



**Regione Toscana**

Diritti Valori Innovazione Sostenibilità

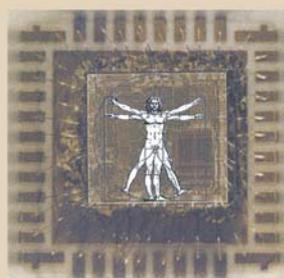


Unione Europea



## SICOTER

Sistema Informativo per l'ottimizzazione del  
COmfort Termico nei luoghi di lavoro e la  
creazione di una filiera per l'uso di  
Energia Rinnovabile nella provincia di Firenze



RICERCA  
TRASFERIMENTO  
INNOVAZIONE

**DOCUP Ob. 2  
Anni 2000-2006**

Misura 2.8 "Azioni a sostegno  
della società dell'informazione"  
Azione 2.8.4. "Potenziamento  
del sistema regionale di servizi  
telematici e di comunicazione  
per le PMI"

## Partner del Progetto SICOTER



La pubblicazione fa parte dei risultati di un progetto finanziato dall'Amministrazione regionale sui Fondi Docup ob.2, anni 2000-2006.



La Regione Toscana non è responsabile dei testi e di quant'altro inserito dagli autori e curatori nella presente pubblicazione.

*Pubblicazione collegata alla Collana:*

**RICERCA TRASFERIMENTO INNOVAZIONE**

Regione Toscana  
Giunta regionale

DG Sviluppo economico  
Settore delle politiche regionali  
dell'innovazione e della ricerca

*Dirigente responsabile:*  
Simone Sorbi

Coordinamento comunicazione ed eventi  
Regione Toscana  
Direzione generale della Presidenza  
Settore Comunicazione istituzionale e pubblicitaria

*Coordinamento scientifico:*  
Simone Orlandini, Marco Mancini, Giampiero Maracchi

# Il problema climatico e la sostenibilità

a cura di Francesca Orlando

## Il riconoscimento dei cambiamenti climatici

Il fenomeno del riscaldamento globale, provocato da un innalzamento dei livelli di anidride carbonica in atmosfera, fu ipotizzato per la prima volta dal chimico svedese Svante Arrhenius nel 1896. Lo scienziato calcolò che se la concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica fosse raddoppiata, per via dell'impiego di combustibili fossili, la temperatura media avrebbe subito un incremento pari a 5-6 °C. All'epoca non fu compresa la rilevanza e l'impatto di tali variazioni e lo studio fu giudicato insignificante per la scienza.

Ad oggi l'importanza dei cambiamenti climatici e la necessità di arginarne gli effetti è stata riconosciuta a livello mondiale. La fonte più autorevole sul piano internazionale per ciò che riguarda le valutazioni sui cambiamenti climatici è rappresentata dall'International Panel on Climate Change (IPCC), organismo costituito nel 1988 dall'UNEP (United Nations Environment Programme) e dal WMO (World Meteorological Organization).

Lo scopo dell'IPCC è di raccogliere e valutare le principali informazioni scientifiche, tecniche e socio-economiche inerenti i cambiamenti climatici, per comprenderne le cause, i rischi e le possibilità d'intervento. L'attenzione dell'IPCC è rivolta verso diversi aspetti del fenomeno e si estende dallo studio del sistema fisico e degli impatti sui sistemi naturali, ai piani di mitigazione e adattamento per la limitazione dei danni.

Fino ad oggi l'IPCC ha prodotto quattro rapporti, all'incirca uno ogni cinque anni. Il primo del 1990 costituisce il primo documento scientifico ufficiale attestante l'esistenza dei cambiamenti climatici e l'ultimo, terminato alla fine del 2007, descrive i contorni più allarmanti di tale situazione in relazione agli scenari previsti per il futuro. Le conclusioni cui giungono i quattro rapporti, riassunte in una frase, sono riportate in tabella 1.

<b>1990</b>	<i>"...<b>esiste</b> un cambiamento climatico"</i>
<b>1995</b>	<i>"...le attività umane sono <b>tra le cause</b> del fenomeno"</i>
<b>2001</b>	<i>"...le attività umane sono <b>all'origine</b> del fenomeno"</i>
<b>2007</b>	<i>"...il cambiamento climatico <b>può essere contrastato</b>"</i>

Tabella 1: Le conclusioni dei report IPCC riassunte in una frase.

Il rapporto del 2007 definisce l'aumento nella concentrazione atmosferica di gas effetto-serra, registrato dall'inizio della Rivoluzione Industriale (1750) ad oggi, innaturale e dovuto principalmente alle emissioni legate all'uso dei combustibili fossili, all'agricoltura e al cambio d'uso del territorio. La probabilità che il riscaldamento globale abbia avuto origine dall'attività antropica è stata stimata attorno al 90-95%.

L'innalzamento della temperatura dell'aria, registrato dal 1906 al 2005, pari a 0,75°C, è ritenuto alla base di diversi fenomeni quali:

- riduzione dell'estensione media del ghiaccio artico: decrementi del 2,7% ogni 10 anni dal 1978;

- *innalzamento del livello medio dei mari*: aumenti di 1,8 mm annui, tra il 1961 e il 2003;
- *mutamenti nel regime delle precipitazioni*: aumenti nella frequenza degli eventi piovosi intensi, nella durata dei periodi siccitosi e nell'intensità dei cicloni tropicali dell'Oceano Atlantico, tra il 1970 e il 2005.

Quest'ultimo rapporto riporta delle proiezioni al 2100 presentando sei possibili scenari, in relazione all'efficacia delle azioni di mitigazione che saranno intraprese per contenere l'innalzamento della temperatura. Gli incrementi previsti al 2100 sono inclusi nel range 1,1-6,4° C; parallelamente la riduzione del ghiaccio artico nei mesi estivi è prevista almeno del 90% e l'innalzamento del livello marino incluso tra 19 e 59 cm. Sono previste, inoltre, drastiche riduzioni nell'estensione dei ghiacciai delle catene montuose poste alle medie e basse latitudini, aumenti nella frequenza ed intensità degli eventi climatici estremi (es. ondate di calore, prolungati periodi siccitosi, precipitazioni intense, alluvioni ecc.) e aumenti nell'intensità dei cicloni tropicali, degli uragani e di fenomeni come El Niño.

Un incremento della temperatura media globale compreso tra 1,5-3,5° C (rispetto al periodo di riferimento 1980-1998) avrà un impatto rilevante sui sistemi fisici e biologici; è stato valutato, infatti, che in corrispondenza di tali aumenti potranno verificarsi:

- *mutamenti nella disponibilità idrica*: incrementi del 10-40% alle alte latitudini, con aumento del rischio di allagamenti e inondazioni, e decrementi del 20% alle basse latitudini e ai tropici, con maggior rischio di incendi e intensificazione dei processi di desertificazione;
- *ripercussioni negative sulle produzioni agricole locali, sulla vivibilità degli ambienti in generale e sulla salute umana*: aumento del tasso di mortalità dovuto a condizioni di malnutrizione, a inquinamento atmosferico (maggiore incidenza di malattie cardio-respiratorie) e a catastrofi naturali (es. incendi, alluvioni ecc.);
- *ripercussioni negative sulla biodiversità*: estensione del rischio di estinzione al 20-30% delle specie animali e vegetali, cambiamenti nei tempi naturali di migrazione e letargo degli animali e sfasamenti nella stagionalità e nei tempi fenologici delle piante.

Il rapporto è di particolare interesse per l'Italia poiché i fenomeni sopra citati sono previsti particolarmente intensi per l'intera area mediterranea.

Secondo l'IPCC però, le azioni di mitigazione intraprese nei prossimi 20 o 30 anni possono potenzialmente contrastare i cambiamenti climatici contenendo l'innalzamento della temperatura entro 2-2,4°C (rispetto ai livelli pre-industriali). L'obiettivo proposto, e giudicato realistico, è quello di attuare una riduzione progressiva delle emissioni fino a giungere, nel 2050, ad un taglio del 50-85% rispetto ai livelli del 2000. A tal fine l'IPCC propone metodi d'intervento quali l'introduzione di innovazioni tecnologiche e azioni nei settori a maggior potenziale di mitigazione come quello energetico (es. uso delle fonti rinnovabili, aumento dell'efficienza del processo di generazione e distribuzione, maggior ricorso alla cogenerazione), quello civile/residenziale e quello industriale (es. aumento dell'efficienza nell'uso finale dell'energia, maggior riutilizzo e riciclo).

Una svolta importante sul riconoscimento del "problema climatico" è stata data da uno studio inglese condotto nel 2006 e noto come **rapporto Stern** (Stern Review of the Economics of Climate). Partendo dalla prova scientifica contenuta nei primi tre rapporti dell'IPCC e sulla base di dati recenti di carattere scientifico-economico Stern compie una valutazione, in termini economici, dei danni connessi alla mancata riduzione delle emissioni di gas effetto-serra e, in alternativa, dei costi da sostenere per intraprendere efficaci azioni di mitigazione e adattamento.

Stern sostiene la convenienza economica ad adottare misure di intervento volte a limitare le emissioni, rispetto al costo dei danni in mancanza di interventi di mitigazione.

Sostiene, inoltre, che attraverso azioni tempestive e coordinate a livello mondiale è possibile ridurre drasticamente i rischi (fig. 1) ed i costi connessi agli impatti dei cambiamenti climatici. Stima poi che ignorare il problema costerà tra il 5 ed il 20% del PIL mondiale, mentre intraprendere efficaci azioni di mitigazione costerà tra l'1 e 3,4% e valuta i danni causati da 1 tonnellata di CO<sub>2eq</sub> (CO<sub>2</sub> equivalente) emessa pari a \$85 mentre la spesa da sostenere per evitarne l'emissione pari a \$25.

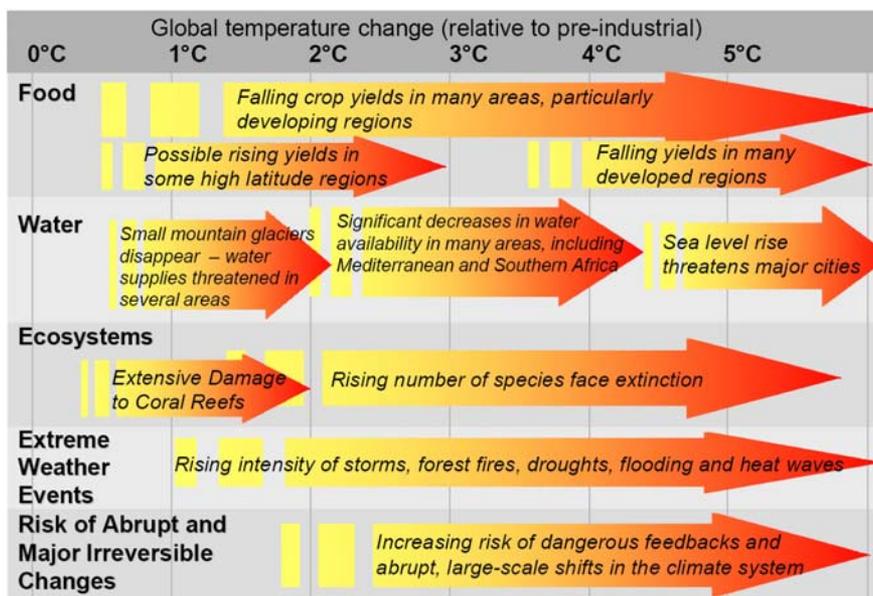


Figura 1: Proiezioni di impatto dei cambiamenti climatici (Fonte: “Stern Review of the Economics of Climate”, 2006).

Alcuni anni prima del rapporto Stern e degli ultimi due rapporti IPCC era avvenuta una tappa fondamentale per far fronte ai cambiamenti climatici: il **Protocollo di Kyoto**. Questo è stato sottoscritto nel corso della “Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici” tenutasi in Giappone nel 1997.

Per molto tempo però non è stato ratificato per resistenze fatte da alcuni paesi avanzati (maggiori inquinatori). L'Europa nel 2002 con la Decisione n. 2002/358/CE del Consiglio dell'Unione Europea ha approvato all'unanimità il protocollo di Kyoto impegnandosi così all'esecuzione congiunta degli obblighi che ne derivano. Solamente nel 2005 è stato ratificato dal 55% dei paesi maggiormente produttori di gas serra ed è entrato in vigore. Il Protocollo tiene conto delle conclusioni riportate dai primi due rapporti dell'IPCC e impegna i paesi ratificanti, in maniera giuridicamente vincolante, a ridurre, tra il 2008 e il 2012, il totale delle emissioni di gas clima-alteranti (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>) almeno del 5,2% rispetto ai livelli del 1990. Con la ratifica i diversi Paesi si impegnano inoltre a promuovere la ricerca, lo sviluppo e la maggiore utilizzazione di fonti energetiche rinnovabili e di tecnologie innovative compatibili con l'ambiente.

Con la Decisione n. 2002/358/CE del 25/04/2002 gli stati membri dell'UE si impegnano, in seguito alle singole ratifiche ad attuare collettivamente, attraverso uno sforzo ripartito nel periodo 2008-2012, una riduzione delle emissioni di gas serra dell'8% rispetto ai livelli del 1990.

L'obiettivo di riduzione di gas effetto serra, fissato per l'Italia al momento della ratifica (legge n. 120 del 1/06/02), è del 6,5%. Ad oggi però, nel nostro Paese, le emissioni invece di diminuire sono aumentate del 13%, portando a circa il 20% le riduzioni da attuare entro il 2012.

## L'impegno dell'Europa

L'Europa, al fine di far fronte al problema energetico e nel contempo intraprendere efficaci programmi di mitigazione, ha pianificato e reso attuativi attraverso azioni di legiferazione, una serie di interventi per la maggior parte riguardanti il settore energetico. I piani europei puntano a promuovere lo sviluppo e lo sfruttamento locale delle fonti energetiche rinnovabili (FER), la riduzione dei consumi e l'aumento dell'efficienza nei processi di generazione ed utilizzo dell'energia.

Il settore energetico, infatti, è stato individuato a livello mondiale come principale responsabile delle emissioni di gas clima alteranti (fig. 2). In Europa le attività umane svolte nel settore energetico sono causa di oltre il 78% delle emissioni di gas effetto serra. Inoltre, è da tener presente che nel mix energetico europeo i combustibili fossili rappresentano quasi l'80% delle risorse utilizzate e che tale fabbisogno è coperto per oltre il 50% dalle importazioni. Si stima che in mancanza di azioni volte a limitare i consumi e promuovere la produzione energetica da fonti locali, la dipendenza dall'estero è destinata ad aumentare sino a giungere nel 2030 all'84% dei consumi di gas e all'82% dei consumi di petrolio coperti dalle importazioni (Rapporto Energia e Ambiente 2006, ENEA 2007).

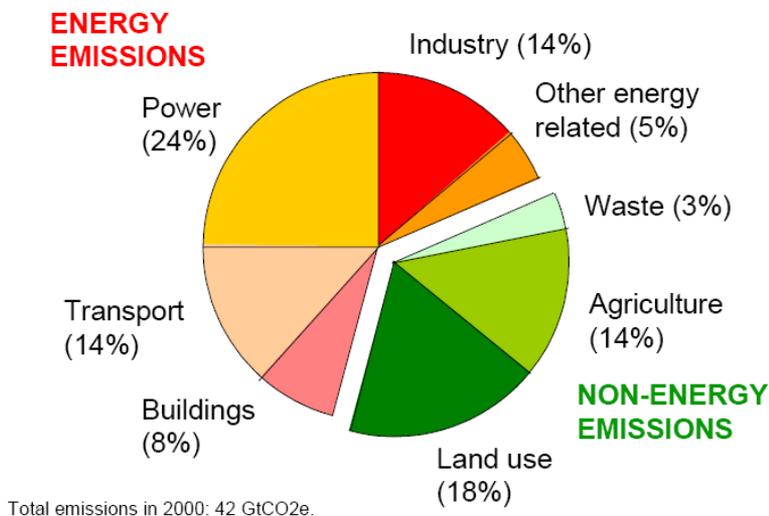


Figura 2: Emissioni mondiali di gas effetto serra per fonte, distinte per il settore energetico e non energetico, anno 2000. (Fonte: "Stern review of the economics of climate", 2006).

## **Il ruolo dell'energia: il meccanismo dei certificati neri**

L'Unione Europea, al fine di promuovere gli impegni di riduzione sottoscritti da ciascuno Stato membro con la ratifica del protocollo di Kyoto ha istituito, attraverso la Direttiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio Europeo (13/10/03), un sistema per il rilascio di permessi e lo scambio di quote di emissione dei gas effetto-serra: l'“Emission Trading System (ETS). Il sistema si basa su permessi di emissione denominati “*certificati neri*”. Ogni anno, attraverso un piano di allocazione, gli Stati membri fissano, per gli impianti industriali considerati maggiormente energivori, un limite massimo di emissione di CO<sub>2eq</sub> assegnando a ciascuno una quota di certificati neri. I gestori degli impianti sono tenuti a restituire annualmente un numero di quote pari alle emissioni annue effettive. Gli impianti che superano il limite assegnato sono soggetti a sanzione, stabilita per il 2008, pari a 100 euro per tonnellata di CO<sub>2eq</sub> emessa in eccesso. In alternativa i gestori possono coprire il deficit attraverso l'acquisto di un numero equivalente di certificati neri immessi sul mercato dagli impianti virtuosi rimasti sotto la soglia consentita.

La sanzione europea ha un importante ruolo sul funzionamento del sistema ETS, spingendo gli operatori all'acquisto dei permessi di emissione; infatti il prezzo di una tonnellata di CO<sub>2eq</sub> seppur molto variabile resta in ogni caso al di sotto dell'ammontare della sanzione. All'inizio del 2005 il mercato europeo ETS si è aperto con quotazioni di circa 20 euro, ma nell'aprile del 2006, la forte disponibilità di permessi e la sobrietà dei tagli imposti ha fatto crollare il prezzo dei certificati neri sino ad arrivare, durante il 2007, a pochi centesimi per tonnellata. Il nuovo regime europeo di emissioni, stabilito per il 2008, ha riportato le quotazioni sui valori iniziali di 20-25 euro per tonnellata di CO<sub>2eq</sub> (“Il sole 24 ore” del 19/05/2008).

L'adozione del Decreto Legge n. 273 del 12/11/04, convertito con la Legge n. 316 del 30/12/04, ha consentito l'applicazione della Direttiva ETS in Italia dal gennaio 2005.

## **Il ruolo dell'energia: il contributo delle fonti energetiche rinnovabili e il meccanismo dei certificati verdi**

Visto il contributo del settore energetico alle emissioni, ogni strategia d'intervento non può prescindere dal ricorso all'impiego di fonti energetiche rinnovabili (FER). La generazione di energia a partire da FER comporta, infatti, rispetto all'impiego di combustibili fossili, una riduzione nelle emissioni di CO<sub>2eq</sub> espressa come “emissioni evitate” di gas serra.

A livello mondiale, nel 2001, i consumi di energia si sono avvalsi per l'86% di fonti fossili non rinnovabili e per solo il restante 14% di fonti alternative (fig. 3).

A livello europeo nel 2005 le FER coprivano il 6,66% dei consumi energetici (fig. 4) e nel 2007, nonostante le politiche di sostegno, si è arrivati appena al 7,5%. Il settore che ha visto la crescita più sostenuta nell'uso di FER è stato quello della generazione elettrica, al contrario il settore dei carburanti per autotrazione sta compiendo progressi lenti.

Al 2005 la produzione di elettricità da parte dell'UE si è avvalsa per il 13,7% di FER (Rapporto della Commissione Europea MEMO/07/12 “Produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili: l'UE si avvicina al proprio obiettivo per il 2010” 10.01.2007 Bruxelles) mentre per lo stesso anno, il settore dei trasporti, pur rappresentando circa la metà del fabbisogno di energia dell'UE, si è avvalso di biocarburanti per meno del 2% sul consumo complessivo di carburanti per autotrazione (Comunicazione della Commissione COM2006-34 “Strategia dell'UE per i biocarburanti” 8.02.2006 Bruxelles).

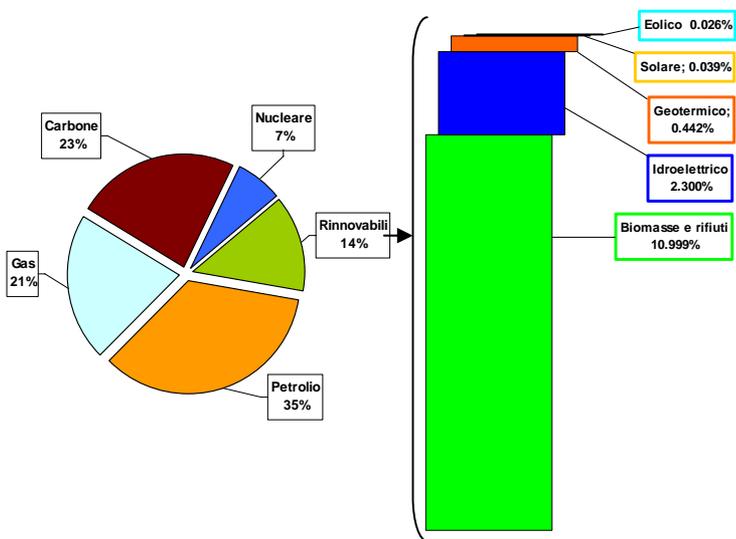


Figura 3: Consumi energetici mondiali per fonte, anno 2001. (Fonte: International Energy Agency “World Energy Outlook 2001” – www.iea.org).

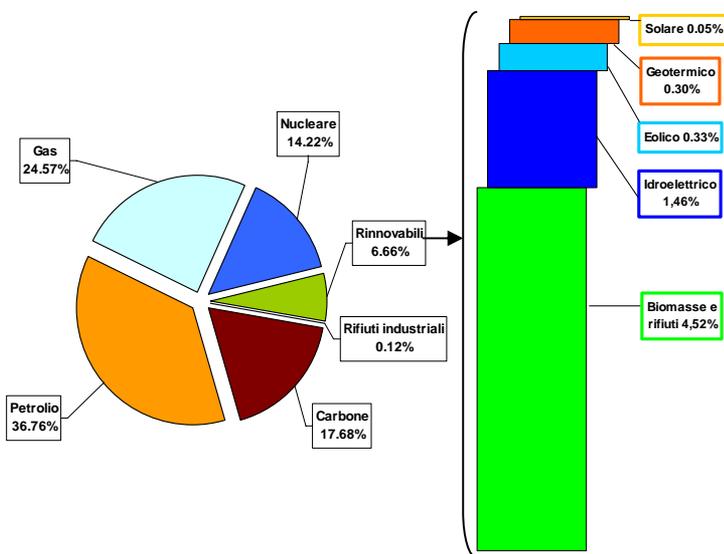


Figura 4: Consumi energetici europei per fonte, anno 2005. (Fonte: European Environment Agency “Suppli, trasformazione, consunzione – all products – annual data” – www.eea.europa.eu”).

Le principali direttive europee volte ad incentivare la produzione di energia da fonti rinnovabili negli Stati membri sono illustrate in tabella 2.

Direttiva	Data	Tema
96/92/CE	19/12/1996	Norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica
98/30/CE	22/06/1998	Norme comuni per il mercato interno del gas naturale
2001/77/CE	27/09/2001	Promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili
2003/30/CE	8/05/2003	Promozione dell'uso di biocarburanti rinnovabili per i trasporti
2003/96/CE	27/10/2003	Tassazione dell'elettricità e dei prodotti energetici
2004/8/CE	11/02/2004	Promozione della cogenerazione

Tabella 2: Direttive Europee sul tema del consumo di energia e sulle fonti rinnovabili.

Le Direttive comunitarie sono indirizzate a promuovere, in ciascuno Stato membro, l'introduzione di quote di energia da fonte rinnovabile sia nel settore dell'elettricità (Direttiva 2001/77/CE) che in quello dei trasporti (Direttiva 2003/30/CE) ed incentivare la creazione del mercato relativo ai nuovi prodotti energetici. Lo sfruttamento delle fonti energetiche alternative, fino ad ora sottoutilizzate, rappresenta, oltre che la possibilità di ridurre le emissioni di gas-serra, l'opportunità di creare occupazione locale, fornire fonti di reddito alternative per il settore agricolo, contribuire alla protezione dell'ambiente e allo sviluppo sostenibile.

L'Europa mira alla liberalizzazione del mercato dell'energia e alla sua apertura alla concorrenza (Direttive 96/92/CE, 98/30/CE); in tale contesto per favorire le FER propone la ristrutturazione del quadro comunitario per la tassazione dei prodotti energetici aprendo interessanti prospettive di defiscalizzazione per biocombustibili e carburanti alternativi (Direttiva 2003/96/CE). Per promuovere la produzione di energia da FER inoltre l'UE propone agli Stati membri l'introduzione di un sistema di garanzia d'origine e certificazione in grado di implementare un valore aggiunto all'energia rinnovabile rendendola competitiva sul mercato (Direttiva 2001/77/CE).

A questo proposito, per promuovere il rispetto di obblighi nazionali d'introduzione di quote di energia da FER, diversi paesi hanno incluso nei piani d'intervento il sistema dei **certificati verdi** (CV). Il certificato verde è un titolo annuo comprovante la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile e viene rilasciato agli impianti di produzione per ogni MWh prodotto. I CV hanno valore di mercato e sono soggetti a compravendita su piattaforme nazionali. In tal modo, ai produttori-importatori di energia da fonte convenzionale viene data la possibilità di soddisfare gli obblighi nazionali attraverso l'acquisto dell'equivalente quota in CV. Contemporaneamente vengono promossi i produttori di energia da FER conferendo loro il guadagno derivante dalla vendita congiunta dell'energia e dei certificati verdi. Dal 2008 in Italia (finanziaria 2008) il valore del certificato verde è riferito ad 1 MWh prodotto ed è stabilito equivalente a 112,88 euro.

L'analogo del certificato verde su piattaforma comunitaria è il **certificato RECS** (Renewable Energy Certificate System) titolo negoziabile rilasciato su base annua agli impianti di generazione per ogni MWh di energia prodotta da FER. Il Renewable Energy Certificate System rappresenta un sistema di certificazione condiviso a livello internazionale e, al contrario dei certificati verdi, si basa su partecipazione volontaria. La commercializzazione dei certificati RECS può avvenire separatamente dall'energia elettrica cui fanno riferimento: mediante il loro acquisto i clienti finanziano l'energia "pulita" testimoniando la sensibilità e l'impegno dell'impresa a favore dell'ambiente.

I principali obiettivi per le energie rinnovabili, posti dall'Unione Europea, sono riassunti e riportati in tabella 3.

Entro il..	Obiettivo UE	Rispetto al...
2010	12% di energia da FER	consumo interno lordo di energia
2010	22,1% di elettricità da FER	consumo interno lordo di elettricità
2020	10% di combustibili FER	consumo interno di combustibili fossili nei trasporti

Tabella 3: Principali obiettivi dell'UE per le energie rinnovabili.

## Il ruolo dell'energia: l'importanza del risparmio energetico, il meccanismo dei certificati bianchi e la certificazione energetica degli edifici

Il miglior tenore di vita in Europa si è tradotto in un incremento della domanda di energia. L'Unione Europea, consapevole dell'esigenza ambientale ed economica di ridurre i consumi energetici, ha incluso nei piani di mitigazione azioni volte ad incentivare il risparmio e l'efficienza negli usi finali dell'energia.

Tenuto conto degli sprechi connessi all'impiego di tecnologie obsolete, alle cattive abitudini e ad un uso irrazionale delle apparecchiature, le manovre d'incentivo stabilite dall'UE prendono in considerazione sia la domanda energetica legata ai settori residenziale e terziario, sia quella connessa ai processi produttivi, con particolar riferimento alla generazione di energia.

Le principali Direttive europee volte ad incentivare il risparmio energetico negli Stati membri sono illustrate in tabella 4.

Direttiva	Data	Tema
2002/91/CE	16/12/2002	rendimento energetico nell'edilizia
2006/32/CE	5/04/2006	efficienza degli usi dell'energia e i servizi energetici

Tabella 4: Direttive Europee sul tema del risparmio energetico.

In tale contesto è stato introdotto il meccanismo dei **certificati bianchi**, titoli di efficienza energetica (TEE) attestanti la riduzione dei consumi finali di elettricità, gas naturale o altri fonti di combustibili, ottenuta per mezzo di appositi interventi e migliorie agli impianti. I TEE sono uno strumento proposto agli Stati membri dall'Unione Europea (Direttiva 2006/32/CE) al fine di promuovere il raggiungimento degli obiettivi comunitari ed il rispetto degli obblighi nazionali. I TEE sono sottoposti a compravendita e possono essere acquistati, analogamente ai certificati verdi, dagli utilizzatori di energia soggetti a vincolo di riduzione dei consumi in alternativa dell'effettiva realizzazione del risparmio energetico.

L'Unione Europea ha inoltre tenuto conto del fatto che i settori residenziale e terziario coprono congiuntamente circa il 40% dei consumi dell'UE, domanda connessa principalmente agli impianti di condizionamento e riscaldamento, e secondariamente di illuminazione e ventilazione. Considerando pertanto gli edifici elementi fortemente energivori, è stata introdotta la **certificazione energetica degli edifici** (Direttiva 2002/91/CE), un documento attestante il rendimento energetico dell'edificio in relazione

all'efficienza e all'uso razionale dei suoi impianti. Attraverso metodologie preposte viene calcolato il così detto "rendimento energetico dell'edificio", ovvero il fabbisogno energetico dell'edificio considerato un uso standard dei suoi impianti. Secondo questo piano d'azione sono previste ispezioni periodiche obbligatorie agli impianti per vagliarne la corrispondenza ai requisiti minimi di riferimento stabiliti per legge e gli edifici devono essere classificati secondo la loro valenza energetica; tale informazione viene messa a disposizione del proprietario, acquirente o locatario.

In tabella 5 è indicato il principale obiettivo posto dall'UE per la riduzione dei consumi.

Entro il..	Obiettivo UE	Rispetto al...
2015	9% di risparmio energetico	consumo interno lordo di energia

Tabella 5: Obiettivo europeo in materia di risparmio energetico.

## I documenti di orientamento e programmazione dell'UE per il settore energetico e la riduzione delle emissioni

Oltre alle Direttive UE, l'Europa, allo scopo di elaborare una strategia unitaria a favore della produzione di energia da fonti rinnovabili, ha presentato negli anni una serie di documenti di programmazione per orientare e coordinare le scelte dei vari governi nel settore energetico.

Una prima tappa in questa direzione è rappresentata dal **"Libro Verde sulle fonti energetiche rinnovabili"** adottato dalla Commissione Europea alla fine del 1996. Con il Libro Verde vengono definite per la prima volta le strategie, i vantaggi e gli ostacoli connessi allo sviluppo del settore delle bioenergie. Il Libro Verde indica l'obiettivo, poi ripreso dalle Direttive UE, di introdurre entro il 2010 una quota sostitutiva di energia da FER pari al 12% del consumo interno lordo della Comunità.

Le azioni necessarie al raggiungimento dell'obiettivo e all'attuazione degli indirizzi strategici, riportati nel Libro Verde, sono contenute invece nel **"Libro Bianco, Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili"** presentato l'anno successivo dalla Commissione Europea. Il Libro Bianco riporta gli obiettivi quantitativi del piano d'azione tra cui: l'installazione di un milione di sistemi fotovoltaici, di centrali eoliche per 10.000 MW elettrici di potenza e di centrali a biomassa per 10.000 MW termici di potenza.

Nel 2002 è stato presentato dal Parlamento Europeo e dal Consiglio Europeo il **"Programma 2003-2006 – Energia intelligente per l'Europa"** il quale, riunendo i precedenti programmi comunitari, mira a sostenere finanziariamente le iniziative locali, regionali e nazionali, prevedendo lo stanziamento di 200 milioni di euro destinati ad azioni volte soprattutto al miglioramento dell'efficienza energetica nell'edilizia e nell'industria e alla diversificazione dei carburanti e delle fonti di energia mediante l'uso e lo sviluppo di FER.

Un aggiornamento rispetto ai precedenti programmi è rappresentato dal **"Piano d'azione per la biomassa"**, approvato dalla Commissione Europea alla fine del 2005, il quale fissa un obiettivo specifico per la produzione di energia da biomasse: raggiungere complessivamente 150 Mtep prodotti a partire da biomasse entro il 2010. Il piano sottolinea inoltre la necessità di promuovere l'utilizzo delle biomasse in tutti i settori di consumo dell'energia (trasporti, elettricità, calore, etc.) ed incentivare le produzioni locali di biomasse attraverso l'emanazione di apposite norme.

Attualmente la politica energetica europea e le linee guida per la riduzione delle emissioni si basano sul programma dettato nel **“Piano d’azione 2007-2009 PEE– Politica Energetica per l’Europa”** presentato dal Consiglio Europeo al termine del vertice di Bruxelles nel marzo del 2007. Nel documento viene sottolineata la stretta interdipendenza tra la questione climatica con l’obiettivo di limitare l’aumento della temperatura media globale entro 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, e la questione energetica, in relazione alla quale si punta a garantire un approvvigionamento energetico sicuro ed economicamente accessibile. Attraverso il documento vengono approvati gli obiettivi vincolanti, basati sulla così detta strategia europea del “20-20-20”, da raggiungere entro il 2020 attraverso uno sforzo ripartito tra i Paesi membri in maniera ponderata e differenziale. Il principio del 20-20-20 fissa tre obiettivi principali:

- riduzione delle emissioni di gas effetto serra del 20%, rispetto ai valori del 1990;
- aumento dell’efficienza energetica tale da effettuare un taglio del 20% sui consumi energetici dell’UE, rispetto alle previsioni per il 2020;
- incremento al 20% della quota di energia ottenuta da FER, sul consumo energetico totale dell’UE, e al 10% della quota di biocarburanti, sul consumo totale di benzina e gasolio per autotrazione.

## **L’Italia verso la sostenibilità climatica**

### **L’Italia verso la riduzione delle emissioni: il risparmio energetico e lo sviluppo di FER**

L’Italia è in forte ritardo rispetto agli impegni assunti in tema di energie rinnovabili e di risparmio energetico. Nonostante vi sia stato un aumento continuo dei consumi complessivi non si è infatti verificato un concomitante decollo della produzione di energia da FER.

I consumi finali di energia sono assorbiti per il 32% dal settore residenziale e terziario, composto per la maggior parte di edifici, e per quote simili dall’industria (28%) e dal settore dei trasporti (30%) (fig. 5), (Rapporto Energia e Ambiente 2006, ENEA 2007).

Per via della forte dipendenza energetica dall’estero e dell’aumento dei prezzi del greggio il fatturato energetico del nostro paese risponde a ben il 2,9% del PIL con un incremento di oltre il 30% rispetto al 2004. L’Italia, infatti, soddisfa attraverso le importazioni circa l’85% della domanda energetica complessiva. Il settore più dipendente è quello dei trasporti con oltre il 90% di petrolio importato; la dipendenza da combustibili solidi e gas naturale si attesta nell’ordine rispettivamente di oltre il 95% ed 80%; il minimo si registra invece per l’energia elettrica di cui importiamo solo il 16,13% (Rapporto Energia e Ambiente 2006, ENEA 2007).

Al 2005 le fonti rinnovabili hanno contribuito per il 7% al consumo interno lordo di energia primaria del Paese. Tale percentuale è dovuta essenzialmente all’idroelettrico e alla geotermia che hanno coperto congiuntamente nel 2004 oltre il 65% del totale di energia prodotta da FER (fig.6).

La tabella (tab.6) mostra il contributo energetico delle diverse FER in termini di kTep dal 2000 al 2005. Si noti come l’incremento percentuale più significativo, pur restando su valori assoluti molto bassi, provenga da fonti quali l’eolico, il fotovoltaico, i rifiuti e le biomasse che passano, sul totale delle rinnovabili, da poco più del 14% del 2000 al quasi 30% del 2005.

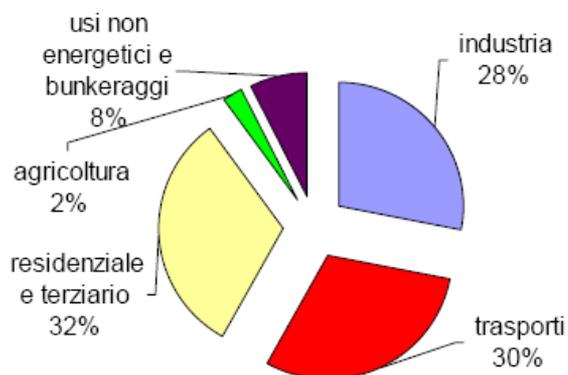


Figura 5: Quote per settore di uso finale dei consumi di energia, anno 2005. (Fonte: ENEA, "Rapporto Energia e Ambiente 2006", Aprile 2007).

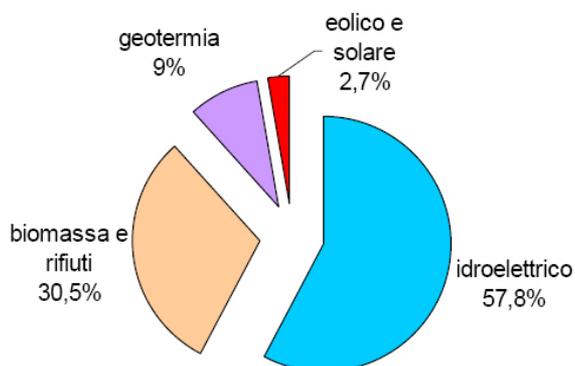


Figura 6: Produzione di energia per fonte rinnovabile, Italia (Fonte: ENEA, "Le fonti rinnovabili 2005, lo sviluppo delle rinnovabili in Italia tra necessità e opportunità").

Fonti Energetiche	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Idroelettrica <sup>1</sup>	9 725	10 298	8 694	8 068	9 404	7 935
Eolica	124	259	309	321	406	515
Fotovoltaico	4	4	4	5	6	7
Solare Termico	11	11	14	16	18	21
Geotermia	1 248	1 204	1 239	1 388	1 409	1 384
Rifiuti	461	721	818	1 038	1 305	1 501
Legna ed assimilati <sup>2</sup>	2 344	2 475	2 482	2 929	3 478	3 558
Biocombustibili	95	146	189	255	280	172
Biogas	162	196	270	296	335	343
<b>Totale</b>	<b>14 173</b>	<b>15 314</b>	<b>14 019</b>	<b>14 317</b>	<b>16 642</b>	<b>15 438</b>
di cui non tradizionali <sup>3</sup>	2 046	2 579	3 027	3 614	4 270	4 555

Tabella 6: Produzione di energie rinnovabili nel periodo 2000-2005, in Italia (ktep) (Fonte: ENEA, "Rapporto Energia e Ambiente 2006").

Il settore della generazione elettrica è quello che ha compiuto maggiori passi avanti verso lo sviluppo delle FER. Nell'anno 2007, secondo quanto riportato dal Gestore Servizi Elettrici, la produzione italiana di elettricità da FER è stata di 49411,3 GWh corrispondenti al 13,6% del consumo interno lordo di elettricità; se poi alla produzione nazionale si aggiunge la quota delle importazioni si arriva al 23,6% del consumo interno lordo soddisfatto attraverso FER. Anche in tal caso i maggiori contributi derivano dall'idroelettrico e dalla geotermia mentre la generazione da biomassa ha registrato una crescita molto limitata.

Come è stato messo in evidenza, l'idroelettrico è la fonte interna più importante, sebbene la produzione sia caratterizzata, nel corso degli anni, da fluttuazioni da attribuire all'effetto della variabilità delle precipitazioni annue. Lo sviluppo dell'idroelettrico è dovuto principalmente alla politica Enel di investire su questa risorsa in seguito al referendum abrogativo del 1987 che sancì l'abbandono da parte dell'Italia del ricorso al nucleare come forma di approvvigionamento energetico. Negli ultimi anni le problematiche di impatto ambientale stanno guidando lo sviluppo del settore verso impianti di piccola taglia: il mini-idroelettrico (potenza < 1000 kW) ed il micro-idroelettrico (potenza < 100 kW).

La geotermia è al secondo posto, fonte utilizzata da più di 100 anni nel nostro Paese, contribuisce in maniera rilevante all'approvvigionamento di energia da FER. La geotermia si presta alla produzione di elettricità è anche di calore attraverso l'utilizzo diretto, con un apporto assestato negli ultimi anni poco al di sotto dei 9000 TJ. Attualmente lo sviluppo del settore è orientato verso soluzioni tecniche in grado di ridurre gli impatti ambientali. I 32 impianti geotermoelettrici operanti sono situati tutti in Toscana.

Alle sopra citate, energie rinnovabili "tradizionali" si affiancano le così dette "nuove rinnovabili" quali l'eolico ed il solare. La produzione di energia elettrica per mezzo del solare fotovoltaico è in grado di contribuire in minima parte alla domanda complessiva del Paese ma sono attesi sviluppi a seguito dei forti incentivi predisposti dal governo (conto energia). Anche il solare termico registra valori, inferiori a 800 TJ, tra i più bassi dell'Unione Europea. La produzione eolica invece, sebbene si attesti anch'essa su livelli ancora molto bassi rispetto alla media europea, negli ultimi anni ha conseguito buoni risultati. Il settore eolico ha subito un forte sviluppo tecnologico in particolare verso soluzioni in grado di ridurre le fluttuazioni di corrente generate dalle raffiche di vento ed aumentare così la compatibilità degli impianti alla rete elettrica, uno tra i principali vincoli tecnici alla diffusione di tale fonte energetica.

Le biomasse includono una vasta gamma di materiali con diverse destinazioni finali (produzione di elettricità, calore, biocarburanti) e filiere, ciascuna con differenti possibilità di sviluppo. In generale il settore delle biomasse stenta a farsi strada nel panorama nazionale delle energie rinnovabili. Gli ultimi dati assegnano alle biomasse un contributo di 5,2 Mtep alla produzione di energia primaria nazionale con una copertura sui consumi del 2,7%, ben al di sotto della media europea. La maggior parte di tale quota riguarda la produzione di energia termica (4,0 Mtep) e solo un milione di tep viene utilizzato nella produzione di elettricità e appena 200000 tep in quella di biocarburanti.

Per ciò che riguarda i rifiuti nel 2006 i 48 termovalorizzatori attivi in Italia hanno prodotto 2,9 milioni di MWhe di energia elettrica e 689 mila MWht di energia termica. Inoltre è da sottolineare come l'88% del biogas prodotto derivi da materiali di discarica. Nonostante ciò, secondo il "Rapporto Rifiuti 2007" dell'APAT, la percentuale di rifiuti urbani impiegata come fonte di energia è stata dello 0,5% indicando un ricorso alla termovalorizzazione limitato rispetto ai potenziali disponibili.

Le biomasse legnose sono prodotte a partire da una risorsa di cui i territori Italiani sono ricchi ed il loro impiego per la produzione di calore è una realtà tradizionalmente consolidata. La maggior parte della produzione di calore nel nostro Paese deriva infatti dall'impiego di legna e assimilati negli impianti industriali (oltre 75000 TJ nel 2004) e di legna da ardere e del teleriscaldamento a biomasse nel settore civile (quasi 67000 TJ nel 2005), senza contare una rilevante quota di materiale legnoso utilizzata direttamente e non commercializzata che pertanto sfugge alle statistiche ufficiali di settore.

Le biomasse inoltre costituiscono la fonte rinnovabile da cui è possibile ottenere i biocarburanti impiegabili per autotrazione. Nonostante le politiche di incentivo fiscale, il settore dei biocarburanti sta compiendo progressi lenti. Sul territorio nazionale operano 7 impianti industriali di biodiesel la cui produzione, che si aggira attorno alle 273000 t/anno, impiega prevalentemente materie prime d'importazione (es. olio di palma) e solo in minima parte olio di colza e girasole di origine italiana. In figura 7 sono riportate le produzioni annuali del biodiesel e dell'olio vegetale puro in Italia. L'olio vegetale viene attualmente impiegato puro nel settore del riscaldamento e miscelato al 5% o al 30% sotto forma di biodiesel con i combustibili fossili nel settore dei trasporti.

