

ALESSANDRO PALETTO (*) - ISABELLA DE MEO (***) - PAOLO CANTIANI (*)
 UGO CHIAVETTA (*) - CLAUDIO FAGARAZZI (***) - GIANLUIGI MAZZA (*)
 ELISA PIERATTI (*) (*) - GIOVANNI MATTEO RILLO MIGLIORINI (***)
 ALESSANDRA LAGOMARSINO (***)

ANALISI DELLA FILIERA FORESTA-LEGNO IN UNA PROSPETTIVA DI (BIO)ECONOMIA CIRCOLARE: IL CASO STUDIO DELLA FORESTA DI MONTE MORELLO

(*) CREA - Centro di ricerche Foreste e Legno.

(**) CREA - Centro di ricerche Agricoltura e Ambiente.

(***) Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali (GESAAF), Università degli Studi di Firenze; via S. Bonaventura 13, 50145 Firenze.

(*) Autore corrispondente; elisa.pieratti@crea.gov.it

Negli ultimi anni è stata enfatizzata l'importanza della bioeconomia circolare al fine di accrescere la competitività delle imprese dei paesi membri dell'Unione Europea. Nell'ambito della bioeconomia circolare il settore forestale riveste un ruolo chiave con particolare riferimento alle potenzialità di produzione bioenergetica. Il principale obiettivo del presente studio è stato quello di analizzare la filiera foresta-legno a livello locale (Monte Morello, Firenze) seguendo l'approccio della bioeconomia circolare. Lo studio è stato strutturato in due fasi: nella prima fase sono stati ricostruiti i flussi di materiali legnosi e le emissioni di anidride carbonica derivanti dal processo produttivo; nella seconda fase sono stati identificati e testati alcuni indicatori specifici per il settore forestale al fine di quantificare le 4R (Reduce, Reuse, Recycle, Recover) dell'economia circolare. Gli indicatori impiegati hanno preso in considerazione i seguenti aspetti: il miglioramento dell'efficienza dei processi produttivi; il riutilizzo e il tempo di vita dei prodotti legnosi; l'ottimizzazione degli assortimenti legnosi ritraibili; il recupero di energia dai prodotti legnosi a fine ciclo. I risultati del presente studio hanno messo in luce come i diradamenti eseguiti nella foresta di Monte Morello non siano riusciti ad ottimizzare gli assortimenti legnosi commercializzati, puntando unicamente sulla produzione di cippato. Questo fatto ha comportato un impatto negativo dal punto di vista economico e del tempo di vita dei prodotti. Viceversa, i risultati hanno evidenziato un bilancio favorevole per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica, soprattutto in riferimento a quelle evitate impiegando fonti rinnovabili anziché fonti fossili, e nella valorizzazione energetica di una parte del legno morto presente in grande quantità nella foresta.

Parole chiave: bioeconomia; economia circolare; analisi di filiera; cippato; Regione Toscana.

Key words: bioeconomy; circular economy; forest-wood chain analysis; woodchips; Tuscany Region.

Citazione: Paletto A., De Meo I., Cantiani P., Chiavetta U., Fagarazzi C., Mazza G., Pieratti E., Rillo Migliorini G.M., Lagomarsino A., 2018- *Analisi della filiera foresta-legno in una prospettiva di (bio)economia circolare: il caso studio della Foresta di Monte Morello.* L'Italia Forestale e Montana, 73 (3): 107-128. <https://dx.doi.org/10.4129/ifm.2018.3.01>

1. INTRODUZIONE

Nell'ultimo decennio, si è diffuso, prima all'interno della comunità scientifica e successivamente tra i *policy makers*, il concetto di (bio)economia circolare (Hetemäki *et al.*, 2017). Questo concetto innovativo integra nella definizione classica di economia circolare gli aspetti tipici e le peculiarità della bioeconomia, ponendo le due discipline in relazione gerarchica (Hagemann *et al.*, 2016).

L'economia circolare è stata concettualizzata a partire dall'idea e dai precetti teorici dell'ecologia industriale e del metabolismo industriale alla fine degli anni '70 e nei primi anni '80 del XX secolo, ma ha avuto una reale diffusione nel mondo accademico soltanto negli anni '90, in contrapposizione ai presupposti teorici dell'economia lineare (D'Amato *et al.*, 2017). Nell'economia lineare il ciclo di vita dei prodotti parte dall'estrazione delle materie prime, prosegue con la produzione ed il consumo, per poi concludersi con lo smaltimento degli scarti e dei prodotti stessi divenuti rifiuti (Giorgi *et al.*, 2017). L'economia circolare, invece, si basa sull'allungamento della vita dei prodotti, sull'impiego di materie prime secondo tassi di utilizzo compatibili con il loro tasso di rigenerazione, sul riutilizzo dei prodotti, sulla riparazione e sulla rigenerazione attraverso l'innovazione tecnologica. La Ellen MacArthur Foundation (2012) ha fornito una definizione organica dell'economia circolare così sintetizzabile: “*un'economia che possa rigenerarsi da sola attraverso due diversi tipi di flussi di materiali: quelli biologici, in grado di essere reintegrati nella biosfera, e quelli tecnici, destinati a essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera*”, mentre secondo l'UNEP (United Nations Environment Programme) l'economia circolare è: “*un'economia che bilancia lo sviluppo economico con la tutela dell'ambiente e delle risorse; pone l'accento sull'uso più efficiente e il riciclaggio delle risorse; mira ad un basso consumo di energia, bassa emissione di sostanze inquinanti ed alta efficienza, comporta l'applicazione della Cleaner Production, lo sviluppo di Eco-Industrial Park per lo sviluppo di industria, agricoltura e aree urbane*” (UNEP, 2006). In altre parole, l'economia circolare si basa su una riduzione della dipendenza dalle energie non-rinnovabili e dai prodotti a base fossile, caratterizzati da un'elevata impronta ambientale (*environmental footprints*), tenendo nella debita considerazione le tre dimensioni della sostenibilità: qualità ambientale, prosperità economica ed equità sociale. Recentemente, a partire da un'analisi testuale di oltre 100 lavori scientifici internazionali, è stata fornita da Kirchherr *et al.* (2017) una definizione olistica di economia circolare basata sulle cosiddette 4R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover*). Secondo gli autori, un sistema produttivo deve essere analizzato attraverso le 4R tenendo al contempo in considerazione sia il livello micro (imprese, prodotti, consumatori) che il livello macro (città, regione) (Kirchherr *et al.*, 2017).

A livello politico, l'Unione Europea (UE), nell'ambito della strategia Europa 2020, considera la transizione da un'economia lineare verso un'economia circolare un aspetto di fondamentale importanza per il raggiungimento di una maggiore efficienza complessiva nell'uso delle risorse (European Commission, 2010). La stessa UE vede nell'economia circolare il cardine per accrescere la

competitività e la crescita economica dei paesi membri e, al contempo, per rispettare gli obblighi derivanti dalla 2015 UN Climate Change Conference (CoP21). In particolare, la comunicazione della Commissione Europea del 2014 “Verso un’economia circolare: programma per un’Europa a zero rifiuti” (COM 398) punta a incentivare gli investimenti attraverso l’introduzione di piattaforme europee sull’efficienza nell’impiego delle risorse, mentre la comunicazione “L’anello mancante - Piano d’azione dell’Unione Europea per l’economia circolare” (COM 614) enfatizza l’importanza di promuovere processi industriali innovativi (simbiosi industriale) e forme innovative di consumo (condivisione di prodotti o infrastrutture). In aggiunta, processi produttivi in grado di ridurre il capitale naturale impiegato, di riutilizzare e riciclare i rifiuti prodotti, possono contribuire attivamente alla riduzione delle emissioni di gas clima-alteranti in atmosfera (Hetemäki *et al.*, 2017). Se a livello comunitario il concetto di economia circolare ha cominciato a diffondersi nell’ultimo decennio, il paese dove questo concetto è diventato un mantra delle scienze economiche è la Cina (D’Amato *et al.*, 2017) che, a partire dal 2008, ha messo in atto una politica nazionale improntata sulla riduzione dei rifiuti prodotti e sul riciclaggio a livello industriale (Murray *et al.*, 2015). La differenza sostanziale tra queste due realtà consiste nel fatto che l’UE ha adottato strategie di mercato (*market based*) a favore dell’economia circolare, quali l’incentivazione di sistemi di etichettatura e il *green public procurement*, mentre la Cina ha adottato un approccio dall’alto emanando norme in materia e procedendo con il controllo della loro applicazione e osservanza (*command-and-control*) (Ghisellini *et al.*, 2016).

