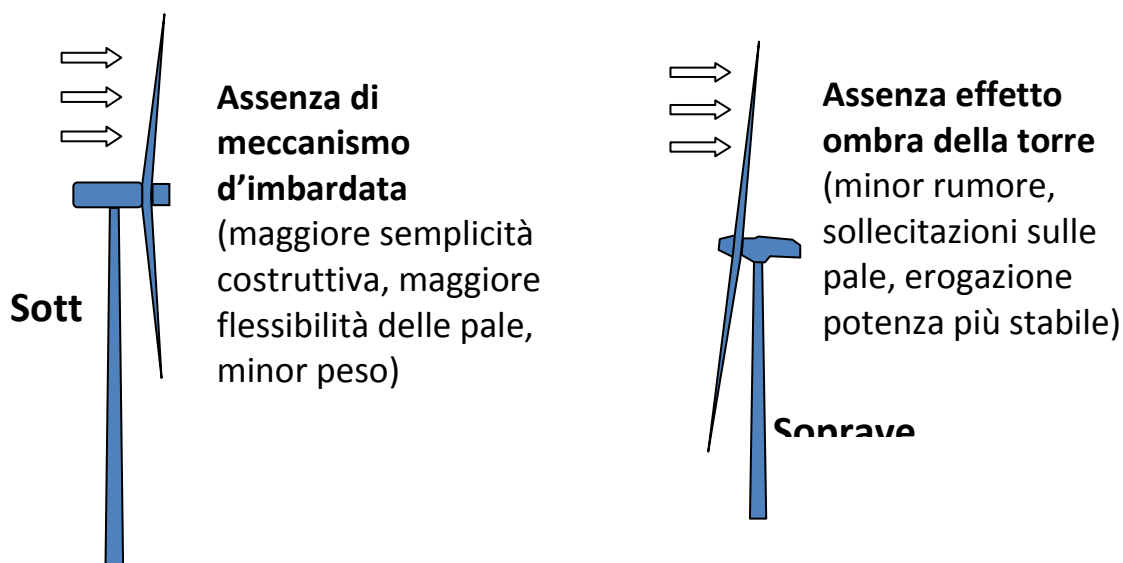


Fig.3.6 – Schema di turbina assiale con e senza meccanismo di imbardata.

La maggior parte delle turbine minieoliche utilizza pale realizzate in materiale composito: poliestere di vetro rinforzato, con minor frequenza fibre di carbonio e raramente legno. È stato abbandonato l'utilizzo di alluminio a causa della sua propensione alla deformazione sotto sforzo. Le dimensioni ridotte delle turbine minieoliche non consentono l'alloggio di motori di imbardata o altre componenti metalliche di cui sono dotate le turbine di taglia media o grande: quasi tutte le miniturbine montano timoni direzionali per orientare il rotore in direzione del vento. In regime di vento forte le turbine devono essere dotate di un sistema di posizionamento passivo del rotore che ne disallinei l'asse rispetto a quello di rotazione della pala. La maggior parte delle turbine impiega alternatori a magneti permanenti: si tratta della configurazione più semplice e robusta. Per le turbine ad uso domestico si trovano le seguenti configurazioni di alternatore: magneti permanenti, alternatore convenzionale a campo avvolto, generatore ad induzione. [2].

La localizzazione della turbina dovrà essere valutata facendo un bilancio tra problematiche contrastanti. Da una parte la vicinanza all'utenza può essere penalizzante per la funzionalità della macchina (interferenza al vento dovuta alla prossimità di edifici) oltre che per l'impatto acustico. D'altra parte la lontananza dall'utenza aumenta i costi di cablaggio ed interrimento delle linee elettriche oltre che incrementare la dispersione di energia.

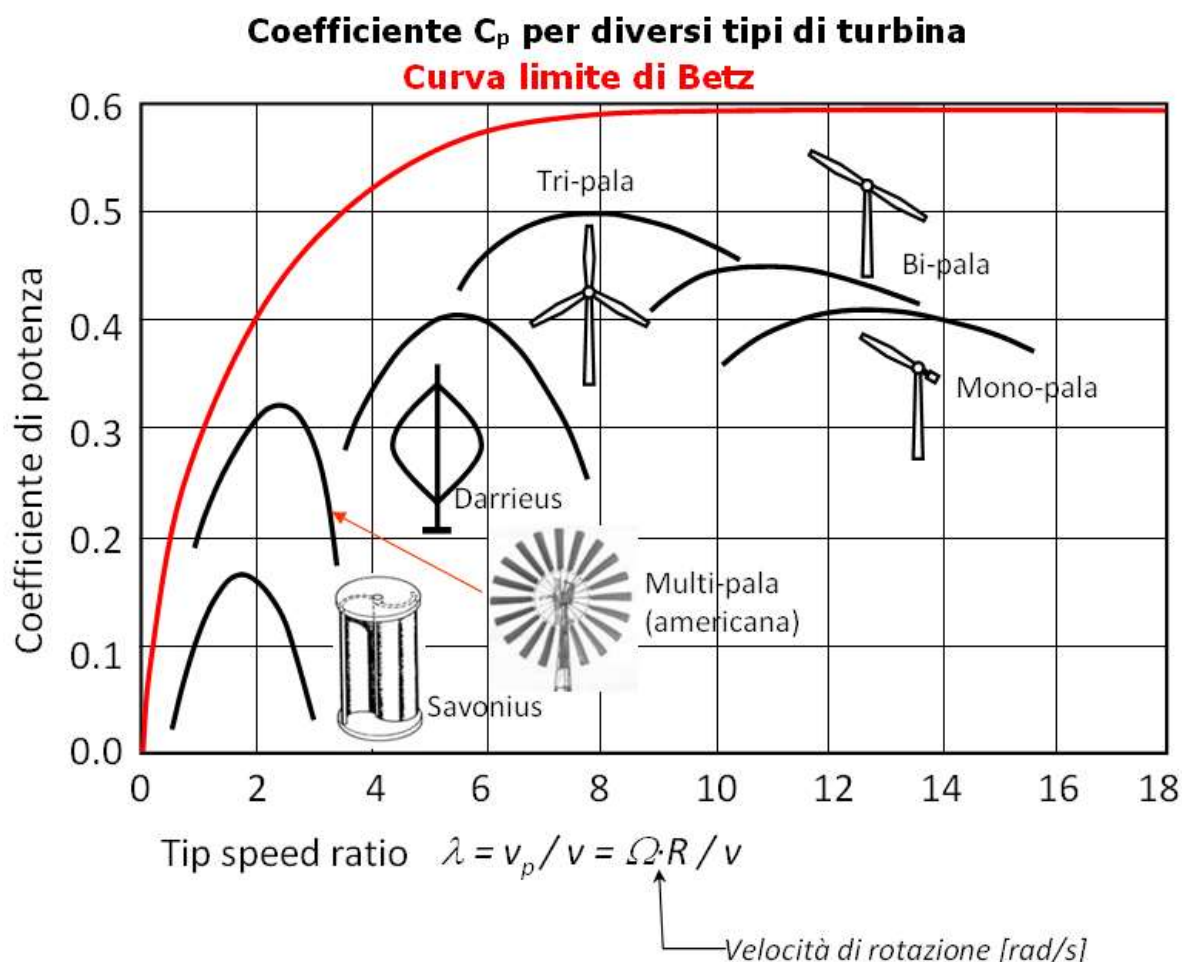


Fig.3.7 – Rassegna di tipologia di micro turbine in funzione del coefficiente di potenza

In figura 7 è riportato l'andamento del coefficiente di potenza in relazione alle diverse tipologie di aerogeneratori da cui si deduce che [8].:

- solo le turbine ad asse orizzontale si avvicinano ai limiti massimi teorici dell'efficienza;
- rotori Savonius o multipala americana forniscono alte coppie a bassa velocità.

## Stima delle potenzialità eoliche

### Premessa

L'uso di modelli numerici per la stima del vento si rende necessario quando le misure anemologiche non sono sufficienti a fornire una buona rappresentatività spaziale del territorio in esame. In questo caso l'Archivio NMM, ottenuto dai campi meteorologici stimati dal modello WRF-NMM, rappresenta una valida alternativa alle misure, in quanto copre l'intero territorio italiano, con una risoluzione spaziale di 10 Km. Le variabili meteo archiviate con passo orario coprono un periodo che va dal 2005 al 2011.

Tuttavia, le stime modellistiche devono essere validate con dati misurati: per questo si è reso necessario, come primo passo, effettuare una validazione sistematica della variabile vento. Per effettuare la validazione, è stato necessario reperire un numero elevato di dati misurati da stazioni

meteorologiche situate su tutto il territorio nazionale, per il periodo 2005-2011. Questa prima fase ha permesso di ottenere un data-set costituito da 46 stazioni. Per effettuare un confronto con le stime orarie di vento, sono state messe a punto alcune procedure per ottenere i principali indicatori statistici (skill), quali correlazione, BIAS, RMSE, oltre ai valori medi ed ad indicatori specifici per la stima della producibilità eolica. L'analisi di questi skill ed indicatori ha permesso di evidenziare i margini di affidabilità del modello nella stima della variabile vento.

Una volta portata a termine la validazione, le stime di vento sono state mediate per ottenere, su tutto il dominio di studio, il vento medio su base mensile (considerando come mese-medio la media ottenuta nel corso di 7 anni, 2005-2011), in modo da evidenziare le differenze stagionali. Le 12 mappe così ottenute sono state georeferenziate in ambiente ARCGIS. Per la realizzazione di questa parte del lavoro, sono state messe a punto alcune procedure, in particolare per effettuare le medie sui periodi di interesse e per la georeferenziazione.

Dato che lo scopo del lavoro consiste nel fornire informazioni riguardo alle potenzialità eoliche del territorio nazionale, le sole mappe di vento medio non sarebbero sufficienti. Sono quindi state elaborate anche alcune mappe di producibilità eolica, relative a tre diverse tipologie di turbina. Allo scopo infatti sono state selezionate, nell'ambito mini-micro eolico, alcune turbine che presentano caratteristiche differenti, in modo da fornire un quadro più ampio delle potenzialità eoliche del territorio nazionale. Anche in questo caso sono già state elaborate le procedure per la stima di alcuni parametri anemologici (mappe relative ai parametri A e K), sia per la stima della producibilità, per ciascuna delle turbine prese in esame. Oltre alla producibilità annua (per l'intero periodo 2005-2011), sono state elaborate mappe relative alla producibilità mensile media. Anche queste mappe sono state georeferenziate in ambiente ARCGIS.

Tutti gli elaborati, relativi al vento medio e alla producibilità, sia annuale che mensile, vengono presentati nella sezione "Cartografia".

Il presente lavoro è da considerarsi preliminare e finalizzato allo studio del possibile utilizzo dei campi di vento elaborati da modello meteorologico a livello nazionale mettendo in evidenza i possibili limiti e vantaggi di tale approccio.

I risultati consentiranno di individuare le criticità della metodologia proposta al fine di poterla migliorare in futuro ed eventualmente di applicarla su vasta scala.

## **Archivio meteorologico WRF-NMM**

In collaborazione con la Regione Toscana, il settore "Qualità dell'Aria" del LaMMA ha realizzato un archivio di variabili meteorologiche, estratte quotidianamente su tutta la regione Toscana a partire dalle previsioni del servizio meteo regionale.

Il modello WRF-NMM (*Weather Research and Forecasting - Nonhydrostatic Mesoscale Model*) [9] è stato sviluppato dalla NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e da NCEP (*National Centre for Environmental Prediction*) in modo da risultare lo stato dell'arte nel campo della simulazione atmosferica e da risultare uno strumento flessibile, portatile, efficiente.

Il sistema è costituito da:

- Risolutore delle equazioni fluido-dinamiche. Caratteristiche del solutore sono:
  - Equazioni di Navier-Stokes non idrostatiche (con opzione per ipotesi idrostatica) per fluido compressibile.

- Sistema di coordinate verticali ibrido: "*terrain-following*" e "*sigma-pressure*".
- Griglia *staggerata* Arakawa E-grid.
- Stesso passo temporale per tutti i termini.
- La dinamica conserva un elevato numero di termini del primo e del secondo ordine, tra cui energia ed entropia.
- Non è ancora implementata la possibilità di *nesting* delle griglie.
- Propagazione orizzontale con schema "*forward-backward*".
- Propagazione verticale delle onde sonore con "*Implicit Scheme*".
- Avvezione orizzontale e verticale conservative (fino ai termini del secondo ordine).
- Diffusione laterale e verticale. La diffusione verticale nel *Boundary Layer* e nell'atmosfera libera si esplicita attraverso lo schema del terreno e lo schema "Mellor-Yamada-Janjic". Quella laterale è formulata attraverso l'approccio non lineare di Smagorinsky (con parametro di controllo pari al quadrato della costante di Smagorinsky).
- Modelli fisici interagenti con il risolutore NMM attraverso una interfaccia *standard*.
  - Microfisica.
  - Schema radiativo ad onda lunga.
  - Schema radiativo ad onda corta.
  - Parametrizzazione fenomeni convettivi.
  - Modello di interazione con la superficie.
- Inizializzazione *standard* delle condizioni iniziali ed al contorno da dati provenienti da modelli globali o regionali.
- Assimilazione dati con schema variazionale "3DVar".

## Validazione delle stime di vento WRF-NMM

Le stime di vento ottenute dal modello prognostico WRF-NMM sono state validate attraverso un processo di verifica che ha previsto il confronto con i corrispondenti dati di vento misurati. Per la verifica, estesa all'intero periodo 2005-2011, sono stati utilizzati i dati rilevati da anemometri installati a 10 m s.l.m. Nonostante la presenza di numerose stazioni meteorologiche sul territorio nazionale, da un attento esame dei dati di vento misurati nel periodo di interesse, sono state scelte quarantasei stazioni, sulla base delle caratteristiche dell'anemometro e dei tempi di misura: in effetti molte stazioni sono state scartate a causa dell'altezza dell'anemometro (ad es. 3 m s.l.m.) o della modalità di misura (ad es. misura mediata su alcuni minuti, ma registrata su base esararia). Nella tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche delle stazioni meteo selezionate (nome della stazione, codice identificativo, latitudine, longitudine, quota s.l.m., tipologia dell'area in cui è collocato l'anemometro).



*Figura 3.8 – Mappa relativa alla posizione geografica delle stazioni anemometriche, indicate con il codice identificativo.*

Tab. 3.1 – Caratteristiche delle stazioni prese in esame.

NOME STAZIONE	ID	LAT.	LONG.	QUOTA	TIPO
MARINA DI GINOSA	81	40.417	16.883	1	costa
VENEZIA TESSERA	156	45.500	12.350	2	costa
GENOVA SESTRI	63	44.400	8.833	4	costa
CAGLIARI ELMAS	28	39.233	9.050	4	costa
ROMA FIUMICINO	130	41.800	12.233	4	costa
GROSSETO	69	42.733	11.050	5	costa
CERVIA	46	44.217	12.283	6	costa
TRAPANI BIRGI	152	37.900	12.483	7	costa
OLBIA C.SMERALDA	99	40.883	9.517	11	costa
LAMEZIA TERME	72	38.900	16.233	12	costa
CATANIA FONT.	41	37.467	15.050	12	costa
PRATICA DI MARE	121	41.650	12.433	12	costa
RONCHI DEI LEG.	132	45.817	13.467	12	costa
BRINDISI	26	40.650	17.950	14	costa
PESCARA	106	42.433	14.183	15	costa
FALCONARA	52	43.617	13.350	15	costa
PALERMO PUNTA R.	101	38.167	13.083	20	costa
CATANIA SIGONELLA	42	37.400	14.917	24	costa
ALGHERO	7	40.617	8.283	27	costa
DECIMOMANNU	49	39.333	8.967	29	costa
BOLOGNA BORGO P.	20	44.517	11.283	37	pianura
TREVISO ISTRANA	153	45.683	12.100	42	pianura
FIRENZE PERETOLA	54	43.800	11.200	43	pianura
PARMA	102	44.817	10.283	50	pianura
MESSINA	84	38.183	15.533	50	costa
AMENDOLA	8	41.533	15.700	57	costa
BARI PALESE	16	41.133	16.750	57	costa
VERONA VILLAF.	159	45.383	10.867	73	pianura
NAPOLI CAPODIC.	97	40.883	14.283	90	costa
BRESCIA GHEDI	23	45.417	10.267	102	pianura
S.MARIA DI LEUCA	135	39.800	18.333	104	costa
ROMA CIAMPINO	129	41.800	12.583	129	pianura
PIACENZA S. DAM.	107	44.900	9.717	138	pianura
GORGONA	67	43.426	9.894	180	costa
MILANO MALPENSA	86	45.617	8.717	234	pianura
BERGAMO ORIO AL S.	17	45.667	9.700	238	pianura
BOLZANO	21	46.450	11.317	239	pianura
TORINO CASELLE	149	45.200	7.633	299	pianura
GIOIA DEL COLLE	66	40.750	16.933	345	collina
BRIC DELLA CROCE	25	45.033	7.717	709	monte
GIOGO	65	44.046	11.388	880	monte
MONTE TERMINILLO	95	42.467	12.983	1874	monte
PASSO_ROLLE	103	46.283	11.783	2004	monte
PAGANELLA	100	46.150	11.033	2125	monte
MONTE CIMONE	92	44.183	10.700	2165	monte
PIAN ROSA	109	45.933	7.700	3480	monte



L'elenco delle stazioni è stato ordinato in base alla quota altimetrica a cui si trova l'anemometro. Dei 46 siti di misura, 7 si trovano in montagna (quota altimetrica superiore a 700 m s.l.m.), uno in collina, 12 in pianura interna, mentre i restanti 26 siti si trovano sulla costa o in prossimità di questa.