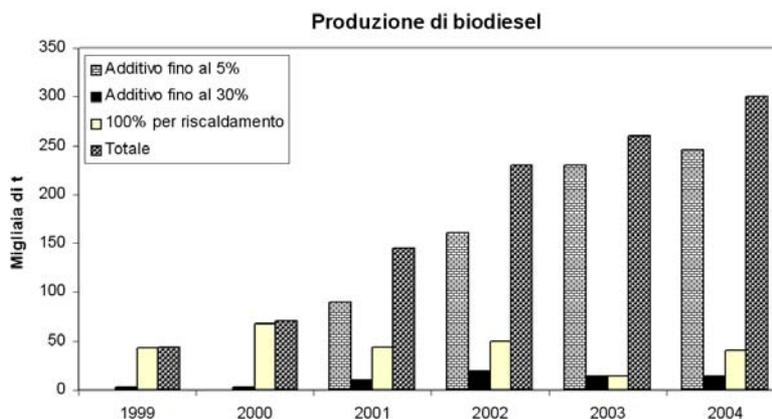


Figura 7: Produzione di olio vegetale puro e biodiesel in Italia anni 1999-2004 (kton) (fonte ITABIA).

## I provvedimenti legislativi dell' Italia per le energie rinnovabili

L'Italia ha emanato una serie di leggi e decreti legislativi come recepimento delle Direttive Europee (tab. 7) volti all'attuazione degli indirizzi programmatici dell'UE. Lo scopo è quello di pianificare una politica nazionale a sostegno dello sviluppo di FER e della riduzione dei consumi per raggiungere gli obiettivi posti per il 2012.

**Le misure** attualmente vigenti in Italia si basano su:

- sistema di certificazioni (certificati verdi, certificati bianchi, certificati neri, certificazione energetica degli edifici ecc.);
- meccanismi di concorrenza e liberalizzazione del mercato dei prodotti energetici;
- imposizione di obblighi specifici e relative sanzioni;
- predisposizione di incentivi fiscali (es. riduzione delle accise per i biocarburanti) e lo stanziamento di fondi.

Documento	Data	Tema
Dlgs. n.79	16/03/99	Attuazione della Direttiva UE 96/92/CE su norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica
Dlgs. n.164	23/05/00	Attuazione della Direttiva UE 98/30/CE su norme comuni per il mercato interno del gas naturale
Dlgs. n.387	29/12/03	Attuazione della Direttiva UE 2001/77/CE sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili
Dlgs. n.128	30/05/05	Attuazione della Direttiva UE 2003/30/CE sulla promozione dell'uso di biocarburanti rinnovabili per i trasporti
Dlgs. n.192	19/07/05	Attuazione della Direttiva UE 2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia
Dlgs. n.26	2/02/07	Attuazione della Direttiva UE 2003/96/CE sulla tassazione dell'elettricità e dei prodotti energetici
Dlgs. n.20	8/02/07	Attuazione della Direttiva UE 2004/8/CE sulla promozione della cogenerazione

Tabella 7: Decreti legislativi emanati dall'Italia come attuazione delle Direttive UE in materia di FER.

I provvedimenti legislativi emanati al 2007 hanno lo scopo di perseguire gli obiettivi generali di seguito riassunti:

- *promuovere l'introduzione di biocarburanti nel settore dei trasporti*: l'obiettivo indicativo d'immissione al consumo sul totale dei carburanti destinati ad autotrazione è stato fissato pari al 2,5% entro la fine del 2010 dal Dlg. n. 128 del 30/05/2005. Successivamente per i produttori di carburante (compagnie petrolifere e produttori in fase di raffinazione) è stato fissato, con la legge n. 296 del 27/12/2006, l'obbligo d'introduzione, entro il 2010, di una quota di sostituzione con biocarburanti di origine agricola pari al 5,75% sul totale diesel e benzina immessi al consumo l'anno precedente.
- *promuovere la produzione di energia elettrica da FER*: l'obbligo di immissione di elettricità da FER per i produttori-importatori di elettricità che immettono più di 100 GWh/anno nella rete elettrica nazionale, è stato fissato per il 2006 pari al 3% del totale dell'elettricità prodotta o importata l'anno precedente (Dlg. n. 387 del 29/12/2003) e per il futuro è prevista la predisposizione di ulteriori incrementi percentuali.
- *promuovere l'efficienza negli usi finali dell'energia e la riduzione dei consumi*: con i decreti ministeriali del 20 luglio 2004 vengono definiti gli obiettivi quantitativi nazionali di risparmio energetico a carico dei distributori di energia elettrica e gas naturale i quali sono tenuti a realizzare complessivamente, entro il 2009, un risparmio di energia pari a 2,9 Mtep. Nell'ambito delle manovre per la riduzione dei consumi viene promossa inoltre la diffusione sul territorio della cogenerazione ad alto rendimento (Dlg. n. 20 dell'8/02/2007). Contemporaneamente è stato introdotto l'obbligo di certificazione energetica per gli edifici (Dlg. n. 192 del 19/08/2005) i quali sono tenuti a rispettare soglie minime di rendimento energetico. Dal primo luglio 2007, con il Dlgs 311/2006 sul rendimento energetico degli edifici, modifica del Dlgs 192/2005, entra in vigore in Italia l'obbligo di dotare di certificazione gli edifici posti in vendita. Per il primo anno di applicazione del decreto l'obbligo ha riguardato gli edifici di dimensioni superiori ai 1000 mq, mentre dal primo luglio 2008 è prevista l'estensione anche agli edifici sotto i 1000 mq sempre nel caso di compravendita dell'intero immobile. Dal 2009 la certificazione energetica diventerà obbligatoria

anche in caso di compravendita dei singoli appartamenti. Sul fronte delle produzioni particolar riguardo è stato posto all'impiego energetico delle biomasse. Il piano proposto dal Governo è volto a promuovere la creazione di filiere produttive nazionali dei biocarburanti secondo modelli a basso impatto ambientale, dall'agricoltura all'industria di trasformazione, con la costituzione di una forte industria nazionale di settore. Gli interventi in questo settore puntano alla costituzione di filiere corte e incentivano la partecipazione diretta delle imprese agricole e l'autoconsumo di biocarburanti e bioelettricità da parte delle aziende stesse. In quest'ambito la **Legge Finanziaria 2006** (legge n. 266 del 23/12/2005) introduce tra le attività connesse e produttive di reddito agrario, (art. 2135 del codice civile comma III), "*la produzione e cessione di energia elettrica da fonti rinnovabili agro-forestali effettuate dagli imprenditori agricoli*".

Per ciò che riguarda nello specifico la filiera dei biocarburanti, gli incentivi, stabiliti nell'ambito di un programma triennale (2008-2010) dalla legge **Finanziaria 2007** (legge n.296 del 27/12/2006), sono rappresentati soprattutto dalla riduzione dell'accisa, rispetto a quella sulla benzina, secondo specifiche aliquote, per i biocarburanti (bioediesel, bioetanolo derivato da prodotti di origine agricola, etere etilbutilico, derivati da alcole di origine agricola, additivi e riformulanti prodotti da biomasse) impiegati puri o in miscela. Inoltre è stata stabilita l'esenzione dell'accisa per l'olio vegetale puro prodotto ed autoconsumato come carburante dall'impresa agricola, per gli oli vegetali utilizzati nelle coltivazioni sotto serra, per l'energia elettrica prodotta con impianti azionati da fonti rinnovabili con potenza non superiore ai 20kW.

La **Legge Finanziaria 2008** (legge n. 244 del 24/12/2007), in conformità col principio di sostenibilità e riduzione dei costi economici ed ambientali connessi al trasporto, introduce un incentivo, fornito in conto energia, pari a 0,30 euro per ogni kWh di elettricità prodotta da impianti alimentati a biomasse. L'incentivo è riservato ad impianti di potenza non superiore ad 1MW che utilizzano materie prime di origine agricola e forestale, prodotte e raccolte entro brevi distanze, ovvero entro un raggio non superiore ai 70 km, sulla base di contratti di filiera. Per gli impianti di potenza superiore ad 1 MW, invece, le misure di incentivo si attuano attraverso il sistema dei *certificati verdi* (CV). I CV rappresentano un valore aggiunto all'energia prodotta da FER e sono rilasciati all'impianto, sotto forma di titoli annui aventi valore di mercato e oggetto di compravendita, ogni 50 MWh/anno di energia prodotta da FER. I CV rappresentano così una fonte di guadagno aggiuntiva per gli impianti a biomassa poiché possono essere venduti ad altri produttori-importatori di energia ai quali, attraverso l'acquisto della quota equivalente, è data la possibilità di adempiere agli obblighi specifici di produzione di energia da FER.

Per il risparmio energetico viene promossa l'efficienza energetica nei processi di produzione e impiego di energia attraverso il sistema dei certificati bianchi o *titoli di efficienza energetica* (TEE) attestanti la realizzazione di un risparmio energetico. I TEE, al pari dei CV, rappresentano una fonte di guadagno aggiuntiva per i soggetti impegnati in misure di riduzione dei consumi. L'autorità per l'energia elettrica ed il gas autorizza l'emissione di 1 TEE per ogni Tep risparmiato, per ogni anno di durata dell'intervento. Coinvolti nella compravendita dei TEE sono sia i soggetti obbligati, ovvero i distributori di energia elettrica e gas con più di 100.000 clienti finali, sia soggetti volontari, cioè le società di servizi energetici (ESCO) o altri distributori di elettricità e gas. I soggetti obbligati sono tenuti a realizzare interventi di efficienza energetica a favore di una riduzione dei consumi dell'utenza finale in termini di gas naturale, elettricità o altri combustibili (es. sostituzione di lampade, scaldacqua, frigoriferi ed altri elettrodomestici con modelli a maggior efficienza energetica, impiego di impianti fotovoltaici di potenza inferiore a 20kW o di

collettori solari per la produzione di acqua calda, interventi di isolamento delle pareti e delle finestre degli abitati, ecc.). Inoltre, attraverso i Decreti Ministeriali del 20 luglio 2004 ed il Dlg n. 20 dell'8 febbraio 2007, attuazione della direttiva 2004/8/CE sulla promozione della cogenerazione, l'assegnazione di TEE è prevista anche per i processi di generazione dell'energia che si avvalgono di sistemi di cogenerazione ad alto rendimento (tab 8). In alternativa all'attuazione di interventi di risparmio energetico, i soggetti obbligati possono comprare TEE per un ammontare equivalente all'obiettivo di risparmio assegnato.

Cogenerazione:	processo di produzione combinata di elettricità e calore attraverso il recupero delle dispersioni termiche dell'impianto
Cogenerazione ad alto rendimento:	cogenerazione attuata attraverso impianti di piccola taglia (piccola e microgenerazione) cioè di capacità massima inferiore ad 1MWe
Legislazione d'interesse:	Delibera AEEG n. 42/02 Delibere AEEG n. 34/05 Dl. n. 20 dell'8/02/07 Dl. n. 79 del 16/03/99 Decreti Ministeriali del 20/07/2004

Tabella 8: La cogenerazione ad alto rendimento: definizione e norme nazionali d'interesse.

Infine, per incentivare la riduzione dei consumi all'interno degli edifici, tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché le prescrizioni inerenti il clima indoor e l'efficienza sotto il profilo dei costi, il Dl. n. 192 del 12/08/05 prescrive un sistema di *certificazione energetica degli edifici* basato sul calcolo del rendimento energetico dell'edificio e su ispezioni periodiche agli impianti di condizionamento, riscaldamento, ventilazione ed illuminazione per la verifica degli sprechi dovuti a tecnologie inadeguate ed apparecchiature obsolete.

## La Toscana verso la riduzione delle emissioni e lo sviluppo di FER

In coerenza con l'obiettivo nazionale di riduzione delle emissioni del 6,5% rispetto alle emissioni del 1990, la Regione Toscana dovrà giungere al 2012 ad un livello massimo di 34.55 Mton di CO<sub>2</sub>eq (tab. 10).

Nella tabella 9 sono riportati i contributi percentuali al totale delle emissioni dell'UE, da parte dell'Italia e della Toscana, mentre in tabella 10 sono riportate per l'Europa, l'Italia e la Toscana sia le stime delle emissioni di CO<sub>2</sub>eq per l'anno di riferimento (1990), sia i livelli di emissione da raggiungere ed i tagli percentuali da attuare (rispetto al 1990) entro il 2012 in conformità con gli "impegni Kyoto".

Regione/stato	1990	2000
Toscana	0,87	0,99
Italia	7,1	7,4
UE	100	100

Tabella 9: Percentuale di emissioni, in CO<sub>2</sub>eq., della Toscana e dell'Italia rispetto alle emissioni dell'UE (fonte [www.rete.toscana.it](http://www.rete.toscana.it), "Quadro conoscitivo regionale" Dossier a cura di Mario Romanelli).

	Livelli atmosferici di CO <sub>2eq</sub>		
	1990	Obiettivo 2012	riduzione
UE	4204,0	3867,7	- 8%
<b>Italia</b>	521,0	487,1	- 6,5%
<b>Toscana</b>	36,9	34,5	- 6,5%

Tabella 10: Emissioni di CO<sub>2eq</sub>, in milioni di tonnellate, per Europa, Italia e Toscana nell'anno di riferimento 1990, obiettivi di emissioni di CO<sub>2eq</sub>, da raggiungere e tagli % da effettuare in accordo con gli impegni presi col protocollo di Kyoto (fonte [www.rete.toscana.it](http://www.rete.toscana.it) "Quadro conoscitivo regionale" Dossier a cura di Mario Romanelli).

Uno strumento di programmazione a livello regionale per il settore energetico è rappresentato dal Piano Energetico Regionale (PER). La legge regionale n. 45 del 27/06/1997 indica il PER tra gli strumenti attuativi regionali per incentivare la produzione e l'impiego di bioenergie secondo le priorità in materia di energia e contenimento delle emissioni di gas effetto serra e in conformità con gli indirizzi del "Programma Regionale di Sviluppo" e delle indicazioni del "Piano Energetico Nazionale".

Il **PER 2006-2010** indica tra le priorità della Toscana la produzione di energia da fonti rinnovabili e pone come obiettivo la riduzione delle emissioni di CO<sub>2eq</sub> di 10 milioni di tonnellate/anno, ben 3 milioni in più rispetto all'obiettivo previsto dal protocollo di Kyoto sulla base dei livelli di emissione del 1990 e del peso della regione sul sistema socio-produttivo del sistema nazionale. Il PER, basandosi sulle specifiche disposizioni comunitarie per il settore energetico, definisce le linee guida della politica energetica regionale volte a promuovere:

- la riduzione dei consumi energetici, l'efficienza energetica e la diffusione della cogenerazione,
- il ricorso alle FER e la loro integrazione con le attività produttive ed urbane.

A tal fine il PER, attraverso l'impiego di fondi comunitari, nazionali e regionali, prevede incentivi agli investimenti nel settore delle bioenergie per valorizzare le potenzialità del territorio e le potenzialità d'intervento reale dei soggetti coinvolti adattandole alle specifiche realtà locali, ottimizzare e coordinare gli investimenti e le attività nel settore e favorire il superamento degli ostacoli territoriali, amministrativi ed economici alle realizzazioni impiantistiche.

Le misure di incentivo previste dal PER sono in funzione dei seguenti obiettivi da raggiungere entro il 2010:

- aumentare la produzione di energia da fonte eolica fino ad una potenzialità installata di 300 Mw rispondenti ad una riduzione di CO<sub>2</sub> in atmosfera di 420000 tonnellate/anno, a tal fine sono individuate 92 possibili aree eoliche su tutto il territorio regionale;
- aumentare la produzione di energia da fonte idroelettrica con un incremento del 20% della potenzialità installata ed il raggiungimento di un valore potenziale di 70 Mw;
- aumentare la produzione di energia da fonte solare fotovoltaica, puntando al soddisfacimento dell'intero potenziale rappresentato dalle utenze isolate ed isole;
- aumentare la diffusione del solare termico al fine di conseguire un obiettivo minimo di 200.000 mq installati;
- incrementare la realizzazione di impianti di cogenerazione allo scopo di auto-produrre, con sistemi cogenerativi, il 50% della potenzialità installabile in Toscana;
- favorire il massimo sviluppo della produzione di energia da biomasse ed in particolare sviluppare la produzione energetica da rifiuti o prodotti di risulta del loro trattamento;
- rafforzare e sviluppare la produzione geotermica per usi termici ed usi elettrici.

Nel corso del 2007 è stato elaborato il nuovo **Piano di Indirizzo Energetico Regionale** (PIER). Il PIER contiene gli indirizzi e le procedure per la realizzazione degli interventi in campo energetico ed ha funzione di pianificazione e coordinamento a livello territoriale. Il PIER infatti, basandosi su disposizioni attuative, su previsioni future e sull'individuazione di obiettivi regionali detta le linee guida cui sono tenuti ad aderire i vari comuni ed enti locali. Il PIER per il 2008 fa proprie le decisioni assunte a livello europeo riportando, riferiti al contesto regionale, gli obiettivi previsti dall'UE in conformità al principio del 20-20-20 stabilito per la questione climatico-energetica.

In particolare nella tabella 11 sono riportate le produzioni regionali al 2005 di energia elettrica da FER ed i risultati attesi al 2020 secondo il PIER.

Fonte energetica	Produzione anno 2005 (GWh)	Produzione annua obiettivo al 2020 (GWh)
Fotovoltaico	0,10	202,60
Eolico	3,00	663,00
Idroelettrico	456,10	856,10
Geotermia	5324,50	6924,50
Biomasse/biogas/rifiuti	290,40	1070,40

Tabella 11: Produzioni di energia elettrica da FER in Toscana al 2005 e previsioni al 2020. (Fonte PIER per la Toscana, 2008).



Figura 8: Centrale elettrica geotermica di Larderello.

Gli obiettivi aggiuntivi al 2020 per ciò che riguarda strettamente la produzione di energia da biomasse sono indicati in tabella 12.

<b>Produzione di energia da biomasse</b>	<b>Obiettivi al 2020</b>
energia elettrica	60 (MWe)
energia termica	600 (MWt)

*Tabella 12: Obiettivi di produzione di energia da biomasse per il 2020 secondo il PIER.*

Ulteriori strumenti di programmazione e indirizzo per le bioenergie, sono rappresentati dal Piano Forestale Regionale (PFR) 2007-2011, dal Piano Regionale di Azione Ambientale (PRAA) 2007-2010 e dal Piano Regionale di Sviluppo Rurale (PSR) 2007-2013.

Il **PFR 2007-2011** pone come obiettivi prioritari l'attuazione della selvicoltura sostenibile, la valorizzazione delle risorse legnose e l'utilizzazione delle biomasse residuali originate dalle opere di manutenzione delle foreste che a tutt'oggi vengono il più delle volte bruciate all'aperto o lasciate sul posto.

Nel **PRAA 2007-2010** il tema energetico assume un ruolo centrale e strategico in funzione dell'obiettivo di garantire un consumo delle risorse rinnovabili e non rinnovabili non superiore alla capacità di carico dell'ambiente. Viene posto particolar rilievo allo sviluppo delle filiere agro-energetiche sul territorio, quali quella ligno-cellulosica e oleaginosa.

Il **PSR 2007-2013** contiene, invece, un'analisi socio-economica delle forti potenzialità derivanti dall'utilizzo delle agro-energie e del ruolo attivo di assorbimento esercitato dalle foreste per la mitigazione dei cambiamenti climatici. Lo sviluppo di fonti rinnovabili di energia ed il risparmio energetico vengono citati tra gli obiettivi specifici da perseguire per assolvere alla priorità di riduzione dei gas serra in atmosfera. Complessivamente il contributo di mitigazione dei cambiamenti climatici, derivante dalla misure previste dal PSR, è stimato pari a circa 6900 Tep, corrispondenti ad una riduzione di CO<sub>2eq</sub> di 20700 Tonnellate. In linea con gli obiettivi regionali il PSR prevede sostegni finanziari agli enti pubblici e alle imprese operanti in tutte le fasi della filiera agro-energetica al fine di promuovere lo sviluppo delle FER e, contemporaneamente, favorire la qualità della vita e la diversificazione dell'economia nelle zone rurali. Lo scopo è di promuovere lo sviluppo occupazionale e la diversificazione dei redditi, l'innovazione nel settore agro-forestale, le colture energetiche "no-food", l'acquisto di mezzi per l'utilizzo delle biomasse, la realizzazione sia di impianti consortili di produzione e distribuzione di energia da biomasse, sia di piccole centrali energetiche aziendali alimentate a biomasse legnose forestali provenienti dall'azienda stessa. Il PSR prevede inoltre l'attivazione di indennità per le cure colturali dei boschi con criteri di selvicoltura sostenibile certificati e contributi per la realizzazione di impianti a ciclo breve (2-3 anni) per produzione di biomassa legnosa a fini energetici.

Grazie alla politica strategica per la pianificazione energetica messa in atto, la Toscana ha già centrato gli obiettivi europei di consumo di energia da FER fissati per il 2010. Un grosso contributo per l'energia elettrica deriva dal geotermico e dall'idroelettrico.

Ad oggi risorse aggiuntive possono derivare dall'ulteriore sfruttamento della geotermia, dell'eolico negli Appennini e delle biomasse agroforestali. Per quest'ultime la Regione ha notevoli potenzialità derivabili soprattutto dall'ottimizzazione delle gestioni colturali sia di boschi che di coltivazioni. Sul territorio sono presenti circa 735000 ha di

boschi, ed oltre 60000 ha di viti e 92000 ha di oliveti (fonte: [www.regione.toscana.it](http://www.regione.toscana.it)), risorse queste che rappresentano congiuntamente una fonte straordinaria di biomassa legnosa, sia derivante dalla tradizionale attività di estrazione forestale, sia dal recupero dei residui delle potature agricole e dei tagli selvicolturali. Minori risorse sono disponibili per le colture dedicate, queste infatti rischierebbero di entrare in competizione con il processo di valorizzazione e tipicizzazione dei nostri prodotti portato avanti negli anni come strategia regionale per l'agricoltura. In alternativa potrebbero essere impiegati i circa 50000 ha di terreni ritirati dalla produzione dichiarati nel 2007 (fonte : ARTEA – newsletter n.30) ma con ancora molti dubbi sul rischio di applicare metodi di agricoltura intensiva a terreni spesso posti in aree con difficoltà di meccanizzazione.

Nel periodo 2002-2003 la regione ha messo a disposizione risorse per 640 mila euro destinate in parte alla realizzazione di impianti a biomasse per la climatizzazione delle serre in agricoltura, di impianti di riscaldamento a biomasse per usi domestici, di impianti termici annessi all'industria del legno per il recupero degli scarti di lavorazione. Gli attuali programmi previsti per la valorizzazione energetica delle biomasse privilegiano gli impianti di potenza installata non superiore ad 1 megawatt elettrico e a 3 megawatt termici, collocati in zone marginali e in zone montane e basati sull'impiego di biomasse prodotte sul territorio in un'ottica di filiera corta.

## **Sostenibilità dell'obiettivo di introduzione di fonti energetiche rinnovabili**

### **Sostenibilità per l'Italia**

L'obiettivo europeo di giungere al 2020 all'introduzione di una quota di energia da FER pari al 20% sul consumo energetico complessivo, introduce la questione della sostenibilità energetica dei territori e della loro capacità di contribuire al raggiungimento di tale obiettivo attraverso l'impiego di fonti rinnovabili locali, senza dover ricorrere alle importazioni. Allo scopo di ottenere un quadro di riferimento in tal senso sono state consultate le principali fonti bibliografiche (World Energy Council, EurObserv'Er, CESI, IEA, ITABIA, ASPO, APAT, GSE etc.) prendendo in esame le stime effettuate sulla produzione attuale e potenziale di energia da FER in Italia, ottenibile sulla base delle tecnologie attualmente disponibili. Ne risulta un quadro riassuntivo che prende in considerazione le principali fonti di energia rinnovabile presenti nel nostro Paese, il loro contributo al fabbisogno energetico nazionale e le previsioni di sviluppo future.

Dall'analisi è emerso che la produzione nel 2006, a livello nazionale, di energia da fonti rinnovabili locali è stata di circa 11,26 Mtep/anno su un consumo lordo totale di circa 200 Mtep/anno (fig. 9). La stima omette il contributo del solare termico poiché, essendo una fonte ad uso diretto, la produzione di energia ad essa connessa è di difficile valutazione. Per la produzione di energia da oleaginose, sono state considerate esclusivamente le biomasse prodotte a livello locale attraverso la messa a coltura di terreni italiani escludendo la produzione energetica connessa a materie prime d'importazione. I 200 Mtep di consumo annuale sono assorbiti principalmente dall'uso residenziale e terziario, dall'industria e dai trasporti (fig. 5). Dall'analisi del contributo delle differenti FER (fig.9) emerge il ruolo importante delle biomasse legnose il cui impiego energetico è storicamente diffuso in Italia. La maggior parte di queste sono impiegate per la produzione diretta di energia termica nelle piccole utenze, rientrando solo in parte nella produzione elettrica nazionale per la quale invece sono il geotermico e l'idroelettrico ad assumere un ruolo dominante. I risultati

indicano che l'Italia ha le potenzialità per passare da una produzione attuale di 11,26 Mtep a 29,4 Mtep (fig. 10).



Figura 9: Analisi della produzione di energia rinnovabile in Italia, per fonte (anno 2006)(considerando 1 tep equivalente a 11628 KWh e, per le biomasse legnose, equivalente a 4,4 mc o a 3,33 t di legna).

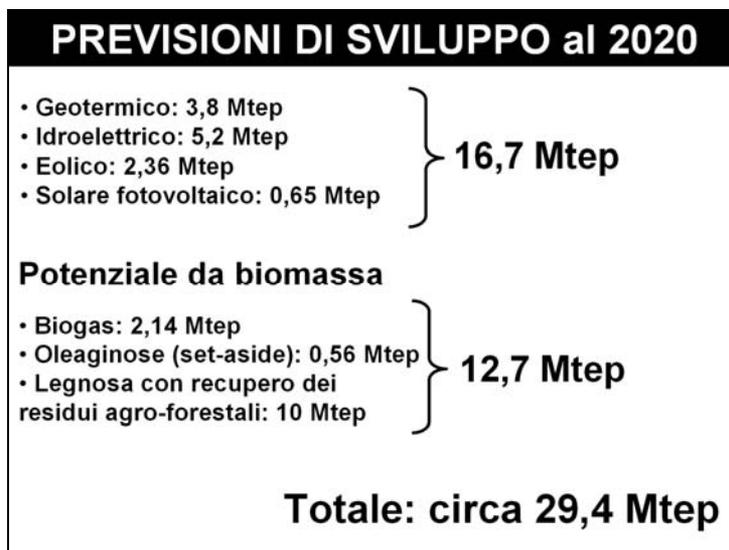


Figura 10: Previsioni di produzione potenziale di energia rinnovabile in Italia al 2020 per le differenti fonte (considerando 1 tep equivalente a 11628 KWh e, per le biomasse legnose, equivalente a 4,4 mc o a 3,33 t di legna).

La stima tiene in considerazione per l'idroelettrico, l'eolico ed il solare fotovoltaico le previsioni di sviluppo effettuate al 2020 e per il geotermico lo sfruttamento dei siti geotermici ad alta e medio-bassa entalpia attualmente inutilizzati. Per la stima del potenziale energetico in biomasse legnose è stato considerato, in aggiunta alla tradizionale produzione forestale al netto della richiesta per usi edilizi, il recupero e l'impiego di residui derivanti dall'attività di taglio e cura dei boschi e dalle operazioni di potatura su frutteti, oliveti e vitigni. Analogamente per il biogas è stato considerato lo sfruttamento energetico delle biomasse residuali complessivamente disponibili sul territorio, provenienti dai diversi settori produttivi, ed attualmente non impiegate a scopi energetici. Per le colture oleaginose invece è stata valutata l'ipotesi della messa a coltura di tutte le superfici ritirate dalla produzione con colture energetiche.

Il quadro riassuntivo evidenzia le potenzialità di tutte le fonti rinnovabili considerate, fatta eccezione per le colture energetiche dedicate il cui contributo si mantiene modesto.

E' inoltre possibile dedurre che, con le tecnologie disponibili, la produzione potenziale di energia da FER in Italia si aggira sui 30Mtep a fronte dei 40Mtep da raggiungere in conformità con l'obiettivo europeo, tenuto conto dei consumi attuali. Si conclude dunque che un'azione indispensabile, oltre allo sfruttamento dei potenziali disponibili, dovrà essere la riduzione consistente dei consumi energetici.

## Sostenibilità per la Regione Toscana

In Toscana il fabbisogno complessivo di energia nel 2003 è stato di 8986,7 Ktep (tab. 13). La Regione, attraverso il Piano di Indirizzo Energetico Regionale ed in conformità con gli obiettivi europei, ha predisposto interventi volti al risparmio energetico tali da giungere, rispetto allo scenario dei consumi previsto al 2020 (7560 Ktep), ad una riduzione di circa l'8% arrivando quindi ad un fabbisogno energetico di 6930 Ktep nel 2020.

Settore	Fabbisogno finale di energia (Ktep/anno)
<b>Agricoltura</b>	139,7
<b>Industria</b>	3128,0
<b>Civile</b>	2888,1
<b>Trasporti</b>	2830,9
<b>Totale</b>	<b>8986,7</b>

Tabella 13: Fabbisogno finale di energia in Toscana (Ktep) per settore (anno 2003, elaborazione IRPET).

L'altro obiettivo è di soddisfare il 20% del proprio fabbisogno energetico attraverso lo sviluppo e l'impiego delle fonti rinnovabili presenti sul territorio in un'ottica di sostenibilità energetica. Stando a quanto indicato dal PIER 2008, la produzione attuale di energia elettrica da FER locali è di 522,368 Ktep (tab. 14). A questi andrebbero aggiunte le produzioni di energia termica legate all'uso diretto del calore derivante dalle biomasse legnose, dalle sorgenti geotermiche a bassa entalpia e dal solare termico che, non essendo facilmente valutabili non sono computate sebbene il loro contributo, specialmente per le biomasse legnose, sia significativo.

Energia elettrica da FER	Produzione annua (GWh)
Fotovoltaico	0,10
Eolico	3,00
Idroelettrico	456,10
Geotermia	5324,50
Biomasse/biogas	290,40
<b>Totale</b>	<b>6074,10</b>

Tabella 14: Produzione di energia elettrica (GWh) per fonte rinnovabile in Toscana (anno 2005, dati Terna).

Il PIER fornisce anche un quadro dettagliato delle previsioni di sviluppo delle FER al 2020, basato su valutazioni della potenzialità del territorio, delle risorse economiche e delle tecnologie disponibili. Le previsioni stimano che grazie all'attuazione degli interventi proposti, la regione Toscana sarà in grado di giungere a produrre nel 2020 circa 838 Ktep di energia elettrica e 432 Ktep di energia termica da FER (tab.15). Considerando inoltre il contributo dovuto alla tendenza dello scenario base, le stime indicano una produzione originata da FER, raggiungibile al 2020, pari a circa 933 Ktep di energia elettrica e 445 Ktep di energia termica rappresentanti rispettivamente il 39% e il 10% del fabbisogno di elettricità e calore previsto al 2020 (tab.15).

Tipo di energia	FER	Produzione (Ktep/anno)	
Elettrica	Fotovoltaico	17,44	
	Eolico	57,06	
	Idroelettrico	73,67	
	Geotermia	595,91	
	Biomasse	92,12	
	<b>Totale</b>	<b>837,92</b>	
Termica	Biomasse	309,81	
	Solare termico (uso diretto)	35,94	
	Geotermia (uso diretto)	86,06	
	<b>Totale</b>	<b>431,80</b>	
<b>TOTALE</b>		<b>1269,72</b>	
Previsioni al 2020	Fabbisogno Ktep	Produzione da FER Ktep	Produzione da FER/Fabbisogno %
<b>Energia elettrica</b>	2380	933	39
<b>Energia termica</b>	4550	445	10
<b>Energia totale</b>	<b>6930</b>	<b>1378</b>	<b>20</b>

Tabella 15: Prospetto delle previsioni di sviluppo delle FER in Toscana al 2020 con indicazione delle produzioni di energia elettrica e termica. Produzione di energia da fonti rinnovabili nel 2020, ottenibile in base ai normali scenari di sviluppo e agli interventi previsti dal PIER.

Per ciò che riguarda lo sviluppo di FER nel settore dei trasporti, si ritiene che il 2,31% dei carburanti fossili impiegati per auto-trazione possa essere sostituito al 2020 da una quota pari di biocarburanti.

Stando al PIER 2008 infatti, si stima che non oltre il 15% delle superfici a seminativo in Toscana, che ammontano a 540 mila ha, possa essere destinato alle produzioni energetiche, con particolare riguardo alle terre marginali, circa 81000 ha. Dalle superfici disponibili indicate, considerando una produzione media di 0,8 t/ha di biocarburanti per autotrazione, è possibile ottenere 64,8 Ktep/anno che rappresentano il 2,31% del fabbisogno complessivo del settore dei trasporti toscano (2809 Ktep, dati ENEA) e che corrispondono a 207360 t/anno di CO<sub>2</sub> evitata.

Per via delle problematiche sollevate a proposito dell'introduzione di colture energetiche dedicate, in riferimento ai bilanci energetici e di emissione di gas serra, particolare rilievo assume anche nel PIER la possibilità di sfruttare le biomasse residuali, in particolare modo quelle provenienti dal settore agro-forestale. La produzione di biomassa utilizzabile a fini energetici in Toscana infatti è stimata di circa 1090000 t/anno comprensiva di residui forestali, agro-forestali, agricoli e dell'industria del legno.

Presupponendo di aggiungere a tale produzione anche la biomassa ottenibile da piantagioni energetiche dedicate (short rotation forestry), nonché i prelievi legnosi correlati alla manutenzione e coltura dei boschi toscani, il materiale complessivamente impiegabile a fini energetici può essere stimato di 2500000 t/anno di cui 1,09 originato dal recupero dei residui.



**Regione Toscana**

Diritti Valori Innovazione Sostenibilità

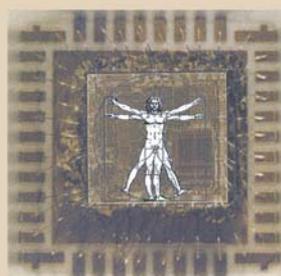


Unione Europea



## SICOTER

Sistema Informativo per l'ottimizzazione del  
COmfort Termico nei luoghi di lavoro e la  
creazione di una filiera per l'uso di  
Energia Rinnovabile nella provincia di Firenze



RICERCA  
TRASFERIMENTO  
INNOVAZIONE

**DOCUP Ob. 2  
Anni 2000-2006**

Misura 2.8 "Azioni a sostegno  
della società dell'informazione"  
Azione 2.8.4. "Potenziamento  
del sistema regionale di servizi  
telematici e di comunicazione  
per le PMI"

## Partner del Progetto SICOTER



La pubblicazione fa parte dei risultati di un progetto finanziato dall'Amministrazione regionale sui Fondi Docup ob.2, anni 2000-2006.



La Regione Toscana non è responsabile dei testi e di quant'altro inserito dagli autori e curatori nella presente pubblicazione.

*Pubblicazione collegata alla Collana:*

**RICERCA TRASFERIMENTO INNOVAZIONE**

Regione Toscana  
Giunta regionale

DG Sviluppo economico  
Settore delle politiche regionali  
dell'innovazione e della ricerca

*Dirigente responsabile:*  
Simone Sorbi

Coordinamento comunicazione ed eventi  
Regione Toscana  
Direzione generale della Presidenza  
Settore Comunicazione istituzionale e pubblicitaria

*Coordinamento scientifico:*  
Simone Orlandini, Marco Mancini, Giampiero Maracchi

# Comfort termico

a cura di Francesca Natali e Martina Petralli

## Introduzione

Il comfort o benessere termico è definito come quella condizione della mente per la quale l'uomo esprime soddisfazione per l'ambiente termico circostante (ASHRAE, 1992), cioè quella condizione in cui l'individuo non desidera avere né più caldo né più freddo (UNI EN ISO 7730, 1996). Secondo la normativa vigente in materia (D.L. 626 del 1994), in un luogo di lavoro deve essere garantita agli operatori una condizione di comfort o benessere termico.

Le relazioni tra condizioni meteorologiche ed ambientali e il corpo umano assumono in quest'ottica un'importanza molto rilevante, ed infatti, negli ultimi 150 anni, sono state studiate per esaminare la percezione del comfort termico. Le interazioni tra variabili ambientali e corpo umano sono molto complesse e comportano una serie di scambi tra l'organismo umano e l'ambiente che lo circonda. Sono stati così sviluppati degli indici biometeorologici, cioè delle formule empiriche che intendono descrivere le condizioni di comfort o discomfort termico di un individuo in relazione alle condizioni ambientali in cui si trova. La condizione di comfort o discomfort termico non dipende solo dal valore assoluto e dalle variazioni di temperatura dell'aria, ma anche da altri parametri meteorologici ed ambientali come l'umidità relativa, la ventilazione, la pressione atmosferica o la radiazione solare: tutti questi fattori hanno, infatti, una forte influenza sulle risposte fisiologiche dell'organismo umano, agendo in particolare sulla percezione della temperatura e sugli scambi di calore che avvengono tra il corpo umano e l'ambiente circostante.

Le condizioni di benessere ambientale risentono anche del tempo che un individuo trascorre in un ambiente e che lo porta ad assuefarsi alle condizioni esistenti, si parla, quindi, di adattamento comportamentale, fisiologico e psicologico. Questo porta a concludere che la sensazione termica di un soggetto è legata, oltre all'insieme delle grandezze fisiche dell'ambiente, anche a caratteristiche soggettive come la produzione di calore metabolico (generalmente legata al tipo e all'intensità dell'attività svolta), allo scambio di energia con l'ambiente (dovuto anche all'isolamento termico del vestiario), alle variazioni fisiologiche (soprattutto quelle relative alla variazione della temperatura media della pelle) ed a altre caratteristiche come da sesso, peso e altezza degli individui.

I primi indici biometeorologici sono stati sviluppati a partire dagli anni '20 (Houghten e Yaglou, 1923; Siple e Passel, 1940; Sharlau, 1950) ed erano rappresentati da formule empiriche che tengono in considerazione solo una o due variabili ambientali, fornendo un'indicazione parziale della percezione termica dell'individuo, in quanto trascurano tutte quelle condizioni soggettive che possono avere delle interazioni con lo scambio di calore che avviene tra l'individuo e l'ambiente. Successivamente sono stati messi a punto dei modelli che descrivono in dettaglio i meccanismi di scambio di calore. Alcuni di questi modelli, basati sul bilancio d'energia del corpo umano, risalgono circa agli anni '70 tra cui, molto studiato e sviluppato è quello di Fanger, il *Predicted Mean Vote* (PMV), nato per descrivere le sensazioni termiche in ambiente *indoor*. Questi modelli, definiti *steady state energy-balance model* o modelli stazionari, sono in grado di stimare la percezione termica in condizioni di regime stazionario, condizioni che nella realtà non si verificano praticamente quasi mai, specialmente in ambiente outdoor. Per questo motivo

sono state fatte sempre maggiori modifiche all'originario PMV e soprattutto sono stati sviluppati modelli molto più complessi, i cosiddetti *non-steady state models* (o modelli multinodo o, anche, dynamical model), che tengono conto di condizioni transienti (Pickup e de Dear, 2000). Questi ultimi, anche se molto più precisi, sono difficilmente applicabili per fini operativi, richiedendo un'ampia varietà di dati e di scenari ed una grande difficoltà di calcolo. Tra i modelli dinamici, alcuni permettono di calcolare non solo il bilancio termico dell'intero corpo umano, ma distinguono anche il comfort di parti distinte come mani, piedi e faccia: utilizzando parametri come l'umidità o il gradiente verticale di temperatura, questi modelli sono in grado di determinare valori di comfort diversi a seconda dell'organo considerato (Olesen e Parsons, 2002). Oltre a questi importanti aspetti, è necessario anche considerare i diversi approcci con cui un soggetto affronta il comfort termico: psicologico, cioè la predisposizione della mente ad esprimere soddisfazione per l'ambiente esterno; termofisiologico, fornito da recettori che si trovano nella pelle e nell'ipotalamo; ed in base al bilancio di calore del corpo umano (Hoppe, 2002).

Secondo quest'ultima definizione, un soggetto raggiunge lo stato di comfort quando i flussi di calore da e verso il corpo sono in equilibrio e la temperatura della pelle varia all'interno di precisi *range*. La temperatura della pelle, che riveste spesso un ruolo fondamentale in biometeorologia, viene calcolata tramite alcuni modelli come il *Munich Energy-Balance Model for Individuals* (MEMI) (Hoppe, 1993) o attraverso modelli di regressione (Mehnert et al., 2000). Questi ultimi hanno lo svantaggio di essere limitati a certi areali climatici e non applicabili ovunque. Dal punto di vista psicologico, risulta determinante l'aspettativa di un soggetto, soprattutto quando ci troviamo in ambienti *outdoor*. Un esempio significativo è fornito da uno studio (Hoppe e Seidl, 1991) condotto su vacanzieri in spiaggia: le persone intervistate dichiararono di trovarsi in una situazione di benessere quando le temperature assumevano valori molto superiori a quelli del *range* di comfort. Questo è riconducibile proprio alle aspettative dei soggetti che, sulle spiagge, preferiscono condizioni termiche molto calde.

A livello mondiale, il problema del risparmio energetico e del comfort negli ambienti indoor sta assumendo una importanza sempre maggiore, anche perché la maggior parte della popolazione trascorre l'80-90% del proprio tempo all'interno di edifici chiusi, utilizzando gli impianti di riscaldamento e condizionamento per raggiungere i livelli di comfort. In quest'ottica, i modelli stazionari, con le opportune modifiche, grazie alla loro relativa semplicità, possono avere un ruolo fondamentale nell'informazione giornaliera della popolazione in merito a situazioni biometeorologiche stressanti per l'organismo umano a causa delle condizioni termiche, fornendo consigli di tipo comportamentale, come il tipo di vestiario più adatto da indossare nei vari momenti della giornata o sul tipo e sull'intensità dell'attività da svolgere; altre applicazioni delle previsioni biometeorologiche basate su indici biometeorologici si possono avere nella pianificazione urbana e nella progettazione degli spazi esterni, nella programmazione di attività ricreative all'aperto, nello sviluppo di mappe biometeorologiche, negli studi epidemiologici e sull'impatto del clima o del tempo atmosferico sulla salute umana.

Tutte queste informazioni, inoltre, possono avere un ruolo fondamentale nell'ottica del risparmio energetico: ad esempio, in base alle condizioni termiche previste in una giornata ed adottando l'abbigliamento adeguato suggerito per mantenersi in condizioni di comfort termico negli ambienti di lavoro, è possibile limitare l'uso di apparecchiature elettriche come il condizionatore.