Per quanto concerne la bioeconomia, le basi teoriche si devono al lavoro di Georgescu-Roegen (1975, 1977) che nella sua teoria bioeconomica ha messo in luce i limiti di natura entropica a cui è soggetto il processo di crescita economica. Questa teoria ha evidenziato, attraverso le leggi della termodinamica, come le attività economiche comportino inevitabilmente dei costi in termini di degradazione di materia e di energia (Bonaiuti, 1993). Recentemente, il Global Bioeconomy Summit, tenutosi a Berlino nel 2015, ha definito la bioeconomia come: “*la produzione basata sulla conoscenza e l’utilizzo di risorse biologiche, processi e principi biologici innovativi per fornire beni e servizi in modo sostenibile a tutti i settori economici*”. In questa definizione viene enfatizzato (Helm, 2016): 1) il ruolo della bioeconomia nel rimpiazzare le energie non rinnovabili e i prodotti a base di petrolio; e 2) la necessità di una maggiore integrazione del valore delle risorse naturali nello sviluppo economico. Nel 2012, l’UE ha adottato a livello politico una strategia, denominata “*Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe*”- meglio conosciuta come EU Bioeconomy Strategy - il cui principale obiettivo è assicurare la crescita economica e il soddisfacimento dei bisogni sociali attraverso un uso sostenibile delle risorse biologiche rinnovabili (European Commission, 2012). All’interno delle risorse biologiche rinnovabili, la EU Bioeconomy Strategy include la produzione sostenibile di risorse rinnovabili derivanti dalla terra, dalla pesca e dall’acquicoltura e la loro trasformazione in cibo, fibre e bioenergia (Mubareka *et al.*, 2014; Wolfslehner *et al.*, 2016).

Nell'ambito della bioeconomia circolare, che come detto non è altro che un'integrazione dei due concetti sopradescritti, il settore forestale, con specifico riferimento alla produzione di bioenergia (biomasse legnose ad uso energetico) e alla trasformazione del legno, ha un ruolo di primaria importanza per lo sviluppo economico futuro dell'UE (Hänninen e Mutanen, 2014). Infatti, attualmente la bioeconomia ha un impatto pari a circa 2 trilioni di € l'anno e 22 milioni di posti di lavoro, corrispondenti al 9% dell'intera forza lavoro dell'UE (Hetemäki, 2014). In questo contesto, il ruolo di rilievo del settore forestale è evidenziato da alcuni recenti studi che illustrano le potenzialità future delle biomasse forestali ad uso energetico in termini sia di domanda sia di offerta (Dees *et al.*, 2011). In riferimento all'anno 2010, l'offerta di legname da parte dei paesi dell'UE è stata pari a circa 1 miliardo di m³, mentre la domanda è stata all'incirca pari a 800 milioni di m³ (57% per uso industriale e 43% per usi energetici). Il modello previsionale EUwood ha stimato che il potenziale di legname ritraibile dalle foreste europee potrebbe variare tra i 625 e gli 898 milioni di m³ nel 2030, a fronte di una domanda che si stima crescere del 73% (Mantau *et al.*, 2010). Questi dati mettono in evidenza l'importante ruolo che potrà svolgere in futuro la filiera foresta-legno nell'economia circolare dei paesi dell'UE (Hetemäki *et al.*, 2017).

In Italia, l'impatto della bioeconomia in riferimento all'anno 2015 è stato stimato in circa 251 bilioni di €. All'interno di questo valore il settore foresta-legno, comprensivo delle cartiere, rappresenta circa il 15% del totale. In termini occupazionali la bioeconomia impiega oltre 1 milione e 700 mila addetti di cui circa il 16% nel settore foresta-legno (Intesa Sanpaolo, 2015). Alla fine del 2016 è stata presentata la prima bozza di "Strategia italiana per la Bioeconomia" nella quale sono stati individuati tre macro-settori (agroalimentare, bioeconomia marina, foreste e bioindustria) ed una serie di obiettivi e priorità per ciascun macro-settore. La bozza di Strategia è stata condivisa tramite un processo di consultazione pubblica con i portatori d'interessi dei principali settori produttivi coinvolti, al fine di accoglierne osservazioni e suggerimenti; nel 2017 è stato redatto il testo definitivo. La "Strategia italiana per la Bioeconomia" è in linea con altri documenti predisposti da alcuni paesi dell'UE nel corso degli ultimi cinque anni: Paesi Bassi (*Framework Memorandum on the Bio-Based Economy*, 2012), Germania (*National Policy Strategy on Bioeconomy*, 2014), Finlandia (*Sustainable Growth from Bioeconomy - The Finnish Bioeconomy Strategy*, 2014), Francia (*A Bioeconomy Strategy for France*, 2016) e Spagna (*Spanish Strategy on Bioeconomy Horizon 2030*, 2016). La "Strategia italiana per la Bioeconomia" rappresenta un testo di fondamentale importanza per i futuri studi in materia, al cui interno è però necessario enfatizzare ulteriormente il ruolo del settore forestale. In questo senso è compito della comunità scientifica nazionale dimostrare, attraverso studi e ricerche *ad hoc*, il ruolo cruciale della filiera foresta-legno per la bioeconomia italiana.

Sulla base di queste considerazioni, il principale obiettivo della presente ricerca è stato analizzare la filiera foresta-legno a livello locale - attraverso un ca-

so di studio - seguendo l'approccio della bioeconomia circolare, mettendone in luce punti di forza e criticità. A tal fine, partendo dai dati di flusso di materiali legnosi ricavati dell'analisi di filiera, sono stati definiti una serie di indicatori utili a realizzare un'analisi di filiera attraverso le 4R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover*) come definite da Kirchherr *et al.* (2017). Il presente studio è stato condotto nell'ambito del progetto LIFE14 CCM/IT/905 "*Recovery of degraded coniferous Forests for environmental sustainability Restoration and climate change Mitigation*" (FoResMit) finalizzato ad investigare il ruolo multifunzionale delle foreste con specifico riferimento alla mitigazione dai cambiamenti climatici. Lo studio è stato condotto nella foresta di Monte Morello in provincia di Firenze (Toscana), successivamente agli interventi di diradamento realizzati nel corso dell'attività progettuale di FoResMit. Si è valutato che l'area si prestasse particolarmente bene ad un'analisi di filiera in quanto allo stato attuale le potenzialità della foresta per la produzione di bioenergia sono assai elevate.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Area di studio

Monte Morello è il complesso di rilievi preappenninici situati a Nord-Ovest di Firenze, elevandosi sulla piana Firenze - Pistoia, tra i comuni di Sesto Fiorentino, Vaglia e Calenzano. Da sempre per la sua vicinanza alla città - la cima del monte dista pochi chilometri in linea d'aria da Firenze - la sua storia è stata inevitabilmente legata alle vicende economico-sociali del capoluogo fiorentino e dei territori limitrofi ed è stato un comprensorio boschivo fortemente sfruttato. Infatti, a partire dal XII secolo, la copertura forestale di Monte Morello ha iniziato ad essere utilizzata in modo consistente e per lungo tempo ha fornito legname da opera per l'attività edilizia e legna per fini energetici alla città (Arrigoni *et al.*, 1997).

In seguito, tra il XVIII ed il XIX secolo, si registrarono intensi prelievi al fine di soddisfare le necessità energetiche della fabbrica di ceramiche dei marchesi Ginori in espansione nella piana di Sesto e per coprire almeno in parte le richieste di legna e carbone della città. Diminui, pertanto, il turno delle ceduzioni nelle formazioni miste di latifoglie di Monte Morello (7-8 anni) e venne perseguito un prelievo sistematico di alcune specie più richieste dal mercato (querce). In questo modo la capacità di riproduzione vegetativa venne compromessa sempre più e la copertura forestale, all'inizio del secolo scorso, risultava rada se non del tutto assente (Maetzke, 2016). Ai primi del '900 fu avviata un'opera di ricostituzione del soprassuolo forestale, finalizzata in primo luogo alla protezione dell'assetto idrogeologico della montagna (Del Noce, 1849; Ciampi, 1979). Successivamente, grazie al Regio Decreto Legge (RDL) n.3267 del 30 dicembre del 1923 e al successivo Regolamento n.1126 del 1926, fu intrapresa l'opera di rimboschimento (prevalentemente a carico dell'ente pubblico anche sui terreni privati) su una superficie complessiva di 1.036 ettari

nell'area di Monte Morello (provincia di Firenze), di cui 816 ha da parte di Enti pubblici (ConSORZI) e 220 ha da privati. A causa delle interruzioni dovute al periodo tra le due guerre mondiali, il rimboschimento di Monte Morello si è concluso soltanto negli anni '70 del XX secolo (Gatteschi e Meli, 1996).

Le principali specie impiegate nei rimboschimenti furono conifere (78% del totale delle specie impiegate) quali il cipresso comune (*Cupressus sempervirens* L.), il cipresso dell'Arizona (*Cupressus arizonica* E. Greene), il pino nero (*Pinus nigra* J.F. Arnold) e il pino bruzio (*Pinus brutia* Ten.). Per il restante 22% - soprattutto in fase di risarcimento delle fallanze - vennero impiegate latifoglie tipiche della zona quali la roverella (*Quercus pubescens* Willd.), il leccio (*Quercus ilex* L.), il cerro (*Quercus cerris* L.) e, in misura minore, altre latifoglie.

