



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI

**SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA
Scienze e Biotecnologie
dei Sistemi Agrari e Forestali
e delle Produzioni Alimentari**



Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali

Ciclo XXVI

**VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI SEQUESTRO DEL CARBONIO FORESTALE
NELLA SERIE DI VEGETAZIONE *GALIO-SCABRI QUERCETUM ILICIS*.
IL CASO DI STUDIO DEL MONTE ARCI - SARDEGNA CENTRALE**

dr. Matilde Silvia Schirru

*Direttore della Scuola
Referente di Indirizzo
Docente Guida*

prof.ssa Alba Pusino
prof.ssa Donatella Spano
prof. Sandro Dettori

Anno accademico 2012- 2013

Sommario

Abstract

Capitolo 1 – Introduzione

Capitolo 2 – Contesto e Obbiettivi

2.1. Contesto

2.2. Obbiettivi

Capitolo 3 – Materiali e metodi

3.1. Descrizione del caso di studio

3.2. Carta delle Serie di Vegetazione

3.3. Carta Forestale del distretto

3.4. Analisi dei dati dell'inventario

3.5. Stima della Carbonio forestale

Capitolo 4 – Risultati

4.1. Attribuzione del dato medio di carbonio ai poligoni della Carta Forestale

4.2. Stima del contributo di biomassa radicale allo stock di carbonio totale

4.3. Scenari

Capitolo 5 – Discussione e conclusioni

Bibliografia

Abstract

Questo lavoro ha permesso di verificare la fattibilità di procedure speditive volte a stimare gli stocks di carbonio forestale per differenti categorie di soprassuolo a scala locale. Come caso concreto è stato scelto il Monte Arci - Distretto forestale dell'Arci Grighine (Sardegna centro occidentale), nell'ambito del quale si è valutata la serie di vegetazione Galio scabri-Quercetum ilicis, su una superficie di 1650 ettari circa di boschi e vegetazione a macchia mediterranea, a partire da dati di inventario inediti (livello Tier 3 per il pool "aboveground biomass"). Questi ultimi descrivono le caratteristiche dendrometriche dei boschi in esame al 2010, acquisiti con la finalità di raccogliere le conoscenze necessarie per l'assestamento del Piano Forestale di Distretto. La ricerca si è potuta sviluppare grazie alla collaborazione tra Enti gestori (Assessorato alla Difesa dell'Ambiente, Regione Autonoma della Sardegna) ed Enti di Ricerca (Dipartimento di Scienze della Natura e del Territorio, Università degli Studi di Sassari). L'elaborazione dei dati e l'implementazione di questi per sviluppare uno scenario gestionale con target ecologico-produttivo, hanno permesso di stimare gli stocks potenziali per un'ipotesi di evoluzione dell'area di studio al 2040. Le stime quantificano uno stock di 1144,65 t di C (4190 t di CO₂ eq.) per l'anno 2010 relativamente all'area di studio, e ipotizzano un incremento trentennale di 6182,84 t C totali (22690 t di CO₂ eq.) al 2040 con contributi variabili in funzione della categoria forestale. Il metodo si dimostra efficace nel supportare decisioni in materia di pianificazione forestale e quale strumento informativo per comunicare obiettivi di Piano nell'ambito dei sempre più diffusi approcci di pianificazione partecipata. Inoltre, i risultati raggiunti possono stimolare gestori pubblici e privati della risorsa bosco ad aderire a protocolli di certificazione per la gestione forestale, nonché a promuovere lo sviluppo di mercati volontari rispondenti a schemi di emission trading da recepire a scala locale per le transazioni di crediti di carbonio.

The main goal of this research is to verify the feasibility and applicability of procedures aimed at estimating forest carbon stocks for different land use categories at the local scale. As a case study the Monte Arci - Distretto forestale dell'Arci Grighine (central-western Sardinia), was chosen. In this ambit, the vegetation series of the Galio scabri-Quercetum ilicis was evaluated, on a total area of 1,650 hectares of woods and shrubs. The investigation started from unpublished inventory data (level Tier 3 for the pool "aboveground biomass"), describing the dendrometric features of the studied woods in the year 2010, that were gathered with the aim of building the knowledge system for the settlement of the district forestry plan. This research was realized in the ambit of the institutional collaboration between the Assessorato alla Difesa dell'Ambiente of Autonomous Region of Sardinia as the manager institution, and the Dept. of Sciences for Nature and Environmental Resources of the University of Sassari as the research institution. The data developed for 2010 and the elaboration of a management scenario characterized by a sustainable ecological-productive orientation, allowed us to estimate potential carbon stocks of the study area for 2040. Our estimates describe a total of 1,144.65 tons of C (4,190 tons of equivalent CO₂) for 2010, and a thirty-year increase of 6,182.84 tons of C (22,690 tons of equivalent CO₂) for 2040 on the whole area. The method herein tested, proved to be effective to support decision processes for forest planning, and as an informative tool to communicate targets in the ambit of participatory planning processes that are increasingly applied. Furthermore, our results can motivate public and private forest land managers to join protocols for forest management certification, and to promote the development of voluntary markets meeting emission trading schemes to be adopted at the local scale for the transition of carbon credits.

Keywords: Forest carbon accounting; Forest ecosystem services, Mediterranean, Sardinia, Vegetation series.

Ringraziamenti

Si ringraziano la Dott.ssa Maria Ledda, la Dott.ssa Maria Bonaria Cadeddu, il Dott. Ing. Andrea Abis dell'Assessorato della Difesa dell'Ambiente, Regione Autonoma della Sardegna per aver messo a disposizione i dati di inventario da cui prende le mosse questa tesi.

Ringrazio inoltre il Professor Sandro Dettori, Direttore del Dipartimento di Scienze della Natura e del Territorio, e la Dott.ssa Ric. Maria Rosario Filigheddu per la fiducia, comprensione, pazienza e opportunità elargitemi durante tutto il percorso del dottorato.

Un ringraziamento particolare al Dottor Emmanuele Farris per il sopporto datomi nella revisione ultima del lavoro.

PAGE INTENTIONALLY LEFT WHITE

Capitolo 1 – Introduzione

Con gli accordi di Doha, l'Italia e i paesi firmatari del protocollo di Kyoto (pK), hanno esteso al 2020 ulteriori impegni di riduzione e contenimento delle emissioni di gas serra (GHG).

Tra gli strumenti introdotti in prima istanza dal pK, vanno annoverate anche le misure in campo agricolo e forestale denominate *Land Use Land Use Change and Forestry (LULUCF)*, che prevedono attività di Afforestazione (A), Riforestazione (R), Deforestazione (D) - (art. 3.3 pK) - nonché di contabilizzazione degli assorbimenti ed emissioni di Carbonio nei bilanci nazionali (art. 3.4 pK) per le attività cosiddette "addizionali" quali gestione forestale, gestione dei suoli agrari, dei prati e dei pascoli, la rivegetazione, quando successive al 1990 (baseline) e "human induced" (IPCC Good Practice Guidance for LULUCF: IPCC, 2006).

L'attività addizionale eletta dall'Italia durante l'ultimo periodo di impegno 2008-2012 ha riguardato la gestione forestale - *Forest Management (FM)* - che a differenza di altre attività senza "cap" (limite soglia stabilito nell'impegno), prevedeva un tetto massimo per l'emissione di crediti verdi di 2.78 Mt C (10.2 Mt CO₂ eq.) all'anno, 13.9 Mt C (50.97 Mt CO₂ eq.) massimo al 2012.

L'Italia ha quasi raggiunto l'impegno di riduzione delle emissioni del 6.5% rispetto a quelle del 1990, in parte per la contrazione delle terre agrarie e contemporanea espansione delle superfici forestali ovvero dei *sink* forestali che beneficiando del contesto di crisi economica più generale ha visto una sensibile riduzione delle emissioni (INEA, 2014).

Le attività di FM si confermano tra le addizionali anche per il periodo di impegno 2013-2020, che vedrà l'affiancarsi di altre quali la gestione delle zone umide come *sink* di carbonio.

Sono da intendersi come aree interessate da FM tutte le superfici forestali del territorio nazionale, ascrivibili alla categoria LULUCF "*Forest land remaining forest land*", non soggette ad attività quali A/R/D (Tab. 1).

20 years matrix		2010						total 1991
		Forest	Grassland	Cropland	Wetlands	Settlements	Other Land	
1991	Forest	7,558				32.3		7,590
	Grassland	1,475	7,196	84	2.37	134		8,891
	Cropland		1,377	9,075	6.16	383		10,841
	Wetland				510			510
	Settlements					1,644		1,644
	Other Land					3.25	655	658
Total 2010		9,032	8,573	9,159	519	2,196	655	30,134
Land converted to:		1,475	1,377	84	9	552	0	

Tab. 1.1. Matrice dei cambiamenti di uso del suolo in Italia nel ventennio 1991-2010 (mln ha). Da ISPRA, 2014.

Il nuovo periodo di impegno volontario per gli Stati membri europei (2014-2020), sancito dalla decisione 529/2013/UE ha istituito il "FM *reference level*", vero e proprio *gold standard* per il bilancio di emissioni/assorbimenti netti di C durante il periodo di impegno, capace di generare debiti se gli assorbimenti diminuiscono rispetto al livello iniziale, e produrre crediti quando i *sink* di carbonio aumentano. Lo standard equivale a -22,16 Mt CO₂/anno per il periodo 2013-2020 (INEA, 2014) e tiene conto di aumenti previsionali di utilizzazione delle biomasse forestali del +30% circa al 2020 rispetto al 2010 (COM 2013/659), inclusi gli *Harvested Wood Products* (Hwp) – carta e lavorati da aree sottoposte a FM -. Annualmente gli Stati aderenti al pK hanno il preciso compito di redigere e aggiornare l'inventario delle emissioni dei gas serra¹. Gli inventari sono prodotti per l'Italia dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione Ambientale), su incarico del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, e prevedono per ciascuna tipologia di uso del suolo che subisce variazioni - in termini di destinazione d'uso, copertura del suolo, superfici interessate - la contabilizzazione dei relativi flussi di carbonio, secondo precisi protocolli nel rispetto di valori soglia per Paese stabiliti dagli impegni (target -6.5% delle emissioni per l'Italia).