Per ciascuna delle quarantasei stazioni, oltre ai valori medi delle misure e delle stime, sono stati elaborati alcuni indicatori statistici o skill, quali coefficiente di correlazione (indicato con  $\rho$ ,  $BIAS$  e  $RMSE$ , di cui sono riportate le formule.

$$\rho(Y, O) = \frac{1}{\sigma_Y \sigma_O} COV(Y, O)$$

$$COV(Y, O) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - \mu_Y)(o_m - \mu_O)$$

$$BIAS(Y, O) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - o_m)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - o_m)^2}$$

dove:

- $Y$  : valori stimati;
- $O$  : valori misurati;
- $M$  : numero di valori utilizzati.

Il coefficiente di correlazione  $\rho$  può variare tra -1 e 1; per valori prossimi ad 1 si ha un ottimo accordo tra i valori stimati e misurati, per valori vicini a 0 le stime sono in totale disaccordo con le misure, per valori negativi stime e misure sono anticorrelate. Il  $BIAS$  rappresenta l'errore medio e fornisce indicazioni relative a sovrastime o sottostime del modello. Valori di  $BIAS$  positivi indicano una sovrastima del modello rispetto ai parametri previsti, mentre valori negativi indicano una sottostima. Valori prossimi a zero indicano che non vi è né sovrastima né sottostima mediamente, ma questo potrebbe essere il risultato del reciproco annullamento di errori in eccesso o in difetto (anche grandi in valore assoluto). In questo senso è utile ricorrere al calcolo del  $RMSE$ , che invece evidenzia l'ampiezza media dell'errore in valore assoluto.

Gli skill sono stati calcolati utilizzando sia le serie storiche su base oraria che su base giornaliera. Nella tabella 2, riferita alle serie storiche su base oraria, sono riportati, per ciascuna stazione, il numero di dati utilizzati (numero di ore in cui sono presenti contemporaneamente sia le misure che i dati del modello), il valore medio del vento misurato nella stazione, il valore medio del vento stimato dal modello nella cella del dominio di calcolo in cui ricadono le coordinate della stazione, la correlazione tra i due set di dati ed i relativi  $RMSE$  e  $BIAS$ . Gli stessi skill sono stati calcolati anche utilizzando le serie storiche di dati mediati su base giornaliera: il dato giornaliero è stato considerato valido nel caso che almeno il 75% dei dati orari fosse presente (tabella 3). L'aggregazione dei dati da orari a giornalieri, eliminando eventuali disallineamenti temporali nelle due serie storiche,

mostra un generale miglioramento degli skill. Ad esempio, il coefficiente di correlazione, che evidenzia l'accordo tra gli andamenti temporali delle serie storiche, mostra valori mediamente più alti in quasi tutte le stazioni (39 su 46) nel caso si consideri l'aggregazione giornaliera (figura 3.10 sopra). In ogni caso, sia che si considerino le serie storiche orarie che quelle giornaliere, questo indicatore è in generale discreto per la maggior parte delle stazioni (30 stazioni hanno valori superiori a 0.50 su base oraria, 33 stazioni su base giornaliera).

Per rendere più immediata la valutazione degli indicatori riportati in tabella, sono stati elaborati alcuni istogrammi che sintetizzano i principali risultati: oltre al grafico già discusso che riporta il coefficiente di correlazione su base oraria e giornaliera (figura 3.10 sopra), in figura 3.9 (sopra) sono messe a confronto, per ciascuna stazione, la media ottenuta dalle misure e la corrispondente stima da modello (base giornaliera), mentre in figura 3.9 (sotto) sono riportati RMSE e BIAS (base giornaliera).

Osservando l'istogramma in figura 3.9 (sopra), si nota come in generale le velocità medie maggiori siano misurate nei siti di montagna e in alcuni casi, sulla costa. I valori medi misurati variano tra 1.5 e 8.8 m/s, mentre quelli stimati da modello tra 2 e 5.5 m/s. Considerando gli skill RMSE e BIAS, riportati nel grafico in figura 3.9 (sotto), si evidenzia come nei siti di montagna si registrano le maggiori differenze tra stime e misure e in particolare come il modello sottostimi: il modello sottostima anche in 7 siti di costa e nel sito in collina, per quanto questi valori siano inferiori rispetto a quanto si verifica nei siti di montagna. Nei restanti 31 siti si nota una sovrastima da parte del modello rispetto ai dati misurati, sia guardando il valor medio che gli indici *BIAS* (sempre positivo) e *RMSE*; la sovrastima è significativa in particolare in 7 siti di pianura interna, mentre nella maggior parte dei siti costieri gli skill sono migliori.

In sintesi, dagli indici considerati si nota un miglior accordo stime-misure nei siti costieri, che nella maggior parte dei casi presentano sovrastime o sottostime abbastanza contenute, mentre nei siti di pianura interna si verificano significative sovrastime in 7 su 12 siti. Nei siti di montagna si verifica la situazione più critica, con marcate sottostime dei valori di vento misurati.

Per ciascuno dei siti selezionati, sono state confrontate la serie storica dei dati di velocità del vento misurati e la serie storica delle stime ottenute da WRF. Le serie storiche di stime e misure su base oraria sono state elaborate per ottenere valori mediati su base giornaliera, in modo da poter effettuare un confronto anche con serie storiche di dati accorpati. Solo a titolo d'esempio, nelle figg. 11-13 sono riportati i grafici che confrontano le serie storiche, per l'anno 2006 su base giornaliera e per un periodo di un mese su base oraria, di stime e misure per tre siti: Catania Fontanarossa (costa), Firenze Peretola (pianura interna), Monte Cimone (montagna). Per motivi di sintesi verranno commentati solo i grafici delle serie storiche di questi tre siti, in quanto rappresentativi delle tre tipologie.

*Catania Fontanarossa (costa)* – Le serie storiche della velocità media giornaliera e oraria evidenziano un buon accordo tra le stime ottenute dal modello (in rosso) e le misure (in blu), soprattutto nel semestre freddo. Nel periodo estivo la corrispondenza è minore, in quanto i venti a regime di brezza che prevalgono in questo periodo non vengono riprodotti dal modello in modo del tutto adeguato. Osservando la figura 3.11 si nota una minore correlazione a livello orario tra stime e misure, sebbene gli episodi con vento più forte vengano comunque riprodotti. In linea di massima, anche nella maggior parte dei siti costieri presi in esame le stime di WRF riproducono discretamente l'andamento dei valori misurati.

*Firenze Peretola (pianura interna)* - Da una prima analisi delle serie storiche su base giornaliera, confrontate in figura 3.12, si nota come la velocità del vento stimata da WRF (in rosso), pur riproducendo in modo discreto l'andamento temporale della serie relativa ai dati misurati (in blu), è decisamente maggiore, raggiungendo picchi dell'ordine di 10 m/s, rispetto a valori massimi misurati dell'ordine di 5 m/s. L'osservazione delle serie su base oraria conferma la sovrastima, pur evidenziando un sostanziale accordo nei valori di picco. Negli altri siti di pianura interna si presentano situazioni differenti: in alcuni siti (Bologna, Parma, ) le stime riproducono piuttosto bene le misure, mentre in altri siti il modello sovrastima notevolmente, inoltre la correlazione temporale non è soddisfacente. In generale comunque nella maggior parte dei siti di pianura il modello sovrastima in modo significativo.

*Monte Cimone (montagna)* – Come indicato dall'alto coefficiente di correlazione, anche il confronto delle serie storiche su base giornaliera conferma che il modello riproduce in modo corretto l'andamento temporale, sebbene sia evidente la sistematica sottostima dei valori. La velocità del vento medio giornaliero misurata presenta picchi dell'ordine di 20 - 25 m/s mentre i valori di picco del modello superano appena i 10 m/s. Le serie storiche orarie evidenziano in modo marcato come i valori di picco misurati non vengano riprodotti adeguatamente dal modello, che invece presenta un profilo smussato.

Anche negli altri siti di montagna si presenta una analoga condizione critica, tanto maggiore quanto maggiore è la quota dell'anemometro. Ovviamente il modello, per quanto ben configurato, non è in grado di riprodurre correttamente la velocità del vento in presenza di orografia complessa, in quanto sarebbe necessario innestare un modello a risoluzione più alta.

Tab. 3.2 – Indicatori statistici delle stazioni prese in esame (su base oraria).

NOME STAZIONE	N. dati h	MEDIA STAZ h	MEDIA MOD h	CORRELAZ h	RMSE h	BIAS h
MARINA DI GINOSA	28461	4.59	4.18	0.61	2.21	-0.41
VENEZIA TESSERA	53867	2.58	3.58	0.64	2.00	0.99
GENOVA SESTRI	55094	4.63	3.89	0.45	2.58	-0.74
CAGLIARI ELMAS	54912	4.09	4.29	0.63	2.04	0.20
ROMA FIUMICINO	55384	3.62	4.50	0.68	2.05	0.88
GROSSETO	45141	3.82	4.40	0.68	2.09	0.58
CERVIA	47382	2.76	3.75	0.51	2.17	0.99
TRAPANI BIRGI	46691	4.04	5.18	0.72	2.38	1.15
OLBIA C.SMERALDA	54754	3.93	5.09	0.71	2.41	1.15
LAMEZIA TERME	49874	4.01	3.81	0.66	2.18	-0.19
CATANIA FONTANAR	54600	3.32	3.46	0.60	1.94	0.14
PRATICA DI MARE	30905	3.64	4.61	0.60	2.35	0.96
RONCHI DEI LEGIONARI	47719	1.94	3.67	0.48	2.75	1.73
BRINDISI	40886	4.99	5.30	0.65	2.31	0.30
PESCARA	46846	2.40	3.73	0.45	2.36	1.32
FALCONARA	49184	2.79	4.21	0.49	2.48	1.42
PALERMO PUNTA RAISI	54617	4.53	4.82	0.70	2.31	0.30
CATANIA SIGONELLA	46537	4.23	3.47	0.60	2.24	-0.77
ALGHERO	54224	3.04	4.76	0.67	2.61	1.72
DECIMOMANNU	40462	3.91	4.31	0.61	2.40	0.41
BOLOGNA BORGO PANIG	54841	2.64	3.15	0.43	1.76	0.51
TREVISO ISTRANA	38468	2.24	3.12	0.49	1.79	0.88
FIRENZE PERETOLA	53097	2.30	3.76	0.55	2.45	1.46
PARMA	28861	2.36	2.87	0.52	1.68	0.50
MESSINA	25849	3.12	5.06	0.40	3.44	1.94
AMENDOLA	28137	3.97	3.71	0.54	2.34	-0.25
BARI PALESE	54780	3.43	4.48	0.63	2.11	1.05
VERONA VILLAFRANCA	52481	2.31	3.05	0.53	1.90	0.74
NAPOLI CAPODICHINO	52188	2.33	4.30	0.65	2.69	1.97
BRESCIA GHEDI	44741	2.06	2.81	0.50	1.78	0.75
S.MARIA DI LEUCA	26186	4.94	4.96	0.60	2.56	0.03
ROMA CIAMPINO	51910	2.64	3.91	0.62	2.15	1.27
PIACENZA S. DAMIANO	28291	2.55	2.85	0.46	1.86	0.30
GORGONA	19560	5.42	5.72	0.69	2.59	0.30
MILANO MALPENSA	47323	1.56	2.69	0.38	2.00	1.13
BERGAMO ORIO AL SERIO	54731	2.23	2.83	0.26	1.84	0.60
BOLZANO	33459	2.13	2.37	0.37	1.98	0.23
TORINO CASELLE	53977	1.91	2.23	0.32	1.60	0.32
GIOIA DEL COLLE	43228	4.54	4.66	0.71	2.06	0.12
BRIC DELLA CROCE	17003	2.77	2.28	0.39	1.91	-0.49
GIOGO	26957	5.68	4.36	0.75	2.54	-1.32
MONTE TERMINILLO	22695	8.90	4.75	0.56	6.39	-4.15
PASSO_ROLLE	27427	3.76	3.38	0.43	2.57	-0.38
PAGANELLA	32293	5.16	2.79	0.41	3.91	-2.37
MONTE CIMONE	23764	9.67	4.72	0.54	6.85	-4.95
PIAN ROSA	38653	5.89	4.62	0.50	4.16	-1.27

Tab. 3.3 – Indicatori statistici delle stazioni prese in esame (su base giornaliera).

NOME STAZIONE	N. dati g	MEDIA STAZ g	MEDIA MOD g	CORRELAZ g	RMSE g	BIAS g
MARINA DI GINOSA	1612	5.17	4.17	0.57	2.35	-1.01
VENEZIA TESSERA	2401	2.62	3.55	0.74	1.49	0.93
GENOVA SESTRI	2396	4.71	3.90	0.55	1.95	-0.81
CAGLIARI ELMAS	2391	4.15	4.29	0.68	1.47	0.14
ROMA FIUMICINO	2398	3.71	4.50	0.74	1.51	0.78
GROSSETO	2338	4.31	4.35	0.59	1.95	0.05
CERVIA	2352	2.90	3.72	0.58	1.57	0.82
TRAPANI BIRGI	2368	4.32	5.07	0.68	2.09	0.75
OLBIA C.SMERALDA	2397	4.01	5.08	0.79	1.83	1.07
LAMEZIA TERME	2386	4.21	3.76	0.65	1.81	-0.45
CATANIA FONTANAROSSA	2391	3.38	3.44	0.67	1.33	0.06
PRATICA DI MARE	1616	3.80	4.55	0.66	1.72	0.74
RONCHI DEI LEGIONARI	2310	2.48	3.64	0.26	2.32	1.15
BRINDISI	1997	4.87	5.03	0.75	1.58	0.16
PESCARA	2371	2.55	3.65	0.47	1.83	1.10
FALCONARA	2346	2.89	4.19	0.59	1.89	1.31
PALERMO PUNTA RAISI	2385	4.56	4.80	0.81	1.52	0.24
CATANIA SIGONELLA	2248	4.44	3.41	0.54	2.01	-1.03
ALGHERO	2398	3.11	4.73	0.73	2.18	1.61
DECIMOMANNU	2358	4.06	4.08	0.53	1.92	0.02
BOLOGNA BORGO PANIG	2396	2.71	3.15	0.44	1.29	0.44
TREVISO ISTRANA	2260	2.21	2.93	0.61	1.23	0.72
FIRENZE PERETOLA	2395	2.36	3.73	0.57	2.04	1.37
PARMA	1949	2.37	2.77	0.65	1.02	0.40
MESSINA	1644	4.05	4.75	0.19	3.46	0.70
AMENDOLA	2111	4.53	3.45	0.47	2.69	-1.07
BARI PALESE	2399	3.50	4.48	0.70	1.62	0.98
VERONA VILLAFRANCA	2351	2.31	3.02	0.68	1.28	0.71
NAPOLI CAPODICHINO	2405	2.39	4.19	0.64	2.28	1.80
BRESCIA GHEDI	2363	2.19	2.77	0.53	1.34	0.59
S.MARIA DI LEUCA	1568	5.87	4.99	0.51	3.06	-0.88
ROMA CIAMPINO	2333	2.73	3.89	0.64	1.71	1.16
PIACENZA S. DAMIANO	2348	2.70	2.78	0.48	1.43	0.09
GORGONA	1184	5.61	5.46	0.72	2.07	-0.15
MILANO MALPENSA	2404	1.56	2.63	0.53	1.49	1.07
BERGAMO ORIO AL SERIO	2387	2.26	2.84	0.36	1.27	0.57
BOLZANO	2377	2.06	2.26	0.45	1.25	0.20
TORINO CASELLE	2387	1.96	2.23	0.50	1.01	0.28
GIOIA DEL COLLE	2288	4.72	4.45	0.69	1.85	-0.28
BRIC DELLA CROCE	1897	2.87	2.06	0.42	1.72	-0.81
GIOGO	1537	5.87	4.33	0.81	2.38	-1.55
MONTE TERMINILLO	1838	8.49	4.40	0.65	5.85	-4.09
PASSO_ROLLE	2167	3.86	3.22	0.44	2.17	-0.64
PAGANELLA	2045	4.80	2.68	0.50	3.11	-2.12
MONTE CIMONE	1747	8.77	4.16	0.66	5.90	-4.61
PIAN ROSA	2243	6.36	4.44	0.50	4.08	-1.92