Negli anni successivi l'opera di rimboschimento, la foresta di Monte Morello è stata sottoposta solo sporadicamente alle necessarie cure colturali (sfolli e diradamenti) e ai tagli fitosanitari (Cenni *et al.*, 1998); questa mancanza di gestione ha dato luogo a fenomeni di invecchiamento precoce, con una diffusa moria di alberi, e difficoltà nella rinnovazione naturale dei popolamenti, fenomeni che hanno vanificato uno dei fini primari dei rimboschimenti, quello della difesa idrogeologica (Nocentini, 1995).

Alla fine degli anni '90 l'Amministrazione Provinciale - ente gestore del comprensorio - ha affidato all'Accademia Italiana Scienze Forestali la redazione di un Piano di Gestione e rinaturalizzazione dei rimboschimenti (Ciancio, 2000) per il periodo 2001-2010, che si è posto come obiettivo quello di facilitare l'evoluzione verso sistemi complessi e funzionali sotto il profilo biologico (Maetzke, 2002).

L'area oggetto del presente studio - dove sono stati realizzati gli interventi selvicolturali dimostrativi nell'ambito del progetto LIFE CCM/IT/905 FoRe-sMit - si trova in località "Fonte dei Seppi". Il soprassuolo è perlopiù una fustaia adulta di pino nero e pino bruzio con presenza di cipresso e latifoglie (prevalentemente cerro, nel piano principale, ed orniello, nel piano sottoposto), caratterizzata da un basso livello della stabilità meccanica e abbondante presenza di legno morto a terra e in piedi. Nella zona studiata la provvigione è risultata molto alta, rispetto a pinete a prevalenza di pino nero di analogo stadio evolutivo attestandosi attorno a $560 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mentre la componente morta registra volumi pari a $75,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ distribuiti nel seguente modo: 80% del volume concentrato nel legno morto a terra, 18% negli alberi morti in piedi e il restante 2% nelle ceppaie (De Meo *et al.*, 2017). La distribuzione dei volumi del legno morto per classe di decomposizione evidenzia come questo sia prevalentemente concentrato nella seconda e terza classe di decomposizione (Tabella 1).

I dati del secondo Inventario Forestale Nazionale (INFC) hanno stimato volumi medi di legno morto nei boschi della Toscana decisamente inferiori ($8,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ di legno morto a terra e $1,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ di alberi morti in piedi) rispetto a quelli registrati nella foresta di Monte Morello (Gasparini e Tabacchi, 2011). Questo fatto a conferma dell'elevato stato di abbandono e conseguente instabilità meccanica della foresta nella zona oggetto di studio.

Tabella 1 - Distribuzione dei volumi di legno morto per componente e classe di decomposizione ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

Classe decomposizione	Legno morto a terra	Alberi morti in piedi	Ceppaie	Totale
1ª classe	2,90	4,48	0,00	7,38
2ª classe	15,05	4,82	0,07	19,94
3ª classe	32,37	4,48	0,70	37,55
4ª classe	8,51	0,12	0,40	9,03
5ª classe	1,09	0,02	0,07	1,18
Totale	59,91	13,92	1,25	75,08

2.2 Struttura dell'indagine

La filiera foresta-legno nell'area oggetto di studio è stata analizzata seguendo i principi teorici della bioeconomia circolare. A tal fine l'indagine è stata strutturata in due step strettamente interconnessi: 1) nel primo step tramite un'analisi di filiera sono stati ricostruiti i flussi di materiali, con particolare riferimento agli assortimenti legnosi prodotti; 2) nel secondo step sono stati messi a punto e applicati ai dati ricavati dalla precedente analisi alcuni indicatori specifici per il settore forestale, al fine di quantificare le 4R della bioeconomia circolare.

Per quanto concerne il primo step sono stati ricostruiti i flussi di materiali derivanti dai seguenti interventi selvicolturali eseguiti nelle aree sperimentali del Progetto FoResMit nella foresta di Monte Morello (Cantiani *et al.*, 2017; Cantiani e Marchi, 2017; Paletto *et al.*, 2017):

- a) diradamento tradizionale: diradamento dal basso nel quale sono state eliminate le piante del piano dominato, asportando tra il 15% e il 20% dell'area basimetrica. Durante le operazioni di utilizzazione sono state abbattute ed asportate le piante morte in piedi, mentre il legno morto a terra presente in foresta non è stato rimosso;
- b) diradamento selettivo (con scelta di piante candidate): diradamento basato su una selezione delle piante candidate (circa 100 soggetti ad ettaro), scelte in base al loro vigore e stabilità. La crescita delle piante candidate è stata favorita tagliando i competitori vicini (Cantiani *et al.*, 2016; Marchi *et al.*, 2018). L'intervento complessivamente ha asportato tra il 30% ed il 40% dell'area basimetrica, con valori circa doppi rispetto al diradamento tradizionale. La riduzione percentuale del numero di alberi è invece simile nelle due modalità di diradamento. Durante le operazioni di utilizzazione sono state abbattute ed asportate tutte le piante morte in piedi e rimossi i tronchi a terra con diametro maggiore di 30 cm e appartenenti alla 1ª e 2ª classe di decomposizione.

In altri termini, si può asserire che è stata adottata una strategia differente per i due diradamenti in riferimento al legno morto: nel caso del diradamento tradizionale è stata prelevata unicamente la componente morta in piedi; mentre

nel diradamento selettivo sono stati prelevati sia gli alberi morti in piedi, sia il legno morto a terra di grosse dimensioni e tecnicamente esboscabile perché ancora integro.

I diradamenti sono stati applicati a fini sperimentali su 10,08 ha di foresta, di cui 5,35 ha trattati con diradamento di tipo basso e 4,73 ha trattati con diradamento selettivo. In aggiunta sono stati monitorati anche altri 5,00 ha circa di bosco non soggetto ad alcun intervento con il ruolo di testimone.

Il flusso di materiale legnoso prelevato a seguito degli interventi selvicolturali è stato ricostruito passo per passo per le diverse fasi della filiera: fase 1 di abbattimento ed esbosco; fase 2 di cippatura; fase 3 di trasporto del cippato; fase 4 di conversione energetica in impianto a biomasse.

Tale analisi è stata realizzata al fine di valutare l'intera filiera foresta-legno a livello locale e fornire indicazioni ai *decision makers* sulle strategie da adottare per migliorarne l'efficienza in una prospettiva di bioeconomia circolare.

Durante il secondo step, la filiera foresta-legno locale è stata analizzata attraverso alcuni indicatori messi a punto *ad hoc* per questo tipo di studio. Come mostrato in Tabella 2, al fine di quantificare le 4R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover*) dell'economia circolare che massimizzano il valore delle risorse per ridurre la produzione di scarti, sono stati definiti sei appositi indicatori per il settore foresta-legno. Gli indicatori impiegano i dati ricavati dalla prima fase di analisi basata sui flussi di prodotti legnosi ed anidride carbonica nelle diverse fasi della filiera.

Il miglioramento dell'efficienza dei processi produttivi, attraverso una riduzione dell'uso della risorsa, può essere quantificato tramite un primo indicatore (I_1) dato dal rapporto tra il valore economico annuo dei prodotti legnosi ottenuti a seguito degli interventi selvicolturali e il volume medio annuo asportato con le operazioni di utilizzazione. Specificatamente per il caso di studio, in cui il legname è pino nero o pino bruzio, un valore alto di questo indicatore sta ad indicare assortimenti legnosi destinati ad edilizia/mobili o produzione di imballaggi, mentre un valore basso di questo indicatore indica che i prodotti commercializzati hanno un basso valore aggiunto (principalmente legna ad uso energetico). Un secondo indicatore (I_2) che integra il concetto di riduzione dell'uso della risorsa scaturisce dalla ricostruzione dei flussi di anidride carbonica (CO_2) in atmosfera, derivanti dall'uso della risorsa forestale e della destinazione finale dei prodotti legnosi. Tale indicatore consente di valutare se il processo produttivo è stato efficiente anche in termini di emissioni, in accordo con i principi base della *green economy* - definita un'economia a basse emissioni di anidride carbonica, con uso efficiente delle risorse e socialmente inclusiva (UNEP, 2011) - e della politica ambientale dell'UE (Giorgi *et al.*, 2017). Al fine di quantificare questo indicatore è necessario calcolare e sommare le emissioni di CO_2 in atmosfera durante tutte le fasi della filiera al netto delle eventuali emissioni evitate derivanti dalla conversione energetica del cippato e dal conseguente non impiego di combustibili fossili. Quest'ultimo aspetto è legato al concetto di "*carbon neutrality*" del sistema bioenergetico nel complessivo ciclo del carbonio

Tabella 2 - 4R dell'economia circolare per la filiera foresta-legno.