Dagli inventari si può cogliere l'effettiva *compliance* degli Stati nei confronti del pK e solo dopo esser stati sottoposti a *review* periodiche e approvati dall'UNFCC (United Nation Framework Convention on Climate Change), essi divengono lo strumento

¹ In ottemperanza anche alla *Convenzione di Ginevra* riguardante l'inquinamento atmosferico transfrontaliero e le Direttive europee 1996/62/EC, 1999/30/EC sulla limitazione delle emissioni, recepite in Italia attraverso il D.Lgs. 351/1999 e D.M. 261/2002. La predisposizione e l'aggiornamento annuale dell'inventario dei gas-serra secondo i formati è sancita dalle indicazioni del D.Lgs n. 51 marzo 2008 e, più di recente, del D.Lgs. n. 30 marzo 2013, che prevedono l'istituzione di un Sistema Nazionale, *National System*, delle emissioni dei gas-serra.

attraverso cui guidare la compensazione delle emissioni per gli attori individuati nei contesti nazionali come "energivori" (i.e. impianti termoelettrici, industriali, manifatturieri, metallurgici, operatori aerei e altri). Le opportunità di compensazione sono garantite dai meccanismi flessibili dello stesso pK quali il Clean Development Method (CMD), le Joint Initiatives (JI) e gli International Emissions Trading (IET) di cui l'European Emission Trading Scheme EU-ETS, istituito con Direttiva 2003/87/CE e successive modificazioni (Direttiva ETS), è stato il primo sistema internazionale per lo scambio di quote di emissione².

Assegnare un valore monetario al carbonio concorrerebbe ad assicurare e verificare l'efficacia di incentivi finalizzati a combattere/osteggiare il cambiamento climatico, e a comparare i relativi meriti di azioni di mitigazione e adattamento nel tempo. La valutazione dei benefit dei futuri stocks di carbonio si lega alla gestione del rischio, in quanto il loro valore sarà influenzato dal rischio che i benefit stessi possano non presentarsi come anticipati (i.e. minacce per il settore forestale quali incendi, pesti, etc.). La valutazione del carbonio, inoltre, è complessa e può utilizzare differenti approcci in accordo con prospettive governative/non governative o di mercato istituzionale / volontario adottate. Ad esempio, con prospettive di tipo sociale può basarsi sul danno marginale dei costi di emissione, noto come "costo sociale del carbonio" o tassa sull'inquinamento (i.e. Carbon tax) richiesta per centrare gli obiettivi di mitigazione al cambiamento climatico (Valatin, 2010).

La Roadmap europea prevede una riduzione del 50% delle emissioni al 2050 per il settore forestale (Tab. 1.2). Le stime del valore sociale di carbonio sono soggette ad ampie variazioni per tonnellata, riflettendo i diversi metodi, assunzioni, modelli economici e dell'incertezza che riguarda gli impatti del cambiamento climatico. La negoziazione di crediti di carbonio "dal basso" trova sempre più concretezza nella realtà dei "mercati volontari". Nella prospettiva "*think globally, act locally*", in Italia l'esperienza delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia con il progetto "Carbomark" ha messo in luce le opportunità ancora inesprese di sviluppo economico per il settore agro-

² Si intenda univocamente per "quota" o "credito di carbonio" un titolo equivalente a 1 t/CO₂eq. (o relativo GHG) emesso o sequestrato, scambiato e venduto sul mercato, prodotto da fonti rinnovabili in sostituzione dei combustibili fossili, oppure da progetti A/F nei paesi in economia di transizione (JI) o in via di sviluppo (CDM).

forestale per la remunerazione, attraverso la vendita di crediti di carbonio, delle esternalità/produzioni non legnose del bosco. I gestori pubblici e privati di boschi del nostro Paese possono diventare così promotori principali della vendita dei crediti di carbonio prodotto nell'ambito di gestioni forestali certificate, concorrendo quali *buyers* (Carbomark, 2011) per azioni di mitigazione e adattamento negli schemi generali di Emission Trading (IETs, CDM e JI), dal mercato regionale a quello internazionale.

Sector	GHG emissions' reduction	Sector-specific objectives
		Almost fully decarbonised by 2050
Power	93 to 99%	Electricity might partially replace fossil fuels in transport and heating; however, electricity demand continues to increase at historic growth rates, due to continuous improvements in efficiency The share of low-carbon technologies is estimated to increase from 45% today to around 60% in 2020, to between 75 and 80% by 2030, and nearly 100% in 2050
Transport	54 to 67%	Technological innovation can help in the transition to a more efficient and sustainable energy system, through: 1 increase of vehicle efficiency (new engines, material and design) 2 cleaner energy use (new fuels and propulsion systems) 3 better use of networks and safer and more secure operation (ICT)
Residential and services	88 to 91%	This sector provides low-cost and short-term opportunities to reduce emissions (mainly through the improvement of energy performance of buildings) The refurbishment of the existing building stock is the greatest challenge within the sector
Industry	83 to 87%	The deployment of carbon capture and storage technologies at a larger scale might be necessary after 2035
Agriculture	42 to 49%	Improved agricultural and forestry practices can increase the capacity of the sector to preserve and sequester carbon in soils and forests
Other	70 to 78%	-

Tab. 1.2. Obiettivi specifici per settori e riduzioni delle emissioni di gas serra nell'ambito della DG Climate Roadmap (Annex I da: THINK final report, 2011).

La sfida attuale che si delinea per il settore forestale in Italia è, dunque, quella di migliorare le capacità di *sink* dei propri boschi e di perpetuare/conservare tutti i servizi ecosistemici di cui i boschi concorrono alla produzione attraverso attività "*human induced*", assolvendo alla funzione sociale ed economica propria del settore primario che dovrà rispondere, tra l'altro, ad una crescente domanda delle biomasse forestali quali fonte primaria di energia rinnovabile, in alternativa ai combustibili fossili nell'immediato futuro. L'imperativo verso una gestione sostenibile e certificata delle foreste sarà sempre più alla base delle economie rurali, per le quali le opportunità offerte anche dai mercati volontari di carbonio potranno stimolare schemi di Pagamenti per i Servizi Ecosistemici (*Payments for Ecosystem Services*, PES), i.e. attraverso specifiche misure di sostegno nell'ambito delle politiche economiche territoriali.

Il framework delineato va inserito nell'ambito di una governance ambientale, non da ultimo strumenti di pianificazione (ambientale) forestale. Le attività antropiche hanno ormai modificato gli assetti naturali del territorio, compromettendo la funzionalità di alcuni habitat spesso frammentati che assommano gravi rischi di perdita della diversità biologica. L'uso reiterato e spesso non razionale della risorsa bosco in ambienti mediterranei, i disturbi e le pressioni quali incendi, pest diseases e pascolamento eccessivo, di pari passo al mutamento delle forme della proprietà, hanno determinato/modellato gli assetti storici con cui le gestioni forestali odierne sono chiamate a confrontarsi. Criteri di pianificazione ecologica (Corona et al., 2011), rispettosa delle dinamiche naturali della vegetazione, sono ad oggi i principi alla base della selvicoltura sistemica (Ciancio, 2002 e 2011) che concorre al recupero della risorsa bosco, anche nei termini di "evoluzione" delle successioni secondarie verso il bosco potenziale. Favorire le dinamiche naturali delle serie di vegetazione (Bacchetta et al., 2010; PFAR RAS, 2007a) come tecnica di gestione forestale per le aree dove gli usi del bosco devono assolvere al ruolo di conservazione e tutela della stessa, può essere occasione di sviluppo di economie agro-forestali a scala locale, da favorirsi quando si massimizzino le capacità del bosco di sequestrare carbonio.

Lista delle abbreviazioni usate nel testo

- Attività ARD: Afferrestazione, Riferrestazione, Deforestazione
- CMD: Clean Development Method
- EU-ETS: European Emission Trading Scheme
- FM: Forest Management
- GHG: gas serra
- Hwp: Harvested Wood Products
- IET: International Emissions Trading
- ISPRA: Istituto Superiore per la Protezione Ambientale
- JI: Join Initiatives
- LULUCF: Land Use Land Use Change and Forestry
- PES: Payments for Ecosystem Services
- pK: protocollo di Kyoto
- PSR: Piani di Sviluppo Rurale
- UNFCC: United Nation Framework Convention on Climate Change

Capitolo 2 – Contesto e Obbiettivi

2.1. Contesto

L'accesso delle popolazioni alle risorse naturali diventa un fattore sempre più cruciale per gli equilibri socio-ecologici a scala globale. Ancor più quando è la causa, lo strumento o il fine di conflitti che esasperano negativamente le condizioni di giustizia sociale, economica e diritto al benessere in senso lato e qualità della vita. Se il futuro della stabilità delle nazioni potrà dipendere dall'accesso degli individui alla risorsa acqua, la cooperazione tra le nazioni per garantire e diffondere la "pace nel mondo" non può più prescindere dall'accesso delle popolazioni alla terra e alle foreste.

Crisi economiche e instabilità politiche dei governi nazionali, cambiamento climatico e aumento della popolazione mondiale, guerre e riduzione della disponibilità dei combustibili fossili possono essere considerati le parole chiave che meglio riassumono il contesto storico che l'umanità vive in questi giorni. Tra le possibili soluzioni che possano guidare alla resilienza del sistema Mondo nella sua interezza, le strategie di mitigazione e adattamento al cambiamento climatico promosse da framework internazionali (United Nations Framework Convention on Climate Change, Millennium Ecosystem Assessment, Convention for Biological Diversity per citare i più importanti) che attraverso la diffusione della cultura sui rischi ambientali promuovono la gestione sostenibile equa e solidale dei benefits delle risorse naturali, dal soddisfacimento dei bisogni primari al perseguimento di profitti economici passando per economie low carbon e green.