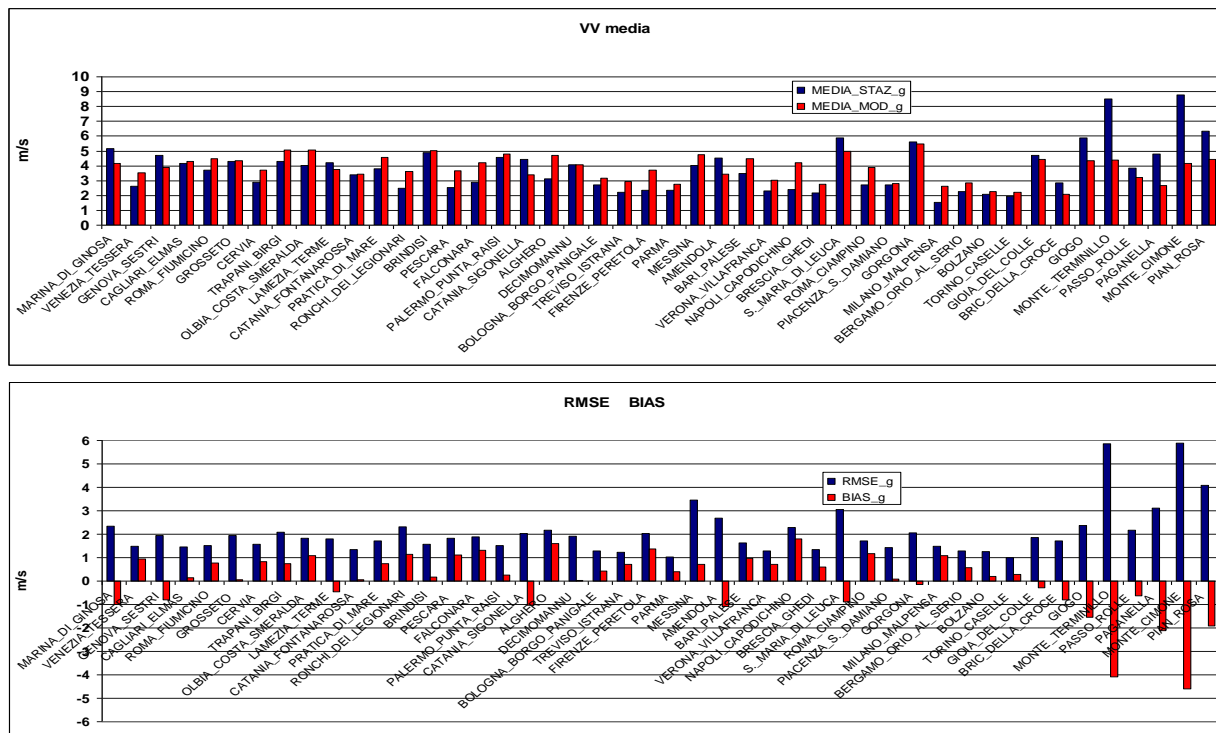


Figura 3.9 – Sopra: istogramma relativo al vento medio giornaliero ottenuto dalle misure (blu) e dalla stima da modello (rosso). Sotto: istogramma relativo a RMSE (blu) e BIAS (rosso).

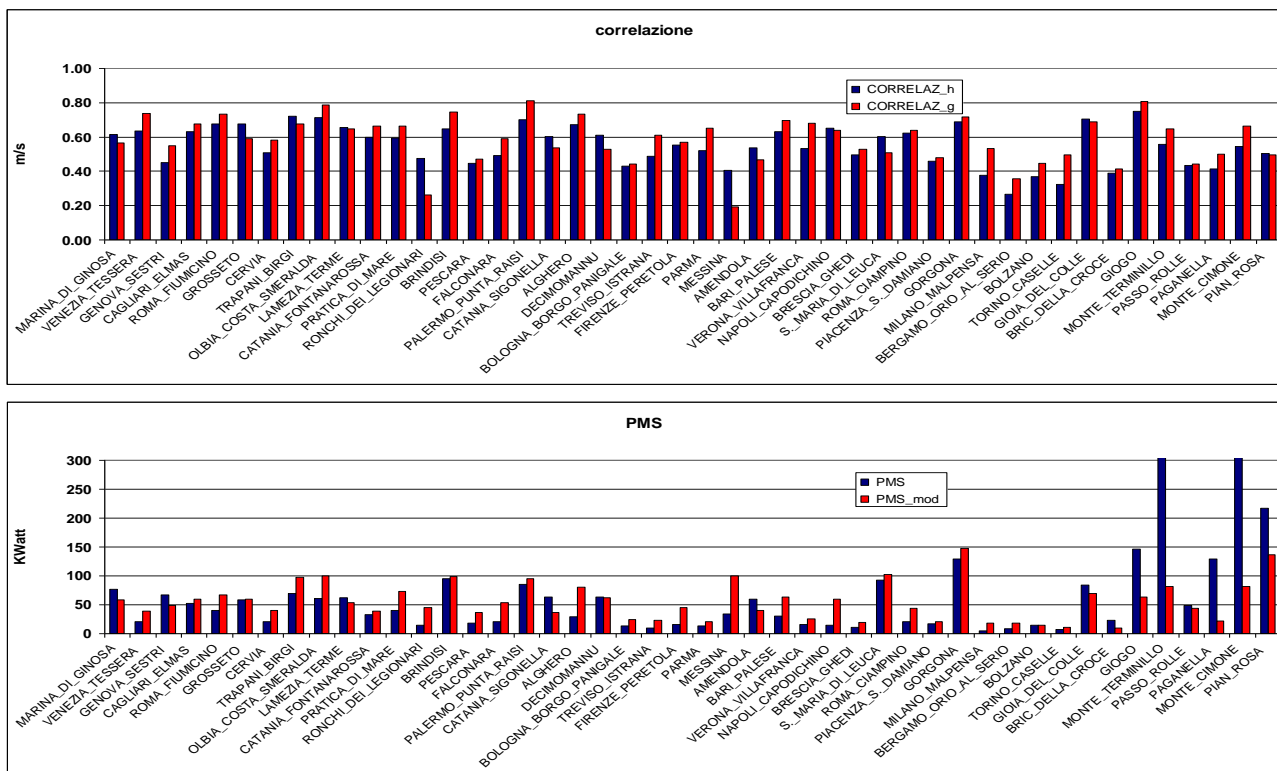


Figura 3.10 – Sopra: istogramma relativo alla correlazione stime-misure su base oraria (blu) e su base giornaliera (rosso). Sotto: istogramma relativo a PMS ottenuto da misure (blu) e da stime (rosso).

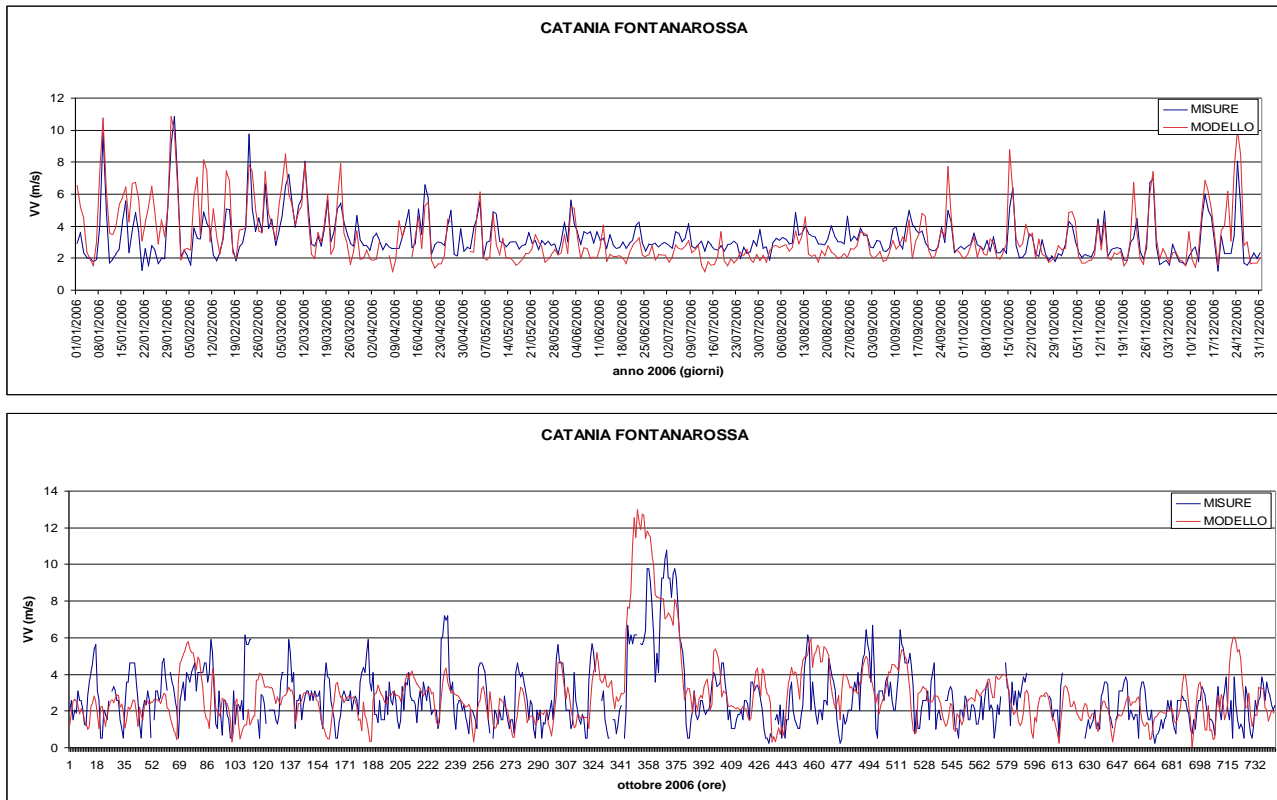


Figura 3.11 – Catania Fontanarossa - Sopra: andamento del vento medio giornaliero misurato (blu) e stimato (rosso) durante l'anno 2006. Sotto: andamento del vento medio orario misurato (blu) e stimato (rosso) durante il mese di ottobre 2006.

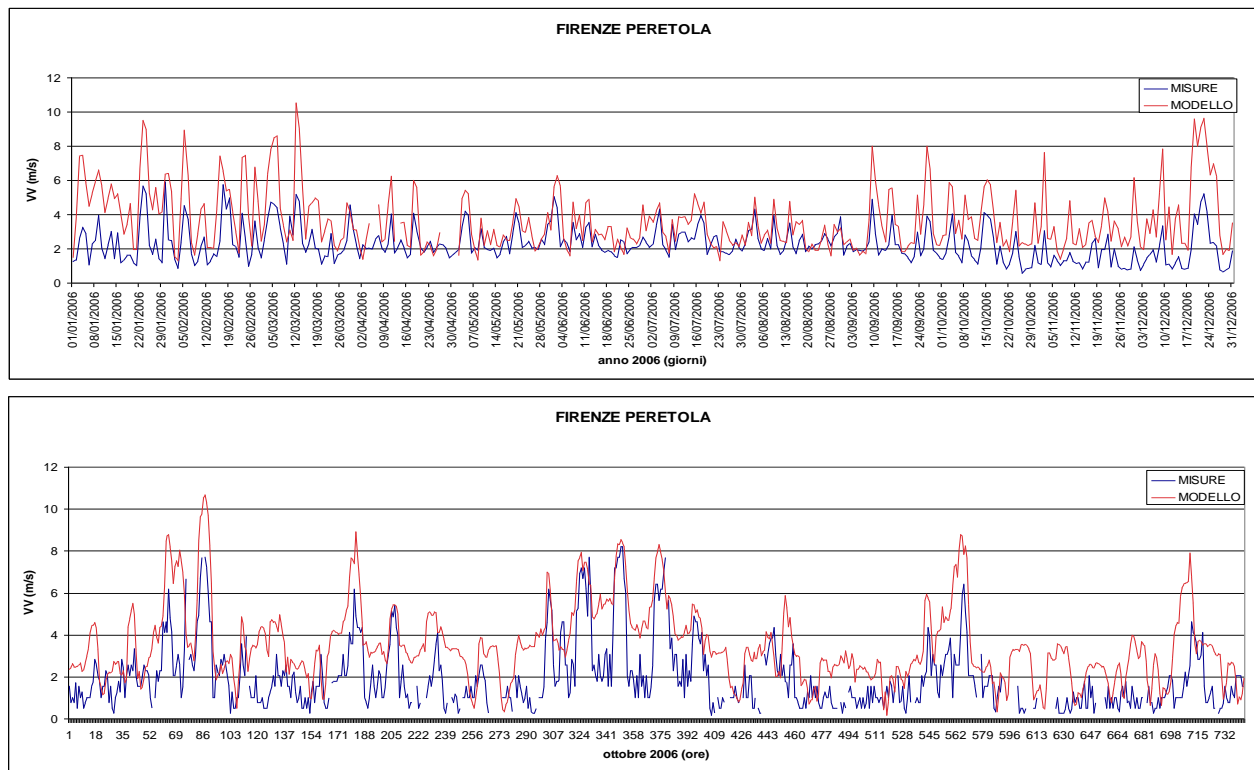
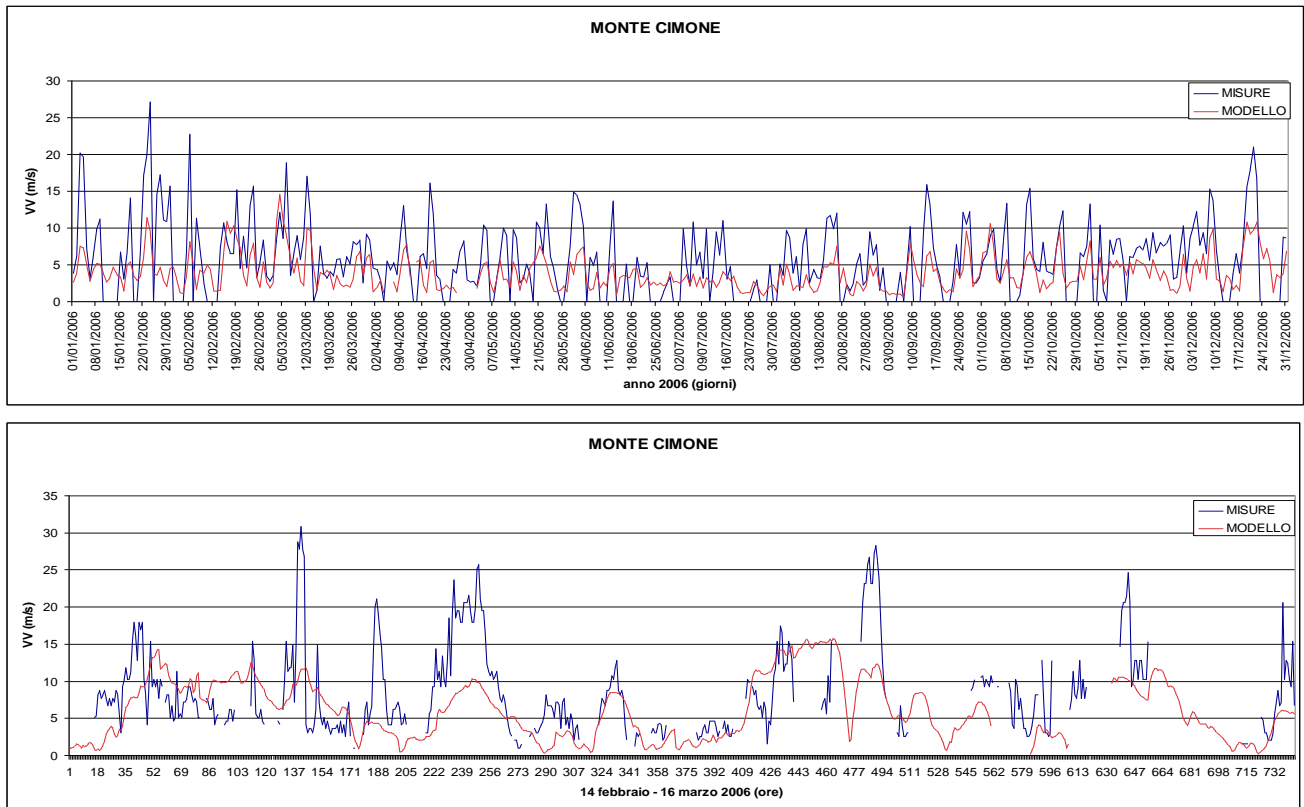


Figura 3.12 – Firenze Peretola - Sopra: andamento del vento medio giornaliero misurato (blu) e stimato (rosso) durante l'anno 2006. Sotto: andamento del vento medio orario misurato (blu) e stimato (rosso) durante il mese di ottobre 2006.