4R	Definizione	Indicatori settore foresta-legno
Riduzione (<i>Reduce</i>)	Miglioramento dell'efficienza dei processi produttivi riducendo l'uso delle risorse naturali impiegate	I ₁ - Rapporto tra valore annuo dei prodotti legnosi ottenuti e ripresa annua (€ m ⁻³) I ₂ - Emissioni di anidride carbonica per unità di prodotto ottenuto (tCO ₂ m ⁻³)
Riutilizzo (<i>Reuse</i>)	Utilizzo di un prodotto più volte prima che lo stesso venga eliminato	I ₃ - Tempo di vita di un prodotto prima di essere destinato al recupero energetico (anni)
Riciclaggio (<i>Recycle</i>)	Processo di divisione dei materiali al fine di ottenere sottoprodotti di alta qualità e di bassa qualità	I ₄ - Rapporto tra il valore degli assortimenti legnosi potenzialmente ritraibili e il valore degli assortimenti legnosi realmente ottenuti (€ € ⁻¹)
Recupero energetico (<i>Recover</i>)	Recupero di energia dai prodotti di rifiuto	I ₅ - Emissioni evitate per unità energetica prodotta dai residui legnosi derivanti dalla filiera foresta-legno (gCO ₂ kWh ⁻¹) I ₆ - Rapporto tra necromassa impiegata a finalità energetiche e necromassa complessiva (m ³ m ⁻³)

(Berndes *et al.*, 2016). Quanto più l'indicatore è basso, tanto più il processo produttivo risulta efficiente, in termini di sostenibilità ambientale, perché sta a significare che un'unità di prodotto finito è stata ottenuta con una minor quantità di emissioni di anidride carbonica.

Il riutilizzo dei prodotti legnosi ricavati è valutato tramite un terzo indicatore (I₃), espresso come tempo di vita del prodotto stesso prima di essere destinato al recupero energetico o diventare rifiuto. Nel caso di prodotti legnosi soggetti a più utilizzi (sono esempi gli scarti di lavorazione del legname successivamente impiegati per la produzione di bioenergia) è necessario stimare il tempo di vita medio di ciascun prodotto. Valori elevati di questo indicatore stanno ad indicare lunghi tempi di vita del prodotto o un riutilizzo dello stesso.

Il riciclaggio, nel caso della filiera foresta-legno, è valutato tramite un quarto indicatore (I₄) dato dal rapporto tra il valore economico degli assortimenti legnosi potenzialmente ritraibili e il valore economico degli assortimenti legnosi realmente prodotti. Questo indicatore esprime in forma percentuale il differenziale economico che si sarebbe potuto ricavare da una più razionale trasformazione dei volumi legnosi prelevati a favore degli assortimenti di pregio. Questi ultimi sono quelli che generalmente hanno tempi di vita più lunghi e creano un valore aggiunto lungo tutta la filiera.

Infine, il recupero energetico è quantificabile attraverso un quinto indicatore (I₅) dato dalle emissioni evitate per unità energetica prodotta da tutti i residui legnosi ottenuti lungo la filiera foresta-legno. Al fine di quantificare in modo completo il recupero energetico è necessario considerare sia i residui forestali derivanti dagli interventi selvicolturali effettuati in bosco, sia i residui legnosi derivanti dal processo di trasformazione del legname (prima e seconda trasformazione). Valori alti dell'indicatore indicano un risparmio nell'u-

utilizzo dei combustibili fossili grazie all'impiego di fonti rinnovabili quali le biomasse legnose.

Il sesto indicatore messo a punto (I_6), specifico per il settore forestale, è dato dal rapporto tra la necromassa (legno morto) impiegata per finalità energetiche e la necromassa complessiva presente in bosco. Quest'ultimo indicatore permette di quantificare il grado di valorizzazione del legno morto presente in bosco tramite la sua conversione in energia. Nel caso del presente studio, sviluppato in una foresta caratterizzata da quantità di legno morto assai elevate, questo indicatore risulta particolarmente consono ad esprimere il risparmio energetico derivante dalla valorizzazione di questa componente.

3. RISULTATI

3.1 *Flussi di materiale*

3.1.1 Fase 1 - Abbattimento ed esbosco

I risultati evidenziano che nelle aree sperimentali del Progetto FoResMit della foresta di Monte Morello il diradamento tradizionale porta ad un prelievo pari al 24% della provvigione in piedi, ovvero di $134,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ a cui vanno aggiunti $9,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ di legno morto in piedi. Quindi complessivamente nelle parcelle sperimentali trattate con diradamento tradizionale vengono asportati $144,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Invece, nelle parcelle trattate con diradamento selettivo si sono registrati prelievi del 36% della provvigione in piedi, ovvero pari a $202,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, a cui va sommato il legno morto in piedi e quello a terra ($18,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Pertanto, complessivamente nelle parcelle sperimentali trattate con diradamento selettivo è stato asportato un volume totale di legname pari a $220,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Per quanto concerne il tipo di legno morto, i volumi prelevati durante gli interventi selvicolturali sono rappresentati da alberi morti in piedi e da tronchi a terra di prima e seconda classe di decomposizione con diametro maggiore di 30 cm. In altre parole sono stati prelevati soltanto i tronchi che potevano essere, sulla base del grado di decomposizione e della dimensione, esboscati in modo agevole.

Nel complesso, nei 10,08 ha di foresta di Monte Morello sottoposti a diradamento sono stati prelevati 1.814 m^3 di cui circa 772 m^3 nelle parcelle trattate con diradamento tradizionale che si estendono su 5,35 ha di superficie e 1.042 m^3 nelle parcelle trattate con diradamento selettivo che si estendono su 4,73 ha.

Le operazioni di utilizzazione in foresta - allestimento del cantiere, abbattimento, esbosco e concentramento agli imposti - hanno impiegato quattro persone, che si sono alternate nel lavoro, nel periodo tra la prima settimana di settembre e l'ultima settimana di novembre 2016. Le attrezzature impiegate nel cantiere di utilizzazione sono state 2 motoseghe medie Stihl MS180, 2 trattori Lamborghini con verricello e un cingolato Terex TC125 con motore Deutz TCD 2012 L04 (potenza motore 74.0 kW) dotato di pinza forestale.

Sulla base dei dati raccolti in campo è risultata una produttività di $1,6 \text{ t h}^{-1}$ (ovvero 75 h ha^{-1}) relativa alle fasi di abbattimento e concentramento e di $2,4 \text{ t h}^{-1}$

per la fase di esbosco (ovvero 50 h ha^{-1}) (Tabella 3). La produttività è piuttosto bassa a causa dell'elevata densità del popolamento e dell'accidentalità del terreno, dovuta anche all'alta presenza di legno morto a terra, che ha fortemente ostacolato le operazioni delle squadre. Questi dati sono inferiori a quanto riportato in letteratura per cantieri con caratteristiche analoghe. Spinelli *et al.* (2003) per un cantiere nel comune di Seren del Grappa, in provincia di Belluno, in cui l'abbattimento è stato eseguito da due operai equipaggiati con una motosega media e slittino Fällboy ha calcolato una produttività di $4,5 \text{ t h}^{-1}$, mentre per l'esbosco, eseguito tramite trattore cingolato Same 65 C da 44 kW , la produttività è risultata di circa $3,4 \text{ t h}^{-1}$. Verani *et al.* (2017) stimano per la fase di abbattimento con motosega in piantagioni artificiali di conifere una produttività media di $1,2-1,6 \text{ t h}^{-1}$, mentre per l'esbosco effettuato con trattore munito di verricello sono state calcolate produttività comprese tra $2,9$ e $3,8 \text{ t h}^{-1}$ per operaio. Baldini *et al.* (2010) hanno calcolato una produttività di $3,2 \text{ t h}^{-1}$ per l'abbattimento in pinete mediterranee di 35 anni e $1,35 \text{ t h}^{-1}$ per l'esbosco eseguito con Same Explorer 80 da 60 kW munito di verricello forestale.

Per la stima delle emissioni derivate dal processo produttivo è stato considerato un parametro medio di emissione pari a $2,65 \text{ kgCO}_2$ per litro di gasolio combusto e $2,38 \text{ kgCO}_2$ per litro di benzina (APAT, 2003). Considerando l'impiego complessivo delle motoseghe pari a 756 ore per l'intera durata del cantiere e un consumo orario di carburante di $0,6 \text{ l h}^{-1}$ si è stimato un consumo totale di 454 l. Pertanto le emissioni di anidride carbonica dell'intera fase di abbattimento sono state pari a circa 1.080 kgCO_2 . In riferimento alla fase di esbosco, eseguita da trattore con verricello forestale, il consumo medio è stato di $4,6 \text{ l h}^{-1}$ con un consumo complessivo di 2.318 l. Le emissioni totali della fase di esbosco del presente caso studio risultano essere pari a 6.144 kgCO_2 .