## I parametri oggettivi per il calcolo del comfort termico

Il comfort termico, come si è visto, è strettamente dipendente da una serie di fattori meteorologici ed ambientali che condizionano gli scambi energetici che avvengono tra l'organismo umano e l'ambiente che lo circonda. Tra i fattori ambientali utilizzati per il calcolo del comfort termico, ha un ruolo fondamentale la temperatura dell'aria ( $T_a$ ): questa, può essere misurata con differenti tipologie di termometri, come termometri ad espansione, a resistenza o a termocoppia. E' il parametro più comunemente utilizzato per descrivere lo stato termico di un determinato ambiente e consente di valutare numericamente le comuni sensazioni di caldo e freddo. Essa costituisce quindi il modo più semplice, ma anche più facilmente comprensibile, per giudicare l'accettabilità o meno di un certo ambiente microclimatico. La temperatura dell'aria a bulbo umido a ventilazione naturale ( $T_n$ ) è, invece, la temperatura misurata da un bulbo ricoperto da un tessuto di cotone inumidito con acqua distillata a temperatura ambiente, non soggetta a irraggiamento termico, che risente della ventilazione naturale dell'ambiente. Con questo strumento si rileva un parametro che consente di rilevare il calore latente di evaporazione simulando l'effetto percepito dal corpo umano sottoposto all'evaporazione del sudore.

Un parametro molto utilizzato negli indici biometeorologici per il calcolo del comfort termico è, poi, la temperatura globotermometrica ( $T_g$ ), misurata mediante il globotermometro di Vernon (fig. 11).



Figura 11: Globotermometro di Vernon utilizzato per il calcolo della Temperatura media radiante.

Esso viene utilizzato per la misura della temperatura media radiante ( $t_{mr}$ ), definita come la media ponderata del calore emesso dalle pareti e dagli oggetti presenti nell'ambiente studiato. Lo strumento consiste di una sfera di rame dipinta di nero opaco al

cui centro è posto un sensore termometrico. Il globotermometro classico ha un diametro di 15 cm: l'utilizzo di globotermometri di diametro inferiore dà luogo a risultati meno accurati. L'utilizzo della temperatura media radiante ai fini di valutarne l'effetto sull'uomo può dar da luogo a risultati approssimativi a causa della differenza di forma dello strumento rispetto all'organismo umano. In particolare, le radiazioni provenienti dal soffitto e dal pavimento vengono sovrastimate dallo strumento. Per il calcolo della  $t_{mr}$ , Matzarakis (2002) propone l'applicazione del modello Rayman (Mayer e Matzarakis, 2000), correlando il valore di temperatura media radiante con un altro indice di temperatura indicatrice del comfort, il PET (Physiological Equilibrium Temperature) all'interno di edifici urbani (Hoppe e Mayer, 1987; Hoppe, 1999; Gulyás et al., 2006).

Altro fattore meteorologico che entra in gioco nel calcolo del comfort termico è la velocità dell'aria, che può essere misurata con anemometri a paletta, utili però solo nel caso di presenza di correnti d'aria unidirezionali; più frequentemente viene misurata con l'anemometro a filo caldo che è caratterizzato da tempi di risposta molto brevi e che è in grado di apprezzare le oscillazioni della velocità dell'aria sempre presenti negli ambienti di lavoro. Va segnalato che se la temperatura del filo caldo è troppo elevata, i moti di naturale convezione dell'aria che si generano possono introdurre margini d'errore quando la velocità dell'aria nell'ambiente è bassa.

Infine, un ulteriore fattore meteorologico che gioca un ruolo fondamentale nel calcolo del comfort termico negli ambienti *indoor* è l'umidità dell'aria, che può essere espressa in termini assoluti o relativi. Generalmente viene utilizzata l'umidità relativa (RH), espressa in percentuale, che rappresenta il rapporto tra la pressione parziale del vapor d'acqua presente nell'aria e la pressione massima realizzabile a quella determinata temperatura. Lo strumento più comunemente utilizzato per la misura dell'umidità relativa è l'igrometro.

## I parametri soggettivi per il calcolo del comfort termico

Per quanto riguarda i parametri soggettivi, cioè quei parametri che dipendono dalle caratteristiche dei singoli individui, sono due ad avere il maggior peso nello scambio di calore tra il corpo umano e l'ambiente esterno e sono, quindi, quelli che influenzano in modo maggiore il calcolo del comfort termico.

Il primo è rappresentato dalla produzione di calore metabolico: questo, espresso in  $\text{Kcal h}^{-1}$  ( $1 \text{ Kcal h}^{-1} = 1,163 \text{ Watt}$ ), esprime la potenza media oraria erogata da un soggetto durante un'attività fisica o lavorativa e dipende da tutta una serie di caratteristiche soggettive dell'individuo, come età, sesso, peso ed altezza. Come unità di misura è molto più semplice l'utilizzo del  $\text{met}$  ( $1 \text{ met} = 58,15 \text{ Watt m}^{-2}$ ) con cui si esprime la potenza totale media erogata da un individuo durante un'attività lavorativa divisa per la superficie corporea dell'individuo. In tabella 16 sono riportati i valori di attività metabolica espressi in  $\text{Kcal h}^{-1}$ ,  $\text{Watt m}^{-2}$  ed in  $\text{met}$  per diverse attività svolte da un soggetto standard (un uomo di 35 anni di età, 85 Kg di peso e 1,80 m di altezza).

L'altro parametro soggettivo è la resistenza termica del vestiario, cioè la resistenza al flusso di calore che dal corpo si disperde nell'ambiente opposta dai vestiti e dallo strato di aria presente tra i vestiti e la pelle. Nel sistema internazionale (SI) la resistenza termica del vestiario si esprime in  $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$ , ma più spesso viene utilizzata un'altra unità di misura, il clo, che corrisponde a  $0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$ .

<b>Attività</b>	<b>MET</b>	<b>WATT/m<sup>2</sup></b>	<b>Kcal/h</b>
Sdraiato, a riposo	0,8	47	73
Seduto, a riposo	1	58	90
Attività sedentaria (ufficio, abitazione, laboratorio, scuola)	1,2	70	108
In piedi, a riposo	1,2	70	108
Attività leggera, in piedi (laboratorio, industria leggera)	1,6	93	145
Attività media, in piedi (vendita, lavoro domestico, lavoro su macchinari)	2	117	182
Attività pesante (lavoro pesante su macchinari, garage)	3	175	271

Tabella 16: Valori di riferimento in met, Watt m<sup>-2</sup> e Kcal h<sup>-1</sup> per diverse tipologie di attività per un soggetto standard (ISO 7730).

La resistenza termica dell'abbigliamento dipende soprattutto dallo spessore e dalla porosità di ogni singolo capo. Con la ISO 11079 (2001) viene introdotta una nuova grandezza: l'IREQ - Required Clothing Insulation, valido per ambienti freddi. In tabella 17 sono riportati alcuni esempi di resistenza termica del vestiario per diverse tipologie di vestiario.

<b>Tipologia di vestiario</b>	<b>Resistenza termica del vestiario (Clo)</b>
Nudità	0
Calzoncini corti	0,2
Calzoncini corti e maglietta estiva	0,5
Insieme di capi leggeri	0,7
Completo invernale da interni	1
Completo invernale	1,5
Completo invernale da esterno	2
Completo invernale da esterno molto pesante	3

Tabella 17: Valori di resistenza termica del vestiario espressi in clo per diverse tipologie di abbigliamento (ISO 11079).

## **Indici e modelli biometeorologici per il calcolo del comfort termico**

A livello internazionale sono numerosi gli indici e modelli biometeorologici utilizzati per il calcolo del benessere termico negli ambienti interni. Questi sono generalmente formulati analizzando le risposte fisiologiche o di sensazione di un gran numero di soggetti sottoposto a prove sperimentali che prevedono l'utilizzo di camere climatiche all'interno delle quali sono riprodotte specifiche condizioni ambientali. Gli

indici ed i modelli di confort si dividono in due categorie: indici e modelli di temperatura ed indici e modelli di sensazione.

I primi esprimono la sensazione termica dei soggetti riferendosi a temperature equivalenti, cioè a temperature di ambienti fittizi in cui un individuo prova la stessa sensazione termica che proverebbe nell'ambiente reale. Questi indici si dividono a loro volta in empirici, ricavati cioè sperimentalmente dalle sensazioni provate soggettivamente da gruppi di individui sottoposti alle stesse condizioni microclimatiche, e in razionali, ricavati cioè dall'equazione di equilibrio termico del corpo umano.

Tra gli indici empirici rientra la Temperatura Efficace o *Effective Temperature* (ET): essa viene definita come la temperatura di un ambiente fittizio, con temperatura dell'aria pari alla temperatura media radiante, velocità dell'aria di  $0,12 \text{ m s}^{-1}$  ed umidità relativa del 100%, nel quale un soggetto prova la stessa sensazione termica dell'ambiente reale (Houghten e Yaglou, 1923). L'indice ET presenta alcuni limiti, il principale dei quali è che è stato ricavato dalle sensazioni che gli individui manifestavano nel passaggio dall'ambiente reale a quello fittizio, trascurando l'acclimatazione dell'organismo, oltre al fatto di essere stato studiato per la sola attività del camminare. Per ovviare a questi limiti, è stato elaborato un nuovo indice, il *New Effective Temperature* (ET\*), definito come la temperatura di un ambiente fittizio con temperatura dell'aria pari alla temperatura media radiante, umidità relativa del 50% e velocità dell'aria pari a quella che si ha nell'ambiente reale, nel quale un soggetto scambierebbe attraverso la pelle la stessa quantità di calore che scambia nell'ambiente reale, avendo la stessa temperatura della pelle e la stessa percentuale di pelle bagnata (Gagge et al., 1971). Si tratta di un indice razionale in quanto ricavato dall'equazione di bilancio del corpo umano. (Nishi et al., 1977).

Un indice analogo al precedente è la Temperatura Operativa Umida, cioè la temperatura di un ambiente uniforme con umidità relativa pari al 100% in cui un soggetto disperde attraverso la pelle lo stesso calore che scambierebbe nell'ambiente reale (Nishi e Ibamoto, 1969).

Uno degli indici di relazione più utilizzati è il WBGT (*Wet Bulb Globe Temperature*) utilizzato per la determinazione dello stress termico in ambienti caldi come fonderie, industrie meccaniche, etc (norma ISO 7243). Questo indice prende in considerazione le grandezze soggettive di vestiario e attività, che concorrono a determinare la situazione termica di un soggetto. L'indice WBGT, espresso in gradi centigradi, rappresenta il valore, in relazione al dispendio metabolico associato ad una particolare attività lavorativa, oltre il quale il soggetto si trova in una situazione di stress termico.

$$\text{WBGT} = 0,7 t_n + 0,3 t_g$$

Dove:

- $t_n$  = temperatura del bulbo umido a ventilazione naturale;
- $t_g$  = temperatura del globotermometro.

In base ai valori assunti dall'indice WBGT, l'ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*) propone dei limiti all'attività lavorativa (TLV: *Threshold Limit Values*): ad esempio, per un valore di WBGT pari a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , con un carico di lavoro leggero l'attività lavorativa in un'ora può essere continuativa, mentre per un carico di lavoro pesante, è necessario riposarsi per il 75% del tempo e lavorare soltanto per il restante 25%, come riportato in tabella 18.

Percentuale oraria di lavoro/riposo	Valori di WBGT (C°)		
	Lavoro leggero	Lavoro moderato	Lavoro pesante
Lavoro continuativo (100% lavoro)	30,0	26,7	25,0
75% Lavoro / 25% Riposo	30,6	28,0	25,9
50% Lavoro / 50% Riposo	31,4	29,4	27,9
25% Lavoro / 75% Riposo	32,2	31,1	30,0

Tabella 18: Percentuale oraria di tempo da dedicare al lavoro o al riposo in base al carico di lavoro ed ai valori di WBGT espressi in °C.

Esiste, poi, l'*Heat Stress Index* (HSI), altro indice razionale di stress termico utilizzato in ambienti caldi che deriva dall'equazione del bilancio calorico ( $E_{req}$ ) per un uomo al lavoro (tab. 19):

$$E_{req} = M + C + R$$

Dove:

- $E_{req}$  = valore di potenza termica ceduta per sudorazione necessaria affinché il bilancio termico sia in equilibrio
- R = contributi calorici radianti
- C = contributi convettivi
- M = dispendio energetico connesso al tipo di lavoro

La somma di tali contributi calorici esprime l'energia da disperdere nell'ambiente da parte del lavoratore, mediante il meccanismo della sudorazione. Tale energia è rapportata all'energia massima che si può disperdere in quel determinato tipo di ambiente. Per comodità il risultato del rapporto è moltiplicato per cento. Valori superiori al 100% comportano l'introduzione di pause lavorative orarie. Tuttavia già a partire da valori superiori all'80% la risposta termoregolatoria da parte degli addetti al lavoro risulta essere più severa e comporta l'adozione di particolari precauzioni per assicurare un adeguato assorbimento di acqua e sali minerali da parte del lavoratore.

INDICE HSI (°C)	IMPLICAZIONI FISILOGICHE PER ESPOSIZIONE DI 8 ORE
0	Assenza di "affaticamento" calorico
1 30	Lieve e moderato "affaticamento" calorico
31 60	Severo "affaticamento" calorico che comporta una minaccia alla salute se l'uomo non è fisicamente sano
61 90	"Affaticamento" calorico molto grave. Solo una piccola percentuale della popolazione è idonea a questa attività
91 100	Massimo "affaticamento" tollerabile da un individuo giovane ed acclimatato
> 100	Tempo di esposizione limitato. Aumento della temperatura interna corporea

Tabella 19: Livelli di HSI e corrispondenti implicazioni metaboliche per esposizioni di 8 ore.

Gli indici di sensazione, invece, rappresentano la votazione media manifestata da un gran numero di soggetti sottoposti ad un medesimo microclima in base ad una scala di sensazione termica. I principali indici di sensazione utilizzati a livello internazionale sono quelli introdotti da Fanger nel 1970, il *Predicted Mean Vote* (PMV) e il *Percentage of People Dissatisfied* (PPD), che verranno descritti più in dettaglio nel capitolo seguente.

## Il metodo Fanger

Dalla normativa italiana vigente in materia emerge che il modello biometeorologico più usato per la valutazione del comfort termico in ambienti moderati è quello che utilizza il metodo Fanger (1970). Il PMV è un indice che rappresenta la votazione media della sensazione termica provata da un gran numero di soggetti sottoposti ad un medesimo microclima e parte dal presupposto che la condizione di benessere termico si ottenga quando il bilancio termico sia in equilibrio. Questo metodo è stato sviluppato sottoponendo un gran numero di soggetti alle stesse condizioni microclimatiche per diverse condizioni di attività e di livello di vestiario. La sensazione termica percepita veniva poi espressa sulla base di una scala predefinita, tra - 3 (molto freddo) a + 3 (molto caldo) in cui il valore 0 era posto come punto di riferimento per indicare la condizione di benessere (tab. 20).

PMV	VALUTAZIONE AMBIENTE TERMICO
3	Molto caldo
2	Caldo
1	Leggermente caldo
0	Benessere /Neutrale
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Tabella 20: Scala di valori del PMV e valutazioni termiche corrispondenti.

Confrontando i risultati ottenuti in esperimenti condotti su individui statunitensi e danesi è emerso che non vi sono significative differenze tra le sensazioni termiche espresse, per cui sembra possibile affermare che la nazionalità e la collocazione geografica, almeno per quanto riguarda le zone temperate, non influenzino apprezzabilmente la sensazione termica.

Il metodo di Fanger permette, per ogni tipo di abbigliamento espresso in clo e di attività svolta espressa in  $Wm^{-2}$  o in met, di calcolare le combinazioni di temperatura dell'aria ( $^{\circ}C$ ), velocità del vento ( $m s^{-1}$ ) e umidità relativa (%) che realizzano il benessere termico di determinati tipi di soggetti.

Per il calcolo del PMV è possibile utilizzare una formula empirica, che deriva dal bilancio di energia del corpo umano. Sono numerose le variabili che rientrano nella formula del bilancio di energia del corpo umano (S), ma la più utilizzata è la seguente:

$$S = M - W - Cres - Eres - C - R - K - E$$

Dove:

S = variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo (W);

M = metabolismo energetico (W);

W = potenza meccanica che il corpo umano cede all'ambiente (W);

$E_{res}$  = potenza termica dispersa nella respirazione come "calore latente" (W);  
 $C_{res}$  = potenza termica dispersa nella respirazione come "calore sensibile" (W);  
 $C$  = potenza termica dispersa per convezione (W);  
 $R$  = potenza termica dispersa per irraggiamento (W);  
 $K$  = potenza termica dispersa per conduzione (W);  
 $E$  = potenza termica dispersa per evaporazione dalla pelle (W).

Quando è soddisfatta l'equazione del bilancio di energia, cioè quando  $S = 0$ , non si verificano aumenti o diminuzioni della temperatura corporea in quanto la quantità di energia prodotta all'interno del corpo con il metabolismo è pari a quella ceduta dal corpo all'ambiente. La formula per il calcolo del PMV prevede l'utilizzo della formula del bilancio di energia del corpo umano, ed è la seguente, dove  $S$  ed  $M$  sono le stesse variabili che appaiono nella formula del bilancio di energia:

$$PMV = [0,0303 \exp(-0,036 M) + 0,028] S$$

Al PMV è legato un secondo indice, il PPD, che quantifica percentualmente i soggetti comunque "insoddisfatti" rispetto alla sensazione descritta, la cui formula empirica è la seguente:

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2)$$

Più il valore dell'indice PMV si avvicina alla neutralità, più il valore del PPD è basso, cioè minore è il numero di persone che non si reputa soddisfatta del valore di PMV assegnato a quelle condizioni microclimatiche, anche se non scende mai al di sotto del 5%. Tra valori di PMV compresi tra -0,5 e +0,5 (che corrisponde all'intervallo più vicino alla condizione di benessere) corrisponde una percentuale di insoddisfatti delle condizioni termiche inferiore al 10% (fig. 12). È proprio l'intervallo compreso tra -0,5 e +0,5 quello raccomandato dalla norma UNI 7730.

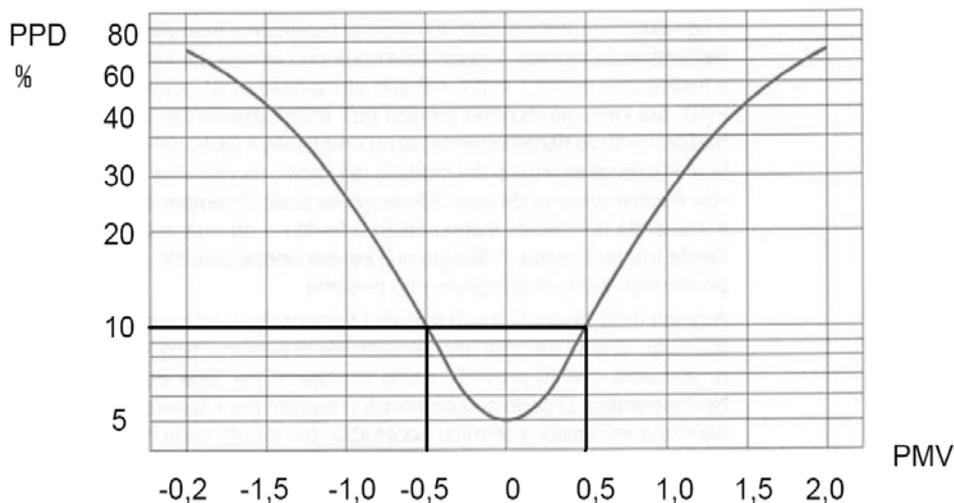


Figura 12: Valori del PPD in funzione del PMV.

È possibile determinare le condizioni di benessere secondo il criterio di Fanger anche in modo grafico, utilizzando una serie di diagrammi costruiti rispetto ad una qualunque delle variabili utilizzate per il calcolo del PMV. Ad esempio, in figura 13 è riportato un diagramma in cui, per un assegnato livello di attività (1 met) e di resistenza termica dell'abbigliamento (0,5 clo), si possono valutare le condizioni di benessere al variare dell'umidità relativa (UR), della velocità dell'aria ( $v_{ar}$ ) e della temperatura dell'aria ( $t_a$ ), supponendo la temperatura media radiante uguale a quella di bulbo bagnato ed alla temperatura dell'aria o di bulbo asciutto.

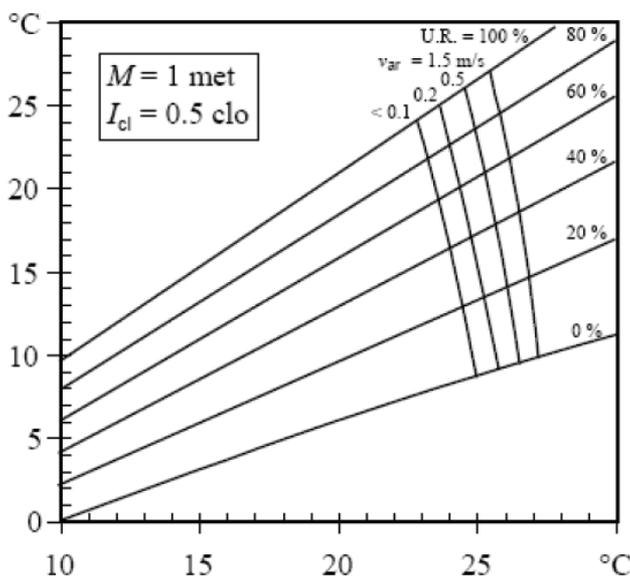


Figura 13: Correlazione tra temperatura ambiente e umidità relativa, per ottenere condizioni di benessere, mantenendo costante la velocità dell'aria ( $1,5 \text{ ms}^{-1}$ ), l'attività metabolica (1 met) e la resistenza termica del vestiario (0,5 clo).

Un altro parametro molto significativo per lo studio del benessere negli ambienti interni è la temperatura operativa ( $T_0$ ): questa viene definita come la media tra temperatura media radiante ( $t_{mr}$ ) e temperatura dell'aria ( $t_a$ ), ciascuna pesata con il rispettivo coefficiente di scambio termico:

$$T_0 = (h_r t_{mr} + h_c t_a) / (h_r + h_c)$$

dove:

$h_c$  = coefficiente di scambio per convezione ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )

$h_r$  = coefficiente di scambio per radiazione ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )

La  $T_0$  viene spesso utilizzata per realizzare un diagramma che consenta di valutare gli scostamenti dei parametri ambientali dai valori di benessere, in relazione al valore di PMV richiesto dalla normativa, cioè accettando una percentuale di insoddisfatti pari al 10%, cui corrisponde dunque un PMV di  $\pm 0,5$ . Ne deriva il grafico riportato in figura 14, che consente, appunto, di determinare lo scostamento ammissibile per la temperatura operativa rispetto al valore di benessere, riportato in ordinate. Le curve a tratto continuo rappresentano le condizioni ottimali di benessere; quelle tratteggiate indicano lo

scostamento possibile della temperatura operativa ( $T_0$ ) dal valore ottimale nella zona accettabile per il benessere ( $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$ ).

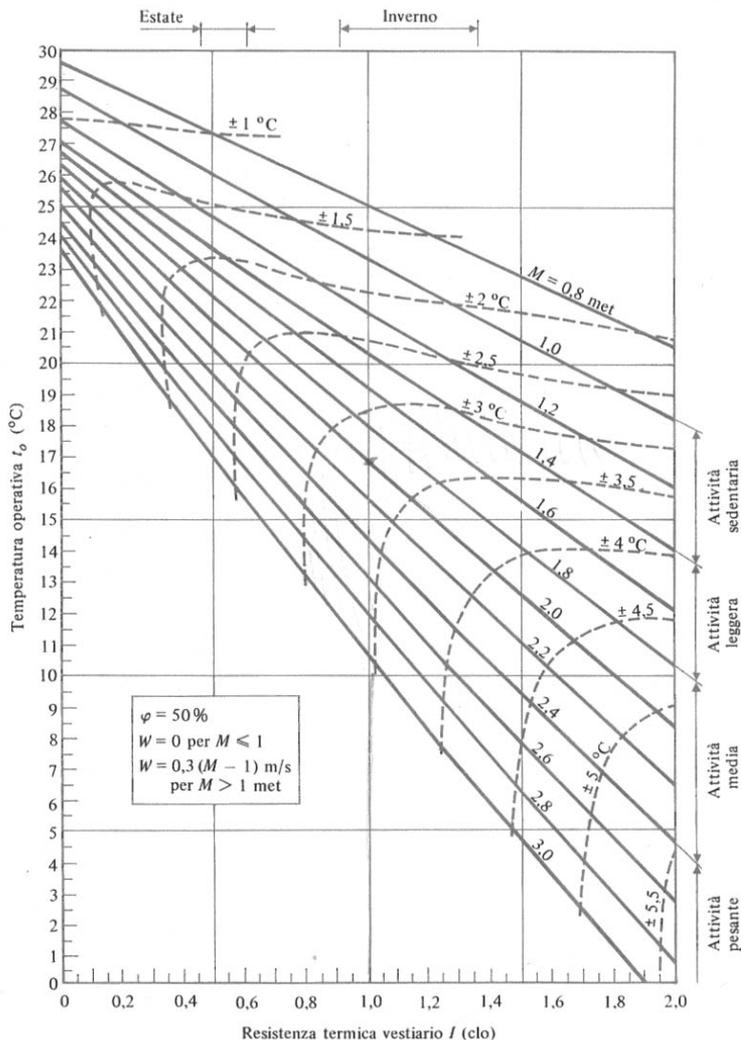


Figura 14: Diagramma del benessere termico, tracciato secondo la teoria di Fanger.

Un indice biometeorologico molto utilizzato nel campo della biometeorologia umana e strettamente legato al PMV è il *Physiological Equivalent Temperature* (PET), un indice fisiologico universale che deriva dall'equilibrio tra l'ambiente e il corpo umano (Hoppe, 1999). Rispetto al PMV, questo indice mostra il vantaggio di essere espresso in °C e di risultare, quindi, più facilmente comprensibile ad una parte più ampia di popolazione. Alla luce di questo, Matzarakis e Mayer (1996) misero in relazione i valori del PMV con un range di valori di PET e fornirono, per determinati valori di attività metabolica (80 W) e di resistenza termica del vestiario (0,9 clo), sia la percezione termica che lo stress fisiologico (Fanger, 1972; Mayer, 1993), come riportato in tabella 21.

PMV	PET °C	Thermal perception	Grade of physiological stress
		Very cold	Extreme cold stress
3,5	4		
		Cold	Strong cold stress
2,5	8		
		Cool	Moderate cold stress
1,5	13		
		Slightly cool	Slight cold stress
0,5	18		
		Comfortable	No thermal stress
0,5	23		
		Slightly warm	Slight heat stress
1,5	29		
		Warm	Moderate heat stress
2,5	35		
		Hot	Strong heat stress
3,5	41		
		Very hot	Extreme heat stress

Tabella 21: Valori di PET in funzione del PMV per un soggetto standard con attività metabolica pari a 80 W e resistenza termica del vestiario pari a 0,9 clo.

Il valore del PMV può essere stimato attraverso l'uso di numerosi programmi: uno comunemente usato a livello internazionale è il modello Rayman, elaborato da Matzarakis. Si tratta di un modello che riprende la definizione di Fanger e rientra negli *steady state model*, modelli creati per situazioni stazionarie, in ambienti *indoor*, che viene esteso anche per ambienti *outdoor* (Matzarakis et al., 2007) compiendo delle approssimazioni. Sono stati condotti studi per analizzare la sensibilità del modello RayMan nel calcolo del PMV al variare delle condizioni meteorologiche, dell'attività e del tipo di vestiario (Petralli et al., 2005), notando che questo modello offre il vantaggio di essere relativamente semplice da utilizzare, di fornire *output* comprensibili anche per chi non è nel settore e di essere applicabile in ambienti con caratteristiche climatiche diverse. Sono stati riscontrati, comunque, alcuni limiti nel suo utilizzo soprattutto legati al fatto che il modello non prende in considerazione i meccanismi di acclimatazione del corpo umano.

## Il discomfort locale

L'equazione di Fanger e gli indici PMV e PPD consentono di valutare le condizioni generali di comfort per un soggetto che si trovi in un ambiente confinato. Essi sono utili per la valutazione del comfort globale, cioè lo stato di benessere individuato dai valori medi delle variabili ambientali.

Tuttavia, si può verificare che un soggetto non sia soddisfatto riguardo all'ambiente circostante anche quando il valore generale delle variabili ambientali indichi una condizione di comfort termico; questo può essere dovuto ad una distribuzione non uniforme delle variabili ambientali che conducono a una situazione di *discomfort* locale e che dipendono generalmente da una asimmetria nella distribuzione della temperatura tra le diverse parti del corpo. Le principali cause del *discomfort* locale sono:

- Elevata differenza verticale di temperatura: può esistere una differenza di temperatura tra l'aria che si trova nella parte alta della stanza (verso il soffitto) e quella nella parte

bassa della stanza (sul pavimento), tanto da registrare una significativa differenza di temperatura tra la testa e le caviglie del soggetto.

- Pavimento troppo freddo o troppo caldo: questa sensazione termica è funzione del tempo di esposizione e cambia con il tipo di calzatura indossata (invernale, estiva, traspirante, ecc...). Per il calcolo del *discomfort* locale legato a questo tipo di causa, vengono utilizzati dei diagrammi che mettono in relazione la percentuale di insoddisfatti e la temperatura del pavimento (Olesen, 1977).
- Correnti d'aria: esse provocano un raffreddamento locale indesiderato del corpo. Il disagio provocato dipende anche dalla temperatura della corrente d'aria, dalla sua differenza rispetto alla temperatura dell'aria nell'ambiente, dalla zona del corpo che viene investita dalla corrente e dall'attività dell'individuo. In funzione dell'intensità di turbolenza, della velocità media della corrente d'aria e della temperatura dell'aria, Fanger ha costruito un modello che consente di ottenere la percentuale di persone insoddisfatte (Fanger et al., 1989).
- Elevata asimmetria radiante: l'asimmetria della temperatura media radiante ( $t_{mr}$ ) dipende dalle fonti di calore che si hanno nella stanza (caloriferi, computer) e la sensazione di disagio nasce dal fatto che le diverse parti del corpo sono esposte a fonti di calore diverse per cui risultano avere temperature non uniformi.

L'importanza del discomfort locale ha determinato una revisione nelle leggi ISO 7730 e ASHRAE 55.

## Normativa

Sono numerose le normative tecniche (tab. 22) e la legislazione nazionale (tab. 23) che si occupano di comfort termico negli ambienti di lavoro. Di seguito viene riportato un elenco delle principali norme con alcune descrizioni degli argomenti da esse trattate.

NORMA ISO	TITOLO
UNI EN 13731	Ergonomia degli ambienti termici - vocabolario e simboli
UNI EN 12515	Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sudorazione richiesta
UNI EN 27243	Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT
UNI EN 7730	Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifiche per le condizioni di benessere termico
UNI ENV 11079	Valutazione degli ambienti freddi. Determinazione dell'isolamento richiesto dagli indumenti (IREQ)
UNI EN 8996	Determinazione del metabolismo energetico
UNI EN 7726	Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche
UNI EN 9920	Valutazione isolamento termico e resistenza evaporativa dell'abbigliamento
UNI EN 9886	Valutazione degli effetti termici mediante misurazioni fisiologiche
UNI EN 10551	Valutazione dell'influenza degli ambienti termici con scale soggettive
UNI EN 12894	Supervisione medica persone esposte ad ambienti molto caldi o freddi
UNI EN 15265	Strategia di valutazione del rischio per la prevenzione dello stress o del disagio termico in condizioni di lavoro

Tabella 22: Esempi di normativa tecnica sul comfort termico.

<b>NORMATIVA NAZIONALE</b>	
Normativa	Descrizione
Codice civile (art. 2087)	Obbligo per il datore di lavoro di "adottare le misure che, secondo la particolarità del lavoro, l'esperienza e la tecnica sono necessarie a tutelare l'integrità fisica e la personalità morale dei lavoratori"
Legge 864/70	Comfort negli ambienti di lavoro: nei locali utilizzati dai lavoratori deve essere mantenuta la temperatura più confortevole e più stabile possibile in relazione alle circostanze lavorative
Direttiva CEE 89/654	Temperature negli ambienti di lavoro: La temperatura dei locali di lavoro dev'essere adeguata all'organismo umano durante il tempo di lavoro, tenuto conto dei metodi di lavoro applicati e degli sforzi fisici imposti ai lavoratori
DL 277/91	Accorgimenti per gli ambienti di lavoro: Per $T > 26^{\circ}\text{C}$ : U.R. Max 60%; Garantire circolazione aria fresca; Limitare esposizione in ambienti caldi Per $T < 18^{\circ}\text{C}$ : Dotare i lavoratori di DPI; Assegnare periodi di riposo in locali con temperature miti Per $18^{\circ}\text{C} < T < 26^{\circ}\text{C}$ ; UR% ~50%; Isolare/scherm. sup. calde/fredde;
Direttiva CEE 92/104	Aerazione nei luoghi di lavoro: nei luoghi di lavoro chiusi occorre provvedere affinché, in relazione ai metodi di lavoro in uso ed all'entità delle sollecitazioni fisiche a carico dei lavoratori, questi ultimi dispongano di sufficiente aria fresca
DL 626/94	Caratteristiche dei luoghi di lavoro (è vietato adibire a lavori continuativi i locali chiusi senza: •buona difesa contro gli agenti atmosferici •isolamento termico sufficiente •aperture sufficienti per un rapido ricambio d'aria • ben asciutti e ben difesi contro l'umidità); Qualità dell'aria nei luoghi di lavoro; Temperatura nei luoghi di lavoro e di riposo (la temperatura nei locali di lavoro deve essere adeguata all'organismo umano durante il tempo di lavoro, tenuto conto dei metodi di lavoro applicati e degli sforzi fisici imposti ai lavoratori; nel giudizio sulla temperatura adeguata per i lavoratori si deve tener conto dell'influenza che possono esercitare sopra di esso il grado di umidità ed il movimento dell'aria concomitanti; la temperatura dei locali di riposo, dei locali per il personale di sorveglianza, dei servizi igienici, delle mense e dei locali di pronto soccorso deve essere conforme alla destinazione specifica di questi locali).

Tabella 23: Esempi di normativa nazionale sul comfort termico.



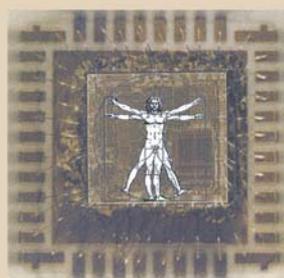
**Regione Toscana**

Diritti Valori Innovazione Sostenibilità



## SICOTER

Sistema Informativo per l'ottimizzazione del  
COmfort Termico nei luoghi di lavoro e la  
creazione di una filiera per l'uso di  
Energia Rinnovabile nella provincia di Firenze



RICERCA  
TRASFERIMENTO  
INNOVAZIONE

**DOCUP Ob. 2**  
**Anni 2000-2006**

Misura 2.8 "Azioni a sostegno  
della società dell'informazione"  
Azione 2.8.4. "Potenziamento  
del sistema regionale di servizi  
telematici e di comunicazione  
per le PMI"

## Partner del Progetto SICOTER



La pubblicazione fa parte dei risultati di un progetto finanziato dall'Amministrazione regionale sui Fondi Docup ob.2, anni 2000-2006.



La Regione Toscana non è responsabile dei testi e di quant'altro inserito dagli autori e curatori nella presente pubblicazione.

*Pubblicazione collegata alla Collana:*

**RICERCA TRASFERIMENTO INNOVAZIONE**

Regione Toscana  
Giunta regionale

DG Sviluppo economico  
Settore delle politiche regionali  
dell'innovazione e della ricerca

*Dirigente responsabile:*  
Simone Sorbi

Coordinamento comunicazione ed eventi  
Regione Toscana  
Direzione generale della Presidenza  
Settore Comunicazione istituzionale e pubblicitaria

*Coordinamento scientifico:*  
Simone Orlandini, Marco Mancini, Giampiero Maracchi

# Comfort termico, condizionamento dei luoghi di lavoro e risparmio energetico

a cura di Martina Petralli, Luciano Massetti, Valerio Capecechi, Giorgio Bartolini

## Comfort termico e consumi energetici legati al condizionamento nei luoghi di lavoro

Nei luoghi di lavoro, secondo la normativa vigente in materia (norme UNI-ISO), negli ambienti di lavoro devono essere mantenute le condizioni di benessere termico. Il benessere (o comfort) termico è definito come quella condizione della mente per la quale l'uomo esprime soddisfazione rispetto all'ambiente termico in cui si trova. Il benessere termofisiologico può essere calcolato attraverso l'applicazione di varie metodologie: le più semplici prevedono la descrizione dell'ambiente termico in termini di temperatura dell'aria, fornendo, cioè, alcuni *range* di temperatura che devono essere mantenuti nei luoghi di lavoro. Altri, più completi, prevedono l'applicazione di alcuni indici e modelli biometeorologici, che descrivono i complessi scambi che avvengono tra il corpo umano e l'ambiente esterno. La sensazione termica di un soggetto è legata, infatti, oltre che all'insieme delle grandezze fisiche dell'ambiente (come temperatura dell'aria, velocità del vento, umidità relativa e temperatura media radiante), a caratteristiche soggettive come la produzione di calore metabolico (generalmente legata al tipo e all'intensità dell'attività svolta), alla resistenza termica del vestiario (misurata attraverso un indice di abbigliamento espresso in *clo*, che si calcola tramite tabelle o modelli) ed a caratteristiche fisiologiche quali età, sesso, peso e altezza.

Durante i mesi invernali ed i mesi estivi, il consumo di energia per portare la temperatura percepita nell'ambiente di lavoro nel *range* del benessere descritto dal modello biometeorologico del PMV sarà maggiore rispetto agli altri mesi dell'anno, in quanto in queste due stagioni si hanno condizioni ambientali negli ambienti esterni (e quindi anche all'interno degli edifici) più lontane dalle condizioni di benessere termico. In queste stagioni, però, è anche difficile limitare l'uso del riscaldamento o del condizionatore in quanto le temperature si discostano notevolmente da quelle definite di comfort, mentre nelle stagioni intermedie (primavera ed autunno) è possibile cercare di limitare maggiormente l'uso di questi apparecchi.

L'aspetto energetico è di fondamentale importanza per il funzionamento della nostra società e allo stesso tempo è materia molto dibattuta per l'influenza che la produzione ed il consumo di energia hanno sul clima. La tendenza a puntare sul sempre maggior impiego di fonti rinnovabili di energia alternative rispetto agli idrocarburi è stata promossa dalla necessità di ridurre la dipendenza dei paesi occidentali da tutte le fonti energetiche derivate dal petrolio, ma l'impulso maggiore è dovuto all'attenzione posta al cambiamento climatico. Gran parte dell'energia utilizzata, infatti, deriva dal petrolio e la sua combustione produce emissioni di gas serra che alterano significativamente la concentrazione di questi gas in atmosfera portando ad un incremento dell'effetto serra con la conseguente alterazione del clima, il cui effetto principale è un progressivo riscaldamento a livello globale. Le conseguenze di un cambiamento climatico intenso, quale il trend di circa 0,75°C registrato negli ultimi 100 anni e sottolineato dall'IPCC (2007), possono influenzare drasticamente il consumo di energia. Un esempio è rappresentato dall'impatto che ha avuto l'estate del 2003, caratterizzata da temperature molto al di sopra della media climatologica,

e con episodi intensi e frequenti di ondate di calore, sul consumo di energia elettrica legato agli impianti di climatizzazione. A partire da quell'estate, l'uso del condizionamento negli ambienti lavorativi e privati ha registrato un grande incremento che è molto probabilmente una delle principali cause dell'aumento di richiesta di energia elettrica nel periodo estivo: la domanda di energia in Italia ha subito un salto di circa 6Mtep passando da 188Mtep nel 2002 ai 194Mtep del 2003 (Energia e Ambiente 2006). Pertanto, la razionalizzazione dei consumi e le azioni di risparmio energetico unite alle azioni di trasferimento della produzione di energia da idrocarburi a fonti rinnovabili, possono contribuire in modo determinante alla riduzione delle emissioni. Lo studio del comfort termico può fornire importanti indicazioni e regole di comportamento la cui applicazione può contribuire ad un uso più razionale della climatizzazione.

Per la valutazione del comfort termico e dei consumi derivanti dall'uso del condizionamento negli ambienti di lavoro sono state seguite due linee di ricerca: nella prima sono stati analizzati due ambienti di lavoro diversi controllando le condizioni termiche ottimali per lo svolgimento delle attività lavorative in funzione anche dell'abbigliamento dei lavoratori; nella seconda è stato monitorato l'uso dell'impianto di condizionamento in un ambiente di lavoro, focalizzando l'attenzione sulle condizioni termiche mantenute realmente in un luogo di lavoro durante il periodo estivo, in giorni caratterizzati da temperature massime elevate e superiori a 30 °C.

Per lo svolgimento di tali ricerche, è stata fatta preventivamente una valutazione degli ambienti lavorativi della Piana di Sesto.

Nella Piana di Sesto si possono identificare due tipi principali di costruzioni: la prima è costituita da edifici con muri spessi e finestre che coprono una bassa percentuale delle facciate; la seconda da strutture prefabbricate o comunque costituite da muri decisamente meno isolanti delle prime, e con finestre che coprono gran parte delle facciate. Quest'ultima tipologia di fabbricato è generalmente meno isolata rispetto alle condizioni esterne.

A partire dall'analisi delle aziende operanti sul territorio, sono stati individuati due tipi principali di ambiente di lavoro.

Il primo è rappresentato da magazzini in cui vengono conservati ed accumulati diversi tipi di materiali per poi essere ridistribuiti sul territorio. Gran parte di questi magazzini non è dotata di ambienti climatizzati o riscaldati in quanto sono ambienti molto ampi in cui le variazioni apportate da questi impianti sarebbero molto limitate e si avrebbe, invece, un alto dispendio energetico; inoltre, la merce che vi viene accumulata non necessita di particolari condizioni termiche per essere conservata. I magazzini, invece, in cui è necessario mantenere una certa temperatura per la conservazione della merce (come per esempio i magazzini di merci alimentari), sono dotati di impianti di condizionamento il cui utilizzo è necessario e non modificabile in quanto legato proprio alla conservazione della merce.

L'altra tipologia di ambiente di lavoro individuato è l'ufficio: sono possibili diverse attività lavorative all'interno degli uffici, ma la maggior parte prevede lo star fermi al computer o alla scrivania (call center, lavoro di ricerca, lavoro dirigenziale, lavoro di segreteria...).

Viste le necessità del progetto SICOTER, e quindi lo studio delle condizioni termiche negli ambienti di lavoro allo scopo di ricercare un certo risparmio energetico tramite il corretto uso degli impianti di condizionamento, sono state utilizzate delle centraline microclimatiche per lo studio del comfort dei luoghi di lavoro, una centralina meteorologica per lo studio delle condizioni ambientali esterne ed un analizzatore di potenza per lo studio dei consumi dei condizionatori. Le centraline per lo studio del

microclima sono state posizionate in due tipi diversi di ambiente lavorativo: entrambe sono riconducibili al lavoro d'ufficio, risultato il più frequente nell'area analizzata, e le centraline sono state poste in un ambiente caratterizzato da un elevato isolamento termico dall'esterno (ambiente tipo A), ed in un ambiente caratterizzato da basso isolamento termico (ambiente tipo B), in modo da osservare le condizioni in due ambienti diversi dal punto di vista dell'isolamento termico. Anche se il lavoro nei magazzini era risultato essere altrettanto frequente rispetto a quello svolto negli uffici, non sono state posizionate delle centraline per il calcolo del microclima nei magazzini in quanto lo scopo del progetto SICOTER è quello di studiare le abitudini dei lavoratori al fine di ricercare un certo risparmio energetico, ma all'interno dei magazzini gli impianti di raffrescamento generalmente non sono presenti o, se lo sono, non se ne può limitare l'uso in quanto servono per la corretta conservazione delle merci deteriorabili.

La centralina utilizzata per lo studio del microclima è il *Thermal Microclimate HD32.1* della Delta Ohm (fig. 15).



Figura 15: Stazione biometeorologica per il monitoraggio del microclima in ambiente indoor.