13 – Monte Cimone - Sopra: andamento del vento medio giornaliero misurato (blu) e stimato (rosso) durante l'anno 2006. Sotto: andamento del vento medio orario misurato (blu) e stimato (rosso) durante il periodo 14 febbraio-16 marzo 2006.



Tab. 3.4 - Indicatori statistici delle stazioni prese in esame.

NOME STAZIONE	A	k	PMS	A mod	K mod	PMS mod
MARINA DI GINOSA	5.20	1.96	77.3	4.71	1.80	58.0
VENEZIA TESSERA	2.86	1.46	20.6	4.03	1.76	39.4
GENOVA SESTRI	5.24	2.08	67.2	4.36	1.71	48.5
CAGLIARI ELMAS	4.62	1.86	52.9	4.84	1.87	60.0
ROMA FIUMICINO	4.09	1.79	39.8	5.08	1.96	66.8
GROSSETO	4.27	1.55	58.6	4.98	2.04	60.2
CERVIA	3.10	1.61	20.7	4.24	1.93	40.7
TRAPANI BIRGI	4.46	1.45	69.5	5.86	2.02	97.6
OLBIA C.SMERALDA	4.38	1.51	61.2	5.74	1.88	100.5
LAMEZIA TERME	4.47	1.55	62.5	4.26	1.57	53.2
CATANIA FONT.	3.73	1.67	33.0	3.89	1.65	38.8
PRATICA DI MARE	4.09	1.74	40.1	5.21	1.93	73.4
RONCHI DEI LEGIONARI	2.08	1.20	14.3	4.13	1.70	45.2
BRINDISI	5.63	1.85	95.6	5.99	2.13	98.4
PESCARA	2.67	1.45	17.7	4.21	2.06	36.4
FALCONARA	3.14	1.65	21.0	4.76	2.04	53.2
PALERMO PUNTA RAISI	5.06	1.58	85.7	5.43	1.72	95.3
CATANIA SIGONELLA	4.78	1.76	63.5	3.90	1.72	36.1
ALGHERO	3.37	1.47	29.3	5.38	1.93	80.7
DECIMOMANNU	4.30	1.41	64.0	4.87	1.83	62.2
BOLOGNA BORGO PANIG.	2.99	2.00	13.7	3.56	1.93	23.9
TREVISO ISTRANA	2.53	1.76	10.2	3.53	1.98	22.8
FIRENZE PERETOLA	2.54	1.41	15.3	4.24	1.73	45.6
PARMA	2.67	1.72	13.0	3.23	1.73	20.7
MESSINA	3.49	1.55	33.7	5.69	1.79	100.1
AMENDOLA	4.44	1.59	59.8	4.19	1.85	39.8
BARI PALESE	3.88	1.93	30.7	5.07	2.07	62.9
VERONA VILLAFRANCA	2.55	1.42	15.7	3.43	1.73	25.5
NAPOLI CAPODICHINO	2.56	1.39	15.1	4.85	1.88	60.3
BRESCIA GHEDI	2.30	1.49	10.7	3.17	1.77	19.7
S.MARIA DI LEUCA	5.59	1.93	93.0	5.58	1.73	103.0
ROMA CIAMPINO	2.94	1.50	20.7	4.42	1.98	43.6
PIACENZA S. DAMIANO	2.85	1.57	17.5	3.20	1.70	20.9
GORGONA	6.12	1.83	128.8	6.43	1.77	147.7
MILANO MALPENSA	1.71	1.38	5.1	3.03	1.73	18.2
BERGAMO ORIO AL SERIO	2.52	1.89	8.8	3.19	1.87	18.2
BOLZANO	2.33	1.30	14.7	2.63	1.48	14.5
TORINO CASELLE	2.16	1.69	7.4	2.51	1.67	11.4
GIOIA DEL COLLE	5.10	1.66	84.5	5.28	2.09	69.1
BRIC DELLA CROCE	3.12	1.61	23.6	2.58	1.81	10.1
GIOGO	6.41	1.82	145.9	4.91	1.83	63.7
MONTE TERMINILLO	10.01	1.64	675.8	5.36	1.85	81.9
PASSO_ROLLE	4.24	1.72	48.5	3.76	1.49	43.6
PAGANELLA	5.78	1.61	129.2	3.11	1.55	21.9
MONTE CIMONE	10.92	1.81	712.7	5.31	1.80	82.1
PIAN ROSA	6.54	1.48	217.0	5.04	1.32	136.0

Infine, le serie storiche su base oraria sono state elaborate in modo da raffrontare stime e misure di velocità del vento in termini di classi di frequenza, che risulta la verifica più significativa ai fini della stima della producibilità eolica.

Inoltre, per ogni stazione, sono stati stimati  $A$  e  $K$ , necessari per caratterizzare la curva di Weibull che meglio approssima la distribuzione, la densità di potenza specifica di Betz, indicata come PMS, espressa in kWatt/m<sup>2</sup>, sia per i dati misurati che per le stime da modello (tabella 3). Per una visualizzazione più immediata, i valori di PMS da misura e da modello sono stati riportati in fig 10 (sotto).

Anche in questo caso, si evidenzia come le maggiori discrepanze si verifichino nei siti di montagna, dove i valori sono sottostimati in modo importante.

Nella maggior parte dei restanti siti, i valori stimati e misurati sono in sostanziale accordo, sebbene si presentino delle sovrastime in generale non molto significative. Fanno eccezione 12 siti, 10 costieri e due in pianura (Firenze Peretola e Roma Ciampino) in cui la sovrastima è importante e due stazioni costiere, Amendola e Catania Sigonella, in cui il modello sottostima leggermente.

Di seguito, per i tre siti presi in esame per le serie storiche, sono riportati i grafici che riproducono la distribuzione di frequenza, la curva di Weibull e i parametri  $A$  e  $k$  per i dati misurati (sopra) e per le stime ottenute da WRF (sotto).

Il sito costiero Catania Fontanarossa presenta due distribuzioni molto simili, come sottolineato dai parametri  $A$  e  $k$ , pari a 3.73 m/s e 1.67 per i dati misurati, 3.89 e 1.65 per le stime, oltre che dall'indicatore PMS (33 kWatt , 38.8 kWatt per misure e stime rispettivamente).

Decisamente peggiore è la situazione nel sito di Firenze Peretola, dove i parametri  $A$  e  $k$ , pari a 2.54 m/s e 1.41 per i dati misurati, 4.24 e 1.73 per le stime determinano due curve di Weibull molto diverse e, di conseguenza, due valori di PMS nettamente diversi (15.3 kWatt , 45.6 kWatt per misure e stime rispettivamente).

Osservando il grafico relativo al sito del Monte Cimone si può notare che il parametro di forma  $k$  non differisce tra stime e misure (1.81 misure, 1.80 stime), mentre il parametro  $A$  relativo alle misure è decisamente molto maggiore rispetto a quello stimato (10.92 m/s, 5.31 m/s rispettivamente). Di conseguenza anche il parametro PMS è molto sottostimato dal modello (712.7 kWatt misure, 82.1 kWatt stime).

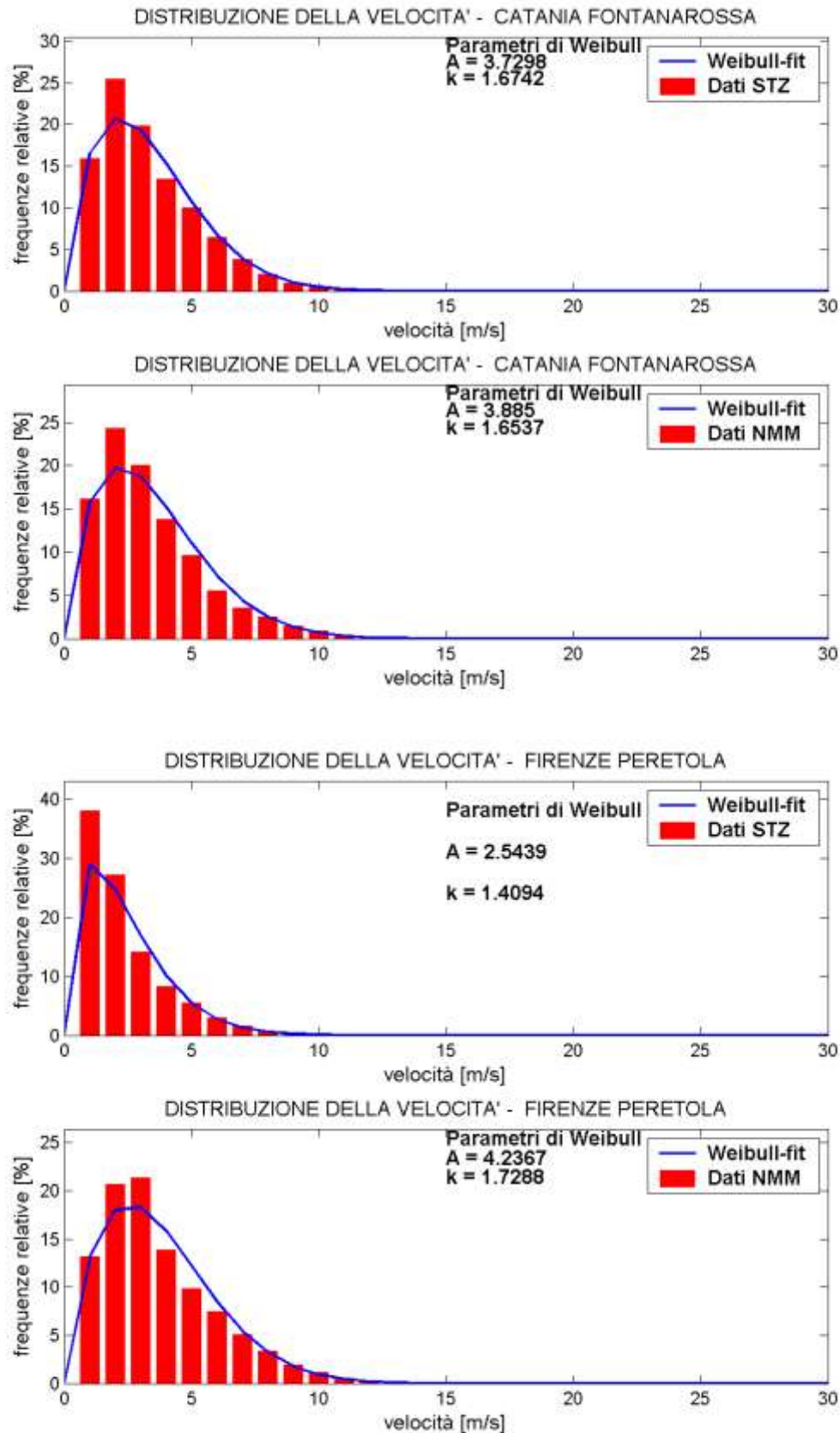


Figura 3.14 – Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento (dati STZ), delle distribuzioni di Weibull relative alle stime di WRF (Weibull-fit), nel sito Catania Fontanarossa (sopra) nel sito Firenze Peretola (sotto).

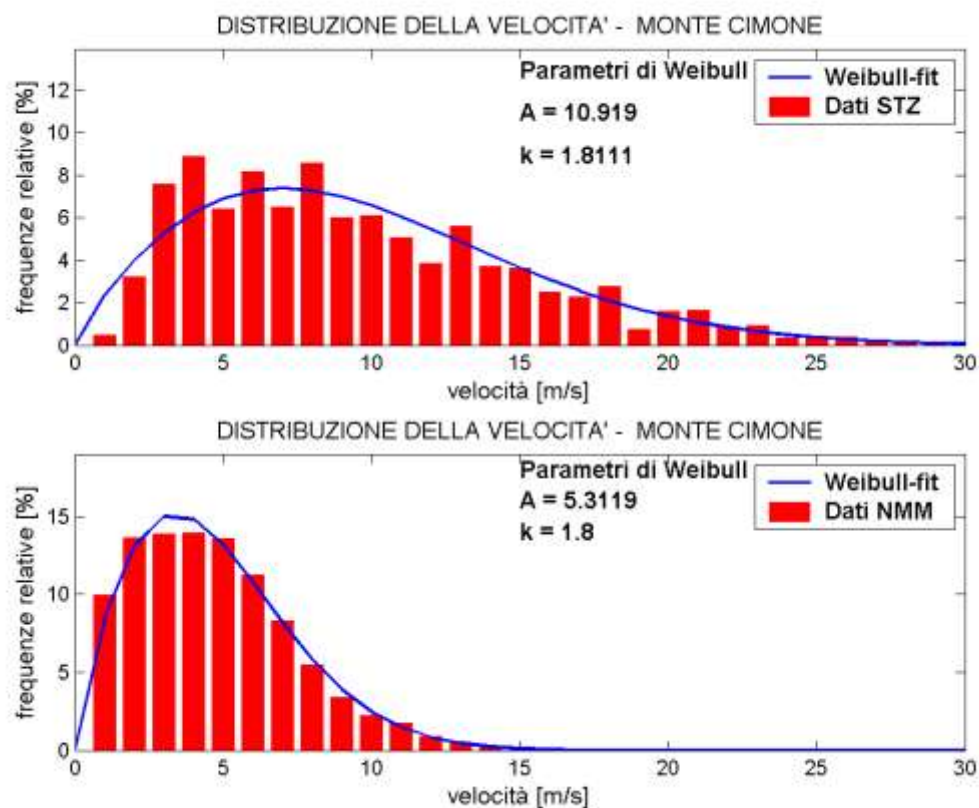


Figura 3.15 – Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento (dati STZ), delle distribuzioni di Weibull relative alle stime di WRF (Weibull-fit), nel sito Monte Cimone.

## Cartografia

### Cartografia relativa al vento medio

Di seguito sono riportate le mappe relative alla velocità media del vento, ottenuta dalle stime del modello meteorologico WRF-NMM.

Le mappe medie mensili sono state ottenute mediando le stime di vento per ciascun mese negli anni 2005-2011 (es. mese di gennaio 2005, 2006, ..., 2011).

La mappa media annua è relativa al periodo preso in esame, 2005-2011. Ovviamente si ricorda che tali dati sono stimati e pertanto suscettibili di errori anche significativi in alcune zone, come descritto nelle sezioni precedenti (in particolare su gran parte delle zone montuose è presente una forte e generale sottostima da parte del Modello, mentre altrove gli errori risultano inferiori e meno diffusi sul territorio) e che essendo relativi al periodo 2005-2011 non necessariamente sono destinati a ripetersi in futuro.

#### Velocità del vento media annua

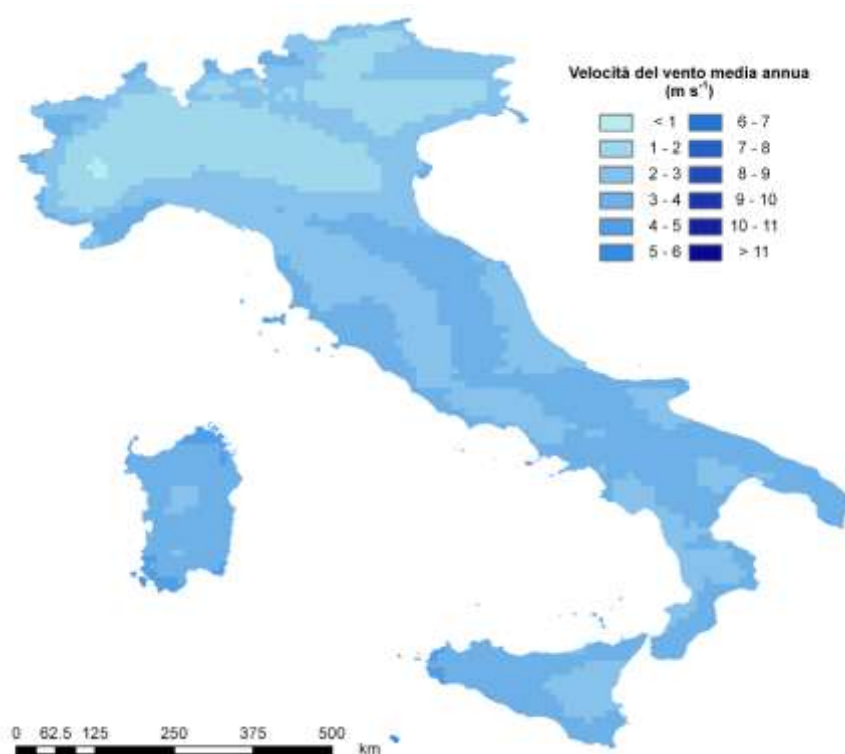


Figura 3.16 – Velocità del vento media annuale ( $m s^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