3.1.2 Fase 2 - Cippatura

Il legname prelevato con gli interventi di diradamento (pari a 1.215 t di biomassa secca) è stato destinato quasi totalmente alla produzione di cippato; nello specifico 1.200 t sono state destinate a produrre cippato, mentre 15 t sono state lasciate in bosco per ragioni logistiche ed ecologiche. Del cippato totale prodotto il 40% proviene dalle particelle trattate con diradamento dal basso e il restante 60% da quelle trattate con diradamento selettivo.

Il materiale esboscato è stato sottoposto ad operazione di cippatura a pianta intera in due settimane lavorative (inizio dicembre 2016), impiegando due operai e una cippatrice montata sul retrotreno di un *forwarder* Timberjack Oy modello Timberjack 1110D. In questo caso è risultata una produttività - intesa come rapporto tra il volume di legname lavorato e il tempo impiegato - di $10,1 \text{ t h}^{-1}$.

Questo dato è in linea con la letteratura nazionale, in quanto Spinelli *et al.* (2003), per il cantiere a Seren del Grappa sopramenzionato, hanno valutato una produttività pari a $7,4 \text{ t h}^{-1}$ impiegando una cippatrice trainata Muss-Max Terminator 6, azionata da un trattore John Deere da 152 kW , ed effettuando una cippatura a pianta intera. Verani *et al.* (2017) evidenziano, in riferimento a

piantagioni artificiali di conifere, una produttività media della sminuzzatura di cimali e ramaglie con macchina a motore autonomo tra 6,3 e 9,5 t h⁻¹ per operaio, mentre la produttività media della cippatrice applicata all'attacco a tre punti di un trattore di media potenza si attesta tra 3,1 e 4,7 t h⁻¹. Verani e Sperandio (2003) hanno calcolato la produttività della cippatrice Erjo (potenza 404 kW) in 13,2 t h⁻¹.

La fase di cippatura nel presente caso studio ha comportato un consumo di carburante pari a 20 l h⁻¹ e un consumo totale di circa 2400 l. Pertanto le emissioni di anidride carbonica in atmosfera dell'intera fase di cippatura sono state pari a 6.360 kg_{CO2}.

Tabella 3 - Produttività ed emissioni nelle tre fasi nel cantiere di Monte Morello.

Fase	N° operatori	N° giornate di lavoro per operatore	N° ore di lavoro per operatore	N° ore di lavoro totali	Produttività (t ore ⁻¹)	Emissioni (kg CO ₂)
Abbattimento e allestimento	da 2 a 4	42	252	756	1,6	1.080
Esbosco	da 2 a 4	28	168	504	2,4	6.144
Cippatura	2	10	60	120	10,1	6.360

3.1.3 Fase 3 - Trasporto del cippato

Allo scopo di stimare gli effetti derivati dalla attivazione di una filiera legno-energia ottimizzata, nel presente studio è stato ipotizzato che la totalità delle produzioni realizzate (1.200 t) siano destinate ad un impianto di cogenerazione situato nel Comune di Calenzano (provincia di Firenze) a circa 12 km di distanza dal cantiere forestale. Nella realtà solo una quota parte della produzione è stata destinata a tale impianto, mentre il resto è stato destinato a impianti energetici fuori regione.

Il trasporto su gomma del cippato dall'imposto all'impianto è avvenuto tramite autotreno della capienza di 280-300 q di cippato fresco percorrendo quindi una distanza pari a 24 km tra andata e ritorno. La produttività del trasporto, calcolata sulla base della capienza media dell'autotreno che ha conferito il materiale all'impianto e del numero di viaggi, è risultata di 20 t h⁻¹ comprensivo dei tempi di carico, scarico e viaggio. Come evidenziato da Spinelli *et al.* (2006) la produttività del trasporto dipende da tre variabili chiave: la distanza percorsa, la forma in cui la biomassa viene trasportata (trouchetti, ramaglia, cippato fresco) e il mezzo di trasporto impiegato. Nel presente studio il tempo maggiore è risultato quello di carico dell'autotreno, mentre i tempi di viaggio effettivo sono risultati piuttosto contenuti.

In termini di emissioni, considerando consumi medi pari a 20,4 l/100 km (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, www.mit.gov.it), il conferimento all'impianto di Calenzano genera emissioni pari a circa 562 kg CO₂.

3.1.4 Fase 4 - Conversione energetica in impianto a cogenerazione

L'impianto di cogenerazione di Calenzano, realizzato nel 2009 su un'area di circa 1.300 m², ha una potenza complessiva di 5,9 MW, alimenta una rete di teleriscaldamento di 6,5 km (potenza termica immessa di 3,5 MW_{th}) e produce 800 kW_{el} attraverso un ciclo a fluido organico (ORC). L'impianto, che immette annualmente in rete energia termica per circa 25 GWh ed energia elettrica per 4,3 GWh, utilizza esclusivamente biomassa locale, proveniente da territori situati entro un raggio di 70 km. Le utenze allacciate sono circa 1.500, sia pubbliche sia private, e comprendono 630 appartamenti, l'area sportiva "la Fogliaia", la piscina comunale, alcuni edifici pubblici e scolastici. La rete di teleriscaldamento è costituita da una coppia di tubi interrati e coibentati percorsi da acqua calda (temperatura di mandata 90-95°C e di ritorno 70°C) con una perdita di temperatura attorno ai 1-2°C km⁻¹.

La biomassa impiegata proviene prevalentemente da tagli boschivi (diradamenti e tagli fitosanitari) per una quantità di poco inferiore alle 15.000 t l'anno con un consumo medio di 50 t/giorno (<https://cloud.estrspa.it>). Tale quantità comprende circa 1.000 t l'anno di residui derivanti da potature di origine agricola. Pertanto, le circa 1.200 t (umidità del 30%) di cippato ricavato dai diradamenti della foresta di Monte Morello potrebbe alimentare la centrale per circa 24 giorni (consumo medio 50 t/giorno), producendo circa 3,4 GWh, da cui, considerando i rendimenti di impianto e di generazione, si otterrebbero circa 0,5 GWh di energia elettrica e 2,8 GWh di energia termica.

Come confronto aggiuntivo, sono state stimate le emissioni di CO₂ che si eviterebbero utilizzando una caldaia a cippato (rendimento 85%) per il riscaldamento invernale, rispetto all'uso del metano e del gasolio (in molti piccoli paesi e case singole il gasolio è ancora ampiamente usato per il riscaldamento domestico). Il risparmio in termini di emissioni di CO₂ è pari a 208 g_{CO2} kW⁻¹ e 278 g_{CO2} kW⁻¹ rispettivamente per la sostituzione di metano e gasolio, che corrispondono, per le 1200 t di cippato, ad un risparmio di CO₂ compreso tra le 800 (per la sostituzione del metano) e le 1100 (in caso di sostituzione del gasolio) tonnellate (Tabella 4).

Tabella 4 - Confronto tra l'uso del cippato e fonti fossili sostitutive per la produzione di un quantitativo di energia pari a quella prodotta con il cippato derivato dai diradamenti a Monte Morello, ed emissioni di CO₂ generate.

	Cippato	Metano	Gasolio
Potere Calorifico Inferiore (PCI)	3,4 MWh/t	10 kWh/m ³	11,6 MWh/t
Rendimento impianto	0,85	0,90	0,85
Energia al focolare	4080 MWh	3853 MWh	4080 MWh
Energia termica utile	3468 MWh	3468 MWh	3468 MWh
Quantità	1200 t	409929 m ³	351 t
TEP ¹	0 t	336 t	344 t
Emissioni CO ₂ ²	0 t _{CO2}	800t _{CO2}	1136 t _{CO2}

¹ 1 t di olio combustibile = 0,98 TEP; 1000 m³ di metano = 0,82 TEP (Ministero dello Sviluppo Economico, 2014).

² Considerando 1,95 kg CO₂ emessi per m³ di metano e 2,8 kg CO₂ emessi per litro di gasolio.

3.2 Indicatori bioeconomia circolare (4R)

3.2.1 Riduzione

In riferimento alla prima delle quattro R della bioeconomia circolare, l'efficienza del processo produttivo è stata stimata come rapporto tra il valore di macchiatico medio annuo derivato dai diradamenti e la ripresa media annua (I_1). In particolare, il valore dei prodotti legnosi è stato calcolato annualizzando il valore della produzione periodica derivato da tagli intercalari, come segue:

$$a = \frac{Pm \cdot r}{(1+r)^n - 1}$$

dove:

a = reddito medio annuo (valore di macchiatico medio annuo) derivato dalla vendita dei prodotti intercalari;

Pm = valore di macchiatico derivato dal taglio intercalare (diradamento) all'anno m ;

r = saggio di interesse reale derivato dalla differenza tra tasso di investimento alternativo (2%), con medesime caratteristiche di durata e rischio, e aspettative di inflazione valutate secondo l'indice N.I.C.³ del 2017 (ISTAT, 2017)

n = numero medio di anni che intercorrono tra due diradamenti (15 anni).