L'approccio ecosistemico, già introdotto con la Convenzione per la Diversità Biologica (CBD), sottolinea come conoscere e monitorare, ripristinare e tutelare strutture, processi e funzioni degli ecosistemi sia prioritario per una valutazione continua della qualità della vita e capacità portante del sistema Terra. Il Millennium Ecosystem Assessment ha definito con il termine Ecosystem Services (ES) "*What human kind benefits from Ecosystems*" (MEA, 2003), sottolineando l'importanza degli ES nella percezione che le popolazioni hanno di benessere umano. Per una definizione di benessere socio-economico Arora & Tiwari (2007) si riferiscono allo status di una sistema (sociale) dove i bisogni primari sono soddisfatti e il sistema ha la capacità di provvedere al miglioramento della propria qualità di vita. Con il fine di comunicare l'importanza degli

ES il MEA li ha classificati in servizi in produzione, regolazione, funzione culturale come sub-categorie di una più generica “di supporto” (Fig. 2.1).

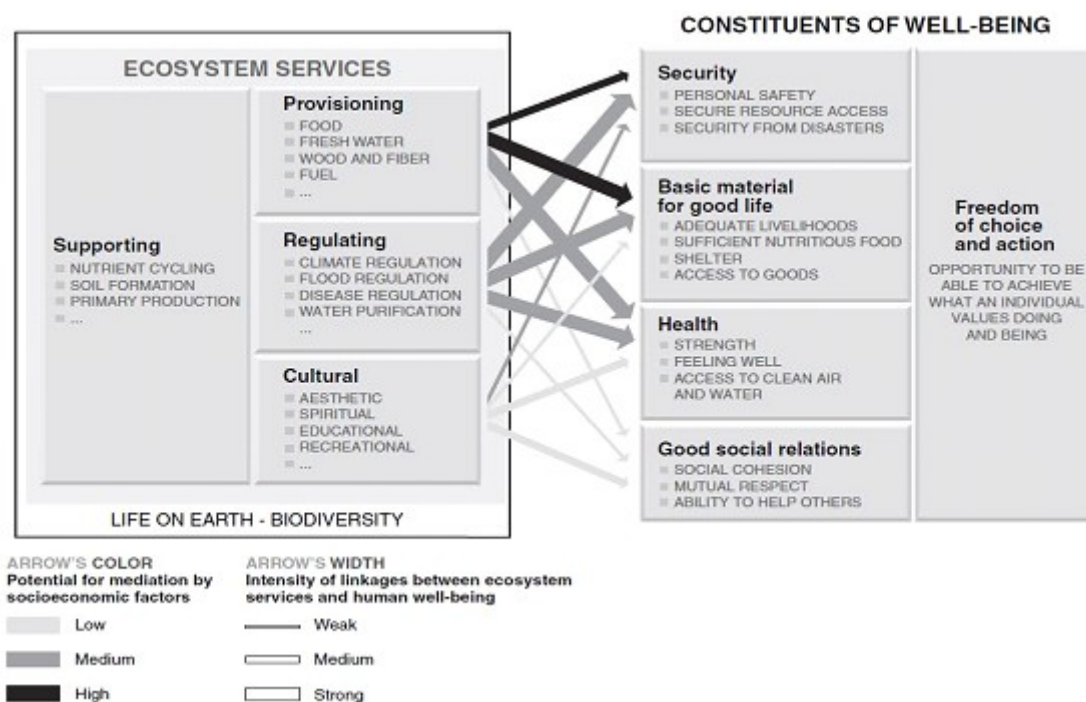


Fig. 2.1. Classificazione degli Ecosystem Services secondo il Millennium Ecosystem Assessment (2005).

La FAO ha definito le risorse forestali come la principale fonte di servizi ecosistemici grazie alla molteplicità di ruoli che rivestono (FAO, 2014) proprio in termini di regolazione climatica (IPCC 2007: Kovats et al., 2014), produzione di beni primari, custodia della biodiversità (CBD, 1992), ispiratrici e simbolo di sacralità e spiritualità per molte culture (Pungetti et al., 2013).

Sarebbe riduttivo valutare l'importanza economica degli ecosistemi forestali in funzione delle produzioni legnose che caratterizzano la principale dimensione economica (di mercato) di cui fanno parte: solo le produzioni legnose coinvolgono a scala globale 13.2 milioni di persone (FAO, 2014) - 3 milioni solo in Europa (EU, 2013). Le produzioni "non legnose" infatti (*non wood forests products*) garantiscono beni primari e alimentano economie rurali locali ponendosi come unica alternativa nella lotta alla fame per milioni di persone. Risorse quali fungatico, bacchiatico, ghiandatico, produzioni apistiche, sughero, resine, piante officinali (EFI, 2014) si sommano a funzioni o servizi di regolazione, di tipo immateriale, quale quella climatica, di regimazione e filtrazione delle

acque superficiali, bilancio del carbonio e altri nutrienti, protezione del suolo, ergo controllo dell'erosione, conservazione della biodiversità, controllo delle fitopatologie, etc (De Groot & van der Meer, 2010). Ma anche i servizi ricreativi, turistici, assimilabili alla tipologia "*cultural services*", così come da CICES (2013) sono numerosi. Si pensi ad esempio all'importanza di boschi "sacri" nel mondo, il cui valore ecologico nonché sopravvivenza spesso è determinato dalla percezione di valori religiosi e identitari.

I metodi per la valutazione degli ES sono di tipo monetario e "*spatially explicit*". Ciò significa che strutture, processi e funzioni degli ecosistemi necessitano anzitutto di essere mappati, cartografati e valutati nelle loro "produzioni" al fine di esser descritti e preservati. Iniziative quali l'Intergovernmental Panel on Biodiversity ed Ecosystem Services (IPBES), sebbene riscuota adesioni a livello mondiale, non si è ancora imposto come framework politico sul tema. Sebbene l'Italia sia tra i pochi Stati Membri assenti ad oggi dal consesso, nel febbraio 2014 ha promosso, su iniziativa del MATTM, il primo incontro nazionale finalizzato al Mapping and Assessment of Ecosystem Services, caldamente sostenuto dall'Unione Europea, in assolvimento degli obiettivi della strategia 2020 (EU, 2011), in collaborazione con il Joint Research Centre (JRC). L'importanza degli ES nell'economia mondiale, oltre che nella qualità della vita, è dettata dal fatto che ogni giorno aumenta la consapevolezza dei rischi della perdita di diversità biologica, compromissioni della funzionalità degli ecosistemi nella previsione che un uso non sostenibile delle risorse possa non garantire beni sufficienti alla futura domanda.

Per gli Stati Membri dell'unione Europea gli obblighi ad assumere, nell'ambito della contabilità nazionale, la valutazione economica delle risorse ambientali (Regolamento 16 aprile 2014, n. 538/2014/UE) richiederà a breve l'implementazione di politiche nazionali e regionali miranti alla tutela e alla centralità degli ES nell'Economia, per la definizione di nuovi paradigmi di qualità della vita e dell'ambiente.

2.2. Obbiettivi

Il lavoro di ricerca qui presentato è finalizzato all'applicazione a livello di distretto forestale di tecniche di stima degli stock di carbonio forestale. La serie di vegetazione ha costituito qui non solo l'unità di riferimento ecologico-ambientale ma anche gestionale, adottata dagli strumenti di pianificazione ambientale e forestale della Regione Sardegna (PFAR RAS, 2007a).

L'obbiettivo generale consiste nella stima del carbonio forestale per un'area di circa 1600 ettari nel Monte Arci - distretto forestale dell'Arci-Grighine - a partire da dati inventariali rilevati nell'ambito della serie di vegetazione *Galio scabri-Quercetum ilicis*, tra il 2009 e il 2010, a cura dell'Assessorato alla Difesa dell'Ambiente della Regione Autonoma della Sardegna, durante le fasi di assestamento della conoscenza del patrimonio boschivo del distretto Arci-Grighine, finalizzata alla redazione del Piano Forestale di distretto (PFAR RAS, 2007b). Il database di inventario è stato messo a disposizione del Dipartimento di Scienze della Natura e del Territorio dell'Università di Sassari per fini di studio.

Gli obbiettivi specifici sono stati: 1) la stima del carbonio forestale, suddiviso nei principali pools – soprassuolo forestale e radici – di 24 aree di saggio in cui sono stati rilevati dati dendrometrici su quasi 1200 piante; 2) la stima dello stock di carbonio forestale attuale (2010) per categorie gestionali dell'area di studio; 3) la valutazione (previsione) del carbonio forestale per uno scenario gestionale al 2040, perseguendo target di tipo ecologico e produttivo - sostenibili - e valutazione dei crediti di carbonio relativi.

Capitolo 3 – Materiali e metodi

La ricerca qui presentata prende le mosse dall'analisi dei dati dell'Inventario Forestale contenuti in database digitale, rilevati per il distretto Arci-Grighine, tra il Maggio 2009 e il Maggio 2010 nell'ambito del Progetto *Ri.Selv.Italia* del MIPAAF-CRA, sottoprogetto 4.2 "*Sistema Informativo Geografico per la gestione forestale*".

I dati analizzati ed elaborati da qui a seguire riguardano aree di saggio ricadenti entro la serie di vegetazione *Galio scabri-Quercetum ilicis* (di seguito SA16 ai sensi della Carta delle Serie di Vegetazione della Sardegna), serie sardo-corsa calcifuga, meso-supramediterranea del leccio (Bacchetta et al. 2010), bacino idrografico del Rio Mogoro³, Monte Arci (Fig. 3.1).