## Velocità del vento media mensile

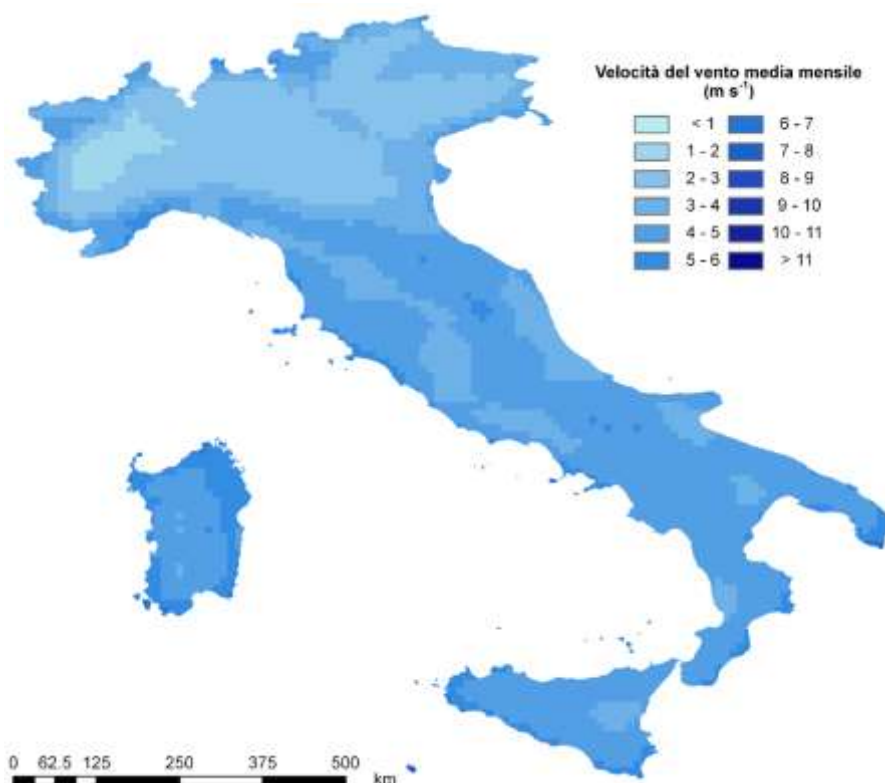


Figura 3.17 – Velocità del vento media mensile di gennaio ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

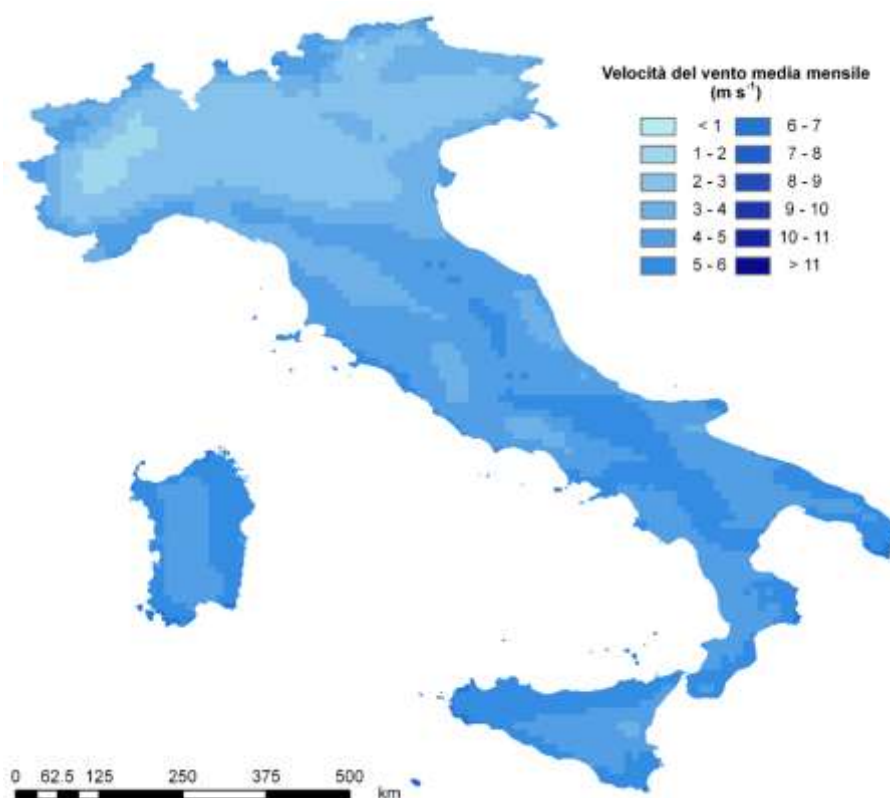


Figura 3.18 – Velocità del vento media mensile di febbraio ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

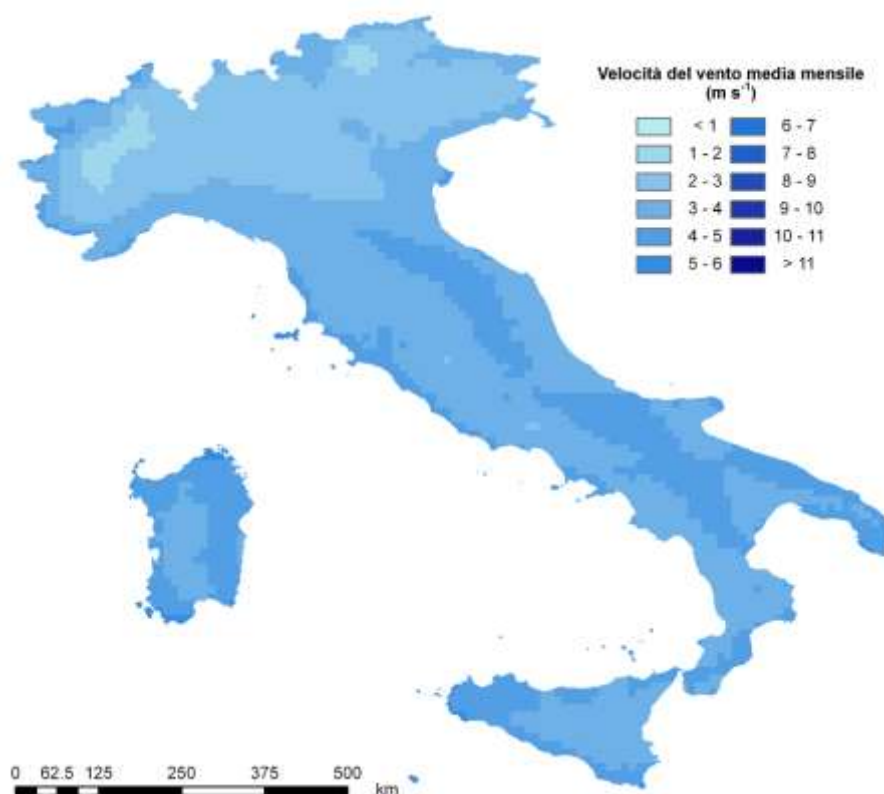


Figura 3.19 – Velocità del vento media mensile di marzo ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

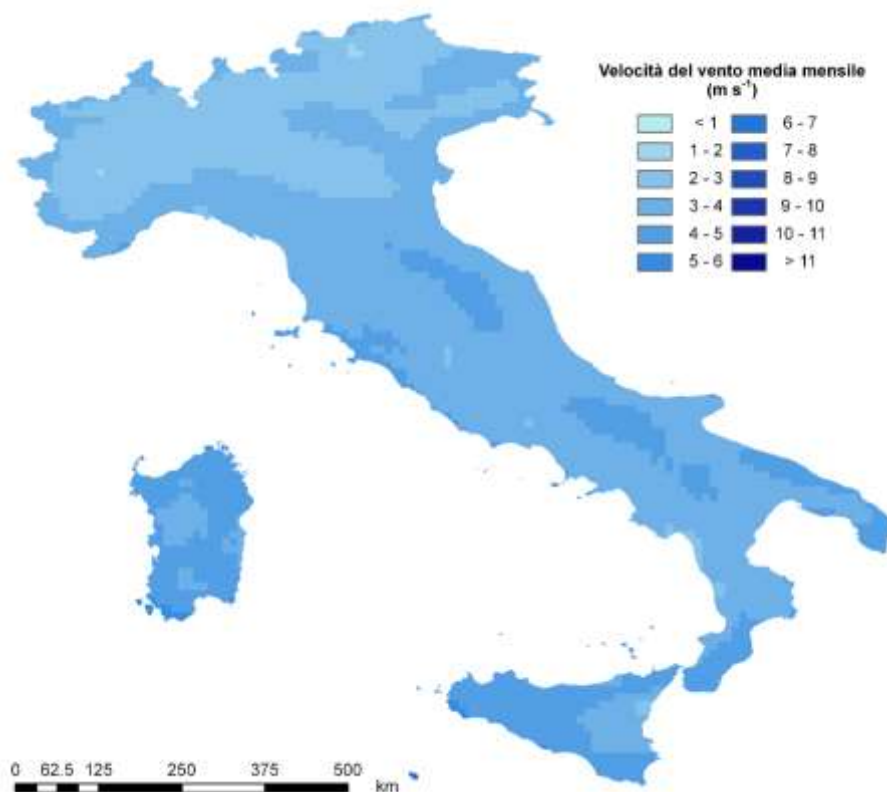


Figura 3.20 – Velocità del vento media mensile di aprile ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.



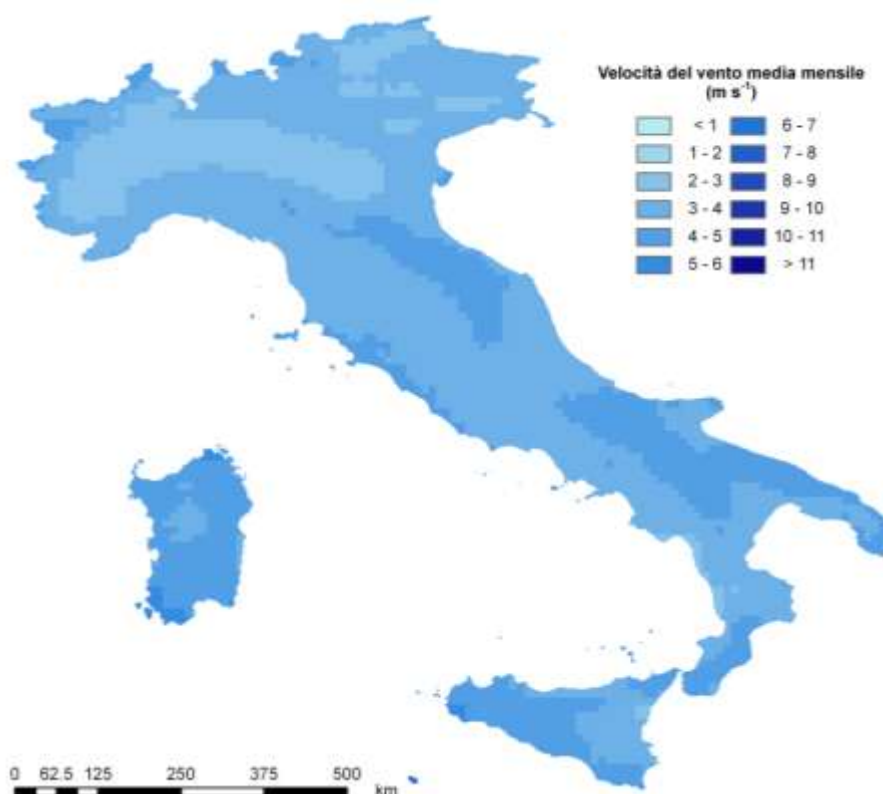


Figura 3.21 – Velocità del vento media mensile di maggio ( $m s^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

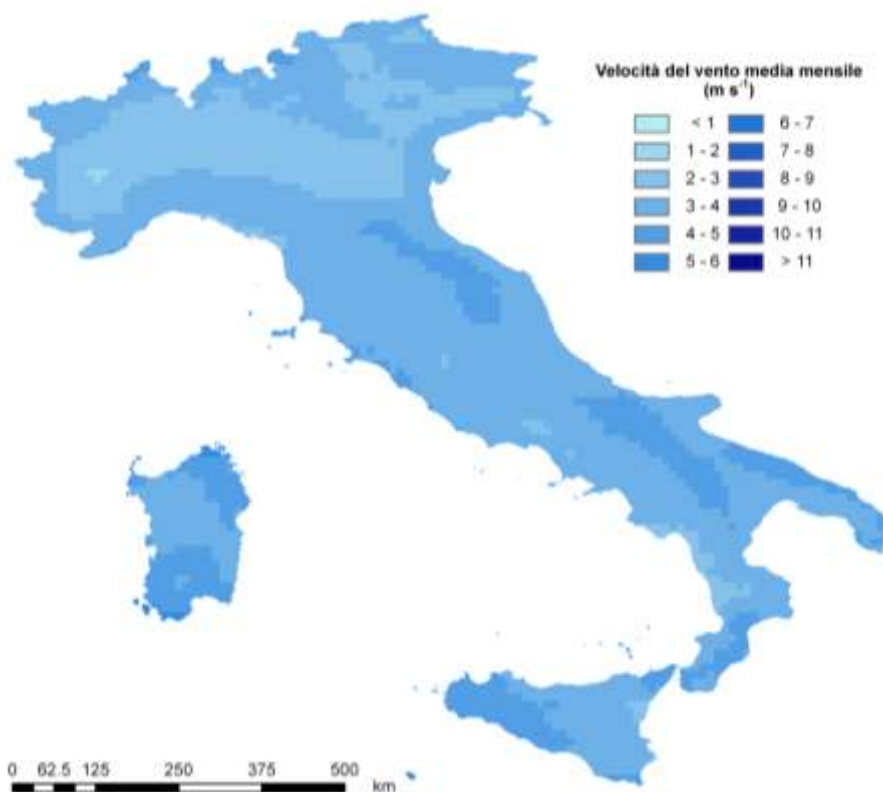


Figura 3.22 – Velocità del vento media mensile di giugno ( $m s^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.



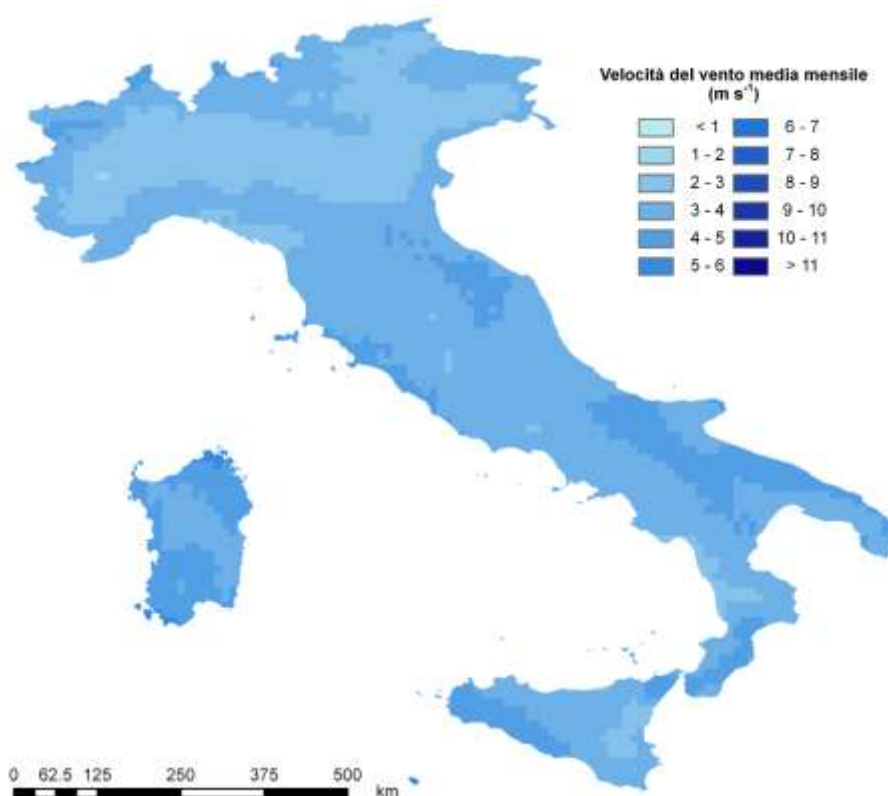


Figura 3.23 – Velocità del vento media mensile di giugno ( $m s^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