Il prezzo del cippato forestale è stato stimato tramite intervista con le imprese forestali locali ed è risultato pari a 37 € t⁻¹ (45% di umidità), corrispondente ad un prezzo franco impianto di 47 € t⁻¹, mentre il periodo tra due diradamenti successivi è stato ipotizzato pari a 15 anni, sulla base delle prescrizioni selvicolturali ricavate dal progetto LIFE CCM/IT/905 FoResMit. Sulla base di questi dati, il valore annuo derivante dalla vendita del cippato è risultato di 302 € anno⁻¹. Infine, considerando che la ripresa totale è stata di 1.814 m³ corrispondente ad una ripresa media annua di 120,9 m³ anno⁻¹, l'indicatore I_1 risulta essere 2,50 € m⁻³.

Per quanto concerne l'indicatore I_2 che esprime le emissioni di anidride carbonica per unità di prodotto ottenuto, questo è risultato essere pari a 7,2 kg_{CO2} per m³ estratto. Le emissioni considerate sono quelle legate al processo produttivo nelle diverse fasi di abbattimento, concentramento ed esbosco, cippatura e trasporto.

3.2.2 Riutilizzo

Per quanto concerne il riutilizzo, l'indicatore I_3 che esprime il tempo di vita di un prodotto prima di essere destinato al recupero energetico, la valutazione è stata fatta considerando il tempo di vita dei prodotti legnosi derivanti dalle utilizzazioni forestali. Nel presente studio la valutazione è risultata particolarmente semplice in quanto tutto il materiale derivante dai diradamenti è stato destinato alla produzione di cippato nell'arco di sei mesi ($I_3=0,5$). Questo tempo è

³ È stato preso a riferimento l'Indice Nazionale per l'Intera Collettività poiché rappresenta il principale indice nazionale dei prezzi al consumo, calcolato con riferimento ai consumi dell'intera popolazione presente.

stato necessario per lo stoccaggio del materiale cippato al fine di una parziale essiccazione prima dell'impiego nell'impianto di cogenerazione di Calenzano che utilizza materiale con un'umidità inferiore al 40%.

Il tempo di vita di altri prodotti a base di legno sarebbe stata decisamente superiore secondo i dati forniti da Anderle *et al.* (2002): 2 anni per la produzione di carta, 3 anni per la produzione di imballaggi, 10-30 anni per la produzione di mobili e 15-35 anni per i prodotti legnosi in edilizia. Questo fatto mette in evidenza come sia opportuno per questo indicatore cercare di valorizzare il più possibile gli assortimenti legnosi con un lungo tempo di vita prima di destinarli a finalità energetiche.

3.2.3 Riciclaggio

Il riciclaggio è stato valutato tramite l'indicatore I_4 , come rapporto tra il valore economico degli assortimenti legnosi potenzialmente ritraibili e quello degli assortimenti legnosi realmente ottenuti. Gli assortimenti legnosi potenzialmente ritraibili - legname per paleria venduto all'imposto a 40 € m^{-3} e tronchi per imballaggio venduti all'imposto a 35 € m^{-3} - sono stati calcolati a partire dai volumi prelevati facendo ricorso alle tavole assortimentali elaborate da Rinaldini (2016). Considerando la classe diametrica, le caratteristiche della paleria, (lunghezza di 5-5,40 m, diametro sopra corteccia compreso tra 18 e 30 cm) e dei tronchi per imballaggi (lunghezza di 4 m e diametro in punta superiore a 30 cm) richiesta dal mercato locale, sono stati stimati i volumi potenzialmente ritraibili per questi due assortimenti (Tabella 5). Questi dati mettono in luce come complessivamente si sarebbero potuti destinare $60,02 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ per la produzione di paleria per palafitte provenienti dalle parcelle trattate con diradamento selettivo e $53,51 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ provenienti dalle parcelle trattate con diradamento dal basso. In aggiunta, $36,06 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ potevano essere destinati per la produzione di tronchi da imballaggio provenienti dalle parcelle trattate con diradamento selettivo e $6,32 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ dalle parcelle trattate con diradamento dal basso.

In particolare, il cippato è stato venduto all'imposto al prezzo di 11 € mst^{-1} che equivale a 37 € t^{-1} (densità legno 900 kg/m^3 al 45% di umidità) a cui va detratto il costo della cippatura pari a 10 € t^{-1} , ottenendo un ricavo totale di circa 44.067 € , mentre in caso di valorizzazione degli altri assortimenti legnosi (palerie e tronchi) si sarebbe ottenuto un ricavo totale di circa 55.200 € così ripartito: 41% derivante dalla vendita di paleria (11.355 € ricavate dal diradamento selettivo e 11.452 € dal diradamento tradizionale), 13% nei tronchi per imballaggi (5.970 € per i tronchi ricavati dal diradamento selettivo, 1.183 € dal diradamento tradizionale) e il restante 46% nel cippato (25.242 €). In riferimento all'indicatore I_4 i risultati evidenziano quindi che circa il 40% di volumi legnosi prelevati e destinati alla produzione di cippato potevano potenzialmente essere destinati alla produzione di paleria e imballaggio. In termini economici la differenza risulta stimabile in un incremento di valore del 25% ($I_4 = 25,3\%$).

Tabella 5 - Assortimenti legnosi potenzialmente ritraibili dalla foresta di Monte Morello sulla base della distribuzione diametrica.

Diametro classe	Legno per paleria (m ³ ha ⁻¹)	Legno per imballaggi (m ³ ha ⁻¹)
<i>Diradamento selettivo</i>		
20	0,58	-
25	8,89	-
30	28,16	-
35	14,44	12,94
40	7,95	23,11
Totale	60,02	36,06
<i>Diradamento tradizionale</i>		
20	1,65	-
25	15,22	-
30	29,60	-
35	7,05	6,32
40	-	-
Totale	53,51	6,32

Fonte: adattata da Rinaldini (2016).

3.2.4 Recupero

Il primo indicatore che fa riferimento al recupero energetico (I_5) è correlato al concetto di “*carbon neutrality*” del sistema bioenergetico, poiché stima le emissioni evitate derivanti dall’impiego di una risorsa rinnovabile (legno) in sostituzione di combustibili fossili. Nello specifico l’utilizzo del cippato per il riscaldamento consente di evitare mediamente l’emissione di 278 grammi di CO₂ kWh⁻¹ nel caso si vada a sostituire una caldaia a gasolio con una a cippato.

L’altro indicatore legato al recupero energetico (I_6), esprime il rapporto tra la necromassa impiegata a fini energetici e la necromassa complessiva presente in bosco al momento delle utilizzazioni forestali. In tal caso, i rilievi effettuati in bosco hanno evidenziato un coefficiente pari a 0,37. Questo risultato indica che oltre un terzo dello *stock* di legno morto presente in bosco è stato recuperato e convertito in energia termica, a conferma del fatto che pressoché tutto il legno morto delle prime due classi di decomposizione è stato impiegato per fini energetici. A livello ecologico questi prelievi non comprometteranno la funzionalità dell’ecosistema nel breve-medio periodo, visto che i quantitativi di necromassa ancora presenti sono superiori a quelli descritti per le pinete mediterranee (Karahalil *et al.*, 2017; Giuntini *et al.*, 2017). Sarà necessario nel lungo periodo, a seguito del processo di decomposizione del legno morto attualmente presente, mantenere almeno un 5% della necromassa appartenente alla prima classe di decomposizione al fine di migliorare la fertilità del suolo e favorire la conservazione della biodiversità. A tal fine, la scelta delle piante da mantenere non dovrà basarsi unicamente su considerazioni quantitative (volume di legno morto), ma dovrà favorire i tronchi di grosse dimensioni (superiori ai 30 cm di

diametro), perché indispensabili per la sopravvivenza di molte specie faunistiche dipendenti dal legno morto.

4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha identificato e testato in un caso studio una serie di possibili indicatori per valutare la filiera foresta-legno in una prospettiva di bioeconomia circolare (Tabella 6). Gli indicatori proposti cercano di prendere in considerazione le 4R dell'economia circolare (riduzione, riuso, riciclaggio, recupero) calandole e adattandole al settore forestale tramite un'analisi di filiera su scala locale. Tali indicatori, pur essendo parziali, permettono di fare un quadro della situazione della filiera ed evidenziare eventuali margini di miglioramento nel processo produttivo.