Il *Thermal Microclimate HD32.1* è uno strumento studiato proprio per l'analisi del microclima negli ambienti di lavoro. Lo strumento è dotato di otto ingressi per sonde con modulo SICRAM che dispongono di un circuito elettronico che dialoga con lo strumento stesso che, a sua volta, conserva i dati di taratura dei sensori nella sua memoria permanente.

Lo strumento, inoltre, è in grado di gestire tre programmi operativi, utilizzabili a seconda del tipo di ambiente che si vuole monitorare. Il programma operativo utilizzato in

questo lavoro è il Programma A: Analisi Microclimatiche. I parametri ambientali monitorati negli ambienti *indoor* sono la temperatura dell'aria, la temperatura del bulbo umido e la temperatura media radiante, necessarie per il calcolo di indici come il WBGT, PMV ed altri eventuali.

Il monitoraggio meteorologico delle condizioni ambientali della Piana di Sesto in ambiente *outdoor* è avvenuto tramite l'utilizzo dei dati provenienti da stazioni meteorologiche già attive sul territorio (fig. 16).

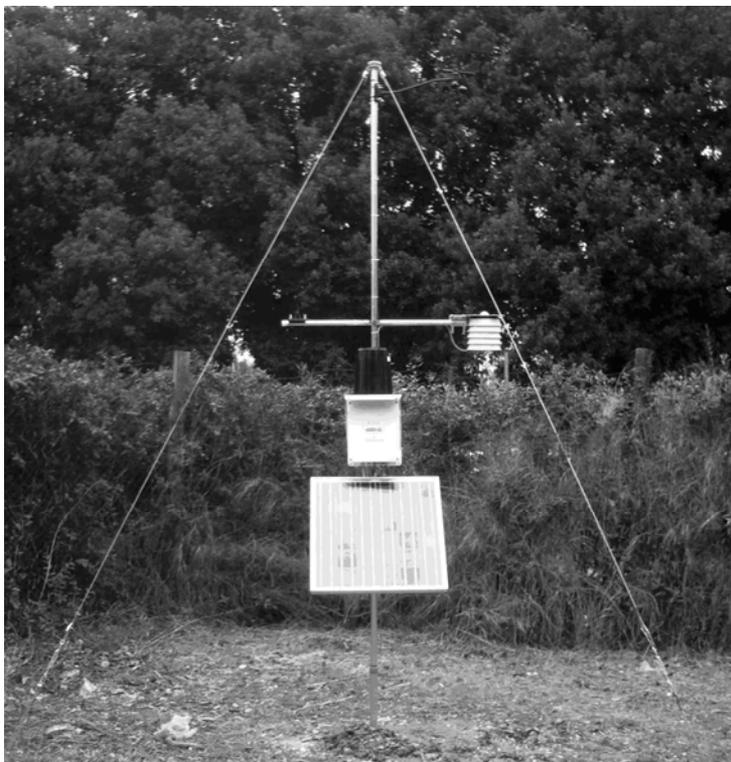


Figura 16: Stazione meteorologica impiegata per il monitoraggio delle condizioni in ambiente *outdoor*.

Il monitoraggio dell'ambiente *outdoor* è necessario per il confronto delle condizioni ambientali che si hanno all'esterno degli edifici con le condizioni ambientali che, invece, vengono mantenute negli ambienti interni. Le variabili meteorologiche monitorate in ambiente *outdoor* sono la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la velocità del vento e la radiazione solare.

Per il monitoraggio dei consumi è stato utilizzato un'analizzatore di potenza collegato in parallelo al climatizzatore, del tipo split con funzione di caldo freddo e un potere di raffreddamento di  $7800 \text{ W btu}^{-1}$  e di deumidificazione dell'aria  $1 \text{ l h}^{-1}$ , installato nell'ambiente di lavoro studiato (fig. 17). Parallelamente è stato tenuto un registro indicante, per ogni giorno, le ore di impiego della climatizzazione e le soglie di temperatura di volta in volta impostate.

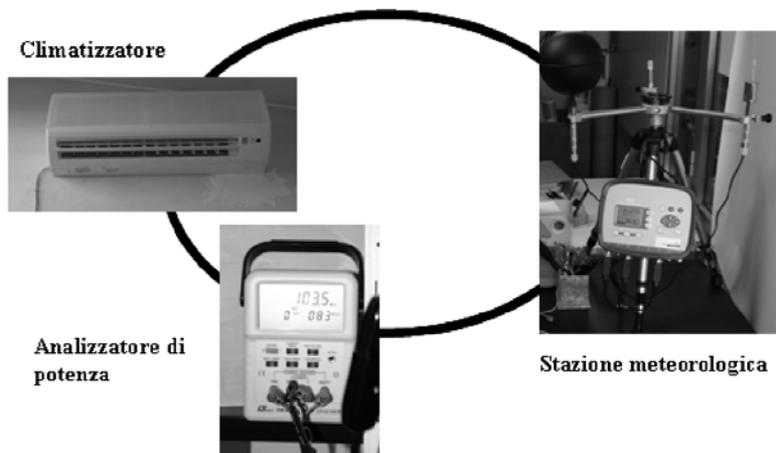


Figura 17: Schema dei dispositivi utilizzati per il monitoraggio dei parametri ambientali e dei consumi energetici.

Negli ambienti di lavoro monitorati è stata presa in considerazione, durante il periodo estivo, la frequenza dell'utilizzo dei condizionatori per il controllo della temperatura. Per quanto riguarda lo studio del comfort termico nei luoghi di lavoro, sono stati utilizzati i dati delle centraline microclimatiche poste nei due ambienti di lavoro sopra descritti (tipo A e tipo B). Le centraline sono state posizionate il 20 agosto 2007 ed hanno raccolto i dati microclimatici per circa un mese e mezzo.

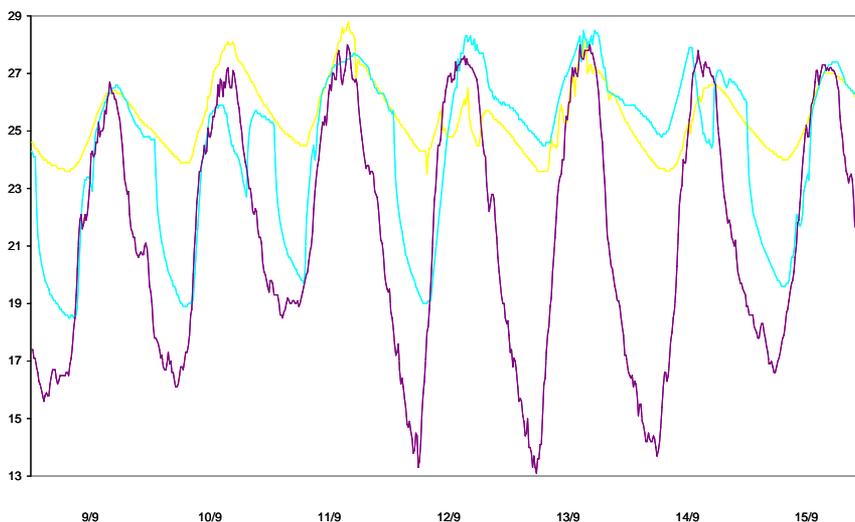


Figura 18: Andamento delle temperature in due diversi ambienti di lavoro e della temperatura esterna in giorni con temperatura massima prossima o superiore a 27 °C (lineaviola: temperatura esterna; linea celeste: temperatura indoor in ambiente con poco isolamento termico (tipo B); linea gialla: temperatura indoor in ambiente con elevato isolamento (tipo A).

Nella figura 18 viene riportato l'andamento delle temperature registrate all'interno dei due ambienti di lavoro in una settimana del mese di settembre in cui le temperature massime esterne si sono mantenute prossime ai 27 °C, dal 9 al 15 settembre.

Analizzando l'andamento delle temperature, risulta evidente che nell'ambiente di tipo B le temperature seguono l'andamento delle temperature esterne sia nei valori minimi che in quelli massimi. Nell'ambiente di tipo A, invece, le temperature hanno un andamento molto più stabile, evidenziando una minore escursione termica tra la temperatura massima e la minima registrate. La minore escursione termica rilevata all'interno dell'edificio di tipo A è sicuramente riconducibile alle caratteristiche fisiche dei materiali con cui è costruito l'edificio rispetto a quelle dei materiali utilizzati nell'edificio di tipo B, e quindi, al maggior isolamento. L'escursione termica registrata all'interno dei locali di tipo B raggiunge anche 8 – 9 °C, mentre nell'ambiente di tipo A supera difficilmente i 4 °C.

È importante notare che in entrambi gli ambienti, le temperature massime si mantengono prossime a quelle esterne: anche quando non viene utilizzato il condizionatore (è evidente che nei giorni 10 e 14 settembre è stato utilizzato nell'ambiente di lavoro di tipo B, mentre il 12 settembre nell'ambiente di lavoro di tipo A), le temperature negli ambienti di lavoro raggiungono valori massimi prossimi o superiori di circa un grado rispetto ai valori esterni. Per il calcolo del PMV, oltre ai valori di temperatura dell'aria, sono stati considerati anche i valori di umidità relativa mantenuti all'interno dei luoghi di lavoro, il livello di attività svolta ed i diversi livelli di vestiario utilizzato, espressi in clo. Per quanto riguarda il livello di attività metabolica, si è considerato un valore medio di 80 Wm<sup>-2</sup> secondo gli standard internazionali che prevedono per il lavoro d'ufficio un range da 70 a 90 Wm<sup>-2</sup>. Nella figura seguente (fig. 19) è riportato l'andamento del PMV in uno degli ambienti monitorati in due giorni lavorativi (dalle 9 alle 18) durante i quali è stato utilizzato il condizionatore.

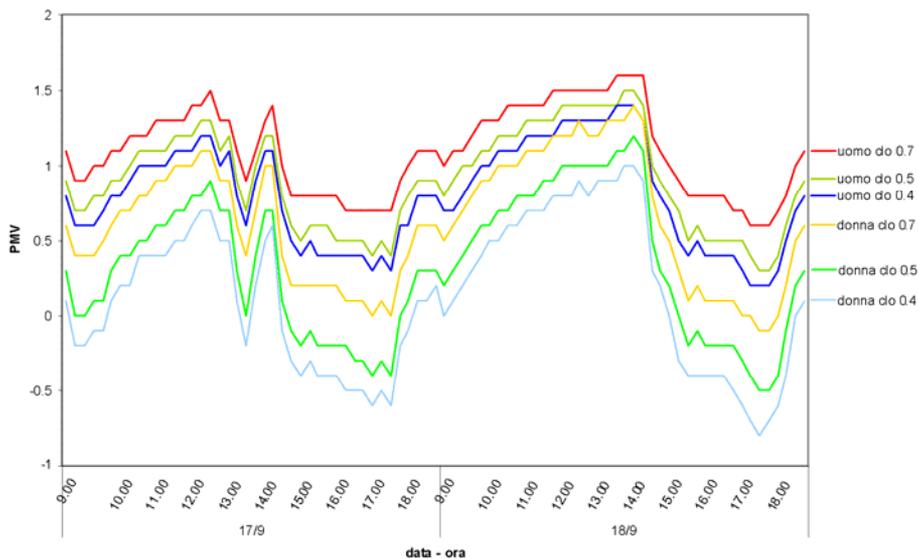


Figura 19: Valori di PMV calcolati negli orari di lavoro di due giorni consecutivi in cui è stato utilizzato il condizionatore per migliorare le condizioni termiche considerando uomini e donne standard (uomo di 35 anni, di 1,75 m di altezza e 75 Kg di peso; donna di 35 anni, di 1,68 m di

altezza e 65 Kg di peso) con lo stesso livello di attività ( $80 \text{ Wm}^{-2}$ ), ma con diversi livelli di vestiario indossato (clo da 0.4 a 0.7).

Per il calcolo del PMV è stato utilizzato un soggetto maschile *standard* di 35 anni di età, 1,75 m di altezza e 75 Kg di peso ed un soggetto femminile di 35 anni, 1,68 m di altezza e di 65 Kg di peso. Si nota che, a parità di attività svolta ( $80 \text{ Wm}^{-2}$ ) e di livello di vestiario indossato (clo), il valore del PMV calcolato per i soggetti di sesso maschile è maggiore di quello calcolato per i soggetti di sesso femminile.

Per quanto riguarda l'uso del condizionatore, si nota che questo determina un abbassamento del valore del PMV nei vari soggetti che aumenta al diminuire del carico di vestiti indossato dai soggetti stessi: per un uomo con clo pari a 0,7, corrispondente a un abbigliamento medio per la stagione estiva (composto, per esempio, da camicia, pantaloni, calzini e scarpe) l'abbassamento del valore del PMV nelle condizioni monitorate nella giornata del 17 settembre è stato di 0,7, mentre nella giornata del 18 è stato di circa 1; per un uomo con clo pari a 0.4 (composto, per esempio, da camicia a maniche corte, pantaloni leggeri, calzini leggeri e scarpe leggere) tale diminuzione è stata di 0.8 il primo giorno e di 1.2 il secondo.

Allo stesso modo, per i soggetti femminili, il primo giorno la differenza nel valore di PMV tra il momento precedente all'uso del condizionatore ed il momento in cui è stato spento il condizionatore, è stata di circa 1 per soggetti con clo pari a 0.7 e di 1.2 per soggetti con clo pari a 0.4 il primo giorno di analisi, mentre di 1.5 e 1.8 per il secondo giorno.

Tutto ciò indica che l'uso corretto dell'abbigliamento negli ambienti di lavoro può determinare una diminuzione dei consumi derivati dall'uso del condizionatore per due motivi principali: il primo riguarda il fatto che un soggetto con valori di clo più bassi ha un PMV più basso nei giorni caldi rispetto ad un soggetto con un abbigliamento più pesante; il secondo motivo riguarda l'efficacia del condizionamento: dall'analisi dei dati risulta, infatti, che il valore del PMV diminuisce maggiormente in soggetti con clo più basso, quindi questi potrebbero utilizzare in maniera più contenuta il condizionatore raggiungendo prima valori di PMV prossimi allo 0.

Per quanto riguarda, invece, lo studio sui consumi energetici legati all'uso dell'impianto di climatizzazione, questo è stato effettuato durante la settimana dal 25 al 31 agosto del 2007. Sono state analizzate le condizioni meteorologiche esterne ed in particolare la relazione tra temperatura dell'aria *indoor* e *outdoor* ed il conseguente uso dell'impianto di climatizzazione durante i giorni lavorativi.

L'ufficio è all'interno della sede della facoltà di Agraria, situato all'ultimo piano dell'edificio e dotato di una apertura a lucernario esposta a sud.

Le temperature *indoor* e *outdoor* dell'aria sono state registrate ogni quindici minuti, utilizzando due stazioni collocate rispettivamente all'interno dell'ufficio ed all'esterno in prossimità della facoltà di Agraria.

All'interno dell'ufficio è stata registrata anche l'umidità relativa dell'aria. Successivamente su questi valori sono state calcolate le medie orarie.

Insieme ai parametri ambientali è stato monitorato anche il comportamento dei lavoratori annotando in un registro l'apertura delle finestre e le ore di accensione e spegnimento del condizionatore. Durante una delle giornate lavorative è stata effettuata una misura del consumo del condizionatore con un analizzatore di potenza per un'ora di accensione. I risultati sono presentati nel grafico di figura 20.

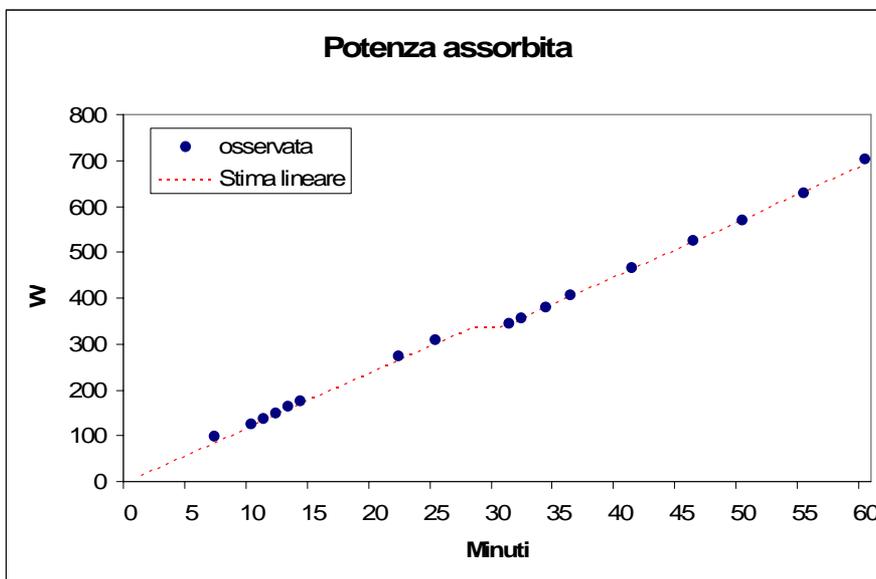


Figura 20: Misura della energia assorbita dal condizionatore durante un'ora di funzionamento.

L'analizzatore è stato collegato in parallelo al condizionatore ed impostato sulla misura dell'energia assorbita cumulata a partire da un determinato istante. Inizialmente, le misure sono state registrate ad intervalli di un minuto e successivamente ad intervalli di cinque minuti nel corso dell'ora di accensione, osservando che il condizionatore assorbe energia proporzionalmente al tempo di accensione. La pendenza della retta che approssima meglio i valori misurati è di 12 Watt al minuto che corrisponde alla potenza erogata dal condizionatore. Nel corso della misura è stato riscontrato un periodo di circa tre minuti in cui il condizionatore si è mantenuto in *stand-by* pur non essendo stata raggiunta la temperatura interna impostata sul termostato.

Nel corso dell'ora è stato misurato un consumo di energia di 701 Watt che, considerando il periodo di mancato consumo dovuto allo *stand-by*, può essere stimata in circa 750 Watt. Questa energia è utilizzata nel corso dell'accensione per estrarre calore dalla stanza e dipende dall'efficienza del condizionatore. Questo stesso valore è stato poi preso in considerazione nella seconda parte dello studio per effettuare una stima del consumo durante i giorni monitorati e valutare gli effetti di climatizzazione ottenuti.

La tabella 24 riassume i dati raccolti giornalmente relativi alla temperatura minima e massima esterna, periodo di uso del condizionamento e temperatura impostata sul termostato.

La settimana presa in considerazione è stata caratterizzata da temperature elevate, superiori a 30 °C nei valori massimi, tutti i giorni ad esclusione del venerdì le temperature minime sono variate da 16 °C a 20 °C. Corrispondentemente la climatizzazione è stata utilizzata tutti i giorni lavorativi durante le ore in cui i lavoratori erano presenti in ufficio. Il termostato è stato impostato nei giorni più caldi ad una temperatura di 21 °C, da lunedì a mercoledì, mentre negli altri è stato impostato a 22 °C.

Data	Giorno	T min (°C)	T max (°C)	Condizionam.	da (h)	a (h)	T termostato (°C)
25-ago	Sabato	16,0	30,5	NO	-	-	-
26-ago	Domenica	18,0	34,6	NO	-	-	-
27-ago	Lunedì	18,4	34,6	SI	9:11	14:20	21
28-ago	Martedì	18,3	32,1	SI	8:25	16:45	21 °
29-ago	Mercoledì	16,3	31,3	SI	8:00 10:00	15:00 17:00	21
30-ago	Giovedì	19,1	31,1	SI	9:50	15:50	22
31-ago	Venerdì	19,9	26,1	SI	8:00	14:30	22

Tabella 24: Temperatura minima e massima esterna e orari di accensione del condizionatore.

Il grafico di figura 21 mostra l'andamento della temperatura misurata dalla stazione esterna, quello della temperatura all'interno dell'ufficio e le ore in cui è stato utilizzato il climatizzatore, oltre alla temperatura impostata sul termostato del condizionatore. Da un primo esame del grafico si può notare la ridotta escursione termica all'interno dell'ufficio rispetto a quella outdoor, la cui ampiezza è legata all'esposizione della stanza e alle caratteristiche delle pareti comunicanti con l'esterno.

Il rapporto tra l'escursione termica *indoor* ed *outdoor* può essere considerato un indice di misura del grado di isolamento termico della stanza, ed in particolare tale isolamento è più efficace tanto più questo rapporto è ridotto, a parità di escursione termica esterna. Un isolamento più efficace ha conseguenze importanti sulla quantità di energia consumata per la climatizzazione. Infatti, un'inerzia termica maggiore nei confronti delle sollecitazioni ambientali esterne comporta una riduzione della necessità di utilizzare la climatizzazione per mantenere una situazione di comfort all'interno dell'ambiente.

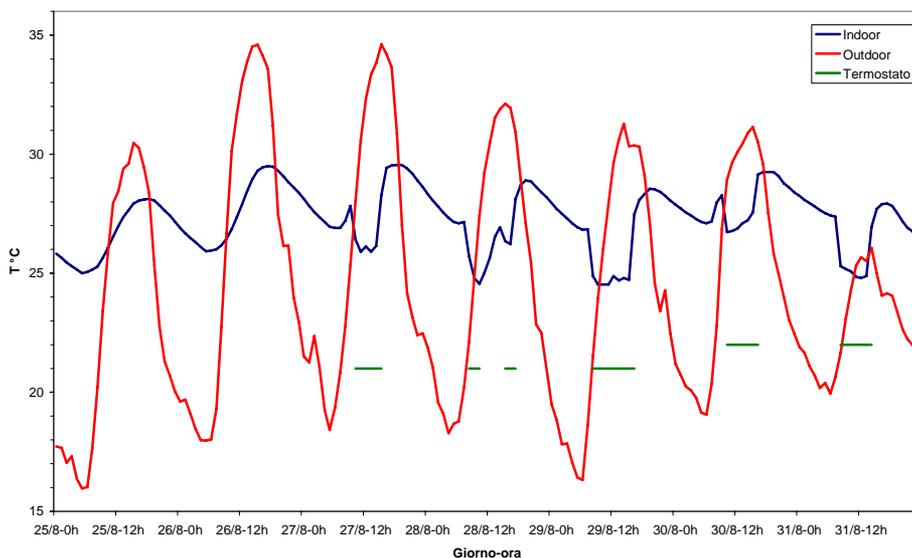


Figura 21: Temperatura outdoor, temperatura indoor e temperatura impostata sul termometro del condizionatore nei periodi di utilizzo per il periodo 25 - 31 agosto 2007.

L'esame dei giorni festivi in cui sono assenti variazioni nel microclima interno indotte dall'uso della climatizzazione, mostra come l'umidità relativa sia soggetta a variazioni periodiche opposte a quelle della temperatura interna. Infatti in assenza di attività lavorativa, l'ambiente rimane chiuso e pertanto il contenuto assoluto di acqua nell'aria resta costante: un aumento della temperatura interna durante il giorno comporta, quindi, una diminuzione dell'umidità relativa, viceversa una diminuzione nei valori di temperatura corrisponde ad un aumento nei valori di umidità relativa, cosa che avviene nelle ore notturne.

Il grafico dell'umidità relativa *indoor* (fig. 22) mostra i valori di umidità relativa misurati nella settimana dal 25 al 31 agosto. Nel periodo in cui non è stato utilizzato il condizionatore, le variazioni di umidità relativa all'interno dell'ufficio hanno un andamento senza particolari variazioni; nei giorni, invece, in cui è stato utilizzato il condizionatore, sono chiaramente visibili un aumento dell'umidità relativa quando l'aria comincia a raffreddarsi ed una sua diminuzione quando l'effetto refrigerante termina.

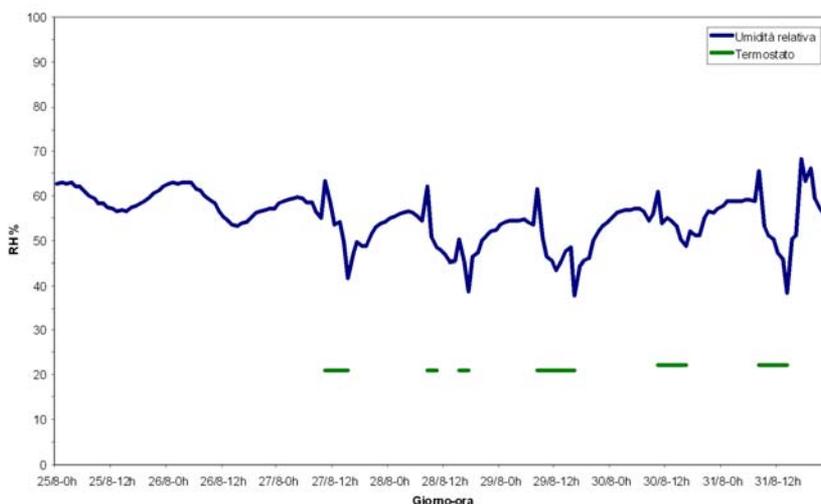


Figura 22: Umidità relativa indoor e uso del termostato per il periodo 25 - 31 agosto 2007.

Nei giorni festivi, quando il condizionatore è spento (25 e 26 agosto) la temperatura interna dipende unicamente dalle condizioni ambientali iniziali e dagli scambi termici con l'esterno guidati dalle variazioni della temperatura *outdoor*. In questi casi la temperatura nell'ambiente *indoor* segue l'andamento di quella esterna con una variazione ciclica assimilabile ad una curva sinusoidale la cui ampiezza è legata all'escursione termica *indoor*.

L'uso del condizionatore attraverso l'impiego di energia per il raffreddamento dell'ambiente causa perturbazioni al comportamento ciclico della temperatura e dell'umidità relativa che possono essere evidenziate confrontando i dati del 26 e del 27 agosto rispettivamente una domenica e un lunedì. Le due giornate sono confrontabili in quanto entrambe caratterizzate da una temperatura minima esterna prossima a 18 °C ed una massima prossima a 34 °C. Il 26 l'ambiente indoor è caratterizzato da temperature inferiori nella prima parte della notte e da una maggior velocità di riscaldamento nel corso della mattinata rispetto al 27 (fig. 23).

Confrontando i dati della domenica e del lunedì si vede chiaramente l'effetto del condizionatore sulla temperatura *indoor* (figg. 23 e 24). Analogamente a quanto avvenuto all'esterno, la temperatura *indoor* il 27 si è mantenuta superiore a quella del 26 agosto per tutta la notte. La mattina, però, quando è stato acceso il condizionatore si è avuta una rapida riduzione della temperatura fino a quasi 25 °C che si è mantenuta pressoché invariata fino alle ore 15, quando il condizionatore è stato spento. Successivamente la temperatura è salita rapidamente per ristabilizzarsi su valori analoghi a quelli della giornata precedentemente.

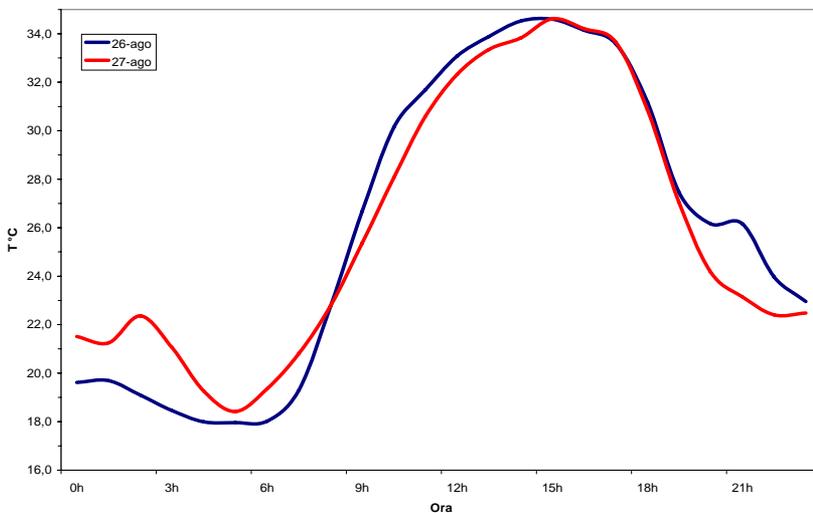


Figura 23: Temperatura esterna misurata alle Cascine il 26 e il 27 agosto 2007.

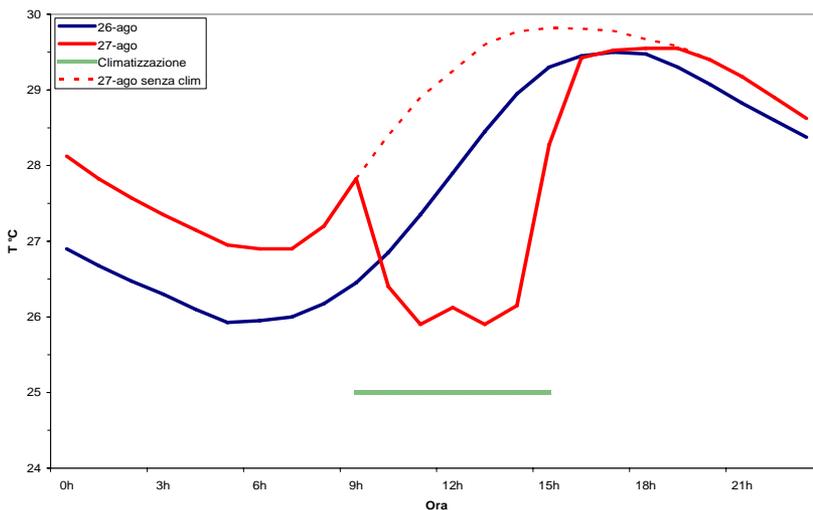


Figura 24: Temperatura interna misurata nell'ufficio il 26 e il 27 agosto 2007.

Analogamente l'esame dell'umidità relativa *indoor* (fig. 25) mostra una variazione positiva all'accensione del condizionatore ed una variazione negativa in corrispondenza dello spegnimento. Nel periodo di utilizzo del condizionatore si è notato una riduzione dell'umidità relativa dovuta alla funzione di deumidificazione del condizionatore stesso (fig. 25). Durante la misura la porta e la finestra dell'ufficio sono state chiuse in modo da ridurre al minimo lo scambio con l'esterno e con le altre stanze del piano. In queste condizioni il contenuto di vapore nell'aria è costante e di conseguenza, una diminuzione rapida di temperatura (accensione) porta ad un aumento dell'umidità relativa e l'opposto accade in corrispondenza di un aumento di temperatura (spegnimento).

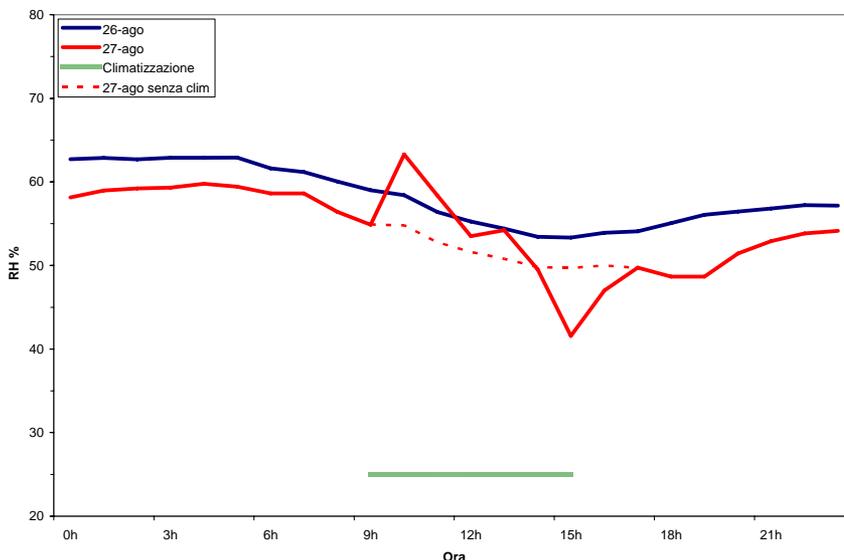


Figura 25: Umidità relativa interna all'ufficio il 26 e il 27 agosto 2007.

La valutazione dei consumi e, soprattutto, dell'effetto del condizionamento richiede un'analisi più accurata dei dati orari. A questo scopo sono state analizzate le giornate del 27 e del 29 agosto, giornate caratterizzate da valori di temperatura massima rispettivamente di 34,6 °C e 31,3 °C. Inoltre, in entrambi i giorni, il condizionatore è stato utilizzato in modo continuato: il 27 per 5 ore e il 29 per 9 ore, con il termostato impostato a 21°C. Le figure 26 e 27 rappresentano l'andamento della temperatura interna in queste due giornate (linea continua) confrontata con la stima della temperatura interna che si sarebbe misurata se non fosse stato utilizzato il condizionatore (linea tratteggiata).

Si può osservare come dopo l'accensione del condizionatore la temperatura scende rapidamente fino a raggiungere un valore che rimane stabile nel tempo e che nel primo caso è di 26 °C e nel secondo di 24,5 °C.

La temperatura della stanza è il risultato del bilancio termico di flussi di calore in entrata e in uscita dalla stanza stessa. Il risultato di questo bilancio è una quota di calore che, se è positiva, contribuisce a riscaldare la stanza, mentre, se è negativa, a raffreddarla. Nel sistema in esame, durante il periodo estivo, il principale fattore termico positivo è un flusso di calore proveniente dall'esterno proporzionale al salto termico tra temperatura *outdoor* e temperatura *indoor* ed il fattore di proporzionalità dipende dalle caratteristiche costruttive dell'edificio, dall'esposizione della stanza e dal numero di aperture. Il fattore

termico negativo è dovuto al condizionatore che, quando è acceso, sottrae calore alla stanza in una quantità che è dipendente dalla potenza e dall'efficienza del motore. Fino a che il calore estratto dal condizionatore è superiore alla quota entrante per il salto termico esterno-interno, la stanza si raffredda. Quando il condizionatore riesce ad abbassare la temperatura fino al valore impostato nel termostato, il condizionatore smette di funzionare automaticamente andando in *stand-by*, per poi riprendere a funzionare quando la temperatura si alza di nuovo. Altrimenti, se il salto termico esterno-interno è tale che il condizionatore non è in grado di fornire sufficiente energia per raggiungere il valore impostato, allora la temperatura si stabilizza quando i due flussi di calore si compensano.

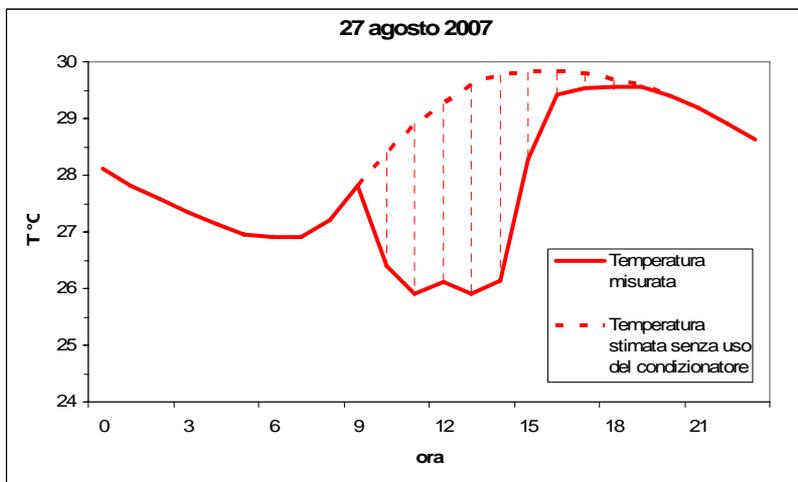


Figura 26: Diagramma della temperatura interna misurata (linea continua) e stimata (linea tratteggiata) nel giorno 27 agosto 2007.

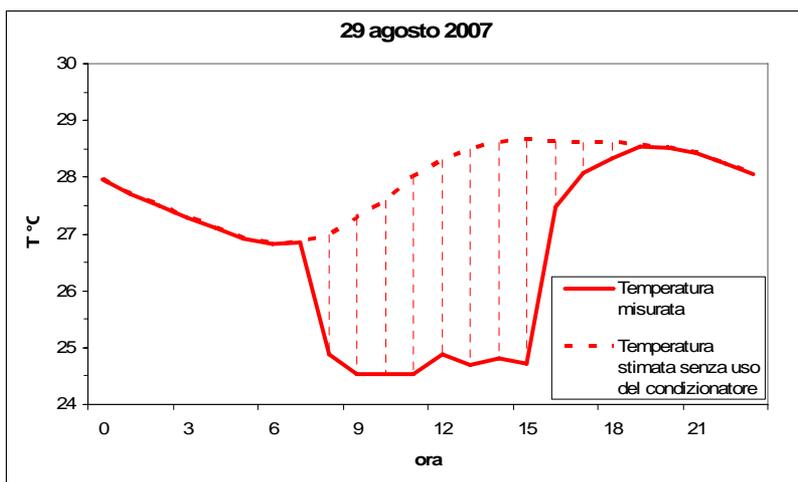


Figura 27: Diagramma della temperatura interna misurata (linea continua) e stimata (linea tratteggiata) nel giorno 29 agosto 2007.

Nei due grafici (figg. 26 e 27) è, inoltre, evidenziata l'area tra le due curve che può essere considerata una stima quantitativa dell'effetto del condizionatore. La riduzione media di temperatura, nel corso del periodo di funzionamento del condizionatore, è attorno ai 2.8 °C il 27 e 3.3 °C il 29.

Poiché la temperatura interna si è stabilizzata su un valore superiore a quello del termostato, possiamo dedurre che il condizionatore abbia lavorato per tutto il periodo di accensione consumando circa 750 Watt per ogni ora. Nel primo caso in una giornata con temperatura massima esterna di 34 °C si riesce a stabilizzare la temperatura interna su un valore di circa 26 °C per un consumo di 750 Watt di energia per ogni ora, e quindi, nel caso del 27 agosto, per un consumo complessivo di 3750 Watt. Consumando la stessa energia oraria, quando la temperatura esterna raggiunge 31 °C si è in grado di portare la temperatura interna fino a 24,5 °C.

Uno studio sul comfort termico, durante il periodo estivo, in un edificio (Wagner, 2007) in cui l'attività lavorativa principale era quella di ufficio, prevalentemente statica, associa a differenti condizioni ambientali il grado di benessere degli occupanti misurato con l'indice PMV. L'analisi dei valori del PMV in relazione agli intervalli di temperatura indica che i soggetti esaminati percepiscono mediamente condizioni di benessere per temperature prossime ai 24 °C, accusando un leggero disagio da caldo quando la temperatura raggiunge i 26 °C. Riportando i valori ottenuti nello studio di Wagner al nostro caso di studio, nel caso del 27 agosto il condizionamento, pur essendo utilizzato in modo continuo, non permette di raggiungere le condizioni di comfort (temperatura prossima a 24 °C), mentre nel secondo caso (29 agosto) le condizioni analizzate sono tali da rientrare nell'intervallo di temperature di comfort: in questo caso, impostando il termostato su un valore di 25 °C, si raggiungerebbero comunque le condizioni di comfort e si otterrebbe, inoltre, un certo risparmio energetico rispetto ad una impostazione del termostato ad una temperatura più bassa.

## **Cambiamenti climatici e clima urbano nella Piana di Sesto Fiorentino**

Negli ultimi anni la questione dei cambiamenti climatici è riuscita a richiamare sempre una maggiore attenzione da parte dell'opinione pubblica e, grazie a questo, nelle ultime decadi sono state promosse numerose ricerche che hanno portato ad acquisire nuovi risultati sulle modifiche e sulle alterazioni climatiche intercorse nell'ultimo secolo.

Se il precedente rapporto dell'IPCC (2001) (Organo che si occupa di fornire ai decisori politici e a tutta la comunità scientifica una valutazione obiettiva della letteratura riguardante i vari aspetti dei cambiamenti climatici, impatti, adattamento e mitigazione) indicava un trend di riscaldamento globale di  $0.6 \pm 0.2$  °C nel periodo 1901-2000 (Folland et al., 2001), nel più recente rapporto (IPCC, 2007) questo trend, relativo al periodo 1906-2005, è passato a  $0.74 \pm 0.18$  °C.

L'aumento della temperatura rilevato a livello mondiale è stato riscontrato in maniera ancora più evidente su scala europea. Se, infatti, a livello mondiale è stato indicato un trend di riscaldamento globale di  $0.6 \pm 0.2$  °C nel periodo 1901-2000 (IPCC, 2001; Folland et al., 2001), in Europa Luterbacher et al. (2004) hanno mostrato un trend di riscaldamento più evidente, di  $0.8 \pm 0.3$  °C.

Per quanto concerne i cambiamenti climatici osservati in Italia a livello di temperatura, questi sono paragonabili a quelli avvenuti su scala europea, mediamente nell'ordine di + 0.8 °C nel XX secolo e di 1 °C  $\pm$  0.1 nel periodo che va dal 1865 al 2003

(Brunetti et al., 2006). L'analisi delle serie stagionali in Italia ha mostrato differenze significative tra le diverse stagioni. In particolare, il forte riscaldamento che ha caratterizzato gli ultimi decenni è evidente in primavera e, soprattutto, in estate, ma non in autunno ed in inverno, stagioni nelle quali il trend recente è meno evidente (Brunetti et al., 2006).

Allo scopo di stabilire i recenti scenari climatici estivi nell'area fiorentina e della Piana di Sesto Fiorentino, è stato analizzato il trend di alcuni indici climatici e indici di temperatura estrema nel periodo 1955-2002 relativamente alla stazione meteorologica di Firenze – Peretola.

La serie climatica giornaliera di temperatura minima e massima è stata sottoposta ad omogeneizzazione, cioè ad un processo che mira a rendere omogenee le serie storiche in modo che le variazioni riscontrate siano imputabili solamente ad effettive modificazioni del clima.

Molto spesso, infatti, può succedere che nelle serie storiche siano presenti salti improvvisi nel valore medio che possono essere causati da spostamenti della strumentazione, cambiamenti dei sensori di misura e dei metodi di rilevazione. Oltre a questi salti improvvisi, possono intervenire anche processi gradualmente come l'ampliamento di una città intorno ad una stazione meteorologica o lo sviluppo incontrollato di vegetazione vicino ai sensori di misura. Per il processo di omogeneizzazione dei dati giornalieri è stato applicato il Craddock test (Craddock, 1979).

Sono stati poi analizzati i trend estivi di:

- 1) Temperatura media minima (Tmin);
- 2) Temperatura media massima (Tmax);
- 3) Temperatura media delle medie (Tmed);
- 4) Numero di giorni con temperatura massima superiore al 90° percentile (*warm days*);
- 5) Numero di giorni con temperatura minima superiore al 90° percentile (*warm nights*).

Si è scelto di adottare la soglia del 90° percentile come espressione di un'anomalia climatica rispetto al periodo 1961-1990, secondo quanto raccomandato dalla World Meteorological Organization- Commission for Climatology (WMO-CCL) a dal Research Programme on Climate Variability and Predictability (CLIVAR; Peterson et al., 2001).

L'analisi del trend degli indici Tmin, Tmax e Tmed è stata eseguita attraverso il metodo parametrico della regressione lineare. Questa analisi statistica è molto utile per la comprensione dei cambiamenti climatici avvenuti nel tempo in quanto fornisce, tra l'altro, indicazioni sulla velocità di crescita (coefficiente angolare della retta di regressione) di questi mutamenti.

Per analizzare il trend degli indici estremi *warm days* e *warm nights* si è resa necessaria, invece, l'applicazione di un test non parametrico. La scelta è ricaduta sul test non parametrico di Theil-Sen, molto diffuso in ambito scientifico (Heino et al., 1999; Horton et al., 2001; Hejzlar et al., 2003; Bartolini et al., in press): esso è in grado di fornire, oltre che la pendenza del trend, anche la significatività statistica.