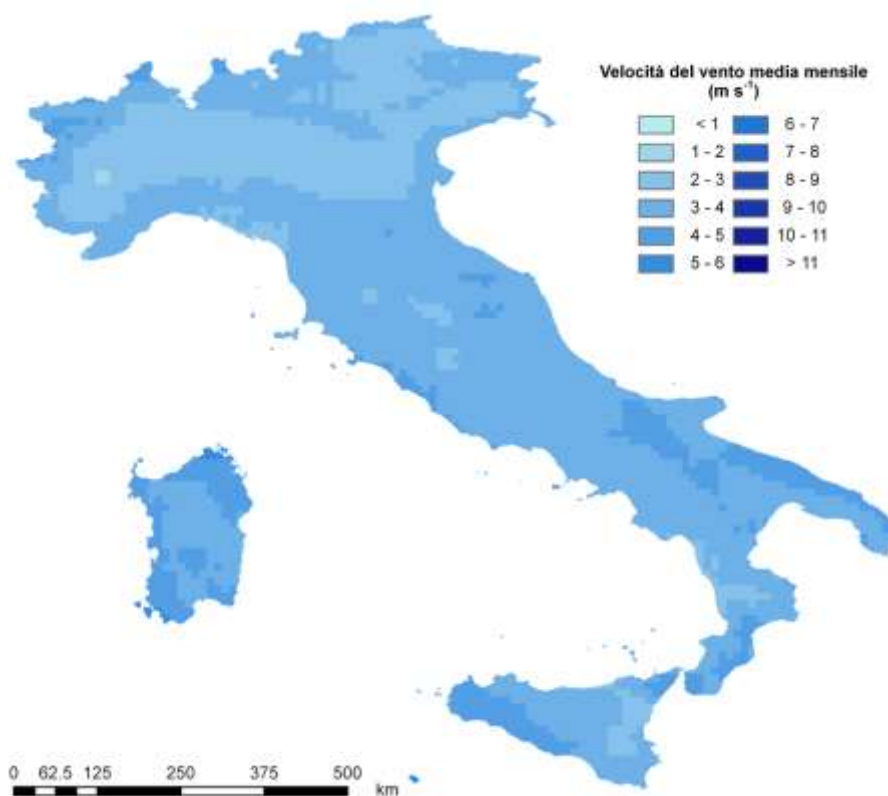


Figura 3.24 – Velocità del vento media mensile di giugno ( $m s^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

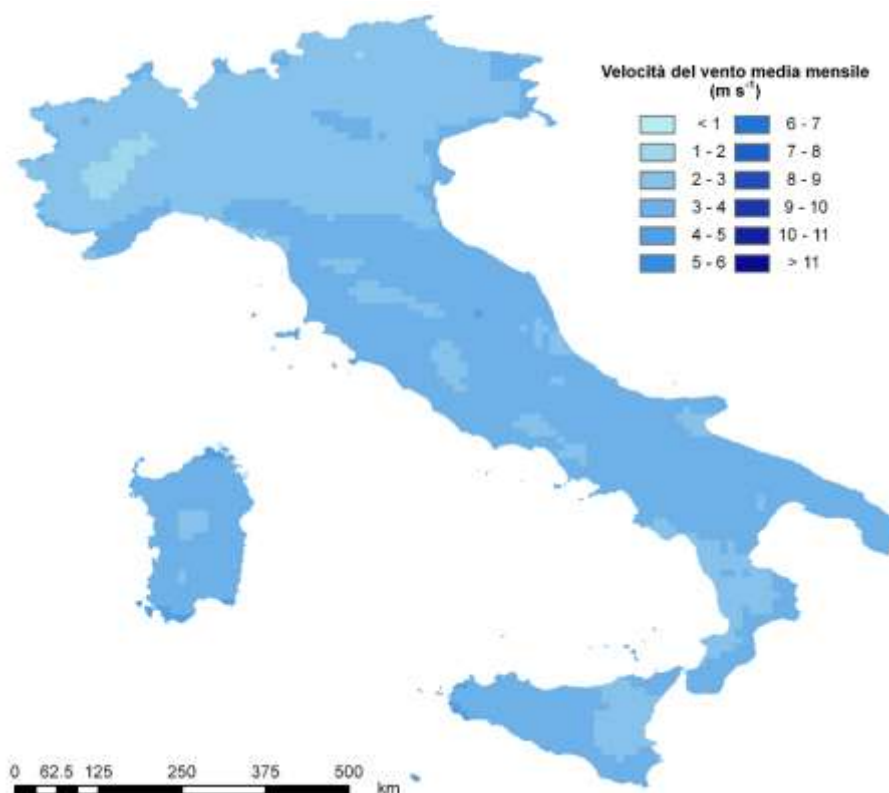


Figura 3.25 – Velocità del vento media mensile di giugno ( $m s^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

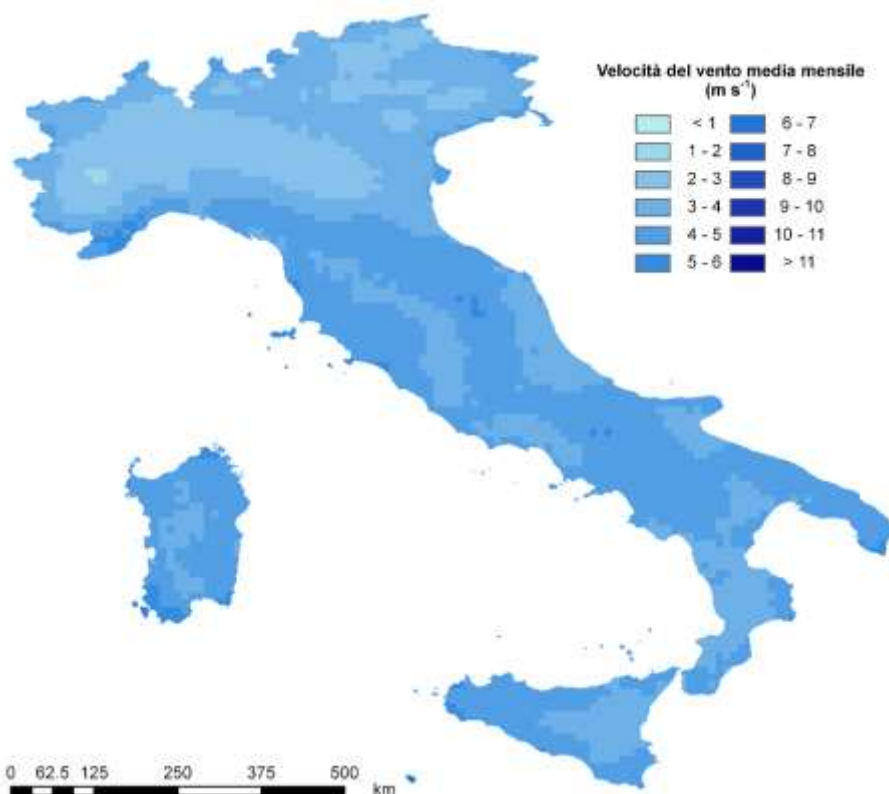


Figura 3.26 – Velocità del vento media mensile di giugno ( $m s^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

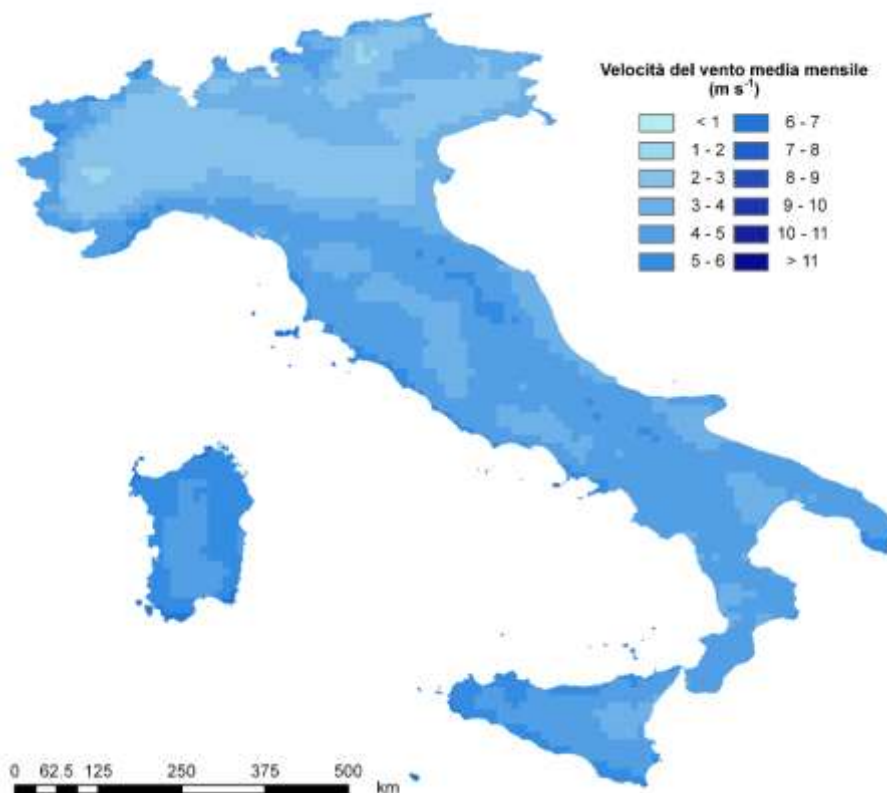


Figura 3.27 – Velocità del vento media mensile di giugno ( $m s^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

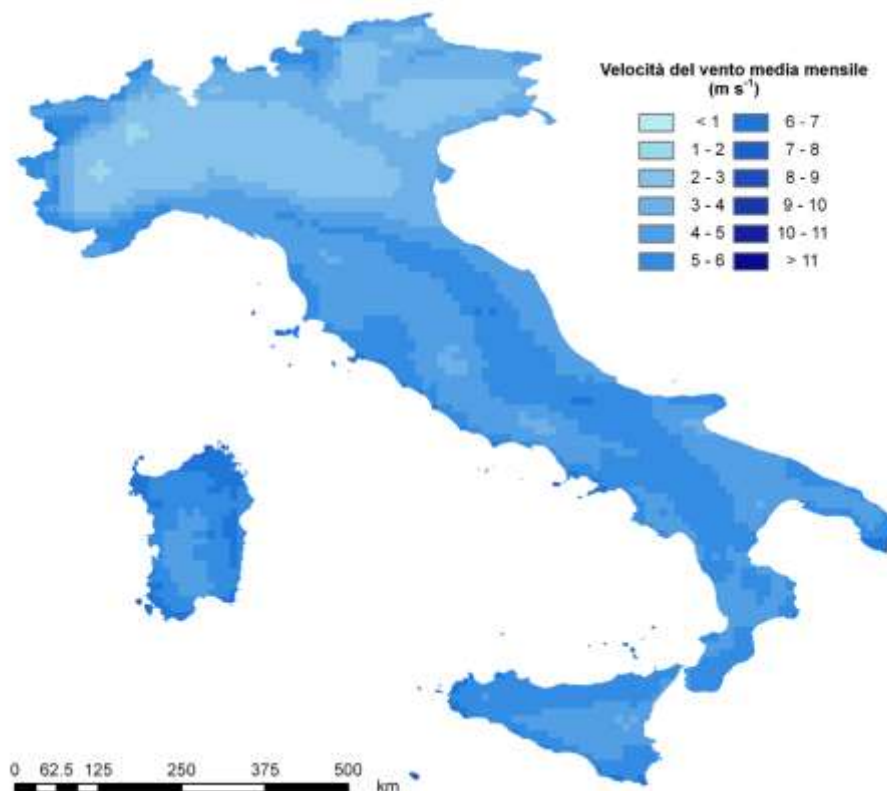


Figura 3.28 – Velocità del vento media mensile di giugno ( $m s^{-1}$ ) a 10 m dal suolo stimata dal modello WRF-NMM sul periodo 2005-2011.

## Cartografia relativa alla producibilità eolica

Di seguito sono riportate le mappe relative alla producibilità, ottenuta considerando le stime del modello meteorologico WRF-NMM, per il periodo 2005-2011, per tre turbine differenti. Ovviamente si ricorda che tali dati sono stimati e pertanto suscettibili di errori anche significativi in alcune zone, come descritto nelle sezioni precedenti (in particolare su gran parte delle zone montuose è presente una forte e generale sottostima da parte del Modello, mentre altrove gli errori risultano inferiori e meno diffusi sul territorio) e che essendo relativi al periodo 2005-2011 non necessariamente sono destinati a ripetersi in futuro.

Le tre turbine, indicate nei grafici come TURBINA1, TURBINA2, TURBINA3, sono rispettivamente da 6 kW, da 15 kW e da 6.5 kW, con asse a 10 metri.

Le mappe medie mensili, per motivi di sintesi, sono relative alla sola turbina 3, mentre in termini di producibilità annua sono riportate le tre mappe.

### Producibilità media annua

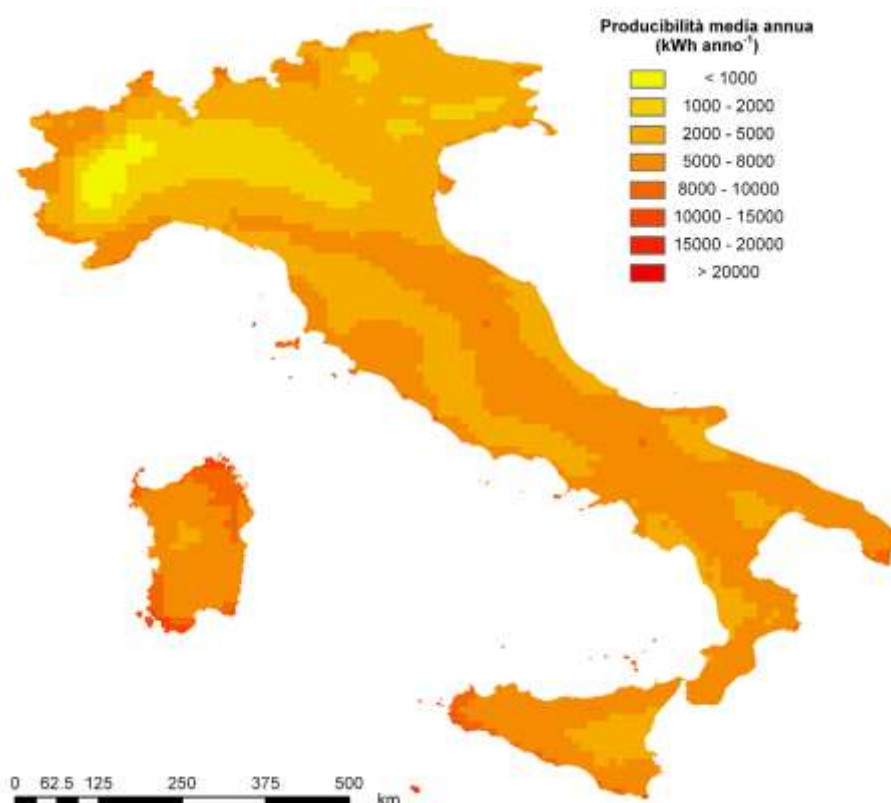


Figura 3.29 – Producibilità media annua stimata per la TURBINA1 (6 kW) con asse a 10 metri.

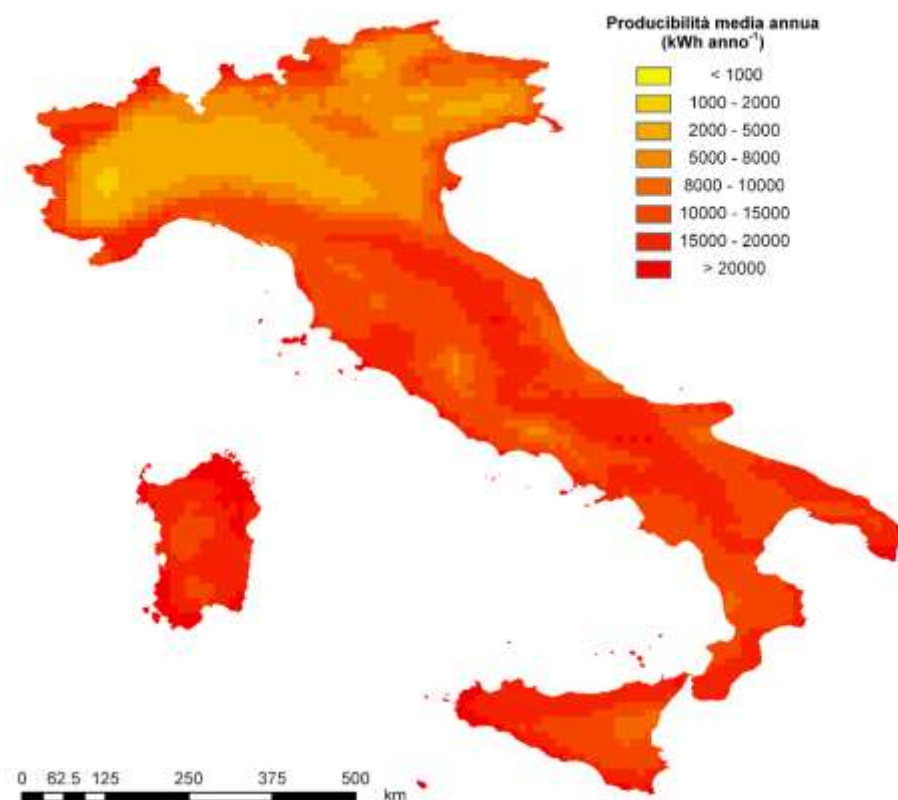


Figura 3.30 – Produciibilità media annua stimata per la TURBINA2 (15 kW) con asse a 10 metri.