Lo studio del territorio è avvenuto attraverso la realizzazione di un sistema informativo territoriale (Arc GIS 9.3), utilizzando quale cartografia numerica di riferimento la Carta delle serie di vegetazione - 1:350.000 -e la Carta forestale del distretto Arci-Grighine (RAS)⁴ - 1:10.000 - prodotta al fine dell'implementazione del piano di distretto (l'area di studio ricade nel distretto forestale nr. 16 ai sensi del Piano Forestale Ambientale Regionale – PFAR, 2007b).

³I bacini idrografici sono disponibili sul portale nazionale SINANET - <http://www.sinanet.isprambiente.it/it>

⁴<http://www.sardegnaeoportale.it/webgis/catalogodati/metadatiDC?idMetadato=12458&idEnte=1>

condizioni d'uso e note legali su http://www.sardegnaeoportale.it/documenti/40_82_20140109151154.pdf

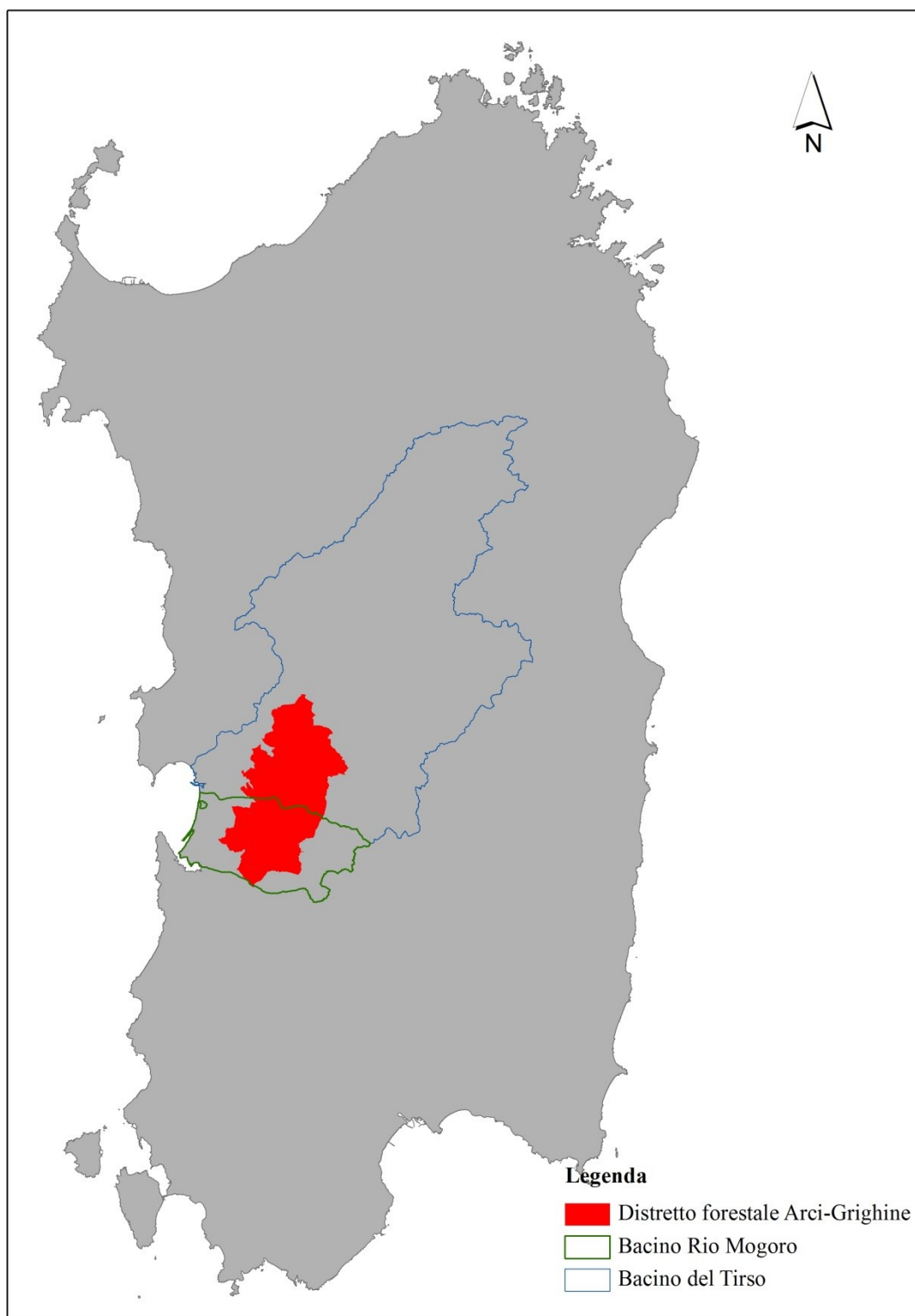


Figura 3.1. Inquadramento territoriale del distretto forestale Arci-Grighine.

3.1. Descrizione del caso di studio

Il territorio oggetto di studio si estende su una superficie di circa 1600 ha presso il Monte Arci, Sardegna centro-occidentale. L'area si trova a cavallo tra due unità fisiografiche distinte: l'unità del Monte Grighine verso Nord, ricadente entro il bacino idrografico del fiume Tirso, e il complesso vulcanico del Monte Arci che si estende in direzione Sud, ricadente all'interno del bacino idrografico del Rio Mogoro (Fig. 3.1). L'area di interesse corrisponde all'area occupata dalla serie di vegetazione *Galio scabri-Quercetum ilicis* (Fig. 3.2) nella parte cacuminale del Monte Arci. Le categorie forestali presenti nell'unità in esame sono riportate dettagliatamente nella Fig. 3.3 e in Tab. 3.1.

Categorie gestionali	Bosco non definito	Fustaia	Ceduo in abbandono colturale	Ceduo a regime	Coesistenza Ceduo Fustaia	Ceduo in avv.o avviati all'alto fusto	Rimboschimenti	n.r.	ha
Ales	0.00	0.00	12.17	0.00	0.05	24.30	34.68	45.33	116.53
%	0.00	0.00	10.44	0.00	0.05	20.85	29.76	38.90	7.07
Marrubiu	0.00	0.00	105.67	0.03	0.00	96.22	0.00	85.30	287.22
%	0.00	0.00	36.79	0.01	0.00	33.50	0.00	29.70	17.43
Morgongiori	0.00	0.00	83.55	210.39	0.00	154.99	86.48	143.76	679.16
%	0.00	0.00	12.30	30.98	0.00	22.82	12.73	21.17	41.21
Palmas Arborea	0.20	21.57	4.54	28.64	0.00	0.00	0.00	31.61	86.56
%	0.23	24.92	5.24	33.08	0.00	0.00	0.00	36.52	5.25
Pau	0.88	2.29	9.40	131.50	7.74	3.92	7.78	103.70	267.21
%	0.33	0.86	3.52	49.21	2.90	1.47	2.91	38.81	16.22
Santa Giusta	0.00	16.96	148.42	18.13	0.00	8.56	0.00	18.77	210.84
%	0.00	8.04	70.40	8.60	0.00	4.06	0.00	8.90	12.79
Totale	1.08	40.82	363.75	388.68	7.80	287.98	129.24	428.58	1647.91
%	0.07	2.48	22.07	23.59	0.47	17.48	7.84	26.01	100.00

Tab. 3.1. Categorie forestali presenti nell'unità di riferimento in esame.

L'Ente Foreste della Sardegna (EF) gestisce sul territorio regionale sardo circa 220'000 ettari. A scala regionale la proprietà forestale pubblica si articola in terre demaniali (circa il 39%) di, proprietà pubbliche comunali (42%) e proprietà privata (il restante 19%). Gli indirizzi selvicolturali discendono da queste ripartizioni, per cui la quota demaniale è gestita secondo un orientamento selvicolturale prioritariamente naturalistico, quella pubblica non demaniale è maggiormente orientata alla multifunzionalità, con l'accostamento delle funzioni produttive del bosco accanto a quelle naturalistiche, mentre

la proprietà privata è in regime cosiddetto di “occupazione”, orientamento gestionale specificamente indirizzato alla stabilizzazione e rinsaldamento dei versanti, secondo il vincolo idrogeologico ai sensi del RDL 3267/23 (PFAR RAS, 2007a). Nel Monte Arci, nell'ambito territoriale di pertinenza dell'Ente Foreste, ricadono due foreste demaniali e tre cantieri rispettivamente nominati: 1) Acquafrida; 2) Sa Dispensa; 3) cantiere di Morgongiori - Masullas - Siris; 4) Usellus-Pau; 5) Villaurbana - Santa Giusta - Palmas Arborea (Fig 3.4).