I risultati, relativi al periodo 1955-2002, hanno evidenziato un generale aumento sia delle temperature minime sia di quelle massime. L'aumento delle minime è risultato inferiore a quello delle massime (rispettivamente +1,60 °C/50 anni e +2,5 °C/50 anni) (fig. 28). La figura 29 mostra invece il trend in aumento per quanto riguarda la temperatura media (+2,1 °C/50 anni).

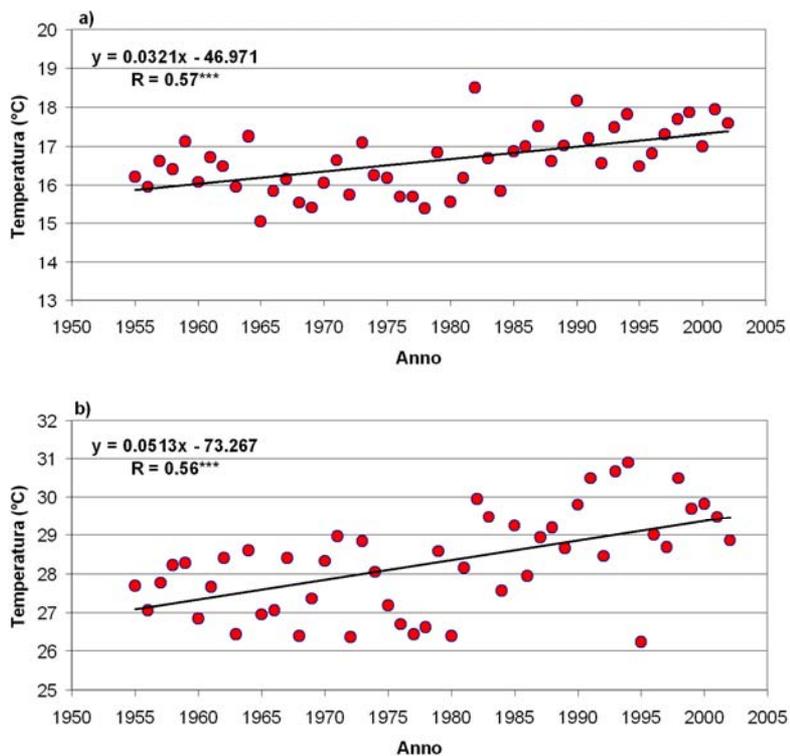


Figura 28: Trend di temperatura media minima (a) e media massima (b) in estate (giugno-luglio-agosto) a Firenze - Peretola nel periodo 1955-2002. È indicata la retta di regressione lineare e la significatività statistica del trend; ns = non significativo; \* = significativo al 95%; \*\* = significativo al 99%; \*\*\* = significativo al 99.9%.

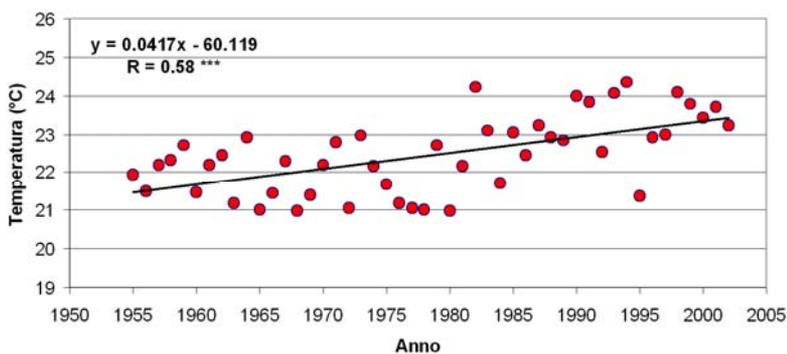


Figura 29: Trend di temperatura media in estate a Firenze - Peretola nel periodo 1955-2002. È indicata la retta di regressione lineare e la significatività statistica del trend; ns = non significativo; \* = significativo al 95%; \*\* = significativo al 99%; \*\*\* = significativo al 99.9%.

La figura 30 mostra le anomalie estive di temperatura media rispetto al periodo climatico di riferimento 1961-1990. Possiamo notare come, dal 1985, con unica eccezione nell'anno 1995, le anomalie risultano prevalentemente positive e molto evidenti.

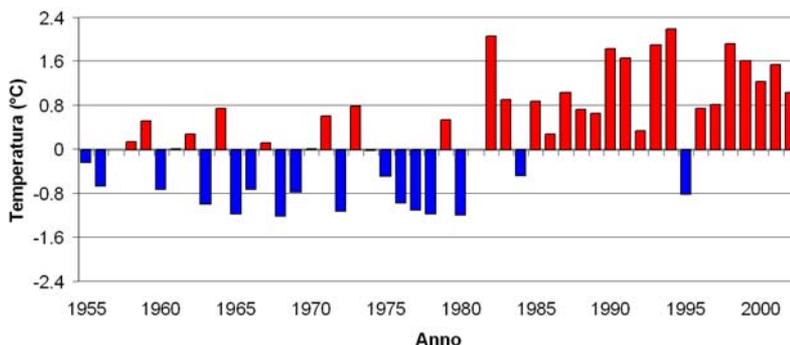


Figura 30: Anomalie di temperatura media in estate (giugno-luglio-agosto) a Firenze – Peretola (1955-2002) rispetto al periodo climatico di riferimento 1961-1990.

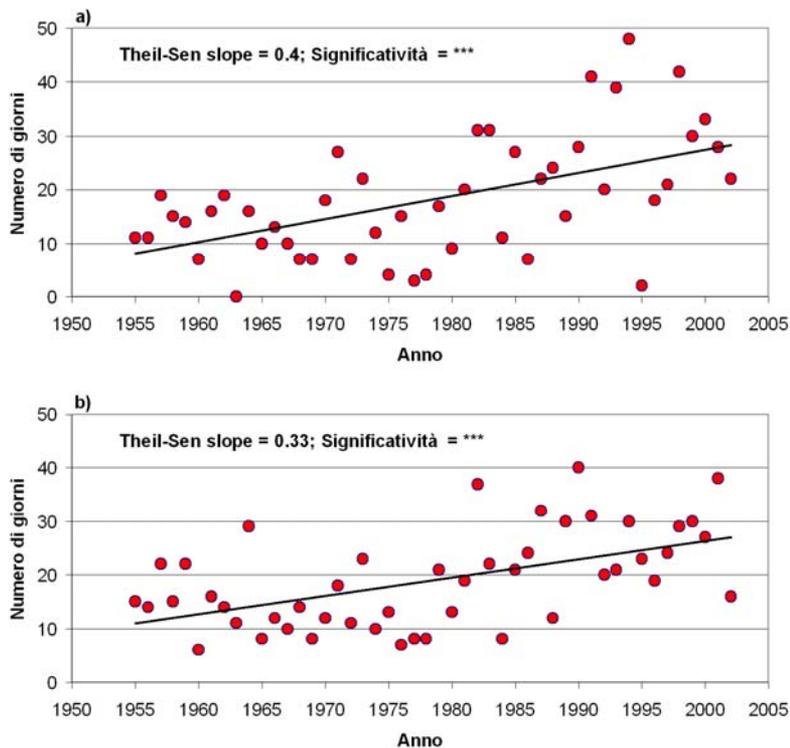


Figura 31: Trend degli indici di temperatura estrema warm days (a) e warm nights (b) a Firenze – Peretola nel periodo 1955-2002. È indicata la pendenza del test-non parametrico di Theil-Sen e la significatività statistica del trend; ns = non significativo; \* = significativo al 95%; \*\* = significativo al 99%; \*\*\* = significativo al 99.9%.

I risultati relativi agli indici analizzati hanno messo in evidenza un aumento dell'incidenza di eventi estremi di temperatura (*warm days* e *warm nights*) nel periodo estivo. L'aumento dei *warm days*, per la stazione di Firenze - Peretola, è risultato maggiore rispetto a quello osservato per i *warm nights* (+20 giorni/50 anni vs. 17 giorni/50 anni) (fig. 31).

Analogamente a quanto osservato in altre ricerche condotte in Italia, l'aumento delle temperature è stato molto più evidente nel periodo estivo piuttosto che in altre stagioni. La figura 32 mostra il contributo percentuale di ciascuna stagione dell'anno al riscaldamento climatico osservato nel periodo 1955-2002 per quanto riguarda la temperatura media annuale a Firenze - Peretola. Si nota come l'aumento della temperatura media annuale osservato a Firenze - Peretola tra il 1955 ed il 2002 sia principalmente dovuto alla stagione estiva (52%), piuttosto che alle altre stagioni.

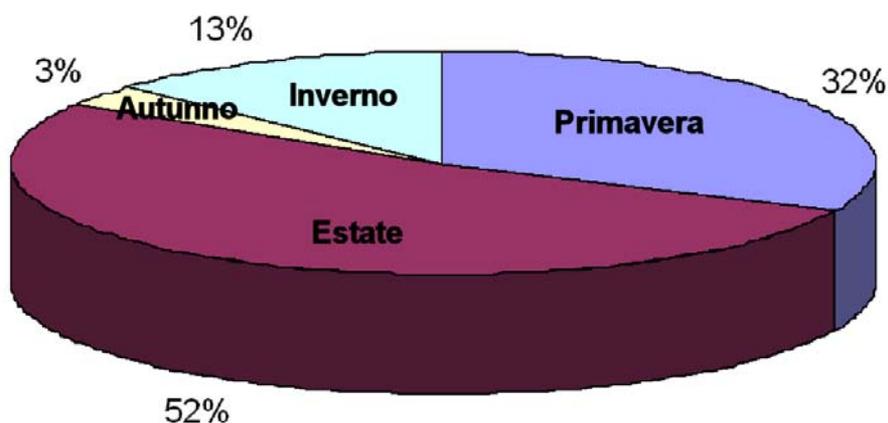


Figura 32: Contributo percentuale di ciascuna stagione in relazione all'aumento di temperatura media annuale osservato nel periodo 1955-2002 a Firenze - Peretola.

L'analisi del trend temporale ha mostrato una chiara tendenza all'aumento della temperatura dell'aria per la stazione meteorologica di Firenze - Peretola.

Questo effetto è ulteriormente amplificato a livello spaziale a causa dell'effetto isola di calore che si verifica in aree altamente urbanizzate (Petralli *et al.*, 2006) quali la piana di Sesto Fiorentino.

L'impiego di immagini da satellite a sensore infrarosso, fornisce un'istantanea della situazione termica di una determinata superficie ed è, quindi, molto utile per l'analisi della variabilità spaziale delle temperature. Naturalmente la temperatura calcolata è soggetta a vari errori tra cui la diversa emissività delle superfici e i valori di temperatura ottenuti si riferiscono alla misurazione fatta sulle superfici dei materiali e non alla temperatura dell'aria ad 1,5 - 2,0 metri dal suolo.

Di seguito sono riportate due immagini: La prima (fig. 33) rappresenta la mappa della zona della Piana di Sesto (evidenziata in rosso) e la parte, evidenziata in blu, che viene riportata nella figura successiva (fig. 34) nell'immagine da satellite all'infrarosso.



Figura 33: Carta di Firenze con delimitata l'area della Piana di Sesto e con indicata la posizione della stazione meteorologica di Peretola, impiegata in questo studio.

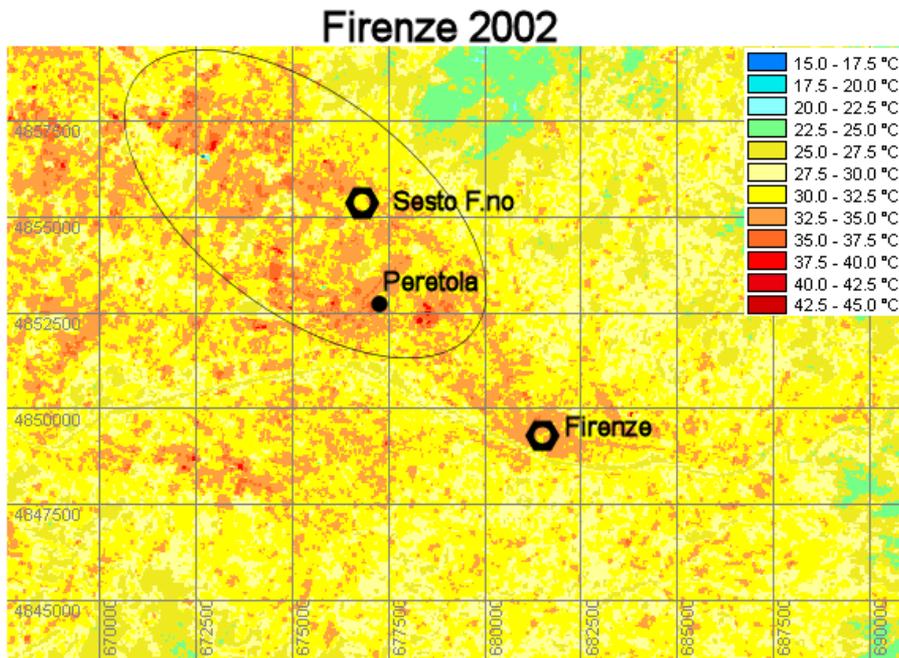


Figura 34: Temperatura superficiale ricostruita dal canale infrarosso (satellite Landsat 7).

L'immagine mostra come, all'interno della stessa area, si possano avere condizioni termiche anche molto differenti a seconda della presenza di aree verdi e dalla presenza di un'alta percentuale di costruito.

## **Modelli di previsioni biometeorologiche sul comfort termico**

L'applicazione di modelli biometeorologici può avere importanti risvolti sul corretto abbigliamento da indossare e quindi anche sulle condizioni termiche ottimali per la riduzione dei consumi energetici nei luoghi di lavoro.

Grazie alla previsione biometeorologica, infatti, l'utente può scegliere il livello di vestiario più adatto per la giornata per affrontare al meglio le condizioni termiche previste.

Dall'analisi microclimatica condotta nei luoghi di lavoro della piana di Sesto è emerso, infatti, che all'interno degli uffici le condizioni termiche sono molto simili a quelle esterne, quindi è possibile adottare il livello di clo consigliato per gli ambienti esterni tramite i modelli di previsioni biometeorologiche giornalieri. In ambiente indoor, così come in ambiente outdoor, a causa delle differenze individuali (caratteristiche soggettive), è praticamente impossibile descrivere una condizione termica (benessere o disagio) valida per chiunque e, per ogni situazione, ci saranno sempre alcuni soggetti che si dichiareranno insoddisfatti (PPD).

È possibile adottare una procedura che riesca a calcolare il livello minimo di vestiario da indossare in una giornata in base alle condizioni termiche previste dal modello di previsione biometeorologica utilizzato a livello locale.

Considerate le differenze associate alle caratteristiche dei singoli soggetti, è necessario prendere come riferimento un soggetto standard. Generalmente viene utilizzato un soggetto di sesso maschile, di 35 anni di età, di 1,75 m di altezza e di 75 Kg di peso. Per calibrare il livello di vestiario ottimale in base al calcolo del modello del PMV, viene scelta anche l'attività svolta: essendo il lavoro d'ufficio abbastanza sedentario, viene scelto il livello di attività pari a  $80 \text{ W m}^{-2}$ .

In questo modo il livello di minimo di clo che si ottiene dal modello di previsione biometeorologica è riferito a questo tipo di soggetto che svolge questo livello di attività: soggetti diversi da quello preso come riferimento che svolgono attività più pesanti o più leggere dovranno adeguare il livello di vestiario sulla base delle loro esigenze personali.

A questo punto, mettendo in relazione le caratteristiche soggettive del soggetto standard con i dati previsti dai modelli di previsione biometeorologica di umidità relativa, temperatura dell'aria e temperatura media radiante, si potrà calcolare il valore del modello del PMV e quindi del livello minimo di vestiario.

Per una maggiore comprensione dell'output del modello di previsione biometeorologica da parte degli utenti, oltre a dare il valore di clo più adatto in funzione delle condizioni termiche previste, vi sarà abbinata una immagine che rappresenti un insieme di abiti che potranno essere indossati al fine di ottenere un clo complessivo simile a quello indicato (fig. 35).

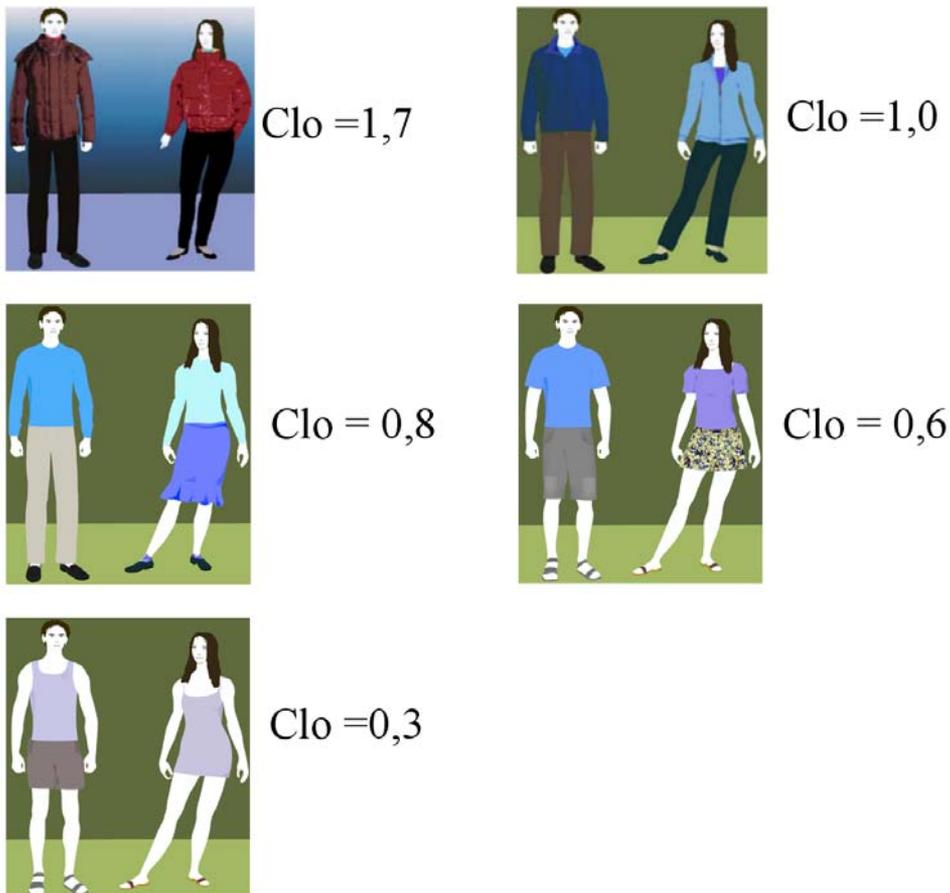


Figura 35: Esempi di raffigurazione di vestiario corrispondente a livelli diversi di Clo.

## Conclusioni

I cambiamenti climatici stanno apportando delle modifiche nel clima mondiale ed in quello italiano. Negli ultimi anni abbiamo assistito ad un generale aumento delle temperature, soprattutto nel periodo estivo. Le città risentono maggiormente del riscaldamento a causa dell'effetto "isola di calore" dovuto alla minore presenza di aree verdi rispetto al costruito propria dell'ambiente urbano, e del riscaldamento provocato dall'attività antropica. Al riscaldamento globale è strettamente legato un aumento del consumo di energia elettrica dovuto all'uso sempre maggiore di impianti di condizionamento. Oltre a questo, le normative italiane ed europee sottolineano la necessità di mantenere all'interno dei luoghi di lavoro le condizioni termiche tali da garantire il benessere termoisometrico ai lavoratori e questo può determinare un aumento sempre maggiore dei consumi energetici all'interno degli uffici.

I risultati di questo studio hanno evidenziato che con l'aiuto dei modelli di previsione biometeorologica e con un corretto uso dell'abbigliamento è possibile limitare l'uso degli impianti di condizionamento soprattutto nel periodo estivo ed autunnale.

Una corretta osservazione dei suggerimenti sul tipo di vestiario da utilizzare forniti tramite le previsioni biometeorologiche potrebbe diminuire l'uso dei condizionatori da parte dei lavoratori: questo perché l'utilizzo di un abbigliamento più leggero, cioè un valore di clo più basso, a parità di condizioni termiche e di attività in un luogo di lavoro, determina nei soggetti un valore di PMV più basso e quindi una minore esigenza di abbassare la temperatura all'interno degli uffici. Allo stesso modo, i risultati di questo studio suggeriscono che la diminuzione del valore del PMV in soggetti con un livello di clo più basso è maggiore di quella dei soggetti con un livello di clo più alto, e questo può far sì che i soggetti raggiungano più velocemente un valore di PMV prossimo allo 0 (corrispondente alla condizione di benessere termico per la quale esiste il minor valore di PPD, percentuale di insoddisfatti) e che, quindi, spengano prima il condizionatore, consumando una minore quantità di energia elettrica e diminuendo la quantità di calore prodotta dal motore del condizionatore durante il suo funzionamento.



**Regione Toscana**

Diritti Valori Innovazione Sostenibilità

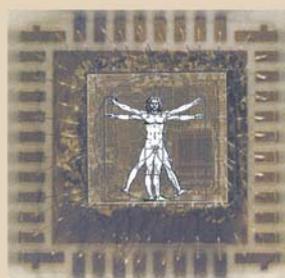


Unione Europea



## SICOTER

Sistema Informativo per l'ottimizzazione del  
COmfort Termico nei luoghi di lavoro e la  
creazione di una filiera per l'uso di  
Energia Rinnovabile nella provincia di Firenze



RICERCA  
TRASFERIMENTO  
INNOVAZIONE

**DOCUP Ob. 2  
Anni 2000-2006**

Misura 2.8 "Azioni a sostegno  
della società dell'informazione"  
Azione 2.8.4. "Potenziamento  
del sistema regionale di servizi  
telematici e di comunicazione  
per le PMI"

## Partner del Progetto SICOTER



La pubblicazione fa parte dei risultati di un progetto finanziato dall'Amministrazione regionale sui Fondi Docup ob.2, anni 2000-2006.



La Regione Toscana non è responsabile dei testi e di quant'altro inserito dagli autori e curatori nella presente pubblicazione.

*Pubblicazione collegata alla Collana:*

**RICERCA TRASFERIMENTO INNOVAZIONE**

Regione Toscana  
Giunta regionale

DG Sviluppo economico  
Settore delle politiche regionali  
dell'innovazione e della ricerca

*Dirigente responsabile:*  
Simone Sorbi

Coordinamento comunicazione ed eventi  
Regione Toscana  
Direzione generale della Presidenza  
Settore Comunicazione istituzionale e pubblicitaria

*Coordinamento scientifico:*  
Simone Orlandini, Marco Mancini, Giampiero Maracchi

## Energia rinnovabile dalle biomasse

a cura di Francesca Orlando

Le biomasse, sia quelle prodotte da colture dedicate che quelle residuali originarie da materiali di scarto, possono essere impiegate, attraverso l'utilizzo di apposite tecnologie, per la generazione di energia termica ed elettrica e per la produzione di biocarburanti.

Con il termine "colture dedicate" o "colture energetiche" si fa riferimento a colture allestite su terreni di normale coltivazione o su set-aside allo scopo di produrre biomassa da destinare alla produzione di energia.

Rappresentando un serbatoio di energia solare captata ed incamerata a breve ciclo attraverso i processi di fotosintesi clorofilliana ed il metabolismo degli organismi viventi, la biomassa è ritenuta una fonte di energia rinnovabile e neutrale ai fini dell'incremento di gas a effetto serra ed in grado di apportare vantaggi dal punto di vista ambientale in relazione al fatto che le emissioni di CO<sub>2</sub> dovute al suo utilizzo negli impianti possono ritenersi equivalenti alla CO<sub>2</sub> assorbita nei tessuti della pianta originaria.

Il termine biomassa per sua natura riunisce una gran quantità di materiale eterogeneo a matrice organica, capace quindi di essere convertito in energia sostitutiva di derivati del petrolio. Secondo la definizione riportata dalla direttiva UE 2001/77 e dal decreto legislativo n.387 del 29/12/2003, per biomassa si intende la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (sia di origine vegetale che animale), dalla selvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti urbani.

**I comparti di provenienza** delle biomasse sono rappresentati dal:

- *settore forestale e agroforestale*: i residui delle operazioni selvicolturali e delle attività agroforestali, i prodotti dell'utilizzazione dei boschi;
- *settore agricolo*: i residui colturali provenienti dall'attività agricola (es. residui delle operazioni agricole di potatura, residui di natura composita provenienti da coltivazioni di cereali e seminativi come paglie di riso e di cereali autunno-vernini, stocchi, tutoli e brattee di mais ecc.) e i prodotti di colture dedicate (es. piante arboree o erbacee annuali e poliennali per la produzione di biomassa ligno-cellulosica; piante oleaginose per la produzione di olio vegetale e biodiesel; piante alcoligene per la produzione di bioetanolo);
- *settore zootecnico*: reflui zootecnici per la produzione di biogas;
- *settore industriale*: residui provenienti dalle industrie del legno (es. scarti di segherie ecc.) e della carta, nonché residui effluenti dell'industria agro-alimentare;
- *comparto dei rifiuti urbani*: residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico e frazione umida di rifiuti solidi urbani.

**I processi di conversione** energetica delle biomasse sono principalmente due:

- *conversione biochimica* : 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;
- *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.

**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 specialmente per la produzione di calore, nei settori residenziale ed industriale, ed elettricità;
- *Biocombustibili liquidi*: prodotti derivanti per lo più da colture dedicate attraverso processi di estrazione (olio vegetale puro) ed esterificazione (biodiesel) degli olii vegetali o di fermentazione e distillazione di materiali zuccherini (bioetanolo); sono di particolare interesse per la produzione di biocarburanti nel settore dei trasporti;
- *Biocombustibili gassosi*: prodotti derivanti da processi di fermentazione anaerobica di biomasse umide a componente organica quali reflui zootecnici, civili o agro-industriali: le colonie batteriche in mancanza di ossigeno producono gas costituito al 45-55% da metano.

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). 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 particolare 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.

## **I biocombustibili solidi: le biomasse ligno-cellulosiche**

L'utilizzo di biomasse legnose negli impianti per la produzione di energia costituisce una soluzione innovativa che, oltre ad abbattere il consumo dei derivati del petrolio, di fatto rappresenta una possibilità per attuare un corretto impiego delle risorse boschive ed il recupero e la valorizzazione degli scarti provenienti dal settore agricolo, urbano ed industriale, nel rispetto dei principi di sostenibilità e tutela ambientale e del territorio.

La filiera ligno-cellulosica coinvolge il settore forestale, agricolo e industriale prendendo origine da materie prime di cui i nostri territori sono ricchi, quali: residui di potature agricole e del verde urbano, prodotti di colture boschive dedicate (es. pioppicoltura), residui e prodotti dell'attività selvicolturale, provenienti sia dal taglio programmato dei boschi sia dalla loro pulizia periodica, residui delle industrie del legno e della carta. Si tratta di materiali legnosi e/o derivati (paglia, sansa, pula, gusci, noccioli, ecc.) contenenti cellulosa e con grado di umidità inferiore al 30%, atti quindi al processo di conversione termochimica.

Poiché la biomassa legnosa costituisce storicamente nel nostro Paese, coperto per il 32,3% da boschi, una delle principali fonti di energia rinnovabile, la sua produzione è sicuramente la più consolidata sul territorio e viene impiegata in maniera diffusa, in particolare modo per il riscaldamento degli ambienti civili o industriali e per la produzione di energia termica ed elettrica in cogenerazione. Grazie al bilancio ambientale indubbiamente favorevole e ai buoni rendimenti energetici, il mercato delle biomasse legnose si prospetta in espansione, sia a livello industriale che per uso domestico.

Oltre al settore forestale anche il settore agricolo ha le potenzialità di dare un grosso contributo alla filiera delle biomasse ligno-cellulosiche, non soltanto attraverso

l'inserimento di colture dedicate (es. kenaf, canapa, sorgo da fibra, canna comune, panico, robinia, ginestra, eucalitto, salice, pioppo), ma soprattutto attraverso il recupero di sottoprodotti dell'attività agricola (tab. 25). Di particolare interesse risulta l'impiego dei residui di potatura di viti, olivi e frutteti; tale materiale potrebbe rappresentare una fonte di reddito aggiuntiva per l'agricoltore poiché non compete con altri utilizzi e solitamente deve essere allontanato dal campo per evitare la possibile diffusione di fitopatologie.

La convenienza al recupero del materiale in campo dipende dalle quantità disponibili ad ettaro e dalla loro distribuzione sul territorio; queste dovrebbero essere tali da giustificare i costi delle operazioni di raccolta e trasporto e sono influenzate dalla densità d'impianto, dalla forma di allevamento e dal grado di frammentazione e giacitura dei terreni.

<b>Biomasse residuali</b>	<b>PCI (kcal/kg)</b>	<b>Produzioni (t/ha)</b>	<b>Problematiche</b>
paglie dei cereali autunno-vernini	3300-4200	3-6	quantità disponibili per ettaro basse rispetto al PCI, competizione con altri usi, rischio di eccessivo contenuto in ceneri
paglia di riso	3700-3800		fase di recupero sul campo problematica (durante i mesi piovosi e su terreni con difficoltà di sgrondo delle acque), rischio di eccessivo contenuto in ceneri
stocchi di mais	3700-3800	4-5	competizione con altri usi
tutoli, brattee di mais	4000-4300	1,5-2,5	competizione con altri usi
potature di vite	4300-4400	3-4	
potature di olivo	4400-4500	1-2,5	
potature di fruttiferi	4300-4400	2-3	rischio di eccessivo contenuto in ceneri

*Tabella 25: Biomasse residuali del settore agricolo impiegabili a fini energetici nella filiera ligno-cellulosica (PCI: Potere Calorifero Inferiore)*

In generale, per il pieno sfruttamento del potenziale nazionale in biomassa legnosa si rende necessario il superamento delle barriere allo sviluppo del mercato e delle criticità logistiche legate alle diverse fasi del processo di produzione.

In fase di combustione, le problematiche che possono insorgere sono imputabili, in parte all'inadeguatezza dell'impianto, ma più spesso alla qualità della biomassa (tab. 26): il biocombustibile non in grado di soddisfare i requisiti standard richiesti, legati soprattutto al contenuto di umidità e ceneri, può, col suo basso PCI, compromettere l'efficienza del processo o danneggiare l'impianto stesso. Dunque, per ovviare a tali inconvenienti e diffondere l'utilizzo delle biomasse solide su vasta scala, è indispensabile innanzitutto indirizzare la produzione verso forme di prodotto dalle caratteristiche il più possibile standardizzate.

<b>Parametri fisici:</b>	
Potere Calorifero Inferiore (PCI)	Considerata un umidità del 12-15% il PCI varia tra 3600-3800, esso indica la quantità di calore in kcal che si sviluppa con la combustione di 1 kg di materiale, considerando l'acqua allo stato di vapore a 100°C. Il PCI è fortemente influenzato dal contenuto d'acqua della biomassa e diminuisce all'aumentare dell'umidità.
Umidità relativa	L'umidità relativa influisce sui meccanismi di combustione, sulle qualità chimiche del legno e sul peso specifico e varia tra il 25-60% sul t.q. in funzione della specie, della stagione di taglio, dell'età e della parte di pianta considerata.
Densità	Varia tra 800-1120 kg/m <sup>3</sup> se riferita al fresco e tra 360-810 kg/m <sup>3</sup> se riferita al secco; è il più comune indicatore di qualità del materiale poiché il PCI è direttamente proporzionale alla densità.
<b>Parametri chimici:</b>	
% di lignina	varia tra il 20-30% del peso secco e conferisce alto potere calorifico
% di cellulosa	costituisce circa il 50% del peso secco e conferisce alto potere calorifero
% di emicellulosa	varia tra il 10-30% del peso secco ed ha potere calorifero più modesto rispetto ai precedenti due polimeri.
% di C e H <sub>2</sub>	alti contenuti di carbonio (tra il 49-51%) e idrogeno (tra il 5-7%) conferiscono alto potere calorifero
% di O <sub>2</sub> , N e ceneri	alti valori di ossigeno (tra il 41-45%), azoto (tra il 0,05-0,4%) e ceneri (tra il 0,5-1,5%) conferiscono basso potere calorifero.

Tabella 26: I principali parametri fisici e chimici (composizione in polimeri e composizione elementare) influenti sul valore energetico della biomassa ligno-cellulosica.

Nel mercato del legno per fini energetici, infatti, sono presenti numerosi assortimenti, atti ai diversi tipi di apparecchi da combustione, che possono trarre origine da una gamma eterogenea di materie prime; pertanto si rendono necessari sistemi normativi e di certificazione atti a definire le categorie e le caratteristiche della biomassa di origine e del biocombustibile derivante.

La definizione e caratterizzazione dei diversi tipi di biomassa legnosa si ritrova, assieme alla descrizione delle proprietà e delle classi di qualità, nelle specifiche tecniche europee “UNI CEN/TS 14588, Biocombustibili solidi: Terminologia, definizione e descrizioni” e “UNI CEN/TS 14961 Biocombustibili solidi: specifiche e classificazione” (tab.13). Analogamente, a livello nazionale, il Decreto della Presidenza del Consiglio dei Ministri - DPCM dell'8/03/02, “Disciplina delle caratteristiche merceologiche dei combustibili aventi rilevanza ai fini dell'inquinamento atmosferico, nonché delle caratteristiche degli impianti di combustione”, individua le biomasse combustibili, cioè destinate all'impiego in impianti di combustione, e indica le fonti di materie prime atte alla loro produzione (tab. 27). Inoltre il Comitato Termotecnico Italiano (CTI), anticipando il legislatore nella definizione di una specifica normativa di regolamentazione, ha fornito una serie di schede tecniche di caratterizzazione dei combustibili a fini energetici con valenza di raccomandazione (tab. 28), allo scopo di migliorare le condizioni di commercializzazione dei prodotti e i rapporti tra gli attori del sistema.

<b>Categorie di biocombustibili solidi</b>
prodotti agricoli e forestali
rifiuti vegetali derivanti da attività agricole e forestali
rifiuti vegetali dell'industria agro-alimentare
rifiuti di legno, in particolare quelli derivanti da resti edilizi, esclusi quelli contenenti composti organici alogenati o metalli pesanti dovuti a trattamento protettivo o di rivestimento
rifiuti vegetali fibrosi derivanti dalla pasta di carta grezza e dalla produzione di carta
rifiuti di sughero

Tabella 27: *Categorie di materiale inclusi tra i biocombustibili solidi secondo le norme UNI CEN/TS 14588 e 14961.*

<b>Fonti di biomassa ligno-cellulosica per la produzione di biocombustibili solidi</b>
coltivazioni energetiche dedicate
trattamento esclusivamente meccanico di coltivazioni non dedicate
interventi selvicolturali, da manutenzioni forestali e da potatura
lavorazione esclusivamente meccanica di legno vergine (inclusi: corteccia, segatura, trucioli, chips, refili, tondelli, granulati, cascami, sughero) ovvero non contaminato da inquinanti
lavorazione esclusivamente meccanica di prodotti agricoli aventi le caratteristiche previste per la commercializzazione e l'impiego

Tabella 28: *Fonti di materia prima per la produzione di biomasse atte alla combustione secondo il DPCM dell'8/03/02.*

Inoltre i biocombustibili solidi, rispetto agli altri, presentano una serie di criticità che hanno portato alla formulazioni di forme merceologiche più elaborate rispetto alla tradizionale legna a pezzi. La legna spaccata infatti pone una serie di limiti alla diffusione dell'impiego energetico della biomassa legnosa per via dell'uso relativamente poco agevole legato al peso e al volume del materiale in fase di trasporto, caricamento e immagazzinamento. Per tale motivo, l'impiego della legna a pezzi avviene prevalentemente a livello domestico in piccoli impianti alimentati manualmente (caldaie a legna).

Pertanto stanno prendendo sempre più piede formati legnosi frutto di ulteriori operazioni di frantumazione meccanica (cippato), essiccazione e pressatura, fino ad arrivare alle così dette forme densificate o addensate (pellet e bricchetti) (tab. 29).

Il cippato e i biocombustibili addensati sono infatti in grado di ovviare in parte alle problematiche connesse al trasporto e all'immagazzinamento e consentono, sia una maggior efficienza energetica, legata al minor contenuto d'umidità, sia l'automazione nel caricamento dell'impianto (caldaie a cippato e a pellet), grazie al processo di frantumazione e omogeneizzazione del materiale.

Le operazioni di sminuzzamento, vagliatura ed essiccazione, infatti, avvicinano le caratteristiche del biocombustibile solido a quelle di un fluido permettendone l'estensione dell'utilizzo ai grandi impianti (caldaie per il riscaldamento centralizzato degli edifici) e nel teleriscaldamento. Da questo punto di vista, poiché il cippato occupa maggiori volumi a parità di contenuto energetico, è più idoneo al contesto industriale; al contrario pellet e bricchetti sono più che altro rivolti al contesto urbano per i piccoli e medi impianti residenziali.

Categorie di biomasse legnose	Processo di produzione	Dimensioni e livelli di umidità tipici del materiale
Legna spaccata corta	Taglio meccanico (con utensili affilati)	UR < 50% Dimensioni: 50-500 mm (L)
Legno frantumato	Frantumazione meccanica	UR < 50% Dimensioni: 3,15-300 mm
Cippato	Frantumazione e sminuzzamento meccanici, essiccazione	UR tra 25-50% Dimensioni: 3,15-100mm
Pellet	Sminuzzamento meccanico, essiccazione, compressione	UR < 12%, e sempre < 20% Dimensioni: DxL 6-8x10-30 mm
Bricchetti Tronchetti	Sminuzzamento meccanico, essiccazione, compressione	UR < 20% Dimensioni: DxL 25-125 x 40-400 mm

Tabella 29: Principali categorie di biomasse legnose secondo le specifiche tecniche del CTI (D= diametro, L=lunghezza).

Dal punto di vista ambientale ed economico, il cippato e le forme densificate consentono ricadute positive sul territorio dando la possibilità di sfruttare al massimo le potenzialità dei diversi settori produttivi e di recuperare i residui di lavorazione delle segherie e delle industrie del legno (es. segatura, trucioli, refili ecc.), delle industrie di trasformazione (es. parte di semi o frutti) e delle attività nel settore agro-forestale (es. sramati, ramaglie, cimali, residui di colture erbacee). Tali biomasse però devono trarre origine esclusivamente da legno vergine e quindi non essere contaminate da materiali sintetici quali colle, vernici, plastiche, preservanti, ecc. In quest'ambito per il pellet, a livello europeo, è stata approvata la norma UNI CEN/TS 14961 con la quale vengono stabiliti i requisiti che deve possedere il prodotto per non causare guasti all'impianto visto che la diversa provenienza del materiale d'origine può portare ad una gamma di prodotti finali di diversa qualità, soprattutto in termini di potere calorifico e contenuto in ceneri. A questo proposito, specifiche normative per l'introduzione di standard qualitativi per il pellet sono state istituite in Austria (ÖNORM M 7135) e in Germania (DINplus), mentre in Italia per il momento non vi è ancora un sistema di certificazione di qualità, ma soltanto un sistema di "attestazione" di qualità sviluppato da AIEL (Associazione Italiana Energie Agroforestali).

Il pellet, dunque, grazie al suo alto potere calorifico e alla standardizzazione del prodotto, è in grado di competere con i normali combustibili fossili (2,1 ton di pellet equivalgono a circa 1 m<sup>3</sup> di diesel leggero) e il suo mercato è in continua espansione sia a livello europeo che nazionale. Attualmente il fornitore principale di materia è l'industria del legno e le potenzialità del settore agro-forestale restano ancora inesplorate sebbene l'espansione del mercato renda il settore industriale sempre meno in grado di soddisfare la domanda di materiali ligno-cellulosici per la produzione di pellet, bricchetti e cippato, soprattutto a causa della concorrenza di panellifici e cartiere nell'impiego delle materie prime. Il duplice riflesso di questa situazione è rappresentato, da un lato, dall'incremento delle importazioni di materia prima dall'estero (principalmente da: Austria, Slovenia, Paesi dell'est europeo, nord America), e dall'altro ha fatto sorgere la necessità d'impiegare ulteriori e differenti materie prime legnose includendo anche quelle di origine agricola e forestale.



Figura 36: tipologie di prodotti lignocellulosici commerciali, per coeneratori ad alimentazione automatica.

<b>Barriere allo sviluppo del mercato del pellet e del cippato</b>
Disinformazione sui vantaggi economici-ambientali
Incertezza nella disponibilità di materia prima e competizione con altri impieghi
Mancanza di un sistema di controllo sulla costanza negli standard qualitativi del prodotto
Mancanza di un sistema di controllo dei prezzi che stabilisca il valore di mercato del prodotto in funzione del potere calorico
Mancanza di chiari sistemi di classificazione per le biomasse di origine
Costi di produzione disomogenei
Diverse propensioni di spesa da parte delle categorie di utilizzatori finali

Tabella 30: Elenco delle barriere che limitano lo sviluppo del mercato del cippato e dei biocombustibili addensati.

Secondo le stime al 2005, il fabbisogno nazionale di pellet si attesta attorno ai 3000000 ton/anno, le importazioni ammontano a più di 50000 t/anno e la produzione nazionale è superiore alle 250000 ton/anno. La produzione italiana di pellet, da parte delle circa 40 aziende operanti sul territorio prevalentemente del Veneto e Friuli Venezia Giulia, si basa per solo l'1,5% su materiali derivanti da potature agricole e per il 3,5% su residui erbacei, mentre per la maggior parte trae origine da residui industriali (per l'83,3% da segatura e trucioli).

Nella tabella 30 sono riassunti i principali ostacoli allo sviluppo del mercato dei biocombustibili addensati e del cippato.

## I biocarburanti: biocombustibili liquidi e gassosi

Se i combustibili solidi rappresentano un'interessante opportunità per la produzione di energia termica ed elettrica, i biocarburanti hanno il merito di avere un ruolo potenziale, oltre che in tali ambiti, anche nel settore dei trasporti, la cui richiesta energetica è in continua crescita. Si prevede che in Europa al 2030 l'impiego di energia nei trasporti aumenterà di circa il 50%, rispetto ai livelli del 1990, assieme ai connessi rischi ambientali e di dipendenza dalle importazioni; solo in Italia nel 2005 sono stati consumati 24,3 milioni di tonnellate di gasolio e 13,4 milioni di tonnellate di benzina. Da qui deriva l'importanza di sviluppare un sistema di produzione nazionale di biocarburanti che invece stenta a decollare.

I prodotti destinati ad essere utilizzati come biocarburanti nei trasporti vengono definiti ed indicati nel Dlg. n. 128 del 30/05/2005, attuazione della direttiva 2003/30/CE. In generale i biocarburanti si originano da biomasse ottenute sia da colture energetiche dedicate che a partire da residui vegetali e rifiuti organici di vario tipo; essi sono atti ad essere utilizzati per l'alimentazione di motori a combustione interna (a ciclo Diesel e ciclo a Otto) e le caratteristiche che li contraddistinguono dai tradizionali derivati del petrolio sono le seguenti:

- *ossigenati*, la presenza di ossigeno nella loro composizione conferisce il potere di ridurre altamente le emissioni di inquinanti gassosi, specie di monossido di carbonio, dai motori endotermici;
- *bassissimo contenuto in zolfo*, ciò consente di ridurre in maniera consistente le emissioni di anidride solforosa;
- *biodegradabili*, poiché costituiti da composti organici presenti in natura;
- *elevato contenuto energetico*, paragonabile a quello degli idrocarburi fossili;
- *bilancio energetico-ambientale favorevole*, poiché sono ottenuti dalle biomasse, quindi da una fonte rinnovabile.

## I biocarburanti da colture oleaginose

Biocarburanti liquidi possono essere ottenuti da colture oleaginose, attraverso il semplice processo di spremitura, ed in tal caso si ottiene il così detto PVO (olio vegetale puro), oppure includere ulteriori processi di raffinazione chimica atti a renderli più vicini ai tradizionali prodotti petroliferi (es. biodiesel).

L'introduzione di specie oleaginose nei piani di rotazione dell'agricoltura italiana si prospetta particolarmente favorevole; alcune di queste colture infatti, non presentando elevati fabbisogni idrici (es. colza, brassica carinata, ecc.), possono rappresentare una possibilità interessante per i terreni marginali delle aree italiane soggette ad una tendenziale riduzione dei regimi pluviometrici, e contemporaneamente assumere il ruolo di colture da rinnovo o da sovescio risultando funzionali al mantenimento dei livelli di fertilità dei suoli.

Le principali oleaginose utilizzate per la produzione di PVO o biodiesel, in Italia, sono colza, girasole, soia, ricino e cartamo, a cui si aggiungono, a livello internazionale, palma da olio, la più diffusa nel mondo, arachide, olivo, cocco e sesamo. Le colture che più si adattano al pedo-clima del nostro paese e che hanno buone prospettive d'impiego nella filiera energetica delle oleaginose sono il colza e il girasole, in misura inferiore la soia per le basse rese in olio, e di crescente interesse gode il cavolo dell'Abissinia (Brassica carinata), specie in via di sperimentazione e che ben si adatta alle zone mediterranee per il

basso fabbisogno idrico e la buona capacità d'adattamento a terreni sia sciolti che argillosi (tab. 31).

Coltura	Produzione semi t/ha	Contenuto in materia grassa % in peso	Resa media in PVO t/ha	Resa media in biodiesel t/ha
Colza	1,5-2,1	41-50	0,8	0,9
Girasole	2,0-3,2	48-55	1,0	1,1
Soia	2,9-3,6	18-21	0,5	0,6
<b>B.Carinata</b>	2,9-3,5	30-39	0,9	1,0

*Tabella 31: Per le colture più atte al pedo-clima italiano sono riportate le rese produttive d'interesse per l'impiego energetico.*

Il PVO si ottiene per spremitura a freddo di semi di oleaginose e successiva filtrazione; il co-prodotto del processo di produzione è rappresentato dal pannello, vendibile come alimento zootecnico ed elemento di particolar rilievo nelle valutazioni economiche inerenti la filiera dell'olio vegetale puro. Il PVO per le sue caratteristiche chimico-fisiche e l'elevato PCI (PCI medio: 9400 kcal/kg) può essere utilizzato per autotrazione in sostituzione del gasolio a seguito di adattamenti a motori a ciclo Diesel; in generale però è più diffusamente impiegato nella generazione termica, elettrica e nella cogenerazione.

Non esiste una normativa nazionale volta a regolamentare le caratteristiche che devono possedere i PVO per essere commercializzati a fini energetici; a questo proposito esiste però la specifica del Comitato Termotecnico Italiano (CTI), volta a designare, sulla base delle esperienze condotte in altri paesi, i metodi per la verifica degli standard più idonei cui il prodotto si deve attenere. I parametri che maggiormente allontanano il PVO dai combustibili fossili e che hanno reso necessaria la formulazione di prodotti più elaborati sono indicati in tabella 32.

Parametro:	PVO rispetto al Diesel:	Conseguenze:
Viscosità	maggiore	Rende necessarie modifiche all'impianto di iniezione del motore
Punto d'infiammabilità	maggiore	Conferisce il vantaggio di una maggior sicurezza durante le operazioni di manipolazione, trasporto, stoccaggio
Numero di Iodio	maggiore	Conferisce tendenza al deterioramento del prodotto con polimerizzazione e formazione di gomme e depositi
PCI	minore	Conferisce minor densità energetica, per sostituire 1 kg di gasolio sono necessari all'incirca 1,13 kg di PVO
Numero di Centano	minore	Conferisce minor prontezza all'accensione, rendendo il PVO più atto a motori a basso numero di giri (es. trattori)
Punto di intorbidimento e di scorrimento	maggiori	Comporta maggiori problematiche legate all'impiego durante i mesi freddi

*Tabella 32: Tabella di confronto tra PVO e Diesel tradizionale, sui principali parametri d'interesse per l'impiego come combustibile.*

Nonostante questo, il PVO risulta un'opportunità interessante per ciò che riguarda l'impiego diretto da parte dell'azienda agricola, sia per l'alimentazione di trattori

appositamente modificate che per la cogenerazione. In tal senso, infatti, il PVO consente l'attuazione di una filiera a km zero, attraverso l'uso di infrastrutture già esistenti in azienda, che annulla i costi economico-ambientali connessi al trasporto o ad ulteriori fasi intermedie di lavorazione ed incrementa la remunerazione del prodotto primario.

Il biodiesel oltre a prevedere l'impiego di biomasse da colture dedicate, può includere l'utilizzo di oli e grassi animali e vegetali esausti reperibili, tramite raccolta differenziata da industrie ago-alimentari, esercizi pubblici, attività di ristorazione, utenze domestiche e da attività di lavorazione delle carni animali. In tal caso le biomasse di scarto prima di essere avviate al normale processo produttivo devono subire un trattamento preliminare di *rigenerazione* necessario per via della bassa qualità del materiale esausto legata specialmente agli alti valori di acidità.

Per l'ottenimento del biodiesel, sia gli oli vegetali puri che gli oli rigenerati sono sottoposti a raffinazione; tale fase consiste in un processo di conversione chimica detto *transesterificazione* attraverso cui si attua la sostituzione dei componenti alcolici d'origine (glicerolo) con alcool metilico (metanolo); ne risulta un prodotto dalle caratteristiche più simili al gasolio e quindi vengono limitati gli inconvenienti connessi all'uso del semplice PVO (tabella18). Il biodiesel infatti è compatibile con i tradizionali motori a ciclo Diesel in miscela con il gasolio. Inoltre, sotto certi aspetti, il biodiesel si comporta addirittura meglio del gasolio avendo, rispetto a questo, punto d'infiammabilità minore (maggior sicurezza nelle operazioni di manipolazione) e numero di centano maggiore (maggior prontezza all'accensione); per ciò che riguarda invece gli altri parametri presenta gli stessi inconvenienti del PVO (tab. 33)

	<b>Diesel</b>	<b>Biodiesel</b>	<b>PVO girasole</b>	<b>PVO colza</b>
Potere calorifico (MJ/kg)	42,7	37,2	37,7	37,6
Densità a 15°C (kg/l)	0,83	0,86-0,9	0,92	0,91
Contenuto energetico (MJ/l)	35,2	32,7	34,8	34,2
Viscosità a 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	2-4,5	3,5-5	31,4	36
Punto d'infiammabilità (°C)	>55	>120	253	>220

Tabella 33: Tabella di raffronto sui più influenti parametri fisici per Diesel, Biodiesel e i due PVO più diffusi in Italia.

Tra tutti i biocombustibili, il biodiesel è stato considerato quello con le maggiori potenzialità d'impiego nel settore dei trasporti ai fini della riduzione delle emissioni di gas effetto serra e, pertanto, la sua produzione si è notevolmente sviluppata sia in Italia che in Europa rispetto a quella del biogas o del bioetanolo. L'Europa detiene l'81,5% della produzione mondiale di biodiesel, originato principalmente a partire da olio di colza e girasole. La sola Germania nel 2006, grazie a norme nazionali che garantiscono la quasi completa esenzione dalle tasse sul biocombustibile, ha prodotto il 45% del biodiesel presente sul mercato dell'UE, la Francia il 13%; l'Italia il 15% ed il restante 27% è ripartito tra gli altri stati dell'UE. In Italia però le materie prime impiegate sono in larga misura provenienti dall'estero (semi/olio di palma, colza e girasole) e tale aspetto comporta notevoli contraddizioni del sistema in termini di sostenibilità per via dei costi energetici ed ambientali connessi al trasporto.

Inoltre, di recente, la convenienza ambientale dell'impiego di biomasse originarie da colture energetiche dedicate, su cui si basa la maggior parte della produzione di biodiesel, è stata rivista in un'ottica di Life Cycle Assessment prendendo in considerazione nei bilanci di emissioni ed energetici tutti gli input/output coinvolti nelle fasi del processo che va dalla produzione della biomassa all'utilizzo del biocarburante. In particolar modo dubbi sono

stati sollevati riguardo le emissioni legate alle pratiche agricole di fertilizzazione e lavorazione in grado di interagire col naturale ciclo del carbonio e dell'azoto; in tale contesto assistiamo dunque ad un cambio di prospettiva a favore di quei biocarburanti in grado di utilizzare più diffusamente biomasse di scarto derivanti da altri processi produttivi (es. biogas e bioetanolo).

## I biocarburanti da colture alcoligene

Un'alternativa al biodiesel è rappresentata dal bioetanolo e derivati. Il *bioetanolo* è basato sul processo di produzione di alcol etilico a partire dalla fermentazione di materiale a matrice zuccherina (zuccheri semplici o zuccheri complessi) proveniente sia da colture dedicate che dalla parte biodegradabile di sottoprodotti dell'industria agro-alimentare e delle attività nel settore agricolo e forestale.

Il bioetanolo infatti può originarsi da un'ampia gamma di biomasse:

- *saccarifere* (contenenti glucosio e fruttosio),
- *amidacee* (contenenti amido),
- *ligno-cellulosiche* (contenenti cellulosa ed emicellulosa);

Le fasi della filiera produttiva dipendono dalla materia prima utilizzata. Per le biomasse saccarifere il processo consiste nell'estrazione degli zuccheri dai tessuti vegetali preposti all'accumulo, nella successiva fermentazione dell'estratto zuccherino, nella distillazione e disidratazione dell'alcol. Nel caso di biomasse amidacee, invece, a monte della fermentazione, si aggiungono le fasi di macinazione della granella e idrolisi dell'amido. Nel caso di biomasse ligno-cellulosiche la tecnologia di produzione è ancora in via di sperimentazione poiché basata su una fase di pretrattamento che prevede l'impiego di un idoneo pattern di enzimi in grado di consentire l'efficiente separazione della lignina e l'idrolisi di cellulosa ed emicellulosa in zuccheri semplici da avviare in seguito al processo fermentativo. Quest'ultima opzione è particolarmente interessante poiché rappresenta una possibilità di valorizzazione dei residui legno-cellulosici (scarti di potature operate in campo agricolo, forestale ed urbano, paglie di riso e frumento, stocchi tutoli e brattee di mais, ecc.), ampiamente disponibili sul territorio nazionale, oltre che nel settore generazione termoelettrica anche in quello dei trasporti. Tale prospettiva però si ritiene potrà concretizzarsi nei prossimi 7-10 anni ed attualmente la produzione ha luogo soltanto in impianti pilota. Nella produzione di bioetanolo vengono al momento impiegati i residui del settore ortofrutticolo e dell'industria agro-alimentare rappresentati principalmente dai sottoprodotti della filiera di produzione dello zucchero, del vino e della frutta.

Tra le specie alcoligene, cioè caratterizzate da elevati contenuti di carboidrati fermentescibili, abbiamo la barbabietola da zucchero, la canna da zucchero ed il mais, presenti tradizionalmente rispettivamente in Europa, Brasile e Stati Uniti; a queste si aggiungono frumento e topinambur. Le specie atte alla produzione di biomassa ligno-cellulosica in Italia, invece, possono ritenersi: la canna comune, il panico ed il sorgo da fibra (quest'ultimo a duplice attitudine, in grado di garantire la contemporanea produzione di granella ricca in amido e di fibra). In tabella 34 sono riportate le colture amilaceo-saccarifere più idonee al pedo-clima del nostro Paese.

E' necessario sottolineare come la concorrenza rappresentata dal settore alimentare costituisca un forte elemento di freno allo sviluppo in Italia della filiera del bioetanolo a partire da colture dedicate; assume pertanto importanza crescente la possibilità di valorizzare in termini energetici i residui produttivi il cui reperimento incide in misura molto più contenuta sui costi di produzione.

	(% sulla s.s.)	(t/ha)	Caratteristiche
<b>Saccarifere</b>	<b>Estratto zuccherino</b>	<b>Rese in etanolo</b>	
barbabietola da zucch.	20	5,5	Tradizionalmente coltivata nel Paese
sorgo zuccherino	18	4,5	Elevata plasticità e bassi fabbisogni idrici
<b>Amidacee</b>	<b>Contenuto di amido</b>		
mais	78	3-6	Atto alle regioni settentrionali
frumento tenero	70	2,5	Atto alle regioni meridionali

Tabella 34: Colture alcoligene, saccarifere ed amidacee, più adatte al pedo-clima italiano.

Grazie alle sue proprietà chimico fisiche, il bioetanolo è in grado di sostituire la benzina nei motori a ciclo Otto e si prospetta per il futuro, dopo ulteriore sperimentazione, il suo impiego anche nei motori a ciclo Diesel. Il bioetanolo per alcuni aspetti presenta comportamenti migliori della benzina: l'elevato numero di ottano gli conferisce maggior capacità antidetonante, la volatilità (espressa dalla temperatura di ebollizione e dalla tensione di vapore) superiore permette una più omogenea e veloce miscelazione con l'aria nel corso della carburazione consentendo di migliorare la combustione, l'avviamento a freddo del motore e le prestazioni in accensione. Inoltre, soprattutto grazie all'elevata ossigenazione, questo biocarburante comporta un impatto ambientale contenuto rispetto ai combustibili fossili in termini di emissioni di composti inquinanti e di gas serra (particolato, monossido di carbonio, anidride solforosa). Per contro il limite è rappresentato dal minore valore di PCI (27 MJ/kg): per sostituire 1 kg di benzina occorrono 1,67 kg di bioetanolo (tab. 35).

Il bioetanolo costituisce la base per la produzione del bio-ETBE (etil-terbutil-etero), un derivato ossigenato ricavato per sintesi chimica a partire da etanolo (al 47%) e isobutene (al 53%). Poiché nella sua sintesi partecipa un idrocarburo fossile (l'isobutene) il bio-ETBE è considerato un biocarburante solo per la frazione che deriva dal bioetanolo. Il bio-ETBE viene invece considerato un antidetonante in virtù del numero di ottano superiore rispetto a quello della benzina, quindi può essere utilizzato nella formulazione delle benzine per motori a ciclo a Otto al fine di migliorarne le caratteristiche di compatibilità ambientale regolarizzando e omogenizzando la combustione della miscela.

Il bioetanolo ed i suoi derivati possono essere impiegati come carburante sia puri che in miscela con la benzina, apportando, anche in tal caso, indubbi vantaggi dal punto di vista di emissioni di gas effetto serra. La tecnologia FFV (Fuel Flexible Vehicles) ha consentito la diffusione in alcuni paesi europei (Francia, Svezia, Germania) di veicoli a doppio sistema di alimentazione, a benzina e a bioetanolo all'85% in volume con la benzina. In Brasile il bioetanolo azeotropo è utilizzato puro nei veicoli predisposti.

La produzione europea di bioetanolo presenta quantità decisamente inferiori al biodiesel, tuttavia gli incrementi nella produzione sono importanti e da ricondursi all'ingresso dei nuovi Paesi membri che introducono produzioni nazionali grazie agli scarti delle coltivazioni a grani. La Spagna è il maggior produttore con 240.000 t prodotte nel 2005, seguita da Svezia (oltre 130.000 ton) e Germania (120.000 ton), l'Italia è praticamente assente da questo mercato.

Parametri	Bioetanolo	Benzina
PCI (MJ/kg)	27	44
Contenuto ossigeno (%)	35	assente
Numero di ottano	113	90
Temperatura di ebollizione (°C)	78	100
Tensione di vapore (kPa)	124	85

Tabella 35: Tabella di raffronto tra bioetanolo e benzina sui più influenti parametri chimico-fisici.

## Il biogas dai rifiuti

Il biogas è un biocombustibile rappresentato da una miscela gassosa ottenuta attraverso il processo di fermentazione anaerobica di materiale organico entro appositi reattori (digestori); esso è caratterizzato da un alto PCI che lo rende atto ad essere utilizzato in sostituzione del gas naturale nei motori a ciclo Diesel e a Ciclo Otto.

Le materie prime impiegabili sono svariate e includono una vastissima gamma di biomasse che non competono con impieghi alternativi; i materiali a matrice organica sono sostanzialmente riconducibili a scarti e rifiuti provenienti dai diversi settori di attività umana, principalmente zootecnico, urbano e agro-alimentare.

Tradizionalmente il biogas deriva dalla fermentazione delle deiezioni zootecniche e dai rifiuti solidi urbani stoccati nelle discariche. Pertanto, il valore ambientale del biogas è altissimo; esso infatti, prendendo origine prevalentemente da materiali di scarto, presenta un bilancio ambientale decisamente favorevole: contribuisce a risolvere il problema dello smaltimento dei rifiuti organici escludendo le perplessità sollevate sui bilanci di emissioni riguardanti le filiere di biocarburanti prodotti a partire da colture dedicate.

Nonostante questo, la produzione di biogas nel nostro Paese è ancora scarsa e l'applicazione nel settore dei trasporti limitata; il suo impiego potrà avere in futuro maggior peso rappresentando anche una valida opportunità di guadagno per le aziende agricole. Vista l'elevata concentrazione di allevamenti bovini e suini nel nostro Paese e l'ammontare dei reflui derivanti, la produzione di biogas introduce un risparmio sui costi di smaltimento e alternative di reddito per l'agricoltore.

Le criticità connesse alla filiera del biogas riguardano la distribuzione sul territorio degli allevamenti e le distanze dall'impianto di produzione. Per non incontrare difficoltà di carattere logistico e rispettare il principio di sostenibilità, infatti, è auspicabile, parimenti agli altri biocombustibili, che i siti di prelievo ed impiego delle biomasse si inseriscano in un ambito di filiera corta.

Il processo di produzione del biogas si articola di una prima fase, in cui la sostanza organica viene convertita in composti semplici (acido acetico, anidride carbonica, idrogeno) da batteri anaerobi facoltativi, e di una seconda fase, operata da batteri anaerobi obbligatori (metanigeni) che trasformano i composti intermedi in metano e anidride carbonica. Il risultato è l'ottenimento di una miscela gassosa costituita per circa il 30-40% da anidride carbonica, il 60-70% da metano e con tracce di idrogeno solforato nell'ordine dello 0,1%; il PCI mediamente è di 23,3 MJ/Nm<sup>3</sup> e tanto più alto quanto maggiore è la percentuale di metano. Il *biometano* invece si ottiene attraverso la purificazione del biogas al 98% di metano e la compressione a 220bar ed in tal caso può essere utilizzato con successo per alimentare autovetture fornite di tradizionale impianto a metano

Generalmente grazie all'elevato PCI entrambi i biocombustibili possono essere utilizzati nei motori a ciclo Diesel, per potenze superiori a 1 MW (motori "Dual Fuel"), nei motori a Ciclo Otto, anche per taglie piccole, e nelle microturbine (tab. 36). Il biogas però è prevalentemente destinato alla generazione di energia termica (tramite combustione diretta in caldaia) o alla cogenerazione (da 1 m<sup>3</sup> di biogas si ottengono 1,8-2 kWh di elettricità e 2-3 kWh di calore); mentre il biometano è maggiormente atto ad essere impiegato nel settore dei trasporti in sostituzione del gas metano.

<b>Parametri</b>	<b>Metano</b>	<b>Biogas</b>
Potere calorifico (kWh/m <sup>3</sup> )	10,00	6,0
Densità a 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	0,72	1,2
Densità relativa rispetto all'aria (kg/m <sup>3</sup> )	0,55	0,9
Fabbisogno d'aria teorico (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	9,5	5,7
Punto d'infiammabilità (°C)	595	700

*Tabella 36: Tabella di confronto tra il biogas ed il metano sui più influenti parametri fisici.*

Le deiezioni zootecniche tradizionalmente impiegate nel processo di digestione consistono in reflui di allevamento risultato di una miscela di feci, urine, acqua, lettiera, peli, residui alimentari ecc. La composizione delle deiezioni quindi può variare notevolmente in funzione della specie animale e delle modalità di allevamento e di gestione. In generale le deiezioni vengono classificate sulla base del loro contenuto in sostanza secca; i liquami sono quei reflui con contenuto di sostanza secca inferiore al 10-12% e sono il tipo di biomassa che meglio si presta allo sfruttamento energetico, in particolare se prodotti da suini e bovini.

In seguito all'accresciuta consapevolezza della valenza ambientale dello sfruttamento delle biomasse residuali, accanto ai tradizionali di gestori per reflui zootecnici si stanno ampiamente diffondendo quelli atti alla così detta "codigestione". Nella codigestione viene impiegata nel processo fermentativo una miscela di substrati di diversa provenienza. Alle deiezioni zootecniche si aggiungono: residui colturali (paglia, stocchi etc.), reflui agro-industriali, scarti organici di macellazione, fanghi di depurazione, la frazione organica di rifiuti urbani, prodotti di colture energetiche (mais da insilato, sorgo zuccherino, triticale, erba medica, prato ecc). La presenza di diversi substrati per la fermentazione anaerobia consente lo sviluppo di diversi gruppi di microrganismi; ne risulta un incremento delle rese in biogas dovuto alla stabilizzazione del processo.



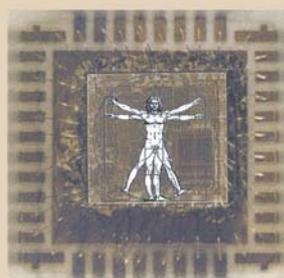
**Regione Toscana**

Diritti Valori Innovazione Sostenibilità



## SICOTER

Sistema Informativo per l'ottimizzazione del  
COmfort Termico nei luoghi di lavoro e la  
creazione di una filiera per l'uso di  
Energia Rinnovabile nella provincia di Firenze



RICERCA  
TRASFERIMENTO  
INNOVAZIONE

**DOCUP Ob. 2  
Anni 2000-2006**

Misura 2.8 "Azioni a sostegno  
della società dell'informazione"  
Azione 2.8.4. "Potenziamento  
del sistema regionale di servizi  
telematici e di comunicazione  
per le PMI"

## Partner del Progetto SICOTER



La pubblicazione fa parte dei risultati di un progetto finanziato dall'Amministrazione regionale sui Fondi Docup ob.2, anni 2000-2006.



La Regione Toscana non è responsabile dei testi e di quant'altro inserito dagli autori e curatori nella presente pubblicazione.

*Pubblicazione collegata alla Collana:*

RICERCA TRASFERIMENTO INNOVAZIONE

Regione Toscana  
Giunta regionale

DG Sviluppo economico  
Settore delle politiche regionali  
dell'innovazione e della ricerca

*Dirigente responsabile:*  
Simone Sorbi

Coordinamento comunicazione ed eventi  
Regione Toscana  
Direzione generale della Presidenza  
Settore Comunicazione istituzionale e pubblicitaria

*Coordinamento scientifico:*  
Simone Orlandini, Marco Mancini, Giampiero Maracchi

# **Valutazione delle potenzialità e della vocazionalità produttiva del Chianti e del Mugello per colture da biomasse energetiche dedicate e da residui colturali**

a cura di Anna Dalla Marta, Roberto Ferrise, Marco Napoli

## **Introduzione**

L'impiego delle biomasse agroforestali a fini energetici può fornire un importante contributo nell'ambito dello sviluppo di fonti energetiche rinnovabili. Queste possono essere prodotte sia a partire da colture energetiche dedicate sia attraverso il recupero dei residui ligno-cellulosici derivanti da coltivazioni agrarie, utilizzazioni forestali o da residui di allevamenti.

L'impiego delle colture dedicate a scopo energetico è però fonte di molteplici polemiche legate soprattutto all'effettivo contributo alla riduzione dei gas serra. Questo, infatti, è ancora in buona parte da definire. Recenti ricerche, infatti, attribuiscono alle fertilizzazioni azotate un'importanza maggiore di quanto fino ad ora computato allo sviluppo di protossido d'azoto ( $N_2O$ ), un gas serra 296 volte più efficace dell'anidride carbonica ( $CO_2$ ) (Crutzen et al., 2007; Dalal et al., 2003; Cheng et al., 2006). Inoltre l'impiego di terreni seminativi per la produzione di colture energetiche si pone in contrasto con la produzione di derrate alimentari dando origine a riflessioni sull'eticità del loro impiego. In questo contesto la loro coltivazione può essere ipotizzata su quei terreni che attualmente sono stati ritirati dalla coltivazione e che in Toscana hanno fatto registrare negli ultimi anni un progressivo aumento. La produzione di colture agrienergetiche dedicate su questi tipi di terreno origina però un altro ordine di problemi legati al fatto che spesso sono posti in aree declive e meno produttive e l'intervento della meccanizzazione è difficile e può innescare fenomeni erosivi. Inoltre le colture attualmente prese in considerazione per produrre biomassa hanno elevate esigenze irrigue elevate per essere produttive. Per il loro sviluppo occorre quindi sostenere ed indirizzare la ricerca verso quelle specie che richiedono bassi input in fertilizzanti, lavorazioni e necessità irrigue. Lo sviluppo di questo nuovo mercato può infatti fornire un contributo al settore agricolo nell'attuale panorama di crisi e mantenere il territorio presidiato e tutelato soprattutto in quelle aree marginali in progressivo abbandono.

Completamente diversa è la prospettiva per le biomasse residuali, dove l'opportunità di valorizzare energeticamente un prodotto di scarto, che spesso necessita di una gestione onerosa, può fornire un valido presupposto per lo sviluppo di questa nuova filiera. A tal fine la possibilità di reimpiegare i residui di potatura delle principali specie agrarie coltivate sul nostro territorio (es. vite ed olivo), apre al settore agricolo nuovi scenari di sostenibilità economica compatibile con l'ambiente.

Obiettivo delle ricerche presentate in questo capitolo è stata l'analisi e la stima delle produzioni potenziali, per alcune tipologie di biomasse residuali e da colture dedicate, ottenibili nei comprensori agricoli fiorentini del Chianti e del Mugello. Per le colture agrienergetiche dedicate sono state prese in esame il mais ed il girasole visto la loro diffusa coltivazione a fini alimentari. Per i residui colturali sono state esaminate la vite e l'olivo che costituiscono per il Chianti le coltivazioni principali ed attualmente sono in espansione anche nel Mugello. Per completare il quadro è stato preso in esame il sorgo, coltura notoriamente adatta a regimi idrici ridotti e a lavorazioni minime quindi proponibile per

l'insediamento nei terreni marginali. I risultati finali della prova sul sorgo saranno presentati all'interno del sito [www.sicoter.it](http://www.sicoter.it), visto che il ciclo colturale non ha permesso di completare le prove entro la fine del progetto stesso.

## Le aree studiate

Nella prima fase dello studio è stato definito il territorio di indagine e sono state reperite le informazioni necessarie per operare elaborazioni con i sistemi di cartografia informatica. Questa, infatti, permette di creare carte tematiche relative ai territori agricoli studiati, facilitando e migliorando la qualità delle analisi effettuate. Come prima operazione sono stati reperiti i layer dei confini amministrativi ed il modello digitale del terreno con i quali è stato possibile delimitare e caratterizzare le aree studiate (fig. 37).

L'uso del suolo è stato ricavato dalla cartografia CORINE Land Cover (CLC2002). Il programma CORINE (COoRdination de l'INformation sur l' Environnement), varato dal Consiglio della Comunità Europea nel 1985, ha lo scopo primario di verificare dinamicamente lo stato dell'ambiente nell'area comunitaria, al fine di orientare le politiche comuni, controllarne gli effetti, proporre eventuali correttivi. In tale ambito il database CLC2002 è specificamente destinato al rilevamento e al monitoraggio delle caratteristiche del territorio, con particolare attenzione alle esigenze di tutela, le quali sono tra gli obiettivi di questo progetto. Il database CLC2002 è costituito da una cartografia digitale dell'uso del suolo alla scala di 1:100000 ed è stato sviluppato in modo tale da essere facilmente utilizzato e analizzato tramite software GIS (Geographic Information Systems). Il GIS è un sistema informatizzato in grado di immagazzinare dati descrittivi della superficie terrestre e di elaborarli fornendo un notevole supporto ai processi decisionali (DSS decision support system). La possibilità d'utilizzare le applicazioni GIS è il principale vantaggio derivante dalla creazione di database digitali; i GIS, infatti, permettono di raggruppare le informazioni del territorio a seconda della loro natura e/o di sovrapporle, di analizzarle in maniera incrociata, di effettuare elaborazioni geostatistiche e di lavorare in ambiente tridimensionale. Queste caratteristiche rendono possibile l'analisi geostatistica e della correlazione fra i vari strati informativi.

Tutti gli strati informativi sono stati importati in ambiente ArcGis e georiferiti al sistema cartografico WGS84 (World Geodetic System 1988). Si è quindi proceduto all'estrazione dei dati delle singole aree oggetto di studio, utilizzando delle maschere corrispondenti ai limiti del territorio interessato.

Dal CLC2002 attraverso il programma di cartografia informatica sono state estratte le superfici coltivate a olivo, vite e seminativo per il Chianti fiorentino e per il Mugello e la loro distribuzione sul territorio.

Per quanto riguarda il Chianti fiorentino la superficie totale a seminativi, vigneti ed oliveti è di 17542 ha, dei quali ben 9728 ha destinati alla coltivazione dell'olivo, mentre la superficie destinata alla coltivazione della vite è 4928 ha (fig. 38). Tali superfici sono distribuite abbastanza uniformemente sul territorio. Le superfici destinate ai seminativi sono limitate ai fondovalle dei torrenti Elsa e Pesa e dei loro relativi affluenti e complessivamente interessano 2885 ha.

Per il Mugello è ridotta la presenza di aree destinate a vite e olivo. La coltivazione dell'olivo è per lo più concentrata nel territorio di Vaglia e complessivamente per tutto il territorio esaminato è limitata a circa 220 ha. Anche la coltura della vite è molto ridotta, dall'analisi del CLC2002 sono stati rilevati poco più di 60 ha. Per i seminativi, invece, il Mugello con oltre 13200 ha, risulta molto vocato. Questi sono presenti in tutti i comuni

esaminati, ma è soprattutto nel bacino del fiume Sieve che si ha la maggiore concentrazione (fig. 39).

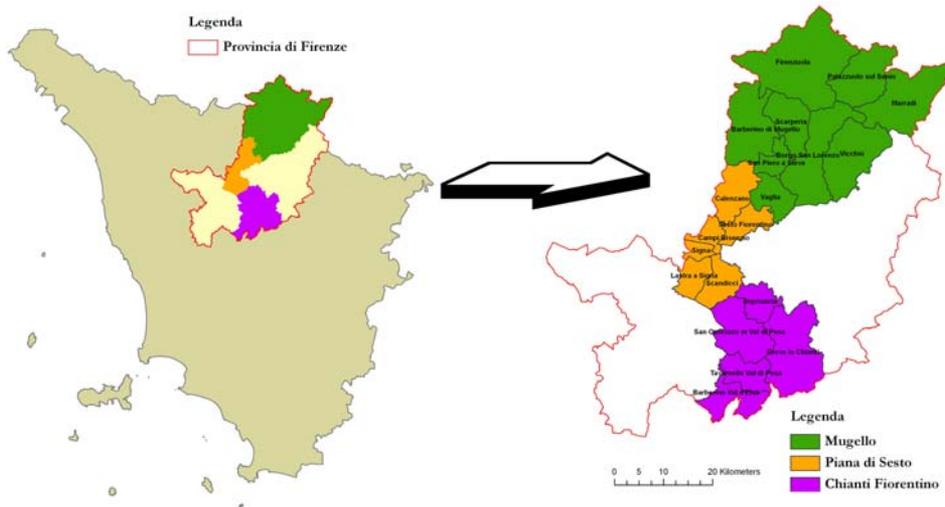


Figura 37: Le aree della provincia di Firenze oggetto di studio.

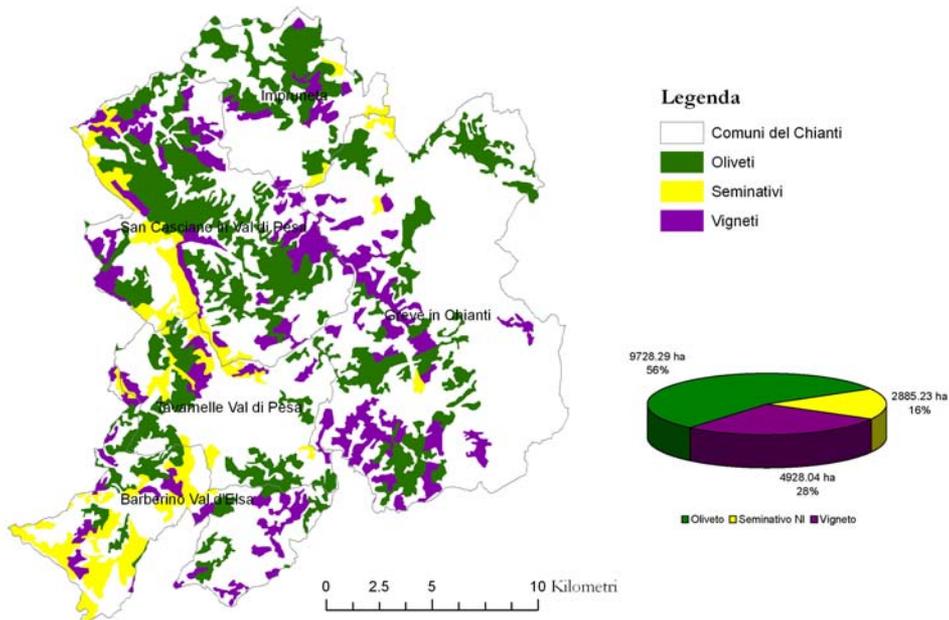


Figura 38: Superfici a olivo, seminativi e vite nel Chianti fiorentino. (Fonte: uso suolo CLC2002).

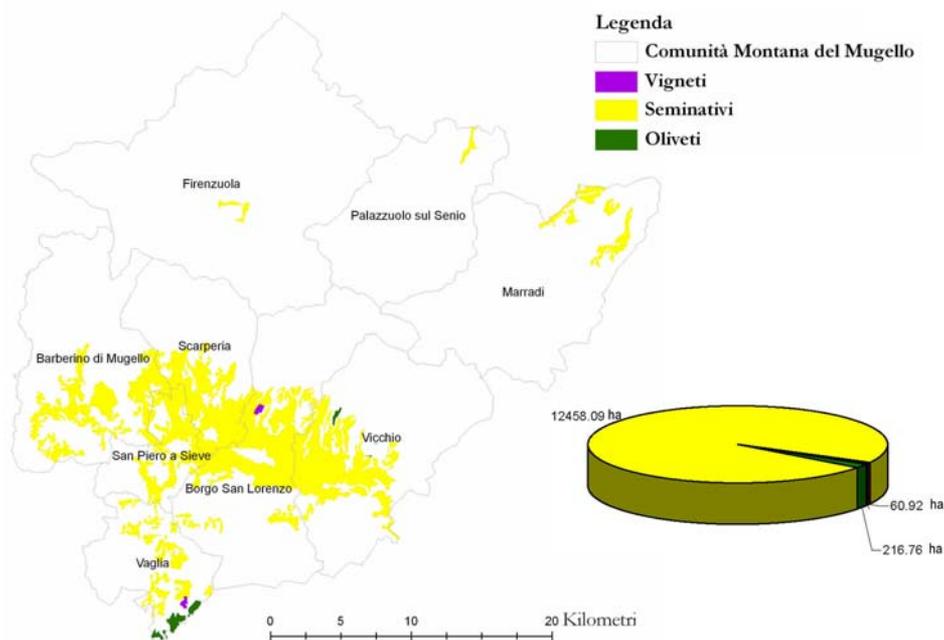


Figura 39: Superfici a olivo, seminativi e vite nel Mugello. (Fonte: uso suolo Corine 2002).

## Le superfici coltivate

Al fine del presente studio sono state considerate le superfici di mais, girasole, terreni ritirati dalla produzione, vite ed olivo risultanti della dichiarazione presentata all'Agenzia Regionale Toscana per le Erogazioni in Agricoltura (ARTEA) nel 2007. Il report presentato nella newsletter n.30 e 31 del 2008 fornisce infatti una fotografia aggiornata e dettagliata delle coltivazioni che hanno interessato la nostra regione nel 2007, ripartita per specie coltivata e per comune, ed attribuibile a forma di conduzione attiva e significativa ai fini del presente studio. Occorre tenere presente che i dati di superficie coltivata presentati sono riferiti alle sole aziende che hanno presentato la dichiarazione unica aziendale (DUA), relative a gran parte dei regimi di aiuto per i quali ARTEA eroga i contributi.

Dai dati ARTEA del 2007 risulta che a livello regionale nel 2007 sono stati coltivati 21945.60 ha a mais, 19969.87 ha a girasole, 60802.42 ha a vite e 71080.59 ha a olivo, mentre i terreni ritirati dalla produzione sono 49215.42 ha (fig. 40). Nella provincia di Firenze, invece, sono stati coltivati 2439.28 ha a mais, 1138.53 ha a girasole, 17138.17 ha a vite e 19886.26 ha a olivo, mentre i terreni ritirati dalla produzione sono 8589.47 ha.

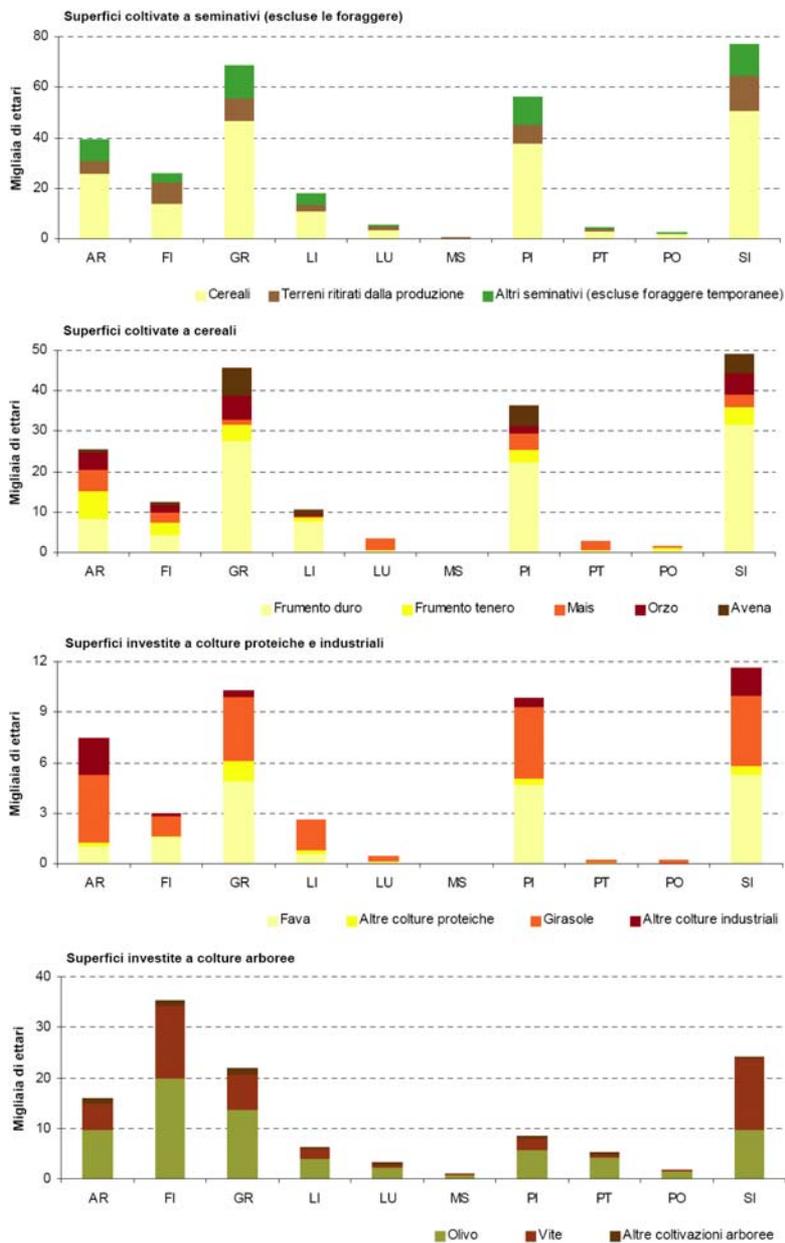


Figura 40: Ripartizione per provincia e per tipo di coltivazione delle superfici dichiarate all'Agenzia Regionale Toscana per le Erogazioni in Agricoltura (Fonte: ARTEA newsletter n. 30 – gennaio 2008).

Particolarmente interessante risulta l'incremento dei terreni a set-aside che si è registrato negli ultimi anni. A livello regionale dal 2004 le superfici a riposo sono pressoché raddoppiate, mentre nella provincia di Firenze sono più che triplicate (fig.41).

## TERRENI A RIPOSO

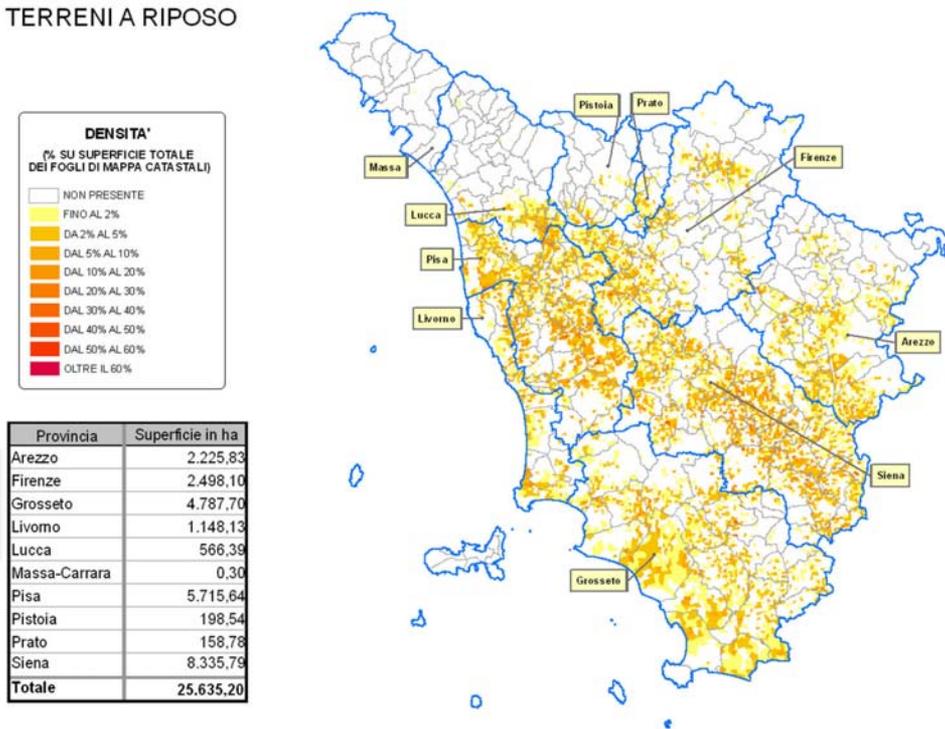


Figura 41: Distribuzione dei terreni a riposo nel 2004, % su superficie dei fogli di mappa (Fonte: ARTEA -www.artea.toscana.it).

In particolare nel Chianti fiorentino nel 2007 erano presenti 3034.39 ha di seminativi di cui 190.71 ha di girasole, 33.30 ha di mais e ben 1410.76 ha di terreni ritirati dalla produzione (tab 37).

Nel Mugello, invece, i seminativi sono 5158.92 di cui 1111.44 a mais, 223.39 a girasole e solamente 481.49 ritirati dalla produzione.