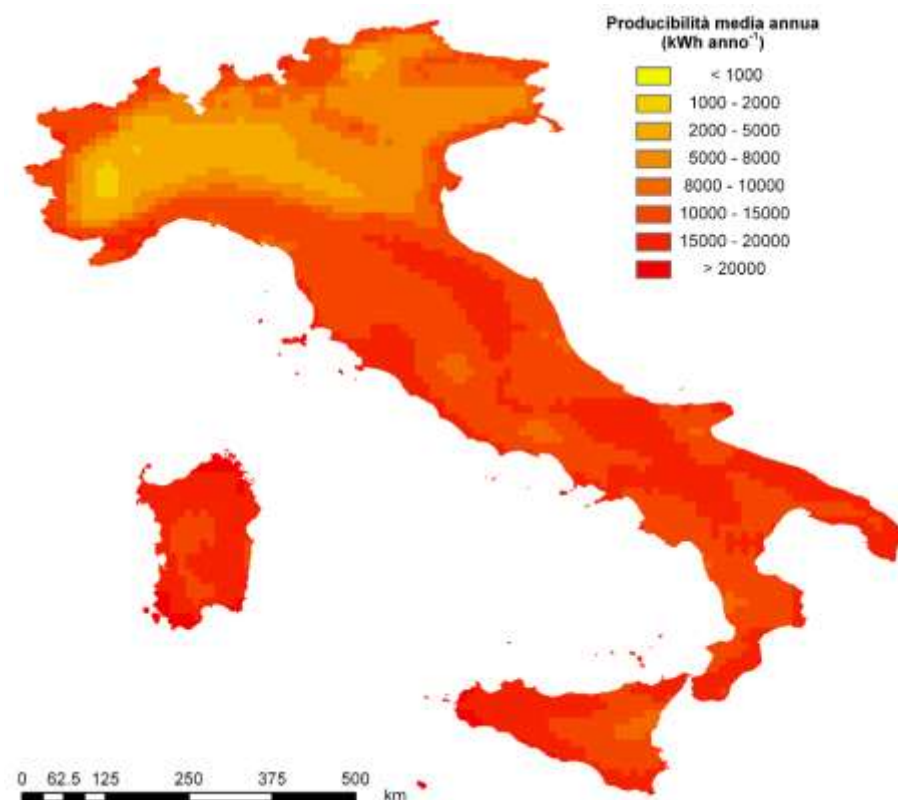


Figura 3.31 – Produciibilità media annua stimata per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

## Producibilità media mensile

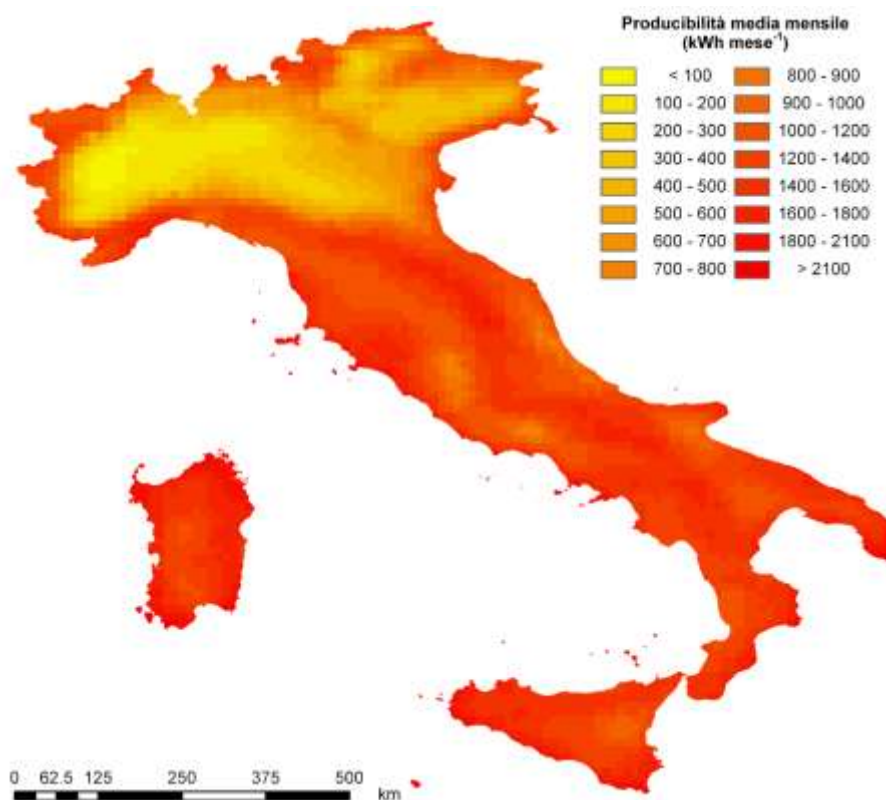


Figura 3.32– Produtibilità media mensile di gennaio stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.



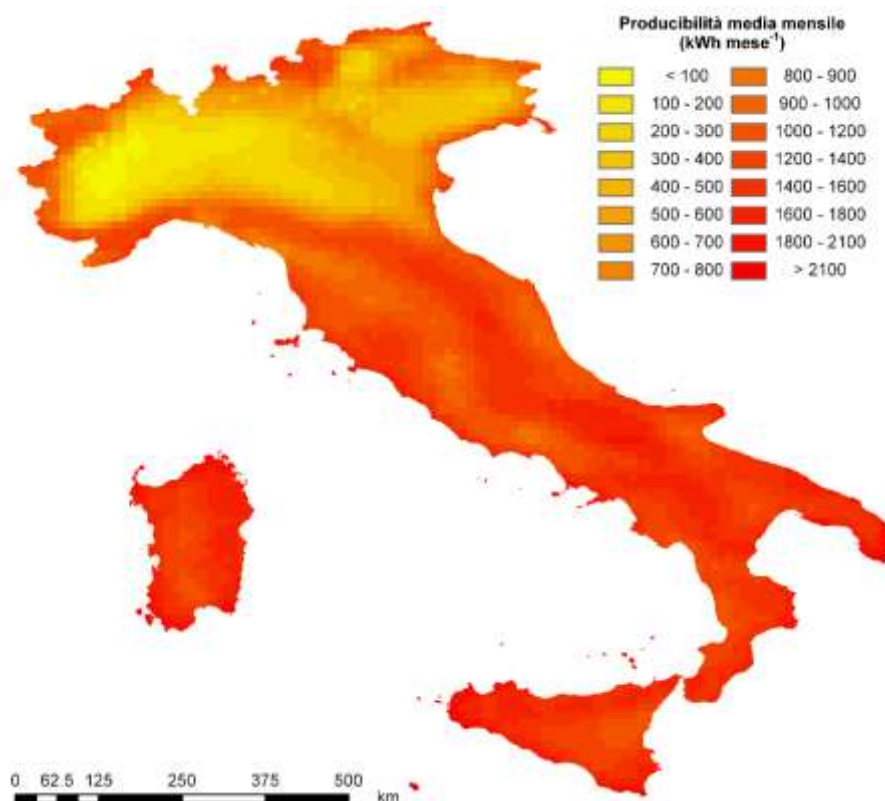


Figura 3.33– Produttività media mensile di febbraio stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

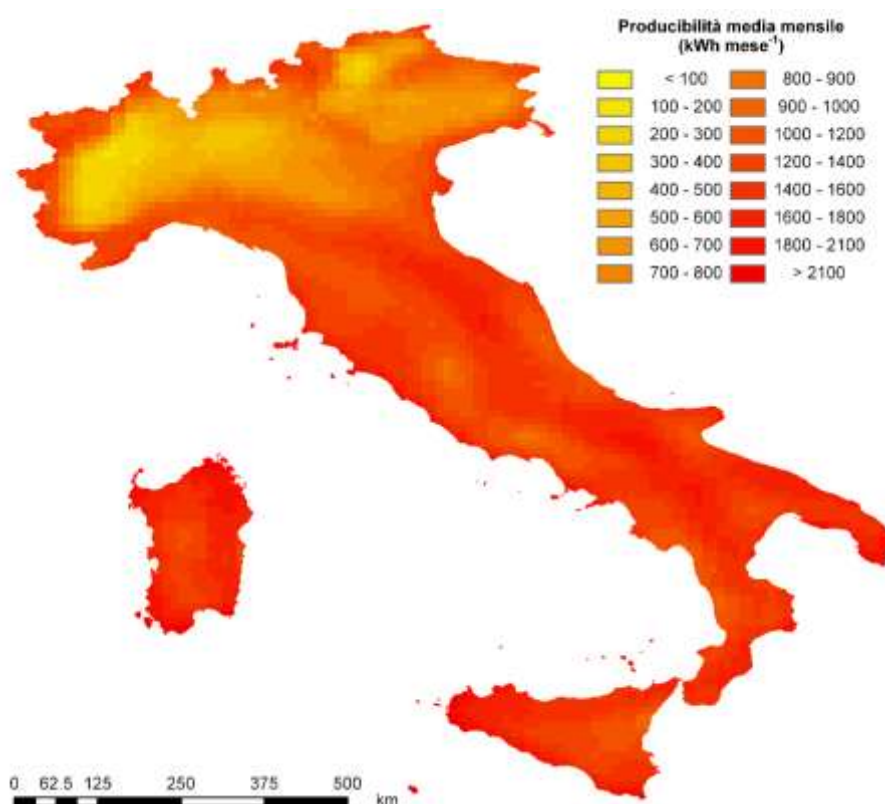


Figura 3.34– Produttività media mensile di marzo stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

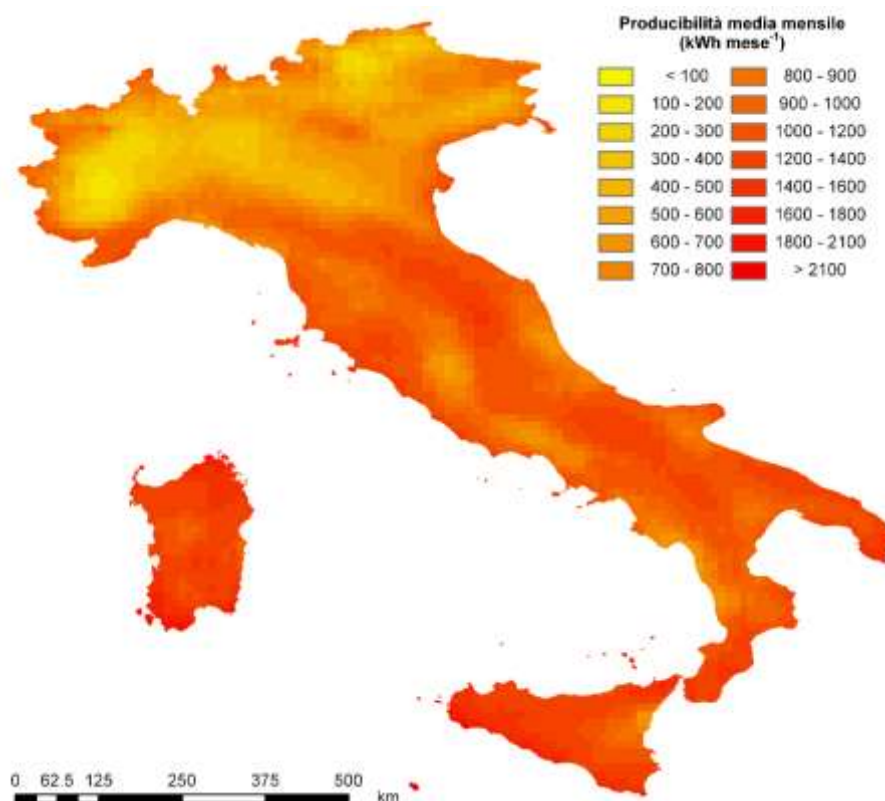


Figura 3.35– Produciibilità media mensile di aprile stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

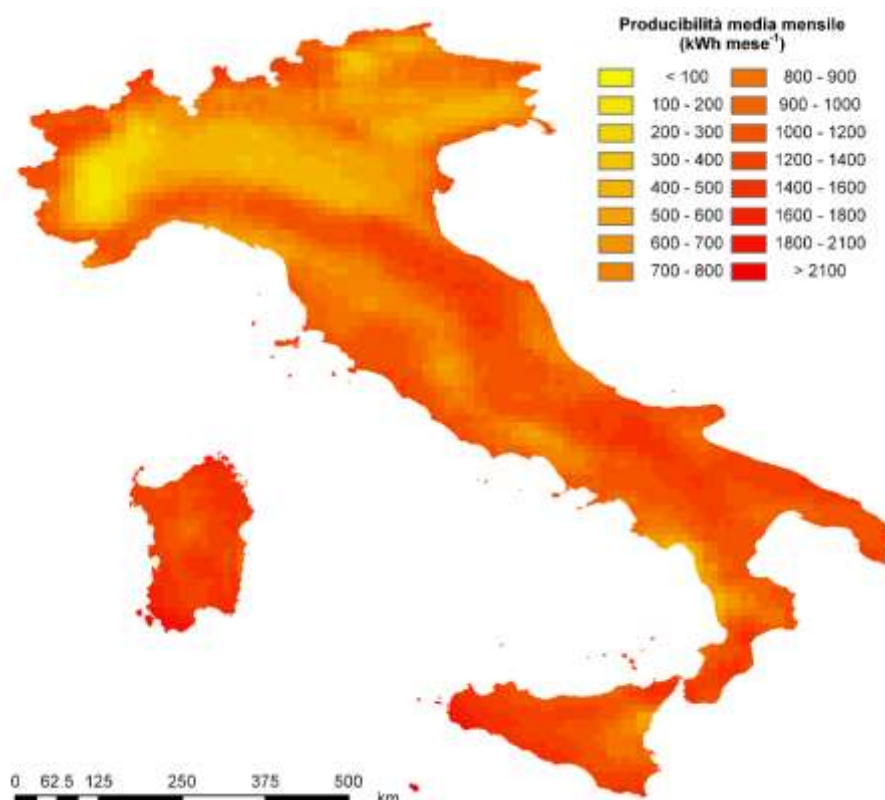


Figura 3.36– Produciibilità media mensile di maggio stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.



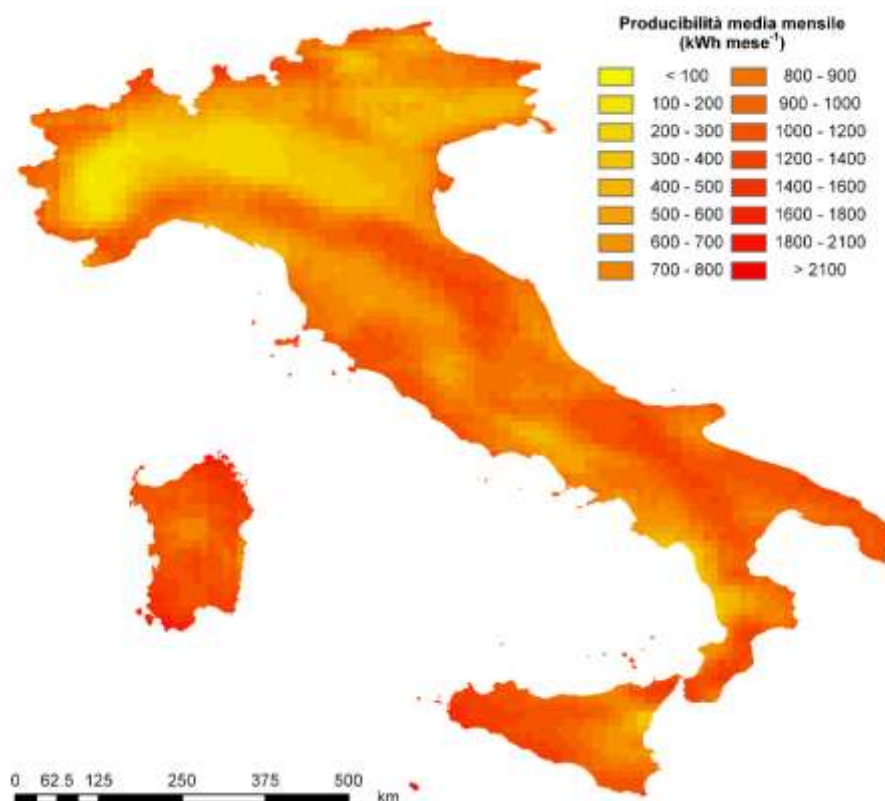


Figura 3.37– Produttività media mensile di giugno stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