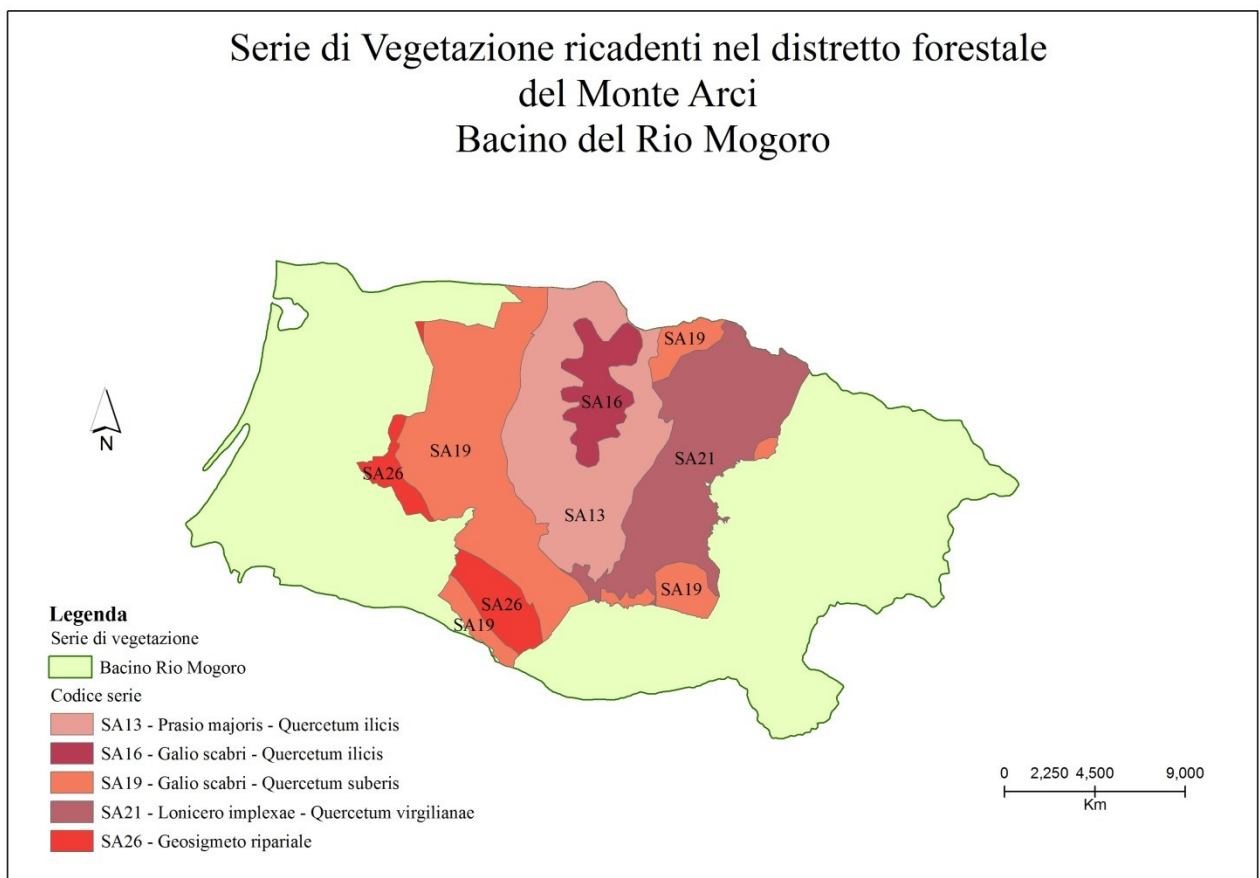


Figura 3.2. Inquadramento vegetazionale dell'area di studio.

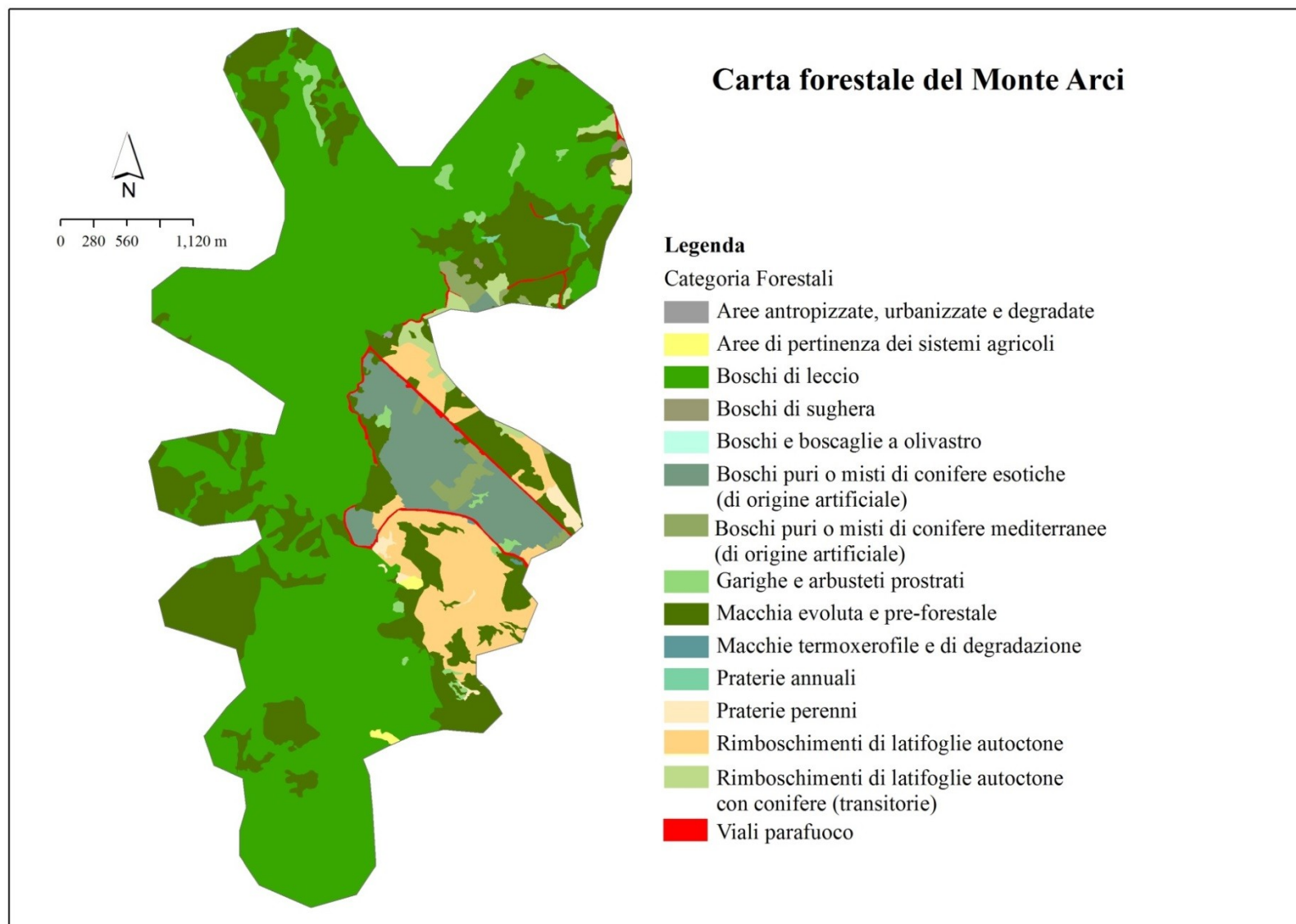


Figura 3.3. Carta e categorie forestali per il distretto Arci-Grighine, dettaglio Monte Arci, unità di paesaggio della serie di vegetazione *Galio scabri-Quercetum ilicis*.

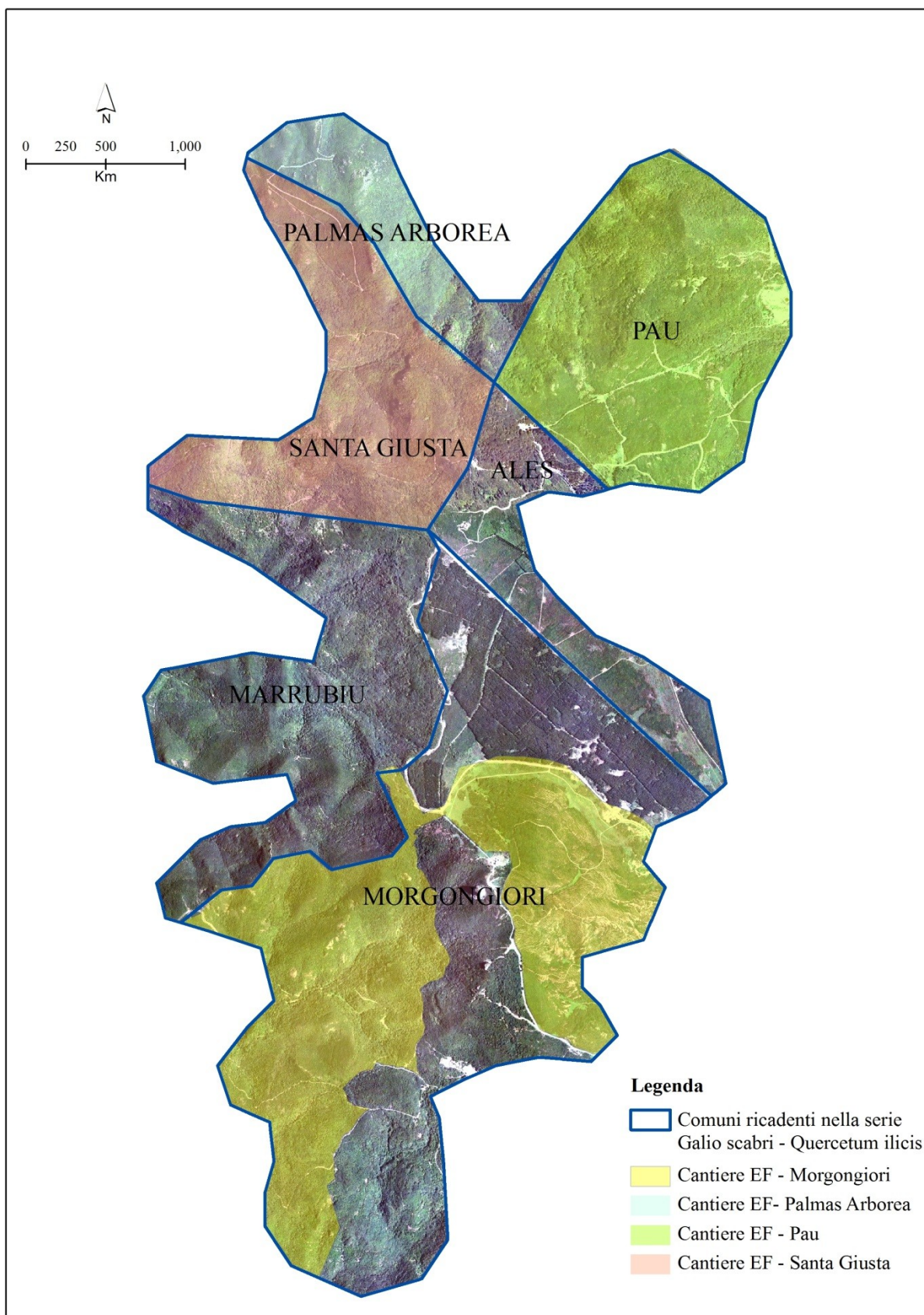


Figura 3.4. Gestioni forestali dell'Ente Foreste per superficie comunale ricadente nell'unità di riferimento della serie di vegetazione *Galio scabri-Quercetum ilicis*.