Per la vite e l'olivo il Chianti risulta particolarmente vocato con 5729.48 ha a vite e 5152.55 ha a olivo mentre nel Mugello queste coltivazioni sono poco presenti e i 146.91 ha di vite e 360.04 di olivo sono per lo più nuovi impianti legati all'espansione dell'areale di coltivazione di queste colture, conseguentemente all'impatto dei cambiamenti climatici e dell'aumento delle temperature.

	<b>Seminativi</b> (escluse foraggere avvicendate) (ha)	<b>Mais</b> (ha)	<b>Girasole</b> (ha)	<b>Terreni ritirati dalla produzione</b> (ha)
<b>Chianti fiorentino</b>				
Barberino Val d'Elsa	1283.80	10.68	101.10	459.90
Greve in Chianti	440.04	12.84	8.50	249.18
Inpruneta	130.99	1.00		123.85
San Casciano Val di P	786.83	8.48	81.11	349.69
Tavarnelle Val di Pesa	392.73	0.30		228.14
<b>totale</b>	<b>3034.39</b>	<b>33.30</b>	<b>190.71</b>	<b>1410.76</b>
<b>Mugello</b>				
Barberino di Mugello	545.64	54.10	17.81	
Borgo San Lorenzo	1138.01	266.10	18.86	88.39
Firenzuola	235.07	2.10	1.00	125.75
Marradi	265.86	5.93	0.50	4.38
Palazzuolo sul Senio	45.85	0.50	1.00	21.45
San Piero a Sieve	710.69	187.25	35.83	6.98
Scarperia	728.58	202.66	60.35	81.06
Vaglia	131.01	0.64		91.50
Vicchio	1358.21	392.16	88.04	61.98
<b>totale</b>	<b>5158.92</b>	<b>1111.44</b>	<b>223.39</b>	<b>481.49</b>

Tabella 37: Superfici a seminativi, a mais, a girasole e a set-aside, per il Chianti fiorentino e per il Mugello, dichiarate nel 2007 all'Agenzia Regionale Toscana per le Erogazioni in Agricoltura (Fonte: ARTEA newsletter n. 30 – gennaio 2008).

	<b>Vite</b> (ha)	<b>Olivo</b> (ha)
<b>Chianti fiorentino</b>		
Barberino Val d'Elsa	938.33	700.02
Greve in Chianti	1884.73	917.93
Impruneta	305.62	1113.30
San Casciano Val di P	1836.72	1855.44
Tavarnelle Val di Pesa	764.08	565.86
<b>totale</b>	<b>5729.48</b>	<b>5152.55</b>
<b>Mugello</b>		
Barberino di Mugello	8.11	71.97
Borgo San Lorenzo	35.88	81.14
Firenzuola	0.14	2.40
Marradi	16.32	0.30
Palazzuolo sul Senio	0.74	
San Piero a Sieve	9.44	18.98
Scarperia	8.74	31.24
Vaglia	16.71	77.81
Vicchio	50.83	76.20
<b>totale</b>	<b>146.91</b>	<b>360.04</b>

Tabella 38: Superfici a vite e a olivo nei territori del Chianti fiorentino e del Mugello (Fonte: ARTEA newsletter n. 30 e n. 31 – gennaio 2008).

## **Le colture dedicate studiate: mais e girasole**

Per la stima delle produzioni potenziali di mais e girasole nel Chianti e nel Mugello è stato calibrato un modello di simulazione al fine di stimare le produzioni potenziali passate e future in funzione dell'influenza esercitata dalla variabilità meteo-climatica e dai cambiamenti climatici. L'obiettivo principale di tale analisi è stato, infatti, quello di valutare le produzioni nel Chianti e nel Mugello nel medio-lungo periodo in modo tale da poter determinare la variabilità produttiva a cui le colture e quindi le biomasse, sono soggette. I risultati forniscono una base di informazioni attendibile su cui poter valutare i più opportuni interventi politici di supporto e per dimensionare al meglio le strutture della filiera agrienergetica.

Per la calibrazione sono stati necessari una serie di alcuni anni di dati reali di produzione, omogeni, non affetti da influenze quali tecniche colturali anomale, differenze di varietà o metodologie di coltivazione nei differenti anni, differenti tipologie di suolo. Queste premesse hanno limitato le colture studiabili, per i territori d'interesse, al mais ed al girasole.

## **La simulazione delle produzioni in funzioni di variabili agrometeorologiche**

Le produzioni ottenibili sono state stimate utilizzando il software CropSyst, un modello di simulazione distribuito gratuitamente e sviluppato da Stockle e Nelson della Washington University (Stockle e Nelson, 1994) il quale permette la simulazione della crescita, dello sviluppo e della produzione delle colture agrarie.

E' da tener presente che i modelli di simulazione delle colture sono un insieme di relazioni di tipo logico-matematico tra parametri e variabili e rappresentano la semplificazione di un sistema complesso quale quello reale caratterizzato da elevata dinamicità e casualità. D'altro canto i modelli di simulazione sono utili nel fornire dati di orientamento sul comportamento delle colture e sulle produzioni ottenibili in certi contesti agrari e pedo-climatici. Al fine di descrivere in forma semplificata e controllabile i fenomeni legati alla fenologia e alle rese in biomassa è necessario che il modello sia in grado di determinare, con un certo grado di accuratezza, alcune caratteristiche chiave dello sviluppo della coltura. La messa a punto dei modelli ha incluso dunque una fase di ricerche bibliografiche per il reperimento delle seguenti informazioni:

- i principali eventi fenologici (es. fioritura, maturità fisiologica), per una corretta descrizione della risposta fenologica ai diversi stimoli e fattori ambientali (temperatura, fotoperiodo, vernalizzazione);

- la resa della coltura, per un'accurata predizione dello sviluppo fogliare e quindi della capacità della pianta di intercettare la radiazione, accumulare biomassa e ripartirla nelle diverse strutture della pianta;

- l'utilizzo dell'acqua, per una corretta valutazione dell'evapotraspirazione e del prelievo di acqua da parte della coltura;

- l'uso dell'azoto, per la descrizione dei processi di mineralizzazione nel suolo, di prelievo da parte delle piante e di ripartizione nei diversi organi vegetali;

- l'influenza delle carenze idriche e nutritive sulla crescita e lo sviluppo della coltura.

Uno step successivo ha riguardato poi la parametrizzazione del modello con dati specifici sulle diverse colture indagate e l'ambiente colturale inerente. CropSyst dà infatti la

possibilità di specificare alcuni parametri di gestione della coltura (es. data di semina, gestione dei fertilizzanti e degli interventi irrigui, ecc.), parametri cultivar-specifici (es. sensibilità fotoperiodica, durata del periodo di riempimento della granella, LAI massimo, ecc.) e proprietà relative al profilo del suolo (tessitura, spessore, contenuto iniziale di acqua ed azoto, ecc.).

I dati di gestione colturale utilizzati sono stati quelli effettivamente impiegati nei casi esaminati mentre i parametri colturali sono forniti di default dal modello. E' stata effettuata una calibrazione della coltura mediante analisi di sensibilità in riferimento alle sommatoria termica necessaria al raggiungimento della fase di maturazione.

In seguito sono stati introdotti gli input meteorologici giornalieri (temperatura minima, temperatura massima, precipitazioni e radiazione globale) per consentire al modello di calcolare la produzione di biomassa. L'output del modello, rappresentato dai dati produttivi, si basa sulla radiazione fotosinteticamente attiva intercettata (PAR) e sull'uso di coefficienti di ripartizione che descrivono, sulla base della fenologia colturale, la distribuzione della biomassa prodotta nei diversi organi della pianta (foglie, steli, radici e frutti).

I dati meteorologici, costituiti dai valori giornalieri di temperatura minima, massima e precipitazione si riferiscono a stazioni agrometeorologiche poste nelle aree di indagine. I dati di radiazione sono stati stimati utilizzando il software RadEst v. 3.0 sviluppato da M. Donatelli nell'ambito di una collaborazione FAO-SDRN Agrometeorology Group e ISCI Crop Science. Il programma è in grado di calcolare la radiazione globale giunta a terra, sulla base dell'escursione termica giornaliera secondo il modello sviluppato da Bristow e Campbell nel 1986.

In CropSyst un sottomodello del suolo è impiegato per la simulazione delle dinamiche idriche e dell'azoto nel terreno. In sede di calibrazione è stato considerato un suolo standard di circa 1,10 m di profondità con tessitura franco-argillosa (classificazione USDA) con 24% di sabbia e 37% di argilla e contenuto in sostanza organica di circa 15 g/Kg (1.5%).

Un ultimo step ha riguardato la validazione del modello, ovvero la verifica della capacità del software di riprodurre adeguatamente le rese delle colture considerate. Il modello è stato testato utilizzando dati produttivi forniti da aziende collocate nelle due zone di studio riferiti al periodo 1995-2004 per quanto riguarda il mais destinabile alla filiera del bioetanolo e al periodo 1995-2003 per il girasole destinabile alla filiera dell'olio vegetale puro. I grafici sottostanti (fig. 42) riportano gli andamenti delle rese osservate (linea continua) e simulate (linea tratteggiata) per le due colture dedicate oggetto d'indagine.

Il coefficiente di correlazione tra simulato e osservato è risultato elevato e pari a 0.90 e 0.78, rispettivamente per il girasole e il mais.

Con riferimento al girasole, il programma è stato in grado di riprodurre adeguatamente tanto le rese ad ettaro, quanto gli andamenti interannuali come mostrato nella figura 43. Per quanto riguarda il mais, i risultati delle simulazioni hanno mostrato una maggiore variabilità rispetto ai valori osservati.

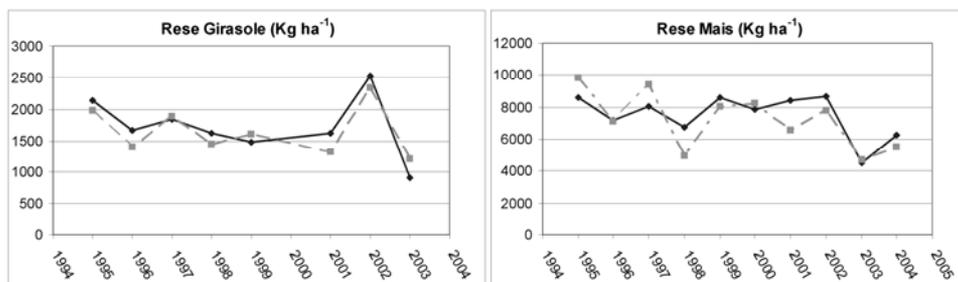


Figura 42: confronto fra dati misurati (linea continua) e dati simulati (linea tratteggiata) delle rese di girasole e mais in Chianti, nel periodo 1994-2005.

Le differenze nei valori assoluti di produzione sono probabilmente attribuibili alla difficoltà di riprodurre, in sede di simulazione, le effettive irrigazioni a causa del fatto che i dati riguardanti il periodo e il volume di adattamento non erano disponibili. Tuttavia, la variabilità interannuale simulata rispecchia gli andamenti reali dimostrando la validità del software nel prevedere la risposta della coltura all'andamento climatico.

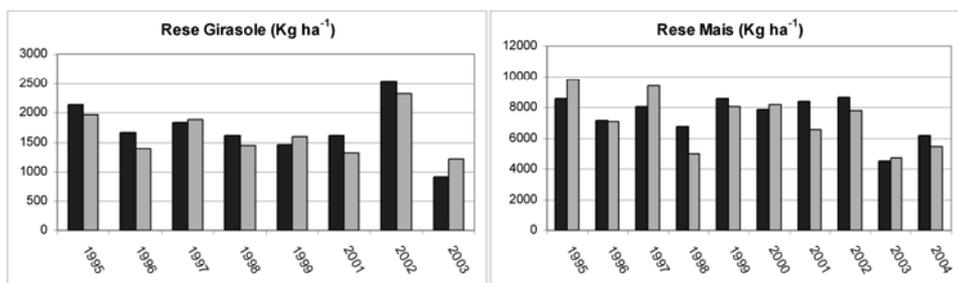


Figura 43: confronto fra dati di produzioni di girasole e mais in Chianti (colore nero) e dati simulati da crop sist (colore grigio) sulla base di variabili agrometeorologiche.

## Le produzioni potenziali nel Chianti fiorentino e nel Mugello

Dai risultati emerge che la variabilità interannuale della temperatura dell'aria e delle precipitazioni, durante la stagione vegeto-produttiva delle due colture, riesce a spiegare abbastanza bene la variabilità delle rese. Nel periodo analizzato la produzione media annua registrata di girasole è stata di 1723 kg/ha e quella di mais di 7482 kg/ha (tab. 39).

La coltivazione intensiva del mais non è pensabile nel Chianti fiorentino sia per la scarsità di fonti di approvvigionamento idrico necessarie all'irrigazione sia per i bassi apporti idrici provenienti dalle precipitazioni nel periodo vegeto-produttivo. Il Mugello mostra invece maggiore vocazionalità per questa coltura, grazie all'ampio alveo fluviale del fiume Sieve che offre un terreno fertile e con una falda idrica abbondante e poco profonda. In tale ottica la stima di produzione di biomassa vegetale del mais è stata limitata all'area del Mugello dove, se fossero coltivati i circa 480 ettari di terreni ritirati dalla produzione, potrebbero essere prodotte 3590 t di granella destinabile alla filiera del bioetanolo. Nell'ipotesi di destinare il 25% dei seminativi a tale coltura avremo una produzione annua di circa 9650 t.

girasole			mais		
Anno	Osservato	Simulato	Anno	Osservato	Simulato
1995	2133	2159	1995	8589	9828
1996	1668	1625	1996	7176	7094
1997	1830	1843	1997	8036	9420
1998	1615	1394	1998	6764	4943
1999	1472	1378	1999	8607	8042
2001	1620	1352	2000	7875	8199
2002	2536	2499	2001	8408	6570
2003	908	1218	2002	8639	7825
<b>DS</b>	<b>477</b>	<b>451</b>	2003	4503	4711
<b>MEDIA</b>	<b>1723</b>	<b>1683</b>	2004	6220	5482
<b>CV</b>	<b>27.7</b>	<b>26.8</b>	<b>DS</b>	<b>1343</b>	<b>1782</b>
			<b>MEDIA</b>	<b>7482</b>	<b>7211</b>
			<b>CV</b>	<b>17.9</b>	<b>24.7</b>

Tabella 39: produzioni osservate e simulate di mais e girasole in un'azienda modello.

Per il Chianti fiorentino è invece ipotizzabile la coltivazione del girasole, visto le minori necessità idriche di questa coltura. In questo caso la coltivazione dei 1410 ha di terreni ritirati dalla produzione, con una produzione media di circa 1723 kg/ha, potrebbe portare a una produzione complessiva di circa 2430 t di semi oleosi da destinare alla filiera dell'olio vegetale puro. Occorre considerare che i terreni ritirati dalla produzione sono attualmente circa la metà dei terreni seminativi presenti in questo territorio.

Il modello è stato poi impiegato per predire la risposta fenologica e produttiva delle due colture ad un aumento della temperatura dell'aria. Le variazioni delle date di emergenza e maturazione e la produzione, conseguenti ad un incremento di 0.5 °C e 1.0 °C rispetto ai valori giornalieri registrati nel periodo 1995-2004, sono stati calcolati per mais e girasole (tab. 40).

Per quanto riguarda la fenologia un incremento di temperatura di 0.5 °C determina una diminuzione del periodo germogliamento-maturazione di 0.9 giorni per il girasole e 1.4 giorni per il mais; l'aumento di 1.0 °C, invece, riduce di 2.2 e 2.7 giorni, rispettivamente per girasole e mais, il periodo intercorrente fra germogliamento e maturazione (tab. 40).

Incremento temperatura	Riduzione periodo GF-M (giorni)		Anticipo GF (giorni)		Anticipo M (giorni)	
	0.5° C	0.1° C	0.5° C	0.1° C	0.5° C	0.1° C
<b>mais</b>	1.4	2.7	2.1	3.8	3.5	6.5
<b>girasole</b>	0.9	2.2	2.4	4.6	3.3	6.8

Tabella 40: influenza della variazione della temperatura dell'aria, rispetto a quella registrata in un'azienda campione, nella fenologia del mais e del girasole; simulazioni effettuate con software CropSyst.

Per la produzione un incremento di temperatura di 0.5 °C ha come conseguenza un decremento rispettivamente per girasole e mais del 4% e del 6% e con un aumento di 1°C la produzione cala rispettivamente dell'11% e del 12 % fermo restando gli altri input colturali (fig. 44).

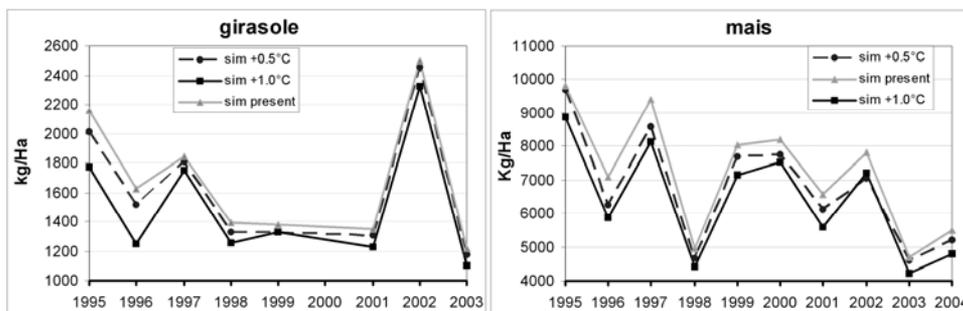


Figura 44: influenza della variazione della temperatura dell'aria, rispetto a quella registrata in un'azienda campione, nella produttività del mais e del girasole; simulazioni effettuate con software CropSyst.

## Le produzioni potenziali in Toscana

L'analisi delle produzioni potenziali è stata successivamente estesa al territorio toscano con l'obiettivo di valutare l'effetto della variabilità meteo-climatica e dei cambiamenti climatici sulla produzione di mais e girasole.

A tale scopo sono stati impiegati i seguenti materiali e metodi:

- 15 serie storiche termopluviometriche, omogeneizzate, per il periodo 1955-2002 (tab. 41);
- il modello di cropsyst calibrato e validato per girasole e mais;
- analisi della variabilità spaziale e temporale delle produzioni;
- realizzazione delle mappe di produzione potenziale
- valutazione del contributo dei biocarburanti prodotti alla domanda di carburanti in Toscana.

LOCATION	Abbr.	Lat UTM_X	Long UTM_Y	Elevation (m a.s.l.)
<i>Castel del Piano</i>	CDPI	706920	4752060	596
<i>Castelnuovo Garf.</i>	CNGA	613275	4885305	280
<i>Grosseto</i>	GROS	669415	4735216	5
<i>Livorno</i>	LIVO	606140	4822595	9
<i>Massa</i>	MASS	591800	4875450	38
<i>Massa Marittima</i>	MAMA	653850	4768500	362
<i>Montepulciano</i>	CHMP	726520	4774950	575
<i>Orbetello</i>	ORBE	681025	4699970	1
<i>Peretola</i>	PERE	676985	4852101	38
<i>Pisa</i>	PISA	613017	4838671	3
<i>Pistoia</i>	PIST	653080	4867535	88
<i>Pontremoli</i>	PONT	570117	4913436	247
<i>San Miniato</i>	SMIN	647740	4838630	132
<i>Siena</i>	SIEN	687630	4799185	346
<i>Volterra</i>	VOLT	649965	4808235	465

Tabella 41: posizione delle stazioni climatiche

Il modello Cropsyst è stato impiegato per simulare crescita e produzione delle colture per ciascuna posizione delle stazioni. Come condizioni iniziali sono stati utilizzati:

- **parametri del suolo:** tessitura presente nel database regionale  
profondità del suolo 2,1 m  
sostanza organica del suolo 0.8%
- **parametri meteorologici:** serie storiche omogeneizzate delle 15 stazioni meteorologiche considerate (temperatura minima, massima e precipitazioni)  
radiazione solare calcolata sulla base dell'escursione termica giornaliera
- **Parametri culturali:** semina il 15 aprile  
fertilizzazione azotata di 180 unità per il mais e di 100 unità per il girasole  
irrigazione con AWC<35% per il mais e assente nel girasole

Dai valori di produzione dei 48 anni, sono state calcolate le produttività (Kg/Ha) medie per il 10° e 90° percentile (tab. 42). Queste corrispondono, per ciascuna stazione, alla media dei cinque anni più e meno produttivi, e dato che le variabili chiave nelle differenze di produzione sono quelle meteorologiche mettono in evidenza l'effetto della variabilità meteo-climatica. Le produttività del 10° e 90° percentile sono state spazializzate con un programma di cartografia e l'ausilio della geostatistica. Successivamente la produttività media è stata impiegata per calcolare le produzioni potenziali dei comuni toscani in funzione della disponibilità di terreni ritirati dalla produzione censiti da ARTEA nella domanda unica 2007 e relativi all'anno 2006 (fig 45).

Infine 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.

Località	Produttività (Ton/Ha)	
	mais	girasole
Castel del Piano	8,74	1,06
Castelnuovo Garf.	7,64	0,61
Grosseto	7,09	1,20
Livorno	8,47	0,42
Massa	7,75	1,41
Massa Marittima	7,31	1,12
Montepulciano	7,72	1,36
Orbetello	6,23	1,18
Peretola	7,14	1,09
Pisa	8,04	1,31
Pistoia	6,58	1,10
Pontremoli	7,60	1,37
San Miniato	8,15	0,54
Siena	7,40	1,26
Volterra	8,61	1,00

Tabella 42: produttività media di mais e girasole nel periodo 1955-2002, per 15 postazioni di rilievo climatico.

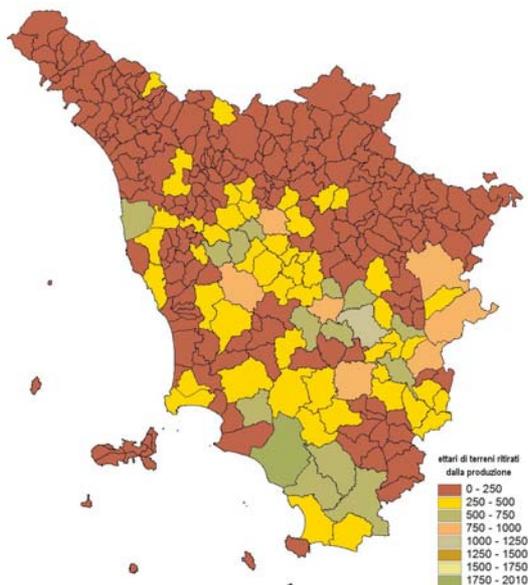


Figura 45: terreni ritirati dalla produzione nel 2006.

Dai risultati è emerso che nel corso degli anni in molte delle posizioni dove è stata effettuata la simulazione si è registrata una diminuzione significativa delle produzioni (tab 43), imputabile all'effetto dei cambiamenti climatici.

Località	Produzione					
	mais			girasole		
	pendenza	R <sup>2</sup>	Significat.	pendenza	R <sup>2</sup>	Significat.
Castel del Piano	-1,4	0,00		-17,6	0,27	***
Castelnuovo Garf.	-10,8	0,03		-9,5	0,11	*
Grosseto	-36,8	0,18	**	-6,3	0,10	*
Livorno	-18,9	0,12	*	-3,2	0,02	
Massa	-4,79	0,03		-1,0	0,00	
Massa Marittima	12,5	0,03		-10,5	0,19	**
Montepulciano	-22,4	0,17	**	-9,2	0,14	**
Orbetello	-20,0	0,18	**	-2,4	0,04	
Peretola	-29,5	0,15	**	-7,5	0,08	
Pisa	1,9	0,00		-5,8	0,05	
Pistoia	-35,7	0,17	**	-3,2	0,02	
Pontremoli	-25,2	0,15	**	-10,6	0,21	***
San Miniato	-16,2	0,05		-0,6	0,00	
Siena	-11,9	0,06		-0,6	0,00	
Volterra	-26,0	0,19	**	-10,5	0,08	

Tabella 43: pendenza della retta di regressione e coefficiente di determinazione delle produzioni del periodo 1955-2002. Livelli di significatività: \*= $P < 0,05$ , \*\*= $P < 0,01$ , \*\*\*= $P < 0,001$ .

Nelle stazioni con variazione della produzione significativa è stata effettuata una detrendizzazione, al fine di eliminare la variabilità imputabile ai cambiamenti climatici. La spazializzazione della media dei cinque anni più produttivi (90° percentile) e meno

produttivi (10° percentile) ha messo in evidenza l'effetto che la variabilità meteo-climatica può avere sulla produttività delle due colture nel territorio toscano (figg. 46 e 47).

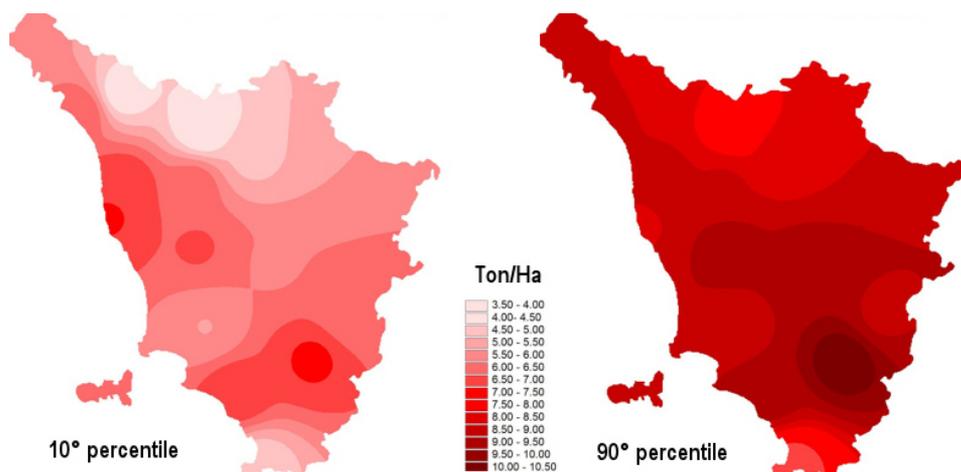


Figura 46: produttività del mais irrigato in toscana nelle annate climaticamente sfavorevoli (10° percentile) e favorevoli (90° percentile).

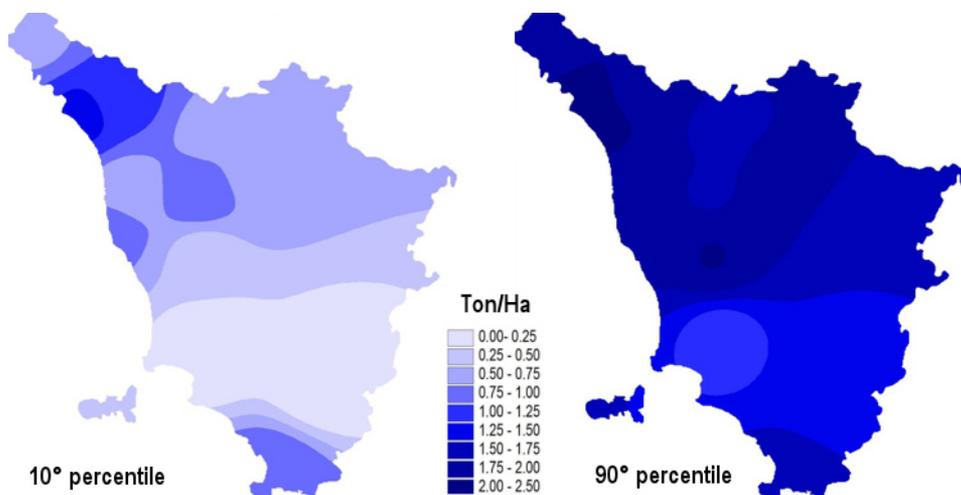


Figura 47: produttività del girasole non irrigato in toscana nelle annate climaticamente sfavorevoli (10° percentile) e favorevoli (90° percentile).

I valori di produttività media di ogni comune della Toscana sono stati, infine, moltiplicati per i terreni ritirati dalla produzione ottenendo così la produzione potenziale di etanolo (fig. 48) e di olio vegetale puro (fig 49) nelle annate climaticamente peggiori e migliori.

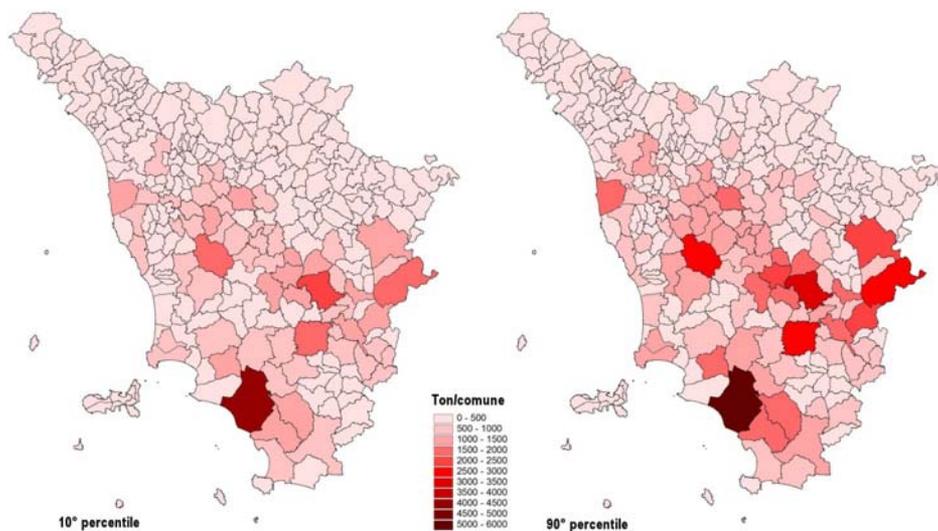


Figura 48: produzione potenziale di bioetanolo producibile da mais irrigato in toscana nelle annate climaticamente sfavorevoli (10° percentile) e favorevoli (90° percentile), impiegando per ciascun comune i terreni ritirati dalla produzione.

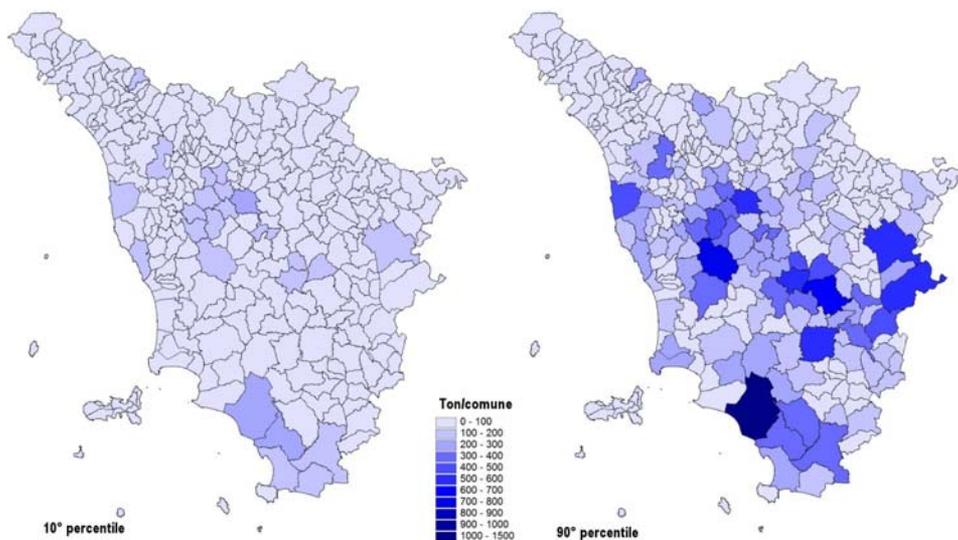


Figura 49: produzione potenziale di olio vegetale puro producibile da girasole non irrigato in toscana nelle annate climaticamente sfavorevoli (10° percentile) e favorevoli (90° percentile), impiegando per ciascun comune i terreni ritirati dalla produzione.

Considerando l'obiettivo indicato nel piano di indirizzo energetico regionale di produrre 108 ktep di biocarburanti, la coltivazione di colture dedicate nei terreni ritirati dalla produzione può contribuire in misura variabile e compresa fra il 7,4 e il 48,3% (fig 50).

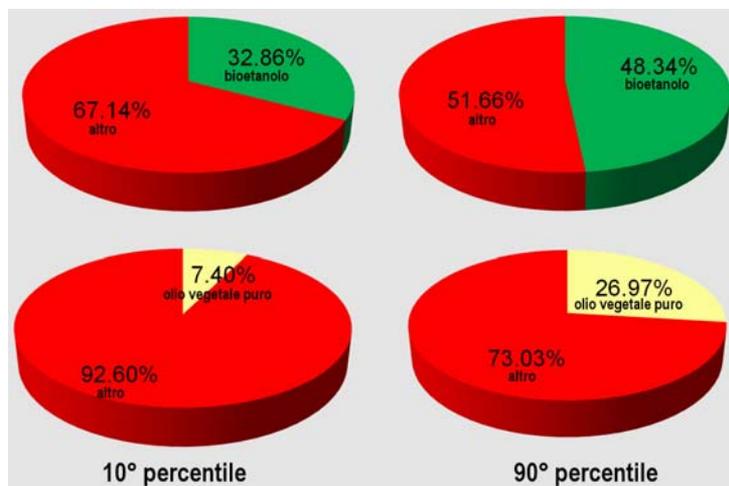


Figura 50: possibile contributo dei biocarburanti producibili in toscana nei terreni ritirati dalla produzione, rispetto agli obiettivi regionali (108 Ktep/anno), in anni climaticamente favorevoli e sfavorevoli. Il bioetanolo è considerato prodotto da mais irrigato, l'olio vegetale puro è considerato prodotto da girasole senza irrigazione.

Occorre però considerare che l'impiego di coltivazioni irrigate richiede un costo energetico legato all'irrigazione stessa. Considerando una richiesta energetica di 0.64kWatt/ora per m<sup>3</sup> di acqua distribuita e volumi irrigui medi di 1500 m<sup>3</sup>/ha avremo un costo energetico per irrigare tutte le superfici ritirate dalla produzione di 10,6 ktep.

### Una coltura alternativa

Nella ricerca di colture alternative per la produzione di biomasse agrienergetiche gli obiettivi principali da tenere presenti sono legati soprattutto all'adattabilità della specie ai terreni marginali spesso collocati in aree declivi e con profondità del suolo ridotta.



Figura 51: fasi della prova sperimentale del sorgo zuccherino.

Per la coltivazione di questa tipologia di colture occorre tenere presente che la finalità prima è rappresentata dal rispetto dell'ambiente e il ruolo che svolgono rispetto al problema climatico. In questo contesto occorre individuare specie caratterizzate da basse necessità in termini di lavorazioni del suolo, fertilizzazioni azotate e necessità irrigue. Le specie autunno vernine come la colza compiono parte del loro ciclo durante il periodo invernale, avvalendosi quindi delle precipitazioni che caratterizzano questo periodo e risentendo meno delle anomalie pluviometriche che stanno sempre più frequentemente interessando il periodo primaverile estivo.

Altra specie interessante per l'adattabilità a condizioni pedoclimatiche difficili è il sorgo. Questo grazie alla sua rusticità, al robusto apparato radicale e alle basse necessità idriche può essere una valida alternativa per la produzione di biomassa. Attualmente il sorgo zuccherino è considerato una coltura adatta alla produzione di bioetanolo di prima e seconda generazione.

Proprio sul sorgo è iniziata una prova sperimentale per valutare la risposta vegeto produttiva a tre differenti regimi idrici. La prova effettuata in vaso sotto copertura, prende in esame anche il ruolo dell'ammendante compostato misto, prodotto nelle biocelle di Case Passerini (Sesto Fiorentino) della Quadrifoglio s.p.a., nei rapporti acqua-pianta e come fertilizzate azotate a lenta cessione. I risultati della ricerca saranno presentati sul sito [www.sicoter.it](http://www.sicoter.it).

## I residui di potature: vite e olivo

### La vite

La stima della biomassa da residui di potature di vite è stata ottenuta da un campione rappresentativo, di varietà Sangiovese, allevata a cordone speronato. Per differenti vigneti sono stati prelevati i tralci residui della potatura invernale di 10 piante. Questi sono stati posti in stufa a 105°C per determinare la sostanza secca. I valori della sostanza secca sono poi stati riportati ad ettaro in funzione dei sestri di impianto (tab. 44).

N°	Forma di allevamento	Sesto di impianto		Piante ettaro	Sost. secca a pianta	Sostanza secca	Umidità al prelievo
		m x m		n°	kg	kg/ha	%
1	Cordone sper.	0,8	2,5	5000	1,6	792	43
2	Cordone sper.	1,0	2,8	3570	3	1076	29
3	Cordone sper.	1,0	2,7	3700	2,5	936	51
4	Cordone sper.	0,8	2,7	3700	2,4	902	42
5	Cordone sper.	0,8	2,5	5000	4,1	2070	53
6	Cordone sper.	0,8	3,0	4170	4,9	2060	46
7	Cordone sper.	0,8	2,4	5200	4,9	2561	47
8	Cordone sper.	1,0	2,7	3700	2,7	983	52
9	Cordone sper.	0,8	2,5	5000	3,8	1913	39
10	Cordone sper.	0,8	2,5	5000	5,1	2550	39
media				4404	4	1584	44
Deviazione standard				655	1	677	7
coefficiente variabilità				15	33	43	16

Tabella 44: peso dei residui di potatura di vite (Sangiovese) allevata a cordone speronato, in Chianti e Mugello.

Dall'analisi risulta che la sostanza secca prodotta per ettaro varia tra gli 800 e i 2550 kg in funzione dell'età del vigneto, della forma di conduzione e gestione del suolo e delle pratiche colturali applicate. Mediamente da ogni ettaro di vigneto si ricavano 1584 kg di sostanza secca. Le potature, subito dopo la raccolta, hanno un'umidità media del 44%.

Considerando 5730 ha di superfici a vigneto dichiarate ad ARTEA nel 2007, per l'area del Chianti fiorentino abbiamo una produzione potenziale di oltre 9000 t di sostanza secca destinabile alla filiera agrienergetica della cogenerazione.

Per il Mugello il contributo potenziale di questa risorsa è molto più modesto, e con 147 ha di vigneti abbiamo un potenziale residuale di 233 t.

## L'olivo

Per i residui di potatura dell'olivo si è operato in maniera analoga a quella sopra descritta (fig. 52)



Figura 52: metodologia impiegata per il rilievo delle biomasse prodotte da potature ordinarie e straordinarie di olivi.

La biomassa prodotta dalle operazioni di potatura invernale è stata raccolta e posta in stufa per determinare la sostanza secca. L'essiccazione è stata condotta in due tempi per evitare la degradazione e la rapida volatilizzazione delle sostanze aromatiche, quali gli oli, per la stessa ragione le temperature utilizzate sono state inferiori a quelle utilizzate per altre tipologie di campioni legnosi.

I campioni sono stati sottoposti per tre giorni ad una temperatura di 32 °C, dopo di che la temperatura è stata portata a 65 °C per altri sette giorni. Il campione raccolto fornisce

un valore preliminare dei residui derivanti dalle potature, gli oliveti attualmente presenti sono infatti molto disomogenei per età, dimensione della pianta, vigoria, sesto di impianto e forma di allevamento, a questo va aggiunto che in molti oliveti la potatura può avvenire ogni due o tre anni. Il campione necessario per poter essere rappresentativo della variabilità presente deve essere molto grande.

Un'analisi effettuata su un campione di 5 piante su 8 siti differenti del Chianti hanno permesso di effettuare una prima stima (tab. 45).

Dall'analisi dei dati preliminari raccolti si evince che mediamente, considerando una media tra le tempistiche di potatura individuata, da ogni ettaro di oliveto si traggono circa 2,2 tonnellate di sostanza secca. Le potature, subito dopo la raccolta, hanno un'umidità media del 44%. Indicativamente, incrociando i dati scaturiti dalle misure effettuate con le superfici olivicole del Chianti fiorentino, si può considerare che l'ipotetica biomassa secca da destinare al biocombustibile si aggiri intorno alle 11300 t e, nel comprensorio del Mugello, a circa 790 t.

N°	Forma di allevamento	Diametro chioma	Tempi potatura	Sesto di impianto		Piante ettaro	Sostanza verde a pianta	Sostanza secca a pianta	Sostanza secca per ettaro
		m		m x m	n°				
1	vaso policonico	4,5	ogni 2 anni	7	6	238,1	27,5	12,6	2990,9
2	vaso policonico	2,8	annuale	7	7	204,1	20,8	7,5	1525,1
3	vaso policonico	4,0	ogni 2 anni	6	7	238,1	25,0	11,6	2773,8
4	vaso policonico	4,5	ogni 2 anni	7	7	204,1	19,2	10,6	2169,6
5	vaso policonico	3,7	ogni 2 anni	6	8	208,3	22,0	10,6	2201,1
6	vaso policonico	3,5	ogni 2 anni	6	6	277,8	24,1	10,3	2861,6
7	vaso policonico	4,3	ogni 2 anni	7	7	204,1	24,8	13,0	2651,7
8	vaso policonico	3,9	annuale	8	8	156,3	19,8	9,8	1533,4
9	vaso policonico	3,2	annuale	7	7	204,1	21,0	6,7	1368,0
10	vaso policonico	2,8	annuale	7	7	204,1	23,0	7,9	1603,1
11	vaso policonico	4,0	ogni 2 anni	6	6	277,8	21,0	8,2	2283,0
12	vaso policonico	4,0	ogni 2 anni	6	6	277,8	19,0	8,5	2360,9

Tabella 45: dati di campioni di biomasse residue di potature di olivo allevato a vaso polifonico, in Chianti e Mugello.

## La gestione dei residui colturali

Attualmente sono in commercio macchine operatrici che consentono la raccolta ed il confezionamento dei residui colturali (fig.53). Nell'ottica della necessaria gestione delle potature queste macchine permettono con accettabili aumenti dei tempi di gestione di ottenere un prodotto commerciale. Allo stato attuale le maggiori problematiche connesse all'avvio di questa filiera restano connesse all'elevata umidità iniziale delle biomasse e al loro stoccaggio.



Figura 53: macchine per la raccolta dei residui colturali di vite ed olivo.

## Conclusioni

I due territori del Chianti fiorentino e del Mugello mostrano una differente vocazionalità produttiva nei confronti delle tipologie di agribiomasse studiate. Il Chianti con consistenti estensioni ad olivo e vite è potenzialmente adatto allo sviluppo della filiera lignocellulosica derivante dal recupero dei residui di potatura di queste colture. Attualmente la valorizzazione di questo prodotto può passare anche per la cogenerazione effettuata dagli stessi agricoltori, con vendita dell'energia elettrica e contributi per la produzione della stessa entro 70 km dal luogo di produzione delle biomasse.

Per la produzione di colture dedicate il girasole per la produzione di olio vegetale puro può rappresentare una risorsa per la valorizzazione di oltre metà dei seminativi ritirati dalla produzione con beneficio del contributo attualmente concesso per la coltivazione di colture no-food su questa tipologia di terreni.

Nel Mugello i residui derivanti da potature di vite ed olivo sono modesti e possono contribuire alla cogenerazione in un limitato numero di aziende. I seminativi ritirati dalla produzione sono molto pochi, visto la vocazione agli allevamenti in questo territorio i

terreni sono, infatti, in larga parte utilizzati. Sicuramente l'impiego di una parte dei seminativi per la produzione di colture dedicate può portare alla produzione di un interessante quantitativo di biomassa destinabile alla produzione di biocarburanti.