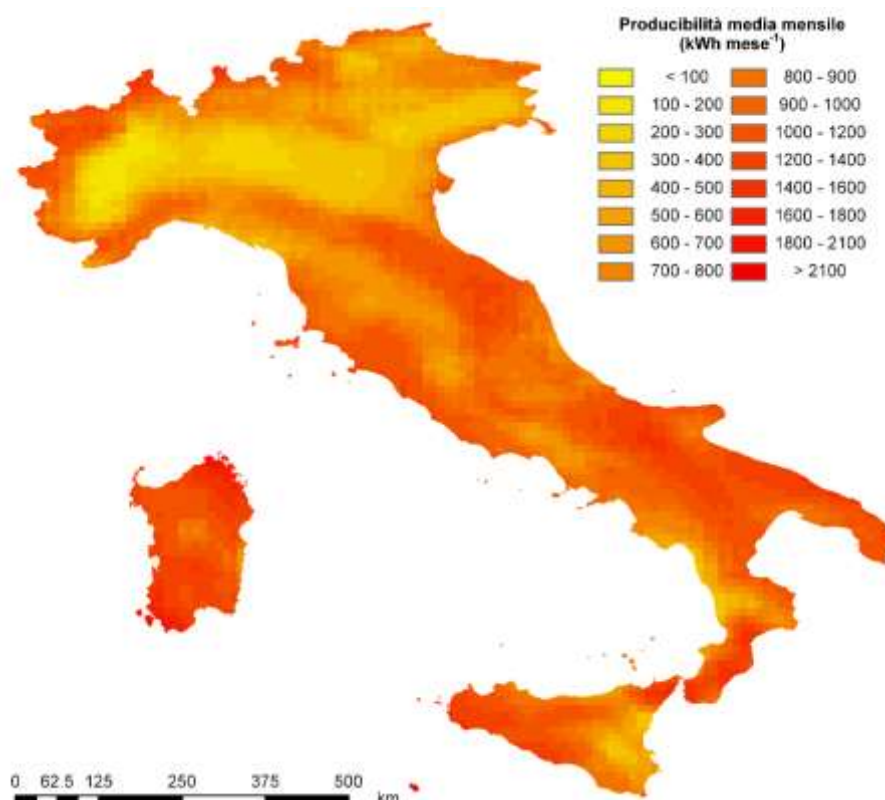


Figura 3.38– Produttività media mensile di luglio stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

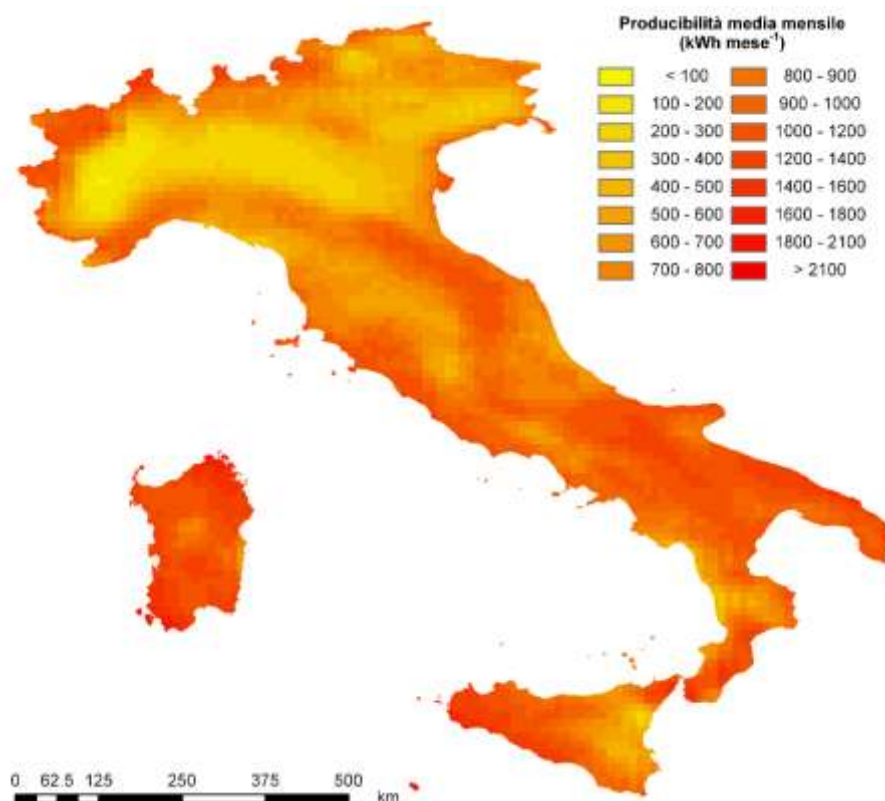


Figura 3.39– Produttività media mensile di agosto stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

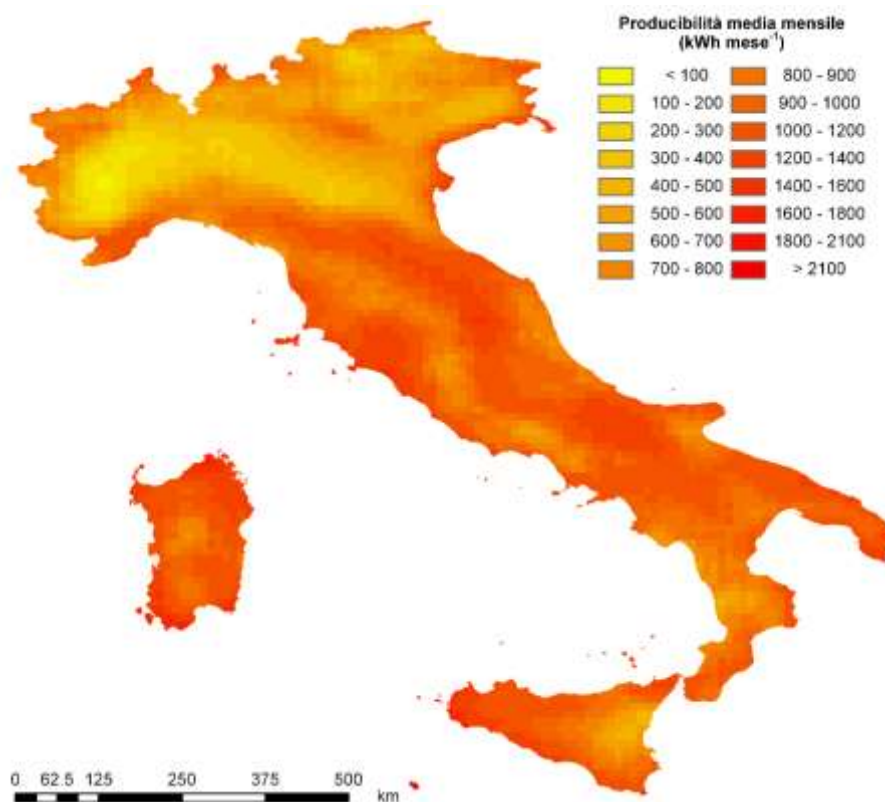


Figura 3.40– Produttività media mensile di settembre stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

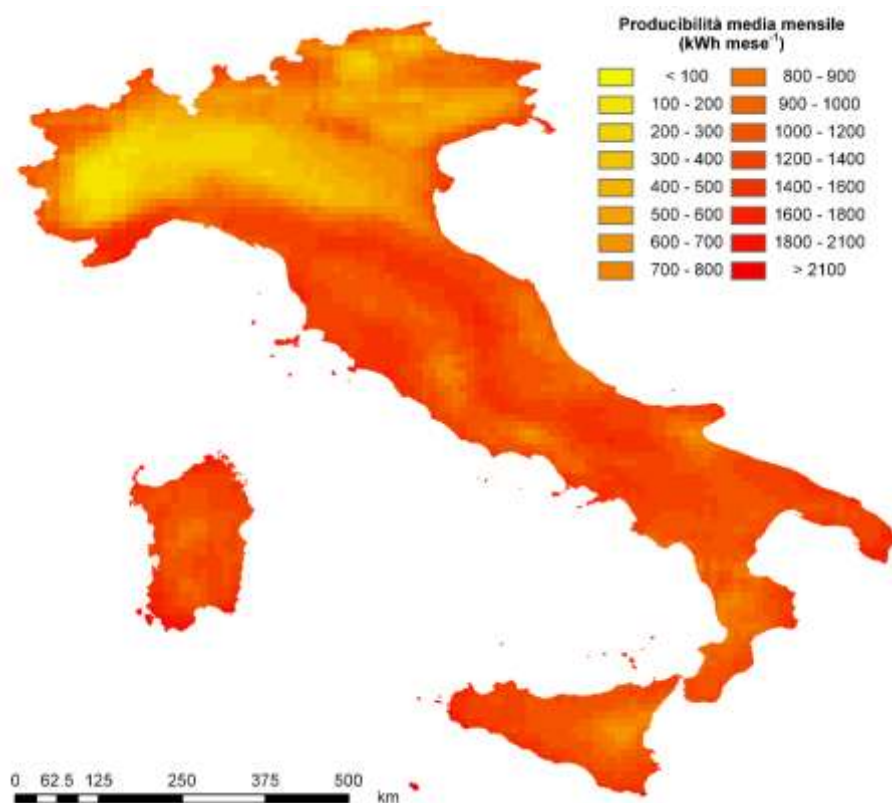


Figura 3.41– Produciibilità media mensile di ottobre stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

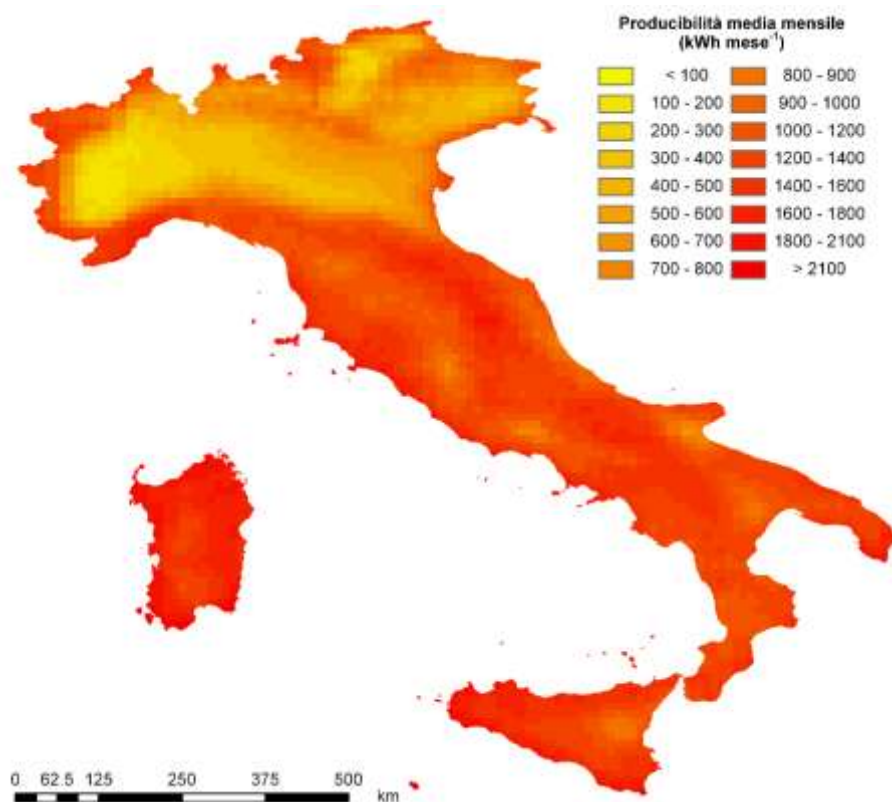


Figura 3.42– Produciibilità media mensile di novembre stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

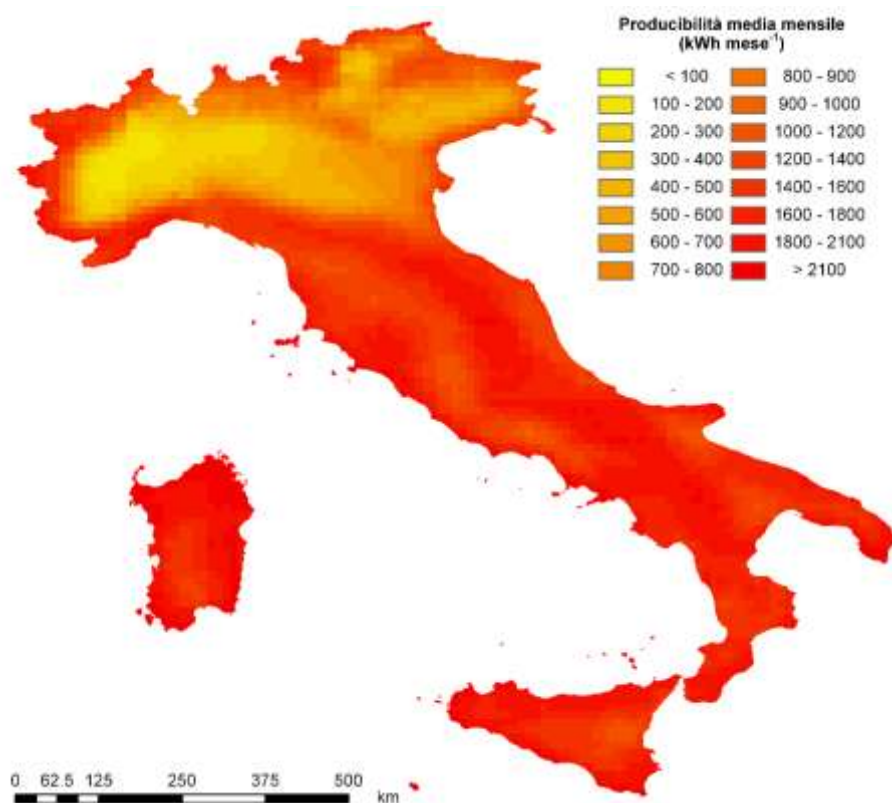


Figura 3.43– Produciibilità media mensile di dicembre stimata sul periodo 2005- 2011 per la TURBINA3 (6.5 kW) con asse a 10 metri.

## **Rendimento economico dell'investimento nell'ambito del mini-microeolico**

Dall'analisi dei risultati sopra riportati riteniamo di non procedere alla elaborazione di una mappa rendimento economico a livello nazionale in quanto una tale informazione potrebbe risultare non coerente con la realtà (in particolare su alcune zone, come descritto nella precedente sezione relativa alla validazione della metodologia e nella successiva sezione cartografica) e con le peculiarità e necessità dell'utente finale.

In ogni caso di seguito si riportano i criteri da seguire al fine di una valutazione economica del rendimento relativo all'utilizzo della risorsa eolica.

La vita utile dell'impianto è calcolata in circa 20 anni. Stando a quanto riportato in bibliografia, per turbine rientranti nella categoria del micro e mini-eolico, i costi di esercizio e manutenzione annui sono abitualmente stimati in circa 2 - 4 % del costo dell'impianto. Inoltre, come già accennato per gli impianti fotovoltaici, a partire dal decimo anno, è buona norma prevedere interventi di manutenzione straordinaria per la sostituzione di alcuni componenti elettrici, soprattutto dell'inverter. A questi costi si deve aggiungere l'assicurazione dell'impianto, che oltre a garantire l'impianto a fronte di eventi "straordinari", come il furto e il danneggiamento in seguito ad eventi meteorologici estremi, deve prevedere anche l'ipotesi di danni che la pala può arrecare a terzi. Generalmente tale costo annuo per le turbine in oggetto si aggira tra i 300,00 e i 500,00 euro.

Allo stato attuale, (finanziaria 2012) è in vigore, per gli impianti eolici di potenza inferiore a 200 kWp, la tariffa omnicomprensiva (art. 2, comma 145, Finanziaria 2008). L'incentivo viene assegnato per una durata massima di 15 anni e garantisce al produttore una remunerazione pari a € 0,30 per kWh netto di energia elettrica immesso in rete. Al termine dei 15 anni l'energia prodotta potrà essere venduta, sul mercato elettrico tramite il meccanismo dello Scambio sul Posto, il quale garantisce al produttore un ricavo pari a 0,18 euro per kWh prodotto.

## Bibliografia

Romoli P., Pedrazzi C., Alberghini L. (2006): Energia dal vento in siti a bassa velocità ed alta turbolenza: missione impossibile? - TEROM S.p.A., Funo di Argelato (BO).

Brusa A., Guarnone E., Smedile E.: Dossier Micro-eolico, Progetto RES & RUE Dissemination - A.P.E.R. ASSOCIAZIONE PRODUTTORI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI, P.le R. Morandi 2 - 20121 Milano.

CESI, Università degli studi di Genova (2002): Atlante Eolico dell'Italia – Rapporto CESI/ENERIN/2002/012 – Prot. A2/039249, Milano, Novembre 2002.

Danish Wind Industry Association: <http://www.windpower.org>.

ARENE (2007): Eolico in ambiente urbano: stato dell'arte – Dossier n. 15, ARENE IDF, Francia, aprile 2007.

M. Andriollo, Università di Padova DIE - Dipartimento di Energia Elettrica: Panoramica della tecnologie di micro e mini generazione eolica, in ambito rurale, di mini-grid per aree industriali e con integrazione nell'ambiente costruito urbano.

Corso di TEFE – A.A. 2010-2011 Ing. Nicola Graniglia PhD – [graniglia2@unisi.it](mailto:graniglia2@unisi.it)

A. Tortella – Laboratorio di Macchine Elettriche Università degli Studi di Padova, Scuola di Dottorato in Ingegneria Industriale: Tecnologie per la produzione eolica di piccola taglia (Parte 1)

Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.G. (2005): A Description of the Advanced Research WRF Version 2 - NCAR Technical Note, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.