Per un osservatore attento che percorra la strada statale 131 Carlo Felice, la "superstrada sarda", all'altezza di Sili, lasciando il golfo di Oristano sulla destra in direzione Cagliari, la piana alluvionale del Tirso si eleva, procedendo verso Est, quindi verso l'entroterra, il Monte Arci. La presenza di due Neks vulcanici ("*trebine*" in sardo), alti circa 800 m s.l.m. e ben visibili dalla piana, testimoniano i centri di emissione puntiforme della lava riferiti al Plio-Pleistocene (Carmignani et al., 2001), periodo per il quale sono note quattro diverse bocche laviche. La forma allungata del monte in direzione N-S raggiunge la quota di 812 m sul punto più alto, in corrispondenza del Neck "*Trebina Longa*". L'importanza del sito è connessa al passato storico, e preistorico soprattutto, quale primo distretto minerario sardo (VI millennio a.C.) di sfruttamento dell'ossidiana.

L'inquadramento climatico del territorio oggetto di studio, in assenza di dati meteorologici puntuali, si riferisce a dati delle stazioni del Servizio Idrografico della Regione Autonoma della Sardegna prossime all'area di studio con almeno un trentennio di osservazioni, come riportato da Bianchi et al. (2003, Tab. 3.2).

Stazione	Altitudine (slm)	Latitudine Nord	Long Ovest (M.te Mario)	Periodo di osservazione	
				temperatura	precipitazioni
Ales	167	39° 45'	3° 38'	1970-2001	1925-2011
Villaverde	204	39° 47'	3° 48'	-	1921-2001
Marrubiu	32	36° 46'	3°45'	-	1922-2001
Uras	20	39° 42'	3° 45'	-	1949-2001
Mogorella	299	39° 52'	3° 36'	-	1922-2011
Monte Arci*	730	39°47'	3° 42'	-	-

Tabella 3.2. Localizzazione e periodo di osservazione dei dati meteorologici nelle stazioni esaminate. *Monte Arci: sito sperimentale di Bianchi et al. (2003).

Si sottolinea come la temperatura media annua sia inversamente correlata con l'altitudine ($r=-0.98$, $P<0.01$), con un gradiente medio pari a -0.4°C a febbraio; i coefficienti di correlazione lineare ricadono fra $-0,28$ a luglio e -0.54°C a febbraio; i coefficienti di correlazione lineare si mantengono sempre elevati, con livelli di significatività comunque inferiori al 5%.

Il database climatico utilizzato per comprendere le condizioni climatiche dell'area di studio è costituito dai valori di temperatura massima, minima e media mensili e di precipitazione totale mensile e giornaliera (periodo 1951-2001). I dati termopluviometrici sono stati utilizzati per elaborare il diagramma ombrotermico di Bagnouls e Gausson e per le successive classificazioni climatiche di Thornthwaite (Pinna, 1977),

previo calcolo del bilancio idrico per suoli con 100 mm di acqua disponibile per la vegetazione (*Available Water Content*), nonché per l'inquadramento bioclimatico proposto da Rivas-Martinez et al. (2001, 2011), basato su indici di continentalità I_c , ombrotermico annuale I_o , ombrotermici estivi $I_{o_{s2}}-I_{o_{s3}}-I_{o_{s4}}$, di termicità I_t , di temperatura positiva annua T_p . Si riportano nel seguente quadro riassuntivo (Tab. 3.3.) i principali parametri climatici dell'area di studio, località di riferimento Ales (da Bianchi et al., 2003).

	Ales	Monte Arci
Temperatura media annua (°C)	15,8	13,9
T. m. mese + caldo (°C) *	25,2	23,3
T. m. max mese + caldo (°C) *	33,3	
T. m. mese + freddo (°C) **	7,5	6,7
T. m. min mese + fr. (°C) **	3,5	
Precipitazione annua (mm)	708	996
N° annuo di giorni piovosi	74	
F-FAO	75	110
Classif. climatica di Köppen	C sa	C sa
Classif. di Thornthwaite		
	AWC / 100 mm	C1s2B2' / b4'
		Macchia B1s B2' / b4'
		Rimbosc. B1s2 B2' / b4'
Fascia fitoclimatica di Pavari	<i>Lauretum freddo</i>	<i>Castanetum caldo</i> tipo b (sicc. est.)
Pluviofattore di Lang	45	72
Indice di continentalità di Gams	13	42
Indice di De Martonne	27	42
Indice di De Martonne-Gottman	15	23
Quoziente pluviom. di Emberger	64	116
ETP di Thornthwaite (mm)	836	750
Classificazione bioclimatica di Rivas-Martinez	macrobioclima mediterraneo	macrobioclima mediterraneo
	bioclima Med. Pluv. Oc.	Med. Pluv. Oc.
	termotipo Mesomedit.	Mesomedit.
	ombrotipo Subumido	Subumido
MDS di Mitrakos		
	somma indici mensili	203
	periodo (MDS \geq 5)	giu-set
	estate (% su tot annuo)	94
P/ETP FAO		1,33
Indice di Bagnouls e Gaussen		71,4
Climate Quality Index (CQI)		
	esposizioni N	1,03
	esposizioni S	1,30

Tabella 3.3. Caratteristiche dell'annata meteorologica media (1951 - 2001) per la stazione termo-udometrica di Ales e inquadramento climatico stimato per l'area di Monte Arci (da Bianchi et al., 2003).

* mese + caldo di ciascuna annata del periodo; ** mese + freddo di ciascuna annata del periodo

È stato così possibile stimare le caratteristiche termo-pluviometriche dell'area sommitale del Monte Arci, sia mensili che annuali (Bianchi et al., 2003) riportate in Tab. 3.4: si evidenzia come l'area di studio abbia una temperatura media annua di poco meno di 14°C e una piovosità annua di circa 1000 mm.

gradiente delle stazioni	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
TEMPERATURA (°C)													
2 più vicine	6,7	6,9	8,5	10,2	15,2	19,4	23,3	23,3	19,3	15,0	10,5	7,8	13,9
7 analizzate	6,7	6,9	8,8	10,2	15,2	19,4	23,3	23,2	19,3	15,0	10,5	7,8	13,8
PIOVOSITÀ (mm)													
5 più vicine	126	114	103	93	57	28	11	16	43	114,0	132	159	996
17 analizzate	127	116	98	93	63	25	11	18	50	104,0	133	164	1002

Tabella 3.4. Confronto fra valori medi mensili di temperatura e piovosità della località Monte Arci stimati secondo approcci diversi da Bianchi et al. (2003).

Con i dati della tabella precedente, in questa sede è stato realizzato il diagramma umbro termico di Bagnouls e Gausson da cui si evidenziano graficamente le caratteristiche termo-pluviometriche dell'area di studio (Fig. 3.5).

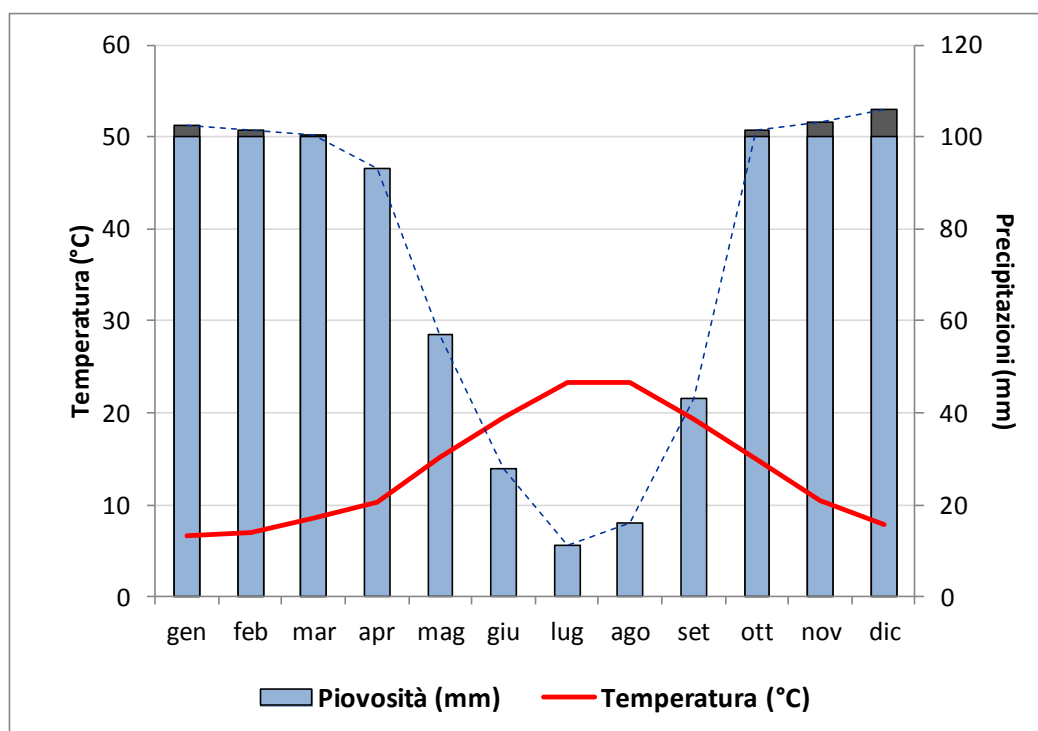


Figura 3.5. Diagramma umbro termico di Bagnouls e Gausson per l'area del Monte Arci (dati stimati da Bianchi et al., 2003).