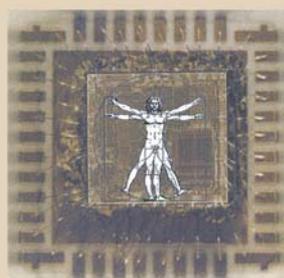
**Regione Toscana**

Diritti Valori Innovazione Sostenibilità



## SICOTER

Sistema Informativo per l'ottimizzazione del  
COmfort Termico nei luoghi di lavoro e la  
creazione di una filiera per l'uso di  
Energia Rinnovabile nella provincia di Firenze



RICERCA  
TRASFERIMENTO  
INNOVAZIONE

**DOCUP Ob. 2  
Anni 2000-2006**

Misura 2.8 "Azioni a sostegno  
della società dell'informazione"  
Azione 2.8.4. "Potenziamento  
del sistema regionale di servizi  
telematici e di comunicazione  
per le PMI"

## Partner del Progetto SICOTER



La pubblicazione fa parte dei risultati di un progetto finanziato dall'Amministrazione regionale sui Fondi Docup ob.2, anni 2000-2006.



La Regione Toscana non è responsabile dei testi e di quant'altro inserito dagli autori e curatori nella presente pubblicazione.

*Pubblicazione collegata alla Collana:*

RICERCA TRASFERIMENTO INNOVAZIONE

Regione Toscana  
Giunta regionale

DG Sviluppo economico  
Settore delle politiche regionali  
dell'innovazione e della ricerca

*Dirigente responsabile:*  
Simone Sorbi

Coordinamento comunicazione ed eventi  
Regione Toscana  
Direzione generale della Presidenza  
Settore Comunicazione istituzionale e pubblicitaria

*Coordinamento scientifico:*  
Simone Orlandini, Marco Mancini, Giampiero Maracchi

# Impiego di compost derivante da raccolta differenziata dei rifiuti in agricoltura

a cura di Francesca Orlando, Francesca Natali

## Introduzione

### Il contributo del compost alla mitigazione dei cambiamenti climatici

Il ruolo del suolo nel sequestro e stoccaggio del carbonio viene messo in evidenza nel protocollo di Kyoto (art. 3.4) tra le manovre proposte a favore della riduzione delle concentrazioni di gas clima-alteranti. I paesi ratificanti sono, infatti, invitati a tutelare e rafforzare la funzione di mitigazione dei suoli attraverso la promozione di un'agricoltura sostenibile in grado di limitare le sorgenti di emissione da un lato e la rimozione del carbonio serbato nei terreni agricoli e forestali dall'altro.

In linea con gli indirizzi del protocollo di Kyoto, la politica comunitaria punta alla pianificazione di una strategia per la protezione del suolo e la promozione di pratiche conservative di gestione agricola in grado di aumentare il sequestro di carbonio ed ostacolare l'impoverimento di sostanza organica. L'impiego di *ammendanti organici* contenenti materia organica stabile, in grado, cioè, di contribuire alla costituzione di humus, vengono citati dalla Commissione Europea (*COM(2006)231 del 22/09/06*) tra le misure volte ad ostacolare la diminuzione di sostanza organica nei suoli; i più efficaci ammendanti organici in tal senso, sono ritenuti il letame, il compost ed in misura molto minore i fanghi di depurazione ed i liquami animali.

Il contributo del suolo alla mitigazione dei cambiamenti climatici è fatto presente anche nella *Proposta del 22/09/06*, da parte del Parlamento Europeo e del Consiglio, di una direttiva volta a definire un quadro comunitario per un uso sostenibile di tale risorsa. Ai processi di degradazione cui sono esposti i suoli dell'UE (erosione, diminuzione della materia organica, contaminazione, salinizzazione, compattazione, diminuzione della biodiversità della pedofauna, impermeabilizzazione, inondazioni e smottamenti) vengono attribuite conseguenze dirette sui cambiamenti climatici e viene sottolineato come, la perdita di materia organica nei suoli possa ostacolare il raggiungimento degli obiettivi del protocollo di Kyoto.

Il pieno sfruttamento del potenziale di mitigazione dei suoli è attuabile attraverso l'integrazione di materiale organico nel terreno: secondo le stime riportate alla fine del 2001 dal Working Group Sinks, nell'ambito dell'European Climate Change Programme (ECCP), i suoli agricoli dell'Unione Europea (EU-15) sono in grado di assorbire 60-70 Mt CO<sub>2</sub>/anno pari, cioè, all'1,5-1,7% delle emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> dell'UE. Il report dell'ECCP cita tra le misure efficaci all'attuazione di tale potenziale l'impiego di ammendanti organici, tra cui il compost, in grado di conservare ed incrementare il contenuto di sostanza organica e migliorare contemporaneamente la fertilità fisica e chimica del terreno. L'ECCP stima che l'impiego di compost in tutti i suoli agricoli dell'EU condurrebbe ad un potenziale complessivo di sequestro di carbonio pari a 100 Mt CO<sub>2</sub>/anno, sebbene la possibilità d'impiegare compost su tutte la superfici agricole europee sia soggetta a fattori limitanti che riducono il potenziale realizzabile a 11 Mt CO<sub>2</sub>/anno. I fattori limitanti sono stati stimati secondo due approcci: in primo luogo, considerando la capacità produttiva di compost da rifiuti, valutata di 160 Mt ss/anno, sufficienti a coprire

una superficie agricola di non oltre 8.000.000 ha (tenuto conto di un quantitativo di prodotto impiegato pari a 20 t/ha/anno). In secondo luogo, stimando il quantitativo di materiale organico proveniente da rifiuti e avviabile al processo di compostaggio pari a 60-150 Mt/anno, è stato valutato che da questi quantitativi è possibile produrre non più di 21-37 Mt/anno (cioè 13-22 Mt ss/anno) di compost, sufficienti a coprire una superficie agricola di 1.300.000-2.200.000 ha (tenuto conto di un quantitativo di prodotto impiegato pari a 10 t/ha/anno).

La raccolta e la trasformazione dell'organico nell'area fiorentina è operata dalla Quadrifoglio s.p.a., che nei nuovi impianti di compostaggio di Case Passerini (comune di Sesto Fiorentino) può lavorare annualmente circa 70000 t di materiale proveniente dai rifiuti organici urbani con una resa in ammendante compostato misto di circa il 40% e una perdita di circa il 30% in umidità e 30% in materiale selezionato dai vagli. Inoltre viene raccolto anche "materiale verde", residuo delle potature e degli sfalci di giardini, per un potenziale di lavorazione di circa 35000 t che andrà a costituire l'ammendante compostato verde. Altro impianto con capacità lavorativa simile è gestito da Publiambiente, è situato nel comune di Montespertoli e opera soprattutto nell'area empolesse.

L'impiego di compost contribuisce positivamente anche nei confronti di una serie di altri problemi. Nella sua qualità di fertilizzante a lento rilascio consente di limitare l'impatto ambientale connesso al lisciviamento dei nitrati, legati ai fertilizzanti di sintesi, e alle emissioni di N<sub>2</sub>O. Le sue proprietà di ammendante contribuiscono, invece, al miglioramento delle proprietà chimico-fisiche e strutturali del terreno, consentendo modelli di lavorazione minima, riduzione della mineralizzazione della sostanza organica, riduzione dell'erosività e incremento della riserva idrica utilizzabile.

Prendendo in considerazione la produzione di fertilizzante organico da FORSU (frazione organica dei rifiuti solidi urbani), oltre ai vantaggi sopra citati, il compost, in una prospettiva più ampia, comporta un ulteriore risparmio di CO<sub>2</sub> emessa connesso ai processi di smaltimento dei rifiuti e alla produzione di concimi chimici implicando una diminuzione della mole di rifiuti avviata all'incenerimento e dei quantitativi di fertilizzanti di sintesi utilizzati.

In linea con gli indirizzi europei e sulla base del grande valore ambientale del compost, in Italia sono state introdotte, a livello regionale, misure per promuovere l'estensione del suo impiego in agricoltura. Nel Piano di Sviluppo Rurale 2007-2013 della Regione Toscana all'Asse 2 ("*Miglioramento dell'ambiente e dello spazio rurale*") vengono stabiliti incentivi per l'impiego agricolo di ammendante compostato di qualità in merito ai suoi effetti favorevoli al sequestro di CO<sub>2</sub>, all'aumento della fertilità e della riserva idrica del suolo, alla limitazione delle perdite per erosione. Il sostegno annuo per l'applicazione di 2,5t s.s./ha di ammendante compostato verde o misto è stabilito fino a 240 euro/ha; l'incentivo vale per l'applicazione su suoli agricoli con contenuto di sostanza organica inferiore al 2% e la priorità è data alle zone soggette ad erosione e vulnerabili a nitrati di origine agricola.

## **Il compost di qualità per la fertilizzazione delle colture agrarie: normative**

La definizione di compost è contenuta nel *Decreto Legislativo n. 22 del 5/02/97* e successive modifiche, attuazione della *Direttiva 91/156/CEE* sui rifiuti, *Direttiva 91/689/CEE* sui rifiuti pericolosi e *Direttiva 94/62/CE* sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio. Il compost è definito come "un prodotto ottenuto dal compostaggio della frazione organica dei rifiuti urbani nel rispetto di apposite norme tecniche finalizzate a

definire contenuti e usi compatibili con la tutela ambientale e sanitaria ed in particolare a definire i gradi di qualità”.

Il *compost di qualità* è considerato un fertilizzante organico, o substrato di coltura, biologicamente stabilizzato risultato della decomposizione naturale di scarti organici selezionati alla raccolta e trattati secondo norme di igiene e sicurezza; esso risponde a requisiti qualitativi specifici, definiti dalle norme e legislazioni vigenti, tali da renderlo compatibile con lo sviluppo radicale e la tutela dell'ambiente. Il compost di qualità costituisce un prodotto ricco di sostanze umiche, variamente dotato di elementi nutritivi, igienicamente sicuro, esente da patogeni dannosi, da semi o propaguli di infestanti e da quantità pericolose di metalli pesanti o composti fito-tossici.

Per ciò che riguarda le caratteristiche dei materiali di origine, cioè delle biomasse avviabili al processo di compostaggio, queste sono indicate a livello europeo dalla *Normativa EN 13432* sulla base delle proprietà di biodegradabilità e disintegrabilità, degli effetti sul processo di compostaggio, del contenuto di metalli pesanti e degli effetti sulla qualità finale del prodotto. Per la qualità del prodotto finito si fa invece riferimento alla *Decisione n. 799 del 3/11/2006* della Commissione Europea, la quale stabilisce i requisiti che deve soddisfare l'ammendante o substrato di coltivazione per l'attribuzione del marchio europeo di qualità ecologica Ecolabel; i limiti per i diversi parametri di caratterizzazione chimica, fisica e biologica sono stabiliti in relazione all'impatto ambientale e spesso risultano più restrittivi di quelli stabiliti dalle leggi nazionali in materia di fertilizzanti.

In Italia, attualmente, vige il *Decreto Legislativo n. 217 del 29/04/2006*, “Revisione della disciplina in materia di fertilizzanti” (modifica della *Legge n. 748 del 19/10/84* “Nuove norme per la disciplina dei fertilizzanti”) che definisce le tipologie di compost e le rispettive categorie di materie prime; il decreto stabilisce altresì i requisiti che il prodotto è tenuto a soddisfare per essere commercializzato sul mercato nazionale degli ammendanti per l'agricoltura. Su tali basi i prodotti compostati attualmente commercializzati in Italia come ammendante sono rappresentati da:

- **Ammendante compostato verde (ACV)**: prodotto ottenuto attraverso processo controllato di trasformazione e stabilizzazione di rifiuti organici costituiti da: scarti della manutenzione del verde ornamentale, residui colturali, altri rifiuti di origine vegetale, esclusi alghe e piante marine. L'ACV viene considerato un prodotto di qualità elevata e superiore rispetto al compostato misto; generalmente assolve la funzione di ammendante piuttosto che di concime, presentando una buona dotazione di sostanza organica ma un contenuto relativamente basso di elementi nutritivi (titolo 1-0,5-0,5). L'ACV viene impiegato con successo in tutte le pratiche agronomiche e florovivaistiche che prevedono contatto diretto con le radici e per la costituzione di terricci.
- **Ammendante compostato misto (ACM)**: prodotto ottenuto attraverso processo controllato di trasformazione e stabilizzazione di rifiuti organici che includono, oltre alle matrici previste per l'ACV, la frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) provenienti da raccolta differenziata, i rifiuti di origine animale (liquami zootecnici compresi), i rifiuti di attività agro-industriali, i rifiuti non trattati della lavorazione del legno e del tessile naturale, i reflui e fanghi. L'ACM, grazie alla buona dotazione di sostanze fito-nutritive (titolo 2-1,5-1,5), assolve principalmente la funzione di fertilizzante e viene impiegato in orticoltura, per colture da rinnovo e per reimpianti in viticoltura e frutticoltura; limitato è invece il suo utilizzo nel florovivaismo per via dell'elevato contenuto in sali solubili.
- **Ammendante compostato torboso**: prodotto ottenuto per miscela di torba con ammendante compostato verde e/o misto.

L'apporto di compost comporta una variazione delle caratteristiche del terreno migliorandone le proprietà fisiche, chimiche e biologiche. La sostanza organica facilita, infatti, la formazione di aggregati e la strutturazione del terreno (proprietà ammendante), favorendo la porosità del suolo e i rapporti acqua suolo. L'utilizzazione di compost contribuisce quindi a limitare i processi di erosione, desertificazione e sterilizzazione responsabili del decremento di produttività dei suoli agricoli. Nei confronti delle coltivazioni, l'incremento di riserva idrica disponibile rende possibile la riduzione degli input irrigui ed il miglioramento delle proprietà strutturali del suolo facilita l'adozione di pratiche di lavorazione ridotte. Anche le proprietà fertilizzanti del compost, seppur ridotte, sono di elevato interesse ambientale, viste le sue caratteristiche di lento rilascio dei principi nutritivi e quindi il ridotto dilavamento a cui questi vengono sottoposti.

I campi d'impiego del compost sono vari ed includono l'agricoltura di pieno campo, l'agricoltura biologica, l'orticoltura specializzata, la viticoltura e la frutticoltura, il florovivaismo, il recupero paesaggistico, il giardinaggio amatoriale, ecc., ma un punto cruciale per l'estensione del suo utilizzo è rappresentato dall'uniformazione a requisiti qualitativi standard e dalla garanzia di qualità sul prodotto. In particolar modo un punto focale è rappresentato dal contenuto di metalli pesanti, legato alla presenza di materiale indifferenziato nel FORSU.

I valori di riferimento a riguardo dei limiti di contenuto di metalli pesanti per ACV e ACM, stabiliti dal marchio europeo Ecolabel, sono reperibili nel sito dell'Ecolabel (<http://www.ecolabel.it>).

I limiti di qualità vigenti in Italia per la commercializzazione, come ammendante, di materiale compostato sono reperibili nel sito [www.camera.it](http://www.camera.it).

## **Un percorso per l'impiego e la valorizzazione dell'ammendante compostato misto in agricoltura**

Per fornire risposte concrete nel corso del progetto sono state avviate alcune attività in grado di contribuire alla creazione di una filiera produttiva di compost di qualità, che ne garantisca anche l'utilizzazione da parte degli agricoltori nei vari settori d'interesse (coltivazioni arboree, erbacee vivaismo, etc.).

Si tratta di percorsi diversi, dalle tecniche agronomiche ad altri più normativi, che forniranno risultati in un arco temporale diversificato, dal breve (alcuni mesi per l'uso di modelli e GIS) al lungo (prove di pieno campo sul contenuto di sostanza organica) periodo.

Complessivamente la loro integrazione sarà di supporto agli operatori nella filiera del compost (imprese di raccolta differenziata, amministratori, agricoltori, etc.) per le scelte di gestione e programmazione, nonché ai cittadini per mettere in atto comportamenti virtuosi e rispettosi dell'ambiente.

### **Creazione di un marchio di qualità del compost**

La norma *UNI EN ISO 9000:2000* definisce la *qualità* come l'insieme delle proprietà, prestazioni e caratteristiche che conferiscono ad un prodotto, processo o servizio la capacità di soddisfare esigenze espresse o implicite. L'*assicurazione della qualità* consiste pertanto nel garantire al mercato, con un adeguato livello di confidenza, che sussista tale capacità di soddisfare bisogni o requisiti specifici.

La creazione di un sistema di certificazione di qualità per il compost risulta un passaggio importante per incentivarne l'impiego. Un marchio di qualità in grado di garantire requisiti del prodotto tali da escludere effetti negativi sulla fertilità dei suoli e

sull'ambiente, è essenziale per promuoverne l'impiego e conquistare la fiducia degli operatori del settore agricolo. In particolar modo i quantitativi di macroelementi, microelementi e metalli pesanti nel prodotto compostato devono essere tali da mantenere inalterato l'equilibrio pedologico e influenzare positivamente lo sviluppo della coltura.

Il *Decreto Legislativo n. 217 del 29/04/2006* e la *Decisione UE n. 799 del 3/11/2006*, rispettivamente per la commercializzazione sul mercato nazionale dei fertilizzanti e per l'attribuzione del marchio europeo Ecolabel, fornisce i requisiti per la definizione della qualità del compost. Nelle norme sono indicate le concentrazioni in macroelementi (in particolare carbonio e azoto), in metalli pesanti, i contenuti in materiali inerti (es. vetro, plastica, ecc) ed il carico di patogeni potenzialmente dannosi (es. Salmonella, E. coli, ecc). Le metodologie ufficiali da seguire per il campionamento ed i test analitici sono indicate dal comitato tecnico *TC CEN 223* come specificato ed approvato nella norma *EN 12579* "Ammendanti per suoli e substrati di coltura".

Attualmente l'unico ente operante a livello nazionale per la certificazione volontaria del compost è il Consorzio Italiano Compostatori (CIC). Il CIC rilascia il proprio marchio di qualità a seguito di un processo di controllo e verifica sul prodotto rifacendosi ai requisiti indicati dalla legislazione vigente per gli ammendanti compostati (decreto legislativo n. 217 del 29/04/2006) e alle metodologie di riferimento indicate nel Manuale ANPA n.3/2001 e a quelle previste dal *TC CEN 223* e *UNI 10780*.

La necessità avere rassicurazioni sulla qualità del compost è però molto sentita da parte del mercato. In particolare le forme di garanzia effettuate a livello locale (provinciale e regionale) e con un rapporto più diretto fra i vari attori della filiera possono costituire la base di partenza per favorire sia l'impiego in agricoltura sia, di riflesso, un incentivo alla differenziazione. Le strade percorribili per tale scopo sono molteplici, dalla ricerca e divulgazione mirata, effettuata nel territorio interessato, al disciplinare di produzione fino alla creazione di un marchio di qualità locale per garantire la qualità del prodotto sulla sua composizione e sugli effetti di breve e lungo periodo sul terreno e la coltura.

Un **sistema per la qualità** include *componenti istituzionali*, rappresentate dalle autorità preposte all'emanazione delle *regole* (disposizioni tecniche a carattere obbligatorio); *componenti tecnico-scientifiche*, rappresentate dagli enti di normazione preposti alla stesura di *norme* (disposizioni tecniche a carattere volontario); e *componenti operative*. Le norme di riferimento per i sistemi di gestione per la qualità sono rappresentate dalla serie ISO 9000, edizione 2000 (tab. 46).

In particolare, la creazione di un sistema di qualità non può prescindere dalla costituzione di un organismo di verifica e attestazione in grado di assicurare la qualità del prodotto. Un primo step in questa direzione è rappresentato innanzitutto dalla definizione delle **forme di assicurazione della qualità** che si intendono realizzare e delle attività integrative connesse. Le possibilità d'interesse in questo caso, tra loro complementari e non alternative, sono rappresentate dalla:

- *certificazione di prodotto*, una forma di assicurazione *diretta* sulle caratteristiche intrinseche del prodotto tali da soddisfare le esigenze richieste dall'acquirente, sia pure con i limiti derivanti dalla natura necessariamente campionaria.
- *certificazione di sistema*, una forma di assicurazione *indiretta* sul prodotto inerente la gestione delle risorse e dei processi produttivi tale da soddisfare i bisogni del cliente.

Per realizzare un sistema per la qualità del compost, una volta individuate le citate componenti istituzionali e tecnico-scientifiche di riferimento, occorre focalizzare l'attenzione sulla componente operativa, costituita dai produttori (organismo di parte prima), dai consumatori (organismo di parte seconda) e dagli organismi di verifica e

attestazione (organismo di parte terza), i quali congiuntamente contribuiscono a stabilire la qualità del prodotto immesso sul mercato.

Norma	Titolo	Tema
ISO 9000	Sistemi di gestione per la qualità, fondamenti e terminologia – certificazione di qualità	Descrive i concetti e i fondamenti dei sistemi di gestione per la qualità e la terminologia. Essa sostituisce la norma Iso 8402.
ISO 9001	Sistemi di gestione per la qualità, requisiti	Specifica i requisiti dei sistemi di gestione per la qualità che un'azienda/organizzazione deve soddisfare per dimostrare la sua capacità di fornire prodotti che soddisfano i requisiti del cliente e di ambiti regolamentati. Essa sostituisce le ISO 9001, ISO 9002 e ISO 9003 diventando così l'unica norma di riferimento per scopi contrattuali e di certificazione di parte terza.
ISO 9004	Sistemi di gestione per la qualità, linee guida per il miglioramento delle prestazioni	Fornisce una guida sui sistemi di gestione per la qualità, inclusi i processi per il miglioramento continuativo, ai fini della soddisfazione dei clienti dell'azienda o organizzazione e delle altre parti interessate. Essa sostituisce la ISO 9004-1.
ISO 19011	Linee guida per gli audit dei sistemi di gestione per la qualità e/o di gestione ambientale	Fornisce una guida sulla gestione e conduzione delle verifiche ispettive dei sistemi di gestione ambientale e per la gestione della qualità, compresi i requisiti per la qualificazione dei valutatori o auditors. Essa sostituisce le norme ISO 10011-1, ISO10011-2, ISO 10011-3, ISO 14010, ISO 14011, ISO 14012.

Tabella 46: Norme della serie ISO 9000, edizione 2000 per i sistemi di qualità.

Le **attività integrative** legate alle forme di certificazione sopra citate hanno carattere di ulteriore garanzia sul prodotto e sono rappresentate da: *attività di ispezione*, attuata attraverso verifiche periodiche del prodotto o processo produttivo; *attività sperimentale*, realizzata attraverso prove, misure ed analisi sul prodotto o processo; *attività di conferma metrologica*, rappresentata dalla regolazione, messa a punto e taratura delle strumentazioni impiegate nell'attività sperimentale e di ispezione.

L'**ente certificatore** è l'organismo preposto a dichiarare la conformità del prodotto o processo a determinati requisiti, amministrando le procedure di rilascio della certificazione e di attribuzione del marchio di qualità sulla base dei risultati restituiti dall'attività sperimentale e di ispezione. Esso è un elemento al di sopra delle parti garante della rispondenza del prodotto a determinati requisiti e può includere nel processo di verifica (es. prove di laboratorio) operazioni effettuate dalle parti prima e seconda purché si assuma la responsabilità finale dell'attestazione. Inoltre l'ente certificatore è tenuto a nominare gli *operatori della qualità*, identificando il personale qualificato implicato nelle procedure di controllo e campionamento, i laboratori di prova e analisi, predisposti alla misura dei parametri di qualità, e i laboratori di taratura, predisposti a operazioni di controllo sulle strumentazioni utilizzate nell'attività sperimentali e di ispezione. Il CIC, a tal proposito, ha nominato: un *Comitato di qualità*, per la gestione ordinaria delle analisi e sopralluoghi periodici, un *laboratorio sperimentale* accreditato dal MSE (Ministero dello Sviluppo Economico) per il rilascio del marchio di qualità ecologica Ecolabel e un *team di tecnici* iscritti all'albo dei professionisti agronomi e forestali i quali, dopo apposito corso di formazione, rientrano tra gli addetti alle operazioni di campionamento.

Oltre alla specifica del **tipo di adesione** alla certificazione, che può essere a carattere *obbligatorio*, se richiesta da specifiche regole tecniche di natura cogente, o, nel caso del compost, a carattere volontario, è necessario definire per quale **tipo di qualità** si desidera costituire il sistema di certificazione. A tal proposito si parla di *qualità ecologica*

se riferita all'impatto sull'ambiente, e di *qualità economica* se riferita ai bisogni dell'utilizzatore.

Un passaggio fondamentale per la realizzazione di un marchio di qualità è rappresentato dalla conquista della **fiducia del mercato**. A tal fine il sistema di certificazione deve essere in linea con i principi di:

- *apertura*, l'accesso al servizio di valutazione di conformità deve essere libero e non soggetto a discriminazioni,
- *trasparenza*, le regole di funzionamento ed i criteri dell'attività di verifica devono essere chiari e conosciuti,
- *imparzialità*, tutti gli interessi devono essere equamente rappresentati,
- *competenza tecnica*, le verifiche devono fondarsi sul miglior stato di conoscenze tecniche ed esperienza
- *efficienza*, il sistema deve soddisfare i principi di economicità con costi proporzionati ai benefici arrecati.

Inoltre è indispensabile che il percorso di certificazione faccia riferimento a requisiti e metodologie riportate in norme tecniche, regolamenti o atti legislativi affini: *la conformità a norme settoriali e specifiche per il prodotto è considerata sinonimo di qualità*. D'altro canto è auspicabile che i requisiti di qualità non siano stabiliti soltanto sulla base delle norme vigenti a livello europeo e nazionale ma anche in relazione ad uno *studio di fattibilità* condotto sul territorio al fine di fissare requisiti accettati e raggiungibili dai produttori locali di ammendante compostato.

Un ulteriore strumento per conquistare la fiducia del mercato è rappresentato dall'*accreditamento* delle diverse componenti del sistema di certificazione da parte di predisposti istituti di accreditamento, tra questi il SINCERT (sistema nazionale per l'accreditamento di organismi di certificazione e ispezione), il SINAL (sistema nazionale per l'accreditamento dei laboratori di prova e misura), il SIT (sistema nazionale di taratura). Gli enti di accreditamento articolano la propria attività in tre fasi: fase di istruttoria (esame della documentazione fornita dal richiedente), fase di valutazione diretta (verifica sul campo della corrispondenza reale di quanto dichiarato nella documentazione del richiedente) e fase di sorveglianza (ispezioni periodiche, da semestrali ad annuali, per la verifica del mantenimento nel tempo delle condizioni che hanno dato luogo all'accreditamento) al fine di attestare la conformità dell'organismo di certificazione a specifiche norme ISO EN e UNI (es. *UNI CEI EN 45000 e 45001*).

Nel percorso per la costituzione di un marchio di qualità è necessario definire in maniera univoca le **categorie di prodotto** soggette a certificazione con le relative tipologie di materie prime ammesse al processo produttivo. Nel caso del compost di qualità, le categorie sono rappresentate dagli ammendanti compostati verdi e misti così come definiti dal decreto legislativo n. 217 del 29/04/2006. Inoltre è necessario procedere alla definizione puntuale di un **regolamento** contenente indicazioni sui parametri soggetti a verifica, sui requisiti di qualità, sulle modalità e metodologie adottate per le operazioni di campionamento, verifica (prova, analisi e misura) e ispezione, sulle procedure di richiesta volontaria della certificazione e rilascio del marchio. Un ultimo passaggio, a completamento del percorso operativo per la creazione di un marchio di qualità è la **registrazione** del medesimo presso l'Ufficio brevetti e marchi del Ministero delle Attività Produttive (riferimenti in materia di marchi registrati sono contenuti nel R.D. n. 929 del 21/06/1942).

## **Il disciplinare di produzione**

In fase di trasformazione l'attuale sistema di tracciabilità impiegato può essere un valido supporto per lo sviluppo di un disciplinare di produzione che garantisca in maniera semplice e di facile divulgazione le regole ed i parametri dei prodotti e delle trasformazioni.

Il disciplinare di produzione è l'insieme delle leggi e delle indicazioni a cui si deve far riferimento nelle diverse fasi di produzione al fine di ottenere un prodotto rispondente a determinate caratteristiche. Il disciplinare è suddiviso in articoli in cui vengono riportate le seguenti informazioni:

- La denominazione del prodotto cui è riservato il disciplinare.
- La denominazione delle categorie di materie prime avviabili al processo produttivo.
- La delimitazione della zona geografica di produzione e la definizione degli impianti di produzione.
- I requisiti e le caratteristiche chimico, fisiche e microbiologiche delle materie prime.
- La denominazione e definizione delle fasi del processo produttivo
- La descrizione dei metodi di ottenimento del prodotto, delle modalità di svolgimento di ciascuna fase e degli indici di controllo per la verifica del corretto andamento del processo produttivo. La descrizione del processo produttivo deve includere:
  - i principi generali: prescrizioni di base per ogni fase di lavorazione delle varie categorie di prodotto
  - le schede tecniche: che specificano nel dettaglio le norme da seguire nelle singole fasi di produzione
  - eventuali condizioni da rispettare in forza di disposizioni comunitarie e/o nazionali
- La descrizione del prodotto mediante indicazione delle principali caratteristiche fisiche, chimiche e microbiologiche, dei requisiti minimi.
- La descrizione delle modalità di controllo e verifica dei requisiti minimi sul prodotto e della corretta esecuzione delle fasi di processo.

## **Le prove eseguite sull'impiego agricolo di compost**

La fertilizzazione tramite compost è stata considerata come strumento per la realizzazione di un sistema virtuoso nel quale la produzione di biomasse agrienergetiche si accompagna all'integrazione di sostanza organica nel terreno.

Attraverso il recupero di materiali organici di scarto e l'applicazione di compost nei suoli agricoli infatti, è possibile attuare, almeno in parte, lo sfruttamento del potenziale locale di sequestro della CO<sub>2</sub>. Ciò rappresenta una misura capace di dare un contributo aggiuntivo alla riduzione delle emissioni di gas serra e in grado di completare l'azione benefica legata alla produzione di biomasse agrienergetiche.

Nel corso del progetto sono state avviate alcune linee di ricerca per verificare gli effetti della distribuzione di compost sul terreno e su colture sia di pregio tipiche della collina toscana in grado di produrre biomasse agrienergetiche residuali (olivo), sia su colture energetiche dedicate (sorgo zuccherino).

### Prove estensive su oliveti dell'azienda agraria Mondeggi-Lappeggi

Il valore ambientale ed agronomico dell'impiego di compost è stato valutato per colture in grado di originare sottoprodotti destinabili alla filiera delle biomasse agrienergetiche. La specie individuata in quest'ambito è l'olivo in virtù della sua capacità di fornire, a seguito di operazioni ordinarie e straordinarie di potatura, materiale di scarto ligno-cellulosico atto alla produzione di cippato per la filiera legno-energia. Oltre al valore ambientale del recupero energetico di scarti agricoli, l'olivo è caratterizzato da una tecnica di gestione del terreno che prevede operazioni minime particolarmente atte a favorire l'accumulo di sostanza organica nel suolo e ridurre la velocità di mineralizzazione.

Nel gennaio 2007 è stata avviata una sperimentazione, presso l'azienda agricola Mondeggi Lappeggi di proprietà della provincia di Firenze, che prevede la fertilizzazione di alcuni ettari di superficie ad oliveto attraverso l'impiego estensivo di ammendante compostato misto originato da raccolta differenziata e fornito dalla Quadrifoglio s.p.a..

L'obiettivo della sperimentazione è di valutare gli effetti del compost sulla fertilità chimico-fisica del suolo nel medio e lungo periodo, e di determinare l'attitudine della coltura nel favorire o meno, anche in relazione alla tecnica di gestione del terreno utilizzata, l'accumulo di sostanza organica e quindi il sequestro di carbonio.

Gli apporti di ammendante compostato sono stati eseguiti, in alcuni appezzamenti dell'azienda, all'inizio del 2007 e del 2008. La prova, ha carattere estensivo e interessa nel complesso circa 30 ha coltivati a oliveto specializzato. Le aree interessate dalla prova sono visualizzate, attraverso cartografia digitale, nella figura 54.

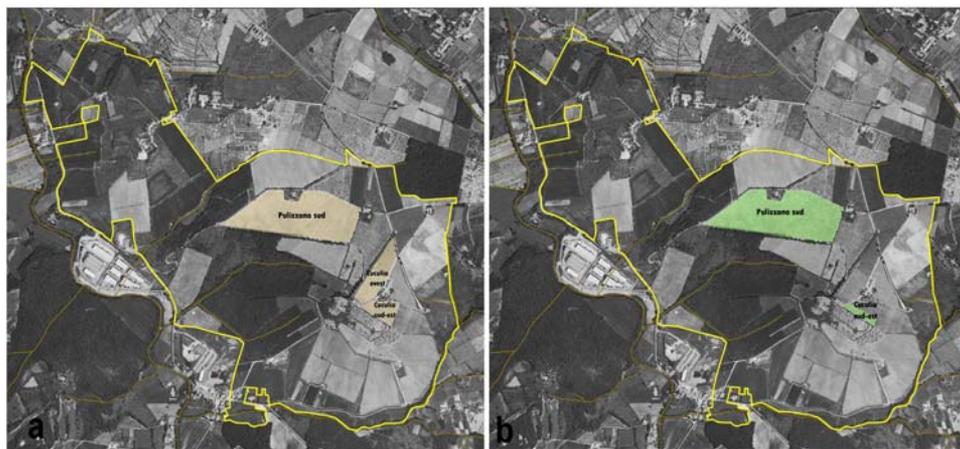


Figura 54: L'azienda Mondeggi Lappeggi: in giallo i confini del territorio aziendale e all'interno di questo gli oliveti interessati dalla distribuzione compost nel 2006 (a) e nel 2007 (b).

Per la distribuzione è stata realizzata un apposita modifica ad un carrello per uso agricolo. Sulla base dei dati bibliografici e delle indicazioni agronomiche correnti sono stati distribuiti quantitativi comprese fra 200 e 300 q/ha (tab. 47) nel mese di gennaio. Il terreno è stato poi lasciato inerbire spontaneamente; la flora infestante in questo modo assorbe gli elementi nutritivi dal compost superficiale e con la crescita delle radici favorisce il trasporto di sostanza organica nel volume di terreno esplorato. Nell'oliveto è stata poi effettuata, nel periodo estivo, una singola operazione di erpicatura al fine di consentire il risparmio idrico, l'eliminazione delle infestanti e l'interramento della sostanza organica.

La ricerca prevede il monitoraggio della composizione del terreno per approfondire le conoscenze circa le proprietà fertilizzanti, il potenziale di accumulo di carbonio organico nel suolo e la presenza di metalli pesanti. Ulteriori verifiche, relative alla qualità ed efficacia dell'ammendante compostato e alla sua interazione con l'equilibrio pedologico degli elementi, sono previste attraverso misure sulle concentrazioni di metalli pesanti non soltanto nel suolo, ma anche nei tessuti vegetali della coltura e nel prodotto raccolto.

Inoltre, per valutare l'azione ammendante del compost sul suolo sono in corso misurazioni del grado di strutturazione con particolare riferimento alla capacità di trattenuta idrica. Per valutare invece, l'azione concimante del compost sono in corso analisi su campioni di terreno focalizzate, in particolare modo, alla determinazione dei contenuti in elementi della fertilità (macro e micro elementi) e sostanze umiche.

<b>Distribuzione di compost</b>		
<b>Oliveto</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
	<b>(m<sup>2</sup>)</b>	<b>(m<sup>2</sup>)</b>
Cuculia ovest	26997	0
Cuculia sud-est	13776	5760
<b>Superficie totale interessata</b>	159679	124666
<b>Prodotto per unità di superficie (q/ha)</b>	301	205

Tabella 47: Superfici interessate dall'applicazione di compost e quantitativi distribuiti nei due anni di prove.

### **Impiego di compost su colture destinate alla produzione di biomasse energetiche**

La coltivazione di colture dedicate, atte alla produzione di biomassa destinata alla generazione di energia rinnovabile, assume un interesse particolare dal punto di vista scientifico, sia per l'individuazione delle colture più idonee per ciascun territorio sia per il reale contributo che possono dare alla diminuzione di gas serra.

In tale contesto è in corso di realizzazione una prova sul sorgo zuccherino destinato alla filiera alcoligena. La prova ha l'obiettivo di valutare l'impatto di differenti regimi idrici sulla risposta produttiva di questa coltura. Sempre obiettivo di questa prova è di valutare l'effetto dell'apporto di compost sulla riserva idrica disponibile e sui rapporti acqua-coltura.

La sperimentazione è realizzata sotto tunnel nella stagione primaverile estiva del 2008, presso l'Istituto Tecnico Agrario di Firenze, tramite coltivazione in vaso al fine di garantire il controllo delle variabili idriche e pedologiche oggetto di valutazione; in tal modo sarà possibile garantire condizioni omogenee per gli apporti di acqua irrigua e di compost previsti per i diversi trattamenti.

Il compost sarà valutato sotto molteplici aspetti, sia come fertilizzante, in grado di sostituire in parte gli input chimici, sia come ammendante, in grado di migliorare la capacità di ritenzione idrica del terreno favorendo così, a parità di input, una maggiore disponibilità di acqua alla coltura e maggior tolleranza a condizioni di deficit. Come per la prova sull'olivo, saranno compiute misure del tasso di mineralizzazione del materiale, in relazione allo carbonio organico stoccato nel terreno, e misure sulle concentrazioni degli elementi della fertilità chimica e dei metalli pesanti.

I risultati della prova, successivi alla fine di questo progetto, saranno diffusi per mezzo del sito web [www.sicoter.it](http://www.sicoter.it).

## **La valutazione del contributo del compost da raccolta differenziata nel bilancio dei gas serra del Comune di Firenze**

Il quadro fornito nei paragrafi precedenti mette in evidenza l'importanza agronomica ed ambientale del compost di qualità. In tale contesto è opportuno condurre uno studio approfondito, a livello comunale, sugli effetti della produzione e dell'impiego di compost sul bilancio locale dei gas serra. Stime sul potenziale di produzione di compost, da parte delle aree urbane, e sul potenziale di sequestro del carbonio, da parte delle superfici agricole, rappresentano una piattaforma di informazioni indispensabile alla compilazione di un bilancio delle emissioni di gas serra capace di esprimere e definire in maniera puntuale le potenzialità del compost come strumento di mitigazione dei cambiamenti climatici.

Lo studio prevede diverse fasi di analisi e stima di cui passiamo a descrivere brevemente i contenuti.

In una *prima fase*, accanto alla stima delle emissioni di gas serra per il Comune di Firenze, si procederà alla stima della CO<sub>2</sub> sequestrata ad opera delle aree verdi sulla base dell'estensione e del tipo di vegetazione. I risultati permetteranno di valutare il contributo della vegetazione urbana all'abbattimento delle emissioni della città attraverso la compilazione di un bilancio che prende in considerazione da un lato le emissioni registrate in atmosfera, e dall'altro il potenziale della vegetazione di attuare, attraverso il processo di fotosintesi clorofilliana, la cattura della CO<sub>2</sub> atmosferica e la sua organizzazione nei tessuti vegetali.

In una *seconda fase* sarà necessario prendere in esame il contributo alla produzione di compost degli scarti organici prodotti nelle aree urbane del Comune di Firenze. In quest'ambito si intendono svolgere in primis valutazioni sulle quantità di materiale organico derivante sia dalla raccolta dei rifiuti solidi urbani, che dalle operazioni di sfalcio e potatura delle aree verdi. Le valutazioni saranno condotte sia per il Comune nel suo complesso sia per i singoli quartieri sulla base di stime sia in termini reali che potenziali. A completamento dello studio si procederà a valutazioni: sulle perdite di carbonio da parte dei materiali organici di origine durante il processo di compostaggio, sulla stabilità del prodotto compostato finale e sul suo contributo al *sequestro temporaneo* di carbonio in relazione al contenuto di carbonio organico.

Le stime delle produzioni *reali* di compost si baseranno sui dati disponibili inerenti i quantitativi di materiale organico, verde o misto, che ad oggi vengono recuperati e avviati al processo di compostaggio, e quindi sulle quantità di ammendante compostato effettivamente prodotte a livello locale.

La produzione *potenziale* di compost sarà valutata su due fronti, tenendo conto, da un lato dell'ammontare complessivo della "frazione organica dei rifiuti solidi urbani" (FORSU), destinabile alla produzione di ammendante compostato misto, dall'altro della frazione organica ottenibile dalle aree verdi, destinabile alla produzione di ammendante compostato sia misto che verde; i quantitativi stimati per entrambe le fonti saranno convertiti in termini di compost producibile. Ai dati attuali sulla frazione organica proveniente da raccolta differenziata, sarà sommata la stima della FORSU che sfugge alla differenziazione; tale valutazione si baserà sui dati disponibili inerenti i quantitativi di materiale organico che convenzionalmente vengono separati dai rifiuti urbani indifferenziati e recuperati per la produzione del così detto "compost grigio". La componente organica presente nei rifiuti indifferenziati viene infatti solitamente recuperata tramite separazione meccanica e sottoposta al processo di stabilizzazione aerobica portando alla produzione di materiale compostato di bassa qualità inutilizzabile come fertilizzante e destinato invece alla discarica, col duplice ruolo di ridurre i processi fermentativi

anaerobici, e quindi le emissioni maleodoranti, ed il volume occupato dalla frazione organica dei rifiuti. Le stime sulla biomassa producibile a seguito di operazioni di manutenzione, sfalcio e potatura del verde pubblico si baseranno su un'analisi delle superfici verdi del territorio comunale (giardini pubblici e privati, parchi, alberature stradali, zone lungo fiume ecc.) dal punto di vista dell'estensione e del tipo di vegetazione presente (alberi, siepi, prati). Lo studio sarà condotto con il supporto di foto aeree, immagini da satellite, elaborazioni GIS e strumenti di modellizzazione e terrà anche conto dei possibili effetti dei cambiamenti climatici (aumento temperatura dell'aria, diminuzione precipitazioni).

In una *terza fase*, in relazione ai risultati ottenuti sulle produzioni reali e potenziali di compost, si procederà alla valutazione degli effetti dell'impiego di ammendante compostato misto sullo *stoccaggio nel lungo periodo* di carbonio organico nei suoli agricoli. La stima della CO<sub>2</sub> sequestrata terrà conto della stabilità della sostanza organica introdotta nel terreno e della velocità di mineralizzazione della stessa nel lungo periodo; per ottenere informazioni a tale proposito si vedano le prove sperimentali descritte precedentemente. Queste consistono nel monitoraggio, nel medio e lungo periodo, del tenore di sostanza organica nel suolo in seguito ad applicazioni di compost per la fertilizzazione di colture agrarie: le concentrazioni di carbonio organico misurate nel tempo su campioni di terreno, saranno convertite in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> evitate.

Ad ultimo, il bilancio delle emissioni e dei sequestri compilato nella prima fase sarà integrato con il bilancio del carbonio desunto nelle fasi successive, prendendo in considerazione quindi l'intero percorso compiuto dalla sostanza organica: il carbonio organico presente inizialmente nei materiali da avviare al compostaggio, quello sequestrato temporaneamente nel compost prodotto, quello stoccato nel lungo periodo dai suoli agricoli soggetti a distribuzione di compost.

Lo studio avviato assume valore ambientale e sociale ed i risultati connessi potranno essere impiegati a sostegno dei piani comunali (vedi anche Agenda 21) a favore della raccolta differenziata in termini di quantità e qualità dei materiali recuperati. L'individuazione dei quartieri più virtuosi, in relazione al potenziale per essi stimato, consentirà di intraprendere iniziative di riconoscimento attraverso la predisposizione di premi e misure di incentivo a sostegno di una gestione eco-compatibile dei rifiuti da parte dei cittadini.

Il modello proposto è in linea con le azioni e gli obiettivi stabiliti dal protocollo di Kyoto e si presenta come un valido strumento di attuazione dei piani locali di mitigazione alla cui promozione concorre sia attraverso la valorizzazione del verde urbano, come centro di assorbimento e stoccaggio di CO<sub>2</sub> e di fornitura di biomassa compostabile, sia attraverso la valorizzazione dei rifiuti, come risorsa impiegabile per incrementare la CO<sub>2</sub> sequestrata nei suoli.