Nel caso di studio della foresta di Monte Morello tre indicatori (I_1 , I_3 e I_4) evidenziano delle scelte non ottimali per quanto concerne la destinazione finale del prodotto legnoso ricavato dai diradamenti. Seppure, come evidenziato in letteratura, il materiale ricavato dai diradamenti è generalmente materiale dalle caratteristiche qualitative mediocri che impediscono la produzione di assortimenti legnosi di pregio (Spinelli, *et al.* 2003, 2006), nel caso della foresta di Monte Morello si sarebbe potuto destinare il materiale legnoso non esclusivamente alla produzione di cippato. Se fossero stati valorizzati assortimenti legnosi per paleria e imballaggi, si sarebbe ottenuto un incremento di valore rispetto alla vendita del cippato (+25%, o anche più con l'applicazione esclusiva del diradamento selettivo), come evidenziato dall'indicatore I_4 , e sarebbe aumentato considerevolmente il tempo di vita dei prodotti complessivi (I_3), con un possibile riutilizzo di alcuni di essi (es. paleria per palafitte). Tuttavia, due degli indicatori proposti (I_2 e I_3) hanno evidenziato un bilancio favorevole in termini di emissioni di anidride carbonica: in quanto a fronte di emissioni di $7,2 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \text{ m}^{-3}$ (I_2), derivanti dall'intero processo produttivo (dalla fase di abbattimento al trasporto alla centrale a biomasse), sono stati quantificate in $278 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \text{ MWh}^{-1}$ (I_3) le emissioni evitate grazie all'impiego di biomasse forestali anziché l'impiego di combustibili fossili. Analizzando in modo congiunto questi due indicatori risulta che in tutto il processo produttivo il bilancio di CO_2 per m^3 di legname estratto è di circa $-626 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \text{ m}^{-3}$.

In ultima analisi, anche l'indicatore I_6 ha messo in luce una discreta efficienza nella gestione forestale in quanto circa un terzo dello *stock* di legno morto presente in bosco è stato convertito in bioenergia. Ovviamente questo indicatore è strettamente legato ai volumi di legno morto presenti e alla sua distribuzione nelle classi di decomposizione, partendo dall'assunto che il legno morto delle ultime classi, a causa dell'elevato grado di decomposizione e umidità nonché della difficoltà di raccolta ed esbosco, non può essere convertito in energia. Il risultato positivo è quindi strettamente legato alla situazione di partenza che nel caso della foresta di Monte Morello presenta un'alta concentrazione dei volumi di legno morto nelle prime tre classi di decomposizione. L'instabilità meccanica e conse-

guentemente il potenziale accumulo di necromassa, tuttavia, non è una condizione rara tra i rimboschimenti di conifere mediterranee e montane dell'Appennino.

A livello metodologico, gli indicatori proposti consentono di monitorare e analizzare la filiera foresta-legno in una prospettiva di bioeconomia circolare, raccogliendo dati durante i rilievi in campo e informazioni da parte degli operatori della filiera. L'utilità di questi indicatori può essere vista in un'ottica comparativa, nell'analisi ed il confronto tra due filiere locali, al fine di intraprendere scelte sia produttive che di mercato. Si riscontra comunque anche un'utilità in una prospettiva di analisi di convenienza gestionale, per valutare come ottimizzare l'efficienza del processo produttivo rispetto a due interventi selvicolturali condotti nella stessa foresta. Come detto, gli indicatori proposti nel presente studio sono un primo tentativo di identificare un set di indicatori specifici per il settore forestale che possano fornire informazioni utili ai pianificatori e gestori locali per valorizzare l'utilizzo della risorsa forestale secondo i principi della "Strategia italiana per la Bioeconomia".

Gli sviluppi futuri del lavoro sapranno integrare questo primo set di indicatori con indicatori addizionali che considerino tutti i servizi ecosistemici offerti dal bosco e testarli in differenti contesti di studio, appenninici e alpini.

Tabella 6 -Valutazione della filiera foresta-legno di Monte Morello in una prospettiva di bioeconomia circolare.

Indicatore	Descrizione	Valore
I ₁	Valore prodotti legnosi (€) / Ripresa prelevata l'anno (m ³)	2,5 € m ⁻³
I ₂	Emissioni di anidride carbonica (kgCO ₂) per unità di prodotto ottenuto (m ³)	7,2 kg _{CO2} m ⁻³
I ₃	Tempo di vita prodotti legnosi (anni)	0,5 anni
I ₄	Incremento valore (%) considerando il valore assortimenti legnosi potenzialmente ritraibili (€) rispetto al valore assortimenti legnosi realmente ottenuti	25,3 %
I ₅	Emissioni evitate (kg _{CO2}) per unità energetica prodotta (MWh)	241 kg _{CO2} MWh ⁻¹
I ₆	Necromassa impiegata a fini energetici (m ³) / Necromassa complessiva presente in bosco (m ³)	0,37

RINGRAZIAMENTI

Il presente studio è stato condotto nell'ambito del Progetto LIFE FoResMit (LIFE14/CCM/IT/905- Recovery of degraded coniferous Forests for environmental sustainability Restoration and climate change Mitigation).

SUMMARY

*Forest-wood chain analysis in the perspective of circular (bio)economy:
the case study of Monte Morello forest*

Recently, the role of circular bioeconomy in order to increase the competitiveness of enterprises and economies of European Union (EU) member countries was emphasized. In circular bioeconomy, the forest sector has a key role with special regard to bioenergy production. The main aim of the present study was to analyze the forest-wood chain at local level (Monte Morello, Florence) following the circular bioeconomy approach. The study was divided in two steps: in the first step wood materials flow and carbon dioxide emission from the production process were analyzed; in the second step a set of indicators - specific for the forest sector - to quantify the 4R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover*) of circular economy was identified and tested. The following aspects were considered: improvement of production process efficiency; reuse and life-span of wood products; optimization of potential wood assortments; and energy recover from the wood products. The results showed that the forest-wood chain by thinning in the Monte Morello forest did not optimize the commercial wood assortments because all wood volume was allocated for bioenergy production. This aspect has generated a negative economic impact and reduced the life-span of wood products. Conversely, the results showed a favorable balance regarding the carbon dioxide emission - above all considering the fossil fuel substitution effect - and for the use for energy production of part of the great amount of deadwood of the Monte Morello forest.

BIBLIOGRAFIA

- Anderle A., Ciccarese L., Dal Bon D., Pettenella D., Zanolini E., 2002 - *Assorbimento e fissazione di carbonio nelle foreste e nei prodotti legnosi in Italia*. Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT), Roma, 58 p.
- APAT, 2003 - *Analisi dei fattori di emissione di CO₂ dal settore dei trasporti*. Rapporti 28/2003, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT), Roma, 31 p.
- Arrigoni P.V., Bechi N., Ricceri C., Foggi B., 1997 - *Documenti per la carta della vegetazione del Monte Morello (Prov. di Firenze)*. Parlatorea, 2: 73-100.
- Baldini S., Di Fulvio F., Laudati G., 2010 - *Analisi della filiera di biomassa legnosa proveniente da interventi di diradamento: un caso di studio in una pineta dell'Italia centrale*. *Forest@*, 7: 177-189. <https://doi.org/10.3832/efor0631-007>
- Berndes G., Abt B., Asikainen A., Cowie A., Dale V., Egnell G., Lindner M., Marelli L., Paré D., Pingoud K., Yeh S., 2016 - *Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation. From science to Policy 3*, European Forest Institute (EFI), Joensuu, 27 p.
- Bonaiuti M., 1993 - *Concetti dialettici e concetti aritmomorfici nel pensiero di N. Georgescu-Roegen*. *Il pensiero economico moderno*, 13 (4): 52-72.
- Cantiani P., 2016 - *Il diradamento selettivo. Accrescere stabilità e biodiversità in boschi artificiali di pino nero*. Manuale tecnico SelPiBioLife. Compagnia delle Foreste. 62 p.
- Cantiani P., Marchi M., 2017 - *A spatial dataset of forest mensuration collected in black pine plantations in central Italy*. *Annals of Forest Science*, 74 (3): 50.
- Cantiani P., Marchi M., Plutino M., 2017 - *SelPiBioLife per i popolamenti di pino nero. Una strategia selvicolturale per pinete artificiali con funzioni e destinazioni diverse*. *Sherwood*, 225: 21-24. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0648-8>
- Cenni E., Bussotti F., Galeotti L., 1998 - *The decline of a Pinus nigra Arn. reforestation stand on a limestone substrate: the role of nutritional factors examined by means of foliar diagnosis*. *Annales des sciences forestières*, 55: 567-576. <https://doi.org/10.1051/forest:19980504>
- Ciampi G., 1979 - *Osservazioni sulla dinamica del paesaggio forestale in due aree ai margini del V'aldarno fiorentino: Monte Morello e Artimino*. *Rivista di storia dell'agricoltura*, 19 (1): 105-166.