Nello studio di Bianchi et al. (2003) viene evidenziato come l'impiego di dati termopluviometrici medi per l'inquadramento climatico di una stazione comporti una semplificazione della notevole variabilità osservata in particolare nelle precipitazioni. Gli Autori fanno notare che i valori descritti dall'annata media hanno probabilità alquanto remote di trovare un riscontro con la realtà. In ambiente mediterraneo, e in Sardegna, le condizioni di oscillazioni sono assai pronunciate e nel periodo considerato dall'indagine gli indici climatici hanno mostrato una marcata oscillazione interannuale, evidenziando la ricorrenza di annate particolarmente critiche per la vegetazione. Infine, si rileva come l'analisi delle singole annate, allargata a un congruo periodo di tempo, segnali, a partire dagli anni sessanta, un trend positivo per la temperatura media annua (circa +0.4°C per decennio) e uno negativo, molto più marcato, per la piovosità, con una diminuzione della media periodica riferita a 10 o 20 anni di -80 mm circa per decennio.

3.2. Carta delle Serie di Vegetazione

Le associazioni vegetali costituiscono le unità fondamentali della fitosociologia (Gèhu & Rivas-Martínez, 1981). La presenza di un'associazione vegetale in una data area o sito è significativa per comprendere, sulla base delle sue caratteristiche ecologiche, fenologiche, strutturali e floristiche, le condizioni edafiche, climatiche e biogeografiche dell'ambiente locale (PFAR RAS, 2007a - Allegato III). Nell'area del bacino del Mediterraneo le dinamiche di fruizione delle risorse naturali in tempi più o meno lunghi hanno alterato l'assetto naturale della vegetazione, in primis delle sue forme più evolute quali boschi e foreste, per cui oggi è grazie alla sinfitosociologia o fitosociologia seriale (Rivas-Martínez, 1976), basata sul concetto di sigmeto (o "serie di vegetazione"), che è possibile ricostruire la potenzialità naturale di un determinato sito con condizioni fisiche, climatiche ed ecologiche omogenee (denominato "tessella" in geobotanica, unità di paesaggio in ecologia). L'approccio è di tipo sincronico, e verte, infatti, sull'individuazione e studio delle associazioni vegetali legate tra loro da rapporti dinamici nell'ambito di uno stesso processo ecologico (la successione secondaria), evolutivo o regressivo, che tendono, tuttavia, verso una stessa tipologia di vegetazione matura: la

vegetazione naturale potenziale - VNP (si veda per la definizione del concetto di VNP Farris et al., 2010 e bibliografia ivi citata).

La Carta delle Serie di Vegetazione della Sardegna (Bacchetta et al., 2010) identifica ambiti territoriali (unità di paesaggio), interessati da un unico tipo di vegetazione potenziale prevalente, corrispondenti ad unità ambientali individuate mediante un rigoroso sistema di classificazione gerarchica divisiva del paesaggio (Blasi et al., 2000). L'eterogeneità geomorfologica e bioclimatica del territorio sardo ha portato all'individuazione di 29 serie di vegetazione differenti (o tipologie di comunità vegetali potenziali), quasi tutte di tipo forestale - 27 -, cui è possibile riferire le comunità vegetali vicarianti (da seminaturali ad antropogene).

Nell'ambito della pianificazione forestale l'approccio alle serie di vegetazione può essere assunto a tutti gli effetti come base di strategie gestionali, atte a perseguire le condizioni ecologiche funzionali alla realizzazione delle potenzialità biologiche dei territori, in equilibrio con le esigenze locali, la conservazione della biodiversità vegetale e animale e dei processi ecosistemici ad esse associati.

Il territorio dell'Archi-Grighine, per l'eterogeneità di caratteri ambientali, ecologici, edafici e geomorfologici mostra una variabilità fitosociologica notevole: nell'area dell'Archi sono state individuate 5 serie di vegetazione (Fig. 3.2: SA13, SA16, SA19, SA21, SA26). Rispetto alle serie di vegetazione individuate dalla scheda del PFAR sul territorio in esame, le elaborazioni qui effettuate si muovono entro i limiti ecologici della serie di vegetazione più mesofila, individuata come SA16: *Galio scabri-Quercetum ilicis* (Bacchetta et al., 2010).

Il *Galio scabri-Quercetum ilicis* è una serie prevalentemente acidofila, che si stabilisce in aree collinari e montane di tutta la Sardegna: Gallura, Bosano, Goceano, Baronie, Montiferru, Barbagie, Archi, Sulcis, Iglesias, Sarrabus e Gerrei (Bacchetta et al., 2010). Occupa poco più di 115.000 ettari corrispondenti al 4,85% della superficie regionale, di cui poco più della metà ricadono nel piano fitoclimatico Mesomediterraneo superiore, seguito da quello Mesomediterraneo inferiore (40%). Circa il 5% ricade nel piano Supramediterraneo inferiore. Gli ombrotipi sono quasi sempre subumidi, con prevalenza

del subumido superiore (45%), seguito dal subumido inferiore e dall'umido inferiore (ca. 12%). Il territorio ricade per quasi il 90% in aree euoceaniche (Canu et al., 2014).

L'area di studio, zona sommitale del Monte Arci, ricade interamente nel macrobioclina Mediterraneo, bioclina Mediterraneo Pluvistagionale Oceanico, isobioclina nr. 28 ai sensi della Carta Bioclimatica della Sardegna (Canu et al., 2014): Mesomediterraneo superiore, Subumido superiore, Euoceanico attenuato.

Per una descrizione dettagliata dell'area vasta si rimanda al documento del Piano Forestale Ambientale Regionale (PFAR RAS, 2007b) - Schede di Distretto. Distretto 16 - Arci-Grighine.

3.3. Carta Forestale del distretto

Delimitata l'area di studio con metodi cartografici nell'ambito della SA16, la costruzione delle informazioni territoriali si cala sul livello degli usi reali. Rispetto all'omogeneità di tipo climatico, ecologico ed edafico a piccola scala, il livello informativo di dettaglio è costituito dalla Carta Forestale di distretto (2010), che consente l'apprezzamento dell'eterogeneità degli usi e delle tecniche di gestione adottate dall'Ente Pubblico (Ente Foreste, cantieri comunali) per le superfici in analisi.

La Carta identifica i cosiddetti "tipi forestali", secondo l'approccio di Del Favero et al. (1991) e Del Favero & Lasen (1993). Le categorie presenti nel territorio oggetto di studio sono riportate in Tab. 3.5.

Le categorie forestali che assommano il 95% della superficie totale (righe scure nella Tab. 3.5) sono desunte dal Piano Strategico Foresta Modello Arci-Grighine 2011-2014 (RAS, 2012):

- Boschi di leccio, target per la serie di vegetazione *Galio scabri-Quercetum ilicis*;
- la "macchia mediterranea", che nella declinazione di "evoluta e preforestale" costituisce la successione secondaria in evoluzione verso il bosco, in condizioni "protette" da fenomeni di disturbo (pascolamento, incendi, tagli non selettivi);
- i "boschi puri o misti di conifere esotiche (di origine artificiale)"; la specie più frequente è il *Pinus insignis* (syn. *P. radiata*), presente su una superficie di 103,56 ha. In genere i boschi di conifere sono formazioni mature e monoplane, localmente biplane per la presenza di latifoglie autoctone;

- i "boschi puri e misti di conifere autoctone" sono caratterizzati, invece, dalla presenza di *Pinus pinaster* (pino marittimo) la principale specie presente. Si conta anche qualche esemplare di pino d'Aleppo (*P. halepensis*);
- i "rimboschimenti di latifoglie autoctone" e "rimboschimenti di latifoglie con conifere (transitorie)" riguardano impianti di età non superiore ai 15 anni (al 2010), realizzati con l'impiego di specie quercine (109,72 ha) a prevalenza di leccio e con conifere artificiali transitorie (19,51 ha).

Tra gli attributi della Carta forestale rientra anche la descrizione del governo del bosco (Tab. 3.6): il ceduo è adottato soprattutto per le leccete, non supera l'85% delle unità oggetto di studio, di cui solo il 4% a regime. Se si escludono le superfici in abbandono (che comunque sfiorano il 40%), il bosco è per lo più gestito con tecniche sostenibili (i.e. prelievi contenuti, turni di taglio lunghi, pascolo assente, etc).

Categoria forestale (SA16)	ha	%
Boschi di leccio	964,60	58,5
Macchia evoluta e pre-forestale	380,01	23,1
Rimboschimenti di latifoglie autoctone	109,72	6,7
Boschi puri o misti di conifere esotiche (di origine artificiale)	103,56	6,3
Boschi puri o misti di conifere mediterranee (di origine artificiale)	20,51	1,2
Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere (transitorie)	19,51	1,2
Garighe e arbusteti prostrati	17,47	1,1
Viali parafuoco	13,47	0,8
Praterie perenni	11,75	0,7
Aree di pertinenza dei sistemi agricoli	3,13	0,20
Praterie annuali	1,61	0,1
Boschi di sughera	1,24	0,07
Macchie termoxerofile e di degradazione	0,58	0,04
Aree antropizzate, urbanizzate e degradate	0,55	0,03
Boschi e boscaglie a olivastro	0,20	0,01
Totale complessivo	1647,91	100

Tab. 3.5. Categorie forestali presenti nel territorio oggetto di studio (da Carta Forestale di distretto).

Il governo a fustaia è applicato soprattutto nei boschi di conifere. La prevalenza delle forme di gestione può riferirsi a scelte conservative della risorsa forestale (388.68 ha in avviamento ad alto fusto versus 4% a regime). Non sono chiare le dinamiche legate all'alta percentuale di cedui in abbandono colturale. Su un campione di intervistati nell'ambito del processo partecipato per il progetto Foresta Modello (RAS, 2012), cui il distretto Arci-Grighine prende parte, la percentuale di interesse verso la risorsa legnatico

è molto alta (Fig. 3.6). Inoltre l'esistenza di un Piano di Assestamento forestale per il comune di Marrubiu (programmazione decennale attività 2006-2015) conferma l'interesse alla gestione delle risorse forestali anche per le aree non ricadenti sotto la gestione dell'Ente Foreste.

Boschi di leccio (Tot 964.60)	ha	%
Ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	388.68	40%
Ceduo in abbandono colturale	363.75	38%
Fustaia	163.91	17%
Ceduo a regime	40.82	4%
Coesistenza Ceduo e Fustaia	6.56	1%
Bosco non definito	0.88	0%

Tab. 3.6. Categorie di governo forestale presenti nelle leccete del territorio oggetto di studio (da Carta Forestale di distretto).

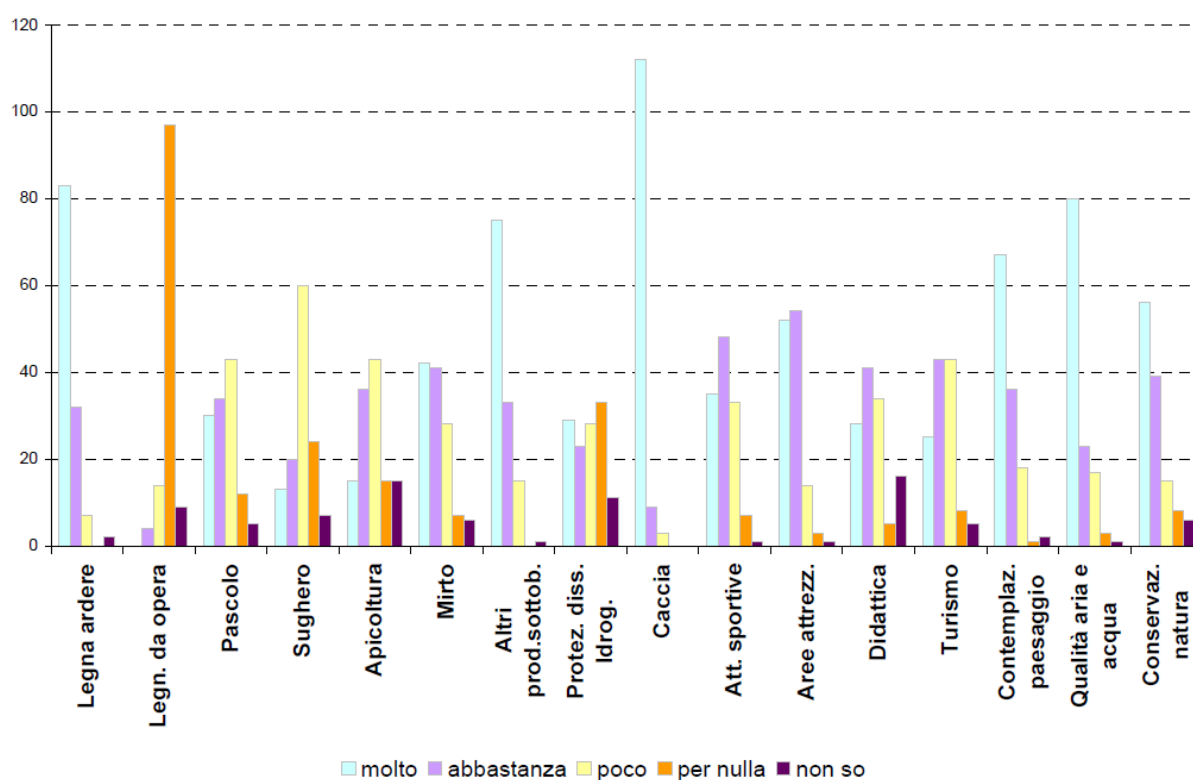


Figura 3.6. Preferenze degli stakeholders coinvolti nel processo partecipativo Foresta Modello per il distretto Arci-Grighine (RAS, 2011).

3.4. Analisi dei dati dell'inventario

Per agevolare il lettore nella comprensione del lavoro di analisi dei dati, nel seguente diagramma a blocchi (Fig. 3.7) sono stati riassunti gli steps seguiti, i metodi e i materiali utilizzati.

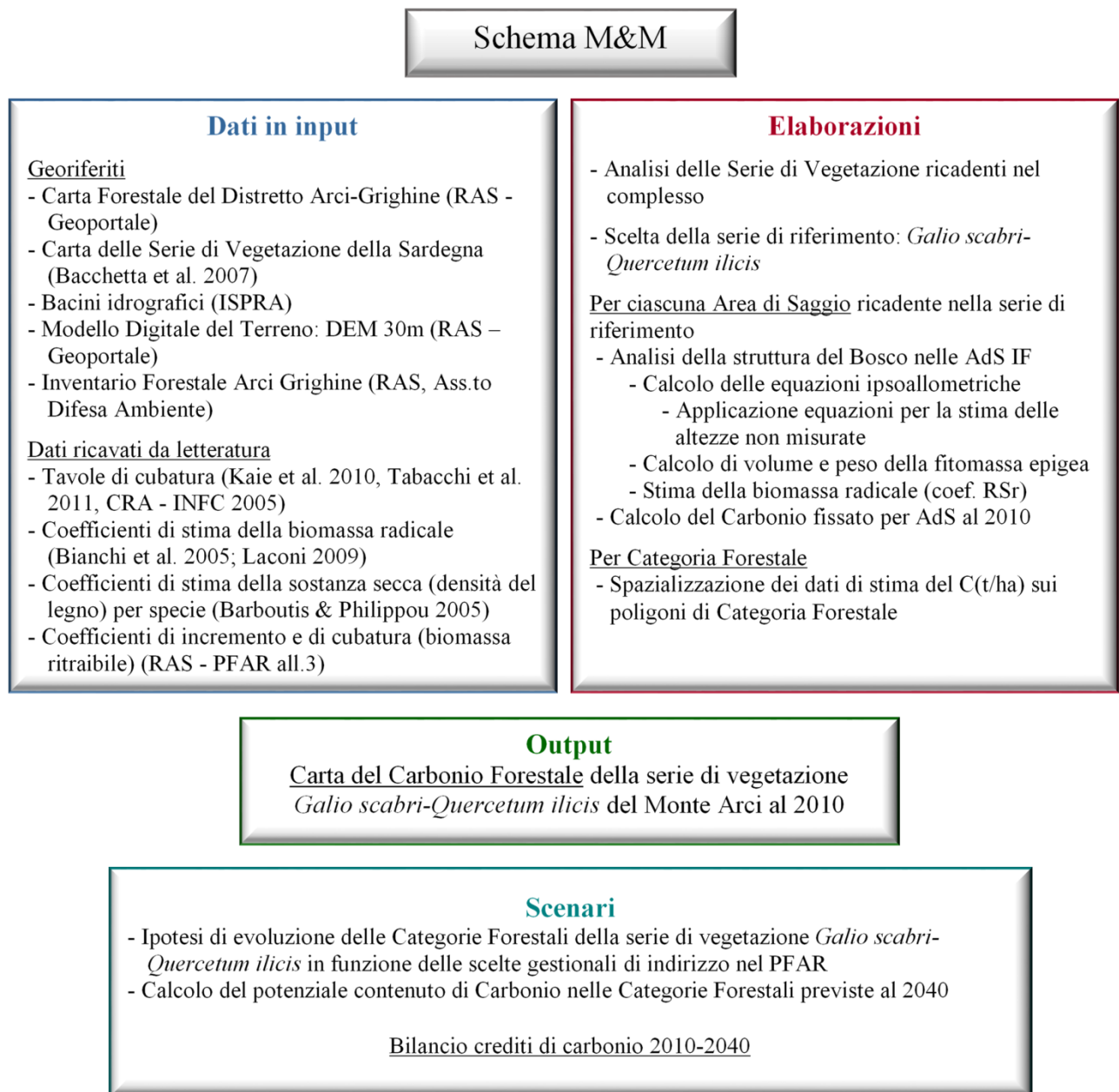


Figura 3.7. Diagramma a blocchi metodologico.

Il database sul quale si è lavorato è articolato in numerose sezioni e differenti "schede" (vedi struttura del DB) i cui dati sono stati gestiti con il software Microsoft Office (2010). I rilievi sono stati effettuati secondo i protocolli previsti nell'ambito del Progetto Bosco che ne detiene i copyright. Tuttavia, è possibile descrivere le aree di saggio di forma circolare tra loro nidificate (*nested*), intorno al punto di campionamento. Le areole di osservazione e di rilievo sono individuate come:

- area di saggio circolare con raggio di 13 m (530,66 m²) – principale;
- areola circolare di riferimento di 40 m di raggio, estesa circa 5000 m² di uniformità descrittiva con l'unità di rilievo INFC (Fattorini et al., 2006).

Di seguito si riportano gli identificativi delle Aree di saggio (Ads) analizzate (Tab. 3.7 e Fig. 3.8, Coordinate UTM – European Datum 50, 32 N).

Ads	Coord E	Coord.N	Località
3	477352	4407181	M.za Canali Stenus
9	476955	4407479	M.za Canali Stenus
11	477059	4403194	P.Giuanni Pilloni
24	478108	4402501	Tupasetti
25	478252	4406478	Genna Spina
26	477454	4403777	Is Murus
28	477924	4404483	Pranu Lioni
33	477349	4402883	Capu Dacquas
40	477153	4403382	P.ta Giovanni Pilloni
43	478572	4406310	Aquafrida
45	477845	4404735	Pranu lioni
55	477650	4406084	M.za Spaduedda
60	476545	4405395	Dispensa Ceddu
62	478049	4402282	Scala Entruxoni
337	478649	4404188	Tuppa Su Boi
340	479353	4404182	Su Lottu de Tommasu
342	478351	4404581	Tuppa su Boi
344	478252	4404777	Tuppa su Boi
346	478550	4404477	Tuppa su Boi
352	478442	4405066	Su Lottu de Tommasu
353	478946	4404081	Tuppa su boi
356	478350	4404786	Tuppa su Boi
383	478752	4403487	Arruaxiu
444	478651	4404480	Tuppa su boi
447	479050	4404482	Su cottu de Tommasu
337	478649	4404188	Tuppa Su Boi

Tab. 3.7. Denominazione e localizzazione (coordinate UTM) delle aree di saggio.