- Ciancio O. (coordinatore), 2000 - *Piano di Gestione e rinaturalizzazione dei rimboschimenti di Monte Morello, periodo 2001-2010*. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Provincia di Firenze.
- D'Anato D., Droste N., Allen B., Kettunen M., Lahntinen K., Korhonen J., Leskinen P., Marthies B.D., Toppinen A., 2017 - *Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues*. Journal of Cleaner Production, 168: 716-734.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
- De Meo I., Angelli E. A., Graziani A., Kirikidou K., Lagomarsino A., Milios E., Radoglou K., Paletto A., 2017 - *Deadwood volume assessment in Calabrian pine (Pinus brutia Ten.) peri-urban forests: Comparison between two sampling methods*. Journal of Sustainable Forestry, 36 (7): 1-21.
<https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1345685>
- Dees M., Yousef A., Ermert J., 2011 - *Analysis of the quantitative tables of the national renewable energy action plans prepared by the 27 European Union Member States in 2010*. BEE working paper D7.2. Biomass Energy Europe project. Freiburg: FELIS-Department of Remote Sensing and landscape information systems, University of Freiburg.
- Del Noce G., 1849 - *Trattato istorico, scientifico ed economico delle macchie e foreste del Gran-Ducato Toscano*. Giuseppe Ducci, Firenze, 340 p.
- European Commission, 2010 - *Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and Social Committee and the Committee of the regions. [Commission Communication; COM(2010) 2020].
- European Commission, 2012 - *Innovating for sustainable growth: a bioeconomy for Europe*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions [Commission Communication; COM(2012)60].
- Gasparini P., Tabacchi G. (a cura di), 2011 - *L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005. Secondo inventario forestale nazionale italiano*. Metodi e risultati. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Corpo Forestale dello Stato, Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unita di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole, Milano, 653 p.
- Gatteschi P., Meli R., 1996 - *I rimboschimenti di Monte Morello 85 anni dopo (1909-1994)*. L'Italia Forestale e Montana, 4: 231-249.
- Georgescu-Roegen N., 1975 - *Energy and economic myths*. Southern Economic Journal, 41 (3): 347-381.
<https://doi.org/10.2307/1056148>
- Georgescu-Roegen N., 1977 - *Bioeconomics: A new look at the nature of the economic activity*. In: Junker L. (ed.) The Political Economy of Foodland Energy, Ann Arbor: University of Michigan, p. 105-134.
- Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S., 2016 - *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic system*. Journal of Cleaner Production, 114: 11-32.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Giorgi S., Lavagna M., Campioli A., 2017 - *Economia circolare, gestione dei rifiuti e Life Cycle Thinking: Fondamenti, interpretazioni e analisi dello stato dell'arte*. Ingegneria dell'Ambiente, 4 (3): 263-276.
- Giuntini F., De Meo I., Graziani A., Cantiani P., Paletto A., 2017 - *Stima del volume di legno morto in rimboschimenti di pino nero (Pinus nigra J.F. Arnold) in Toscana: confronto tra casi di studio*. Dendronatura, 1: 19-28.
- Hagemann N., Gavel E., Purkus A., Pannicke N., Hauck J., 2016 - *Possible futures towards a wood-based bioeconomy: a scenario analysis for Germany*. Sustainability, 8: 1-24.
<https://doi.org/10.3390/su8010098>
- Hanninen R., Mutanen A., 2014 - *Forest bioenergy outlook*. In: Hetemaki L. (ed.) Future of the European Forest-Based Sector: Structural changes towards bioeconomy. What Science Can Tell Us, 6; European Forest Institute. Joensuu, p. 33-41.
- Helm D., 2016 - *Natural capital: valuing the planet*. Yale University Press, 296 p.

- Hetemäki L., (ed.) 2014 - *Future of the European Forest-Based Sector: Structural changes towards bioeconomy*. What Science Can Tell Us, 6; European Forest Institute, Joensuu, 108 p.
- Hetemäki L., Hanewinkel M., Muys B., Ollikainen M., Palahi M., Trasobares A., 2017 - *Leading the way to a European circular bioeconomy strategy*. From Science to Policy, 5; European Forest Institute (EFI), Joensuu, 52 p.
- Intesa Sanpaolo, 2015 - *La bioeconomia in Europa*. 2° Rapporto. Direzione Studi e Ricerche, Intesa Sanpaolo, Federchimica, Associazione nazionale per lo sviluppo delle biotecnologie, Torino, 49 p.
- ISTAT, 2017 - *Indice generale dei prezzi al consumo per le famiglie di operai e impiegati (FOI), con e senza tabacchi*. Istituto Nazionale di Statistica, Roma.
- Karahalil U., Başkent E.Z., Sivrikaya F., Kılıç B., 2017 - *Analyzing deadwood volume of Calabrian pine (Pinus brutia Ten.) in relation to stand and site parameters: a case study in Köprülü Canyon National Park*. Environmental Monitoring and Assessment, 189: 112.
<https://doi.org/10.1007/s10661-017-5828-3>
- Kirchherr J., Reike D., Hekkert M., 2017 - *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions*. Resources, Conservation & Recycling, 127: 221-232.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Maetzke F.G., 2002 - *I rimboschimenti di Monte Morello: analisi e indirizzi di un progetto aperto per la loro rinaturalizzazione*. L'Italia Forestale e Montana, 57 (2): 125-138.
- Maetzke F.G., 2016 - *Storia, caratteri ed evoluzione dei boschi e dei rimboschimenti di Monte Morello e della Calvana*. In: Gei F. et al. (eds.) "Calvana e Monte Morello. Due rilievi a confronto. Geografia, geologia, climatologia, rimboschimenti, vegetazione e flora vascolare. Analogie e difformità". Firenze, Accademia Italiana di Scienze Forestali.
- Mantau U., Saal U., Prins K., Steierer F., Lindner M., Verkerk H., Eggers J., Leek N., Oldenburg J., Asikainen A., Anttila P., 2010 - *EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests*. Final report. Hamburg, 160 p.
- Marchi M., Paletto A., Cantiani P., Bianchetto E., De Meo I., 2018 - *Comparing Thinning System Effects on Ecosystem Services Provision in Artificial Black Pine (Pinus nigra J.F.Arnold) Forests*. Forests, 9, 188. <https://doi.org/10.3390/f9040188>
- Mubareka S., Jonsson R., Rinaldi F., Fiorese G., San-Miguel-Ayanz J., Sallnäs O., Baranzelli C., Pilli R., Lavallo C., Kitous A., 2014 - *An Integrated Modelling Framework for the Forest-based Bioeconomy*. IEEE Earthzine, 7(2).
- Murray A., Skene K., Haynes K., 2015 - *The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context*. Journal of Business Ethics, 140 (3): 369-380.
<https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Nocentini S., 1995 - *The renaturalization of forest plantations. An experimental trial with Pinus nigra and P. nigra var. laricio on Monte Morello near Florence*. L'Italia Forestale e Montana, 50 (4): 425-435.
- Paletto A., De Meo I., Grilli G., Nikodinoska N., 2017 - *Effects of different thinning systems on the economic value of ecosystem services: A case-study in a black pine peri-urban forest in Central Italy*. Annals of Forest Research, 60 (2): 313-326.
- Rinaldini G., 2016 - *I rimboschimenti di Pinus nigra in Toscana in prospettiva: verso una tavola di cubatura assortimentale*. Tesi di laurea magistrale Scienze e Tecnologie dei Sistemi Forestali. Università degli studi di Firenze.
- Spinelli R., Magagnotti N., Nati C., Aguanno M., 2006 - *Produzione di biomassa dalla gestione delle peccete artificiali alpine*. Dendronatura, 1: 35-46.
- Spinelli R., Nati C., Magagnotti N., 2003 - *Raccolta di legno cippato dalle giovani peccete artificiali del Feltrino*. Associazione Montegrappa, Comune di Seren del Grappa, Comunità Montana Feltrina, CNR (IVALSA), Belluno, 26 p.
- UNEP, 2011 - *Toward a green economy pathways to sustainable development and poverty*. St Martin-Bellevue, UNEP DTIE, 42 p.
- UNEP, 2006 - *Circular Economy: An Alternative for economic development*. UNEP DTIE, Paris.
- Verani S., Sperandio G., 2003 - *Utilizzazione del pioppeto*. Sherwood, 88: 37-44.

- Verani S., Sperandio G., Civitarese V., Spinelli R., 2017 - *La meccanizzazione nella raccolta di impianti di arboricoltura da legno: produttività di lavoro e costi*. *Forest@*, 14: 237-246.
<https://doi.org/10.3832/efor2389-014>
- Wolfslehner B., Linser S., Pülzl H., Bastrup-Birk A., Camia A., Marchetti M., 2016 - *Forest bioeconomy - a new scope for sustainability indicators*. *From Science to Policy*, 4; European Forest Institute (EFI), Joensuu, 31 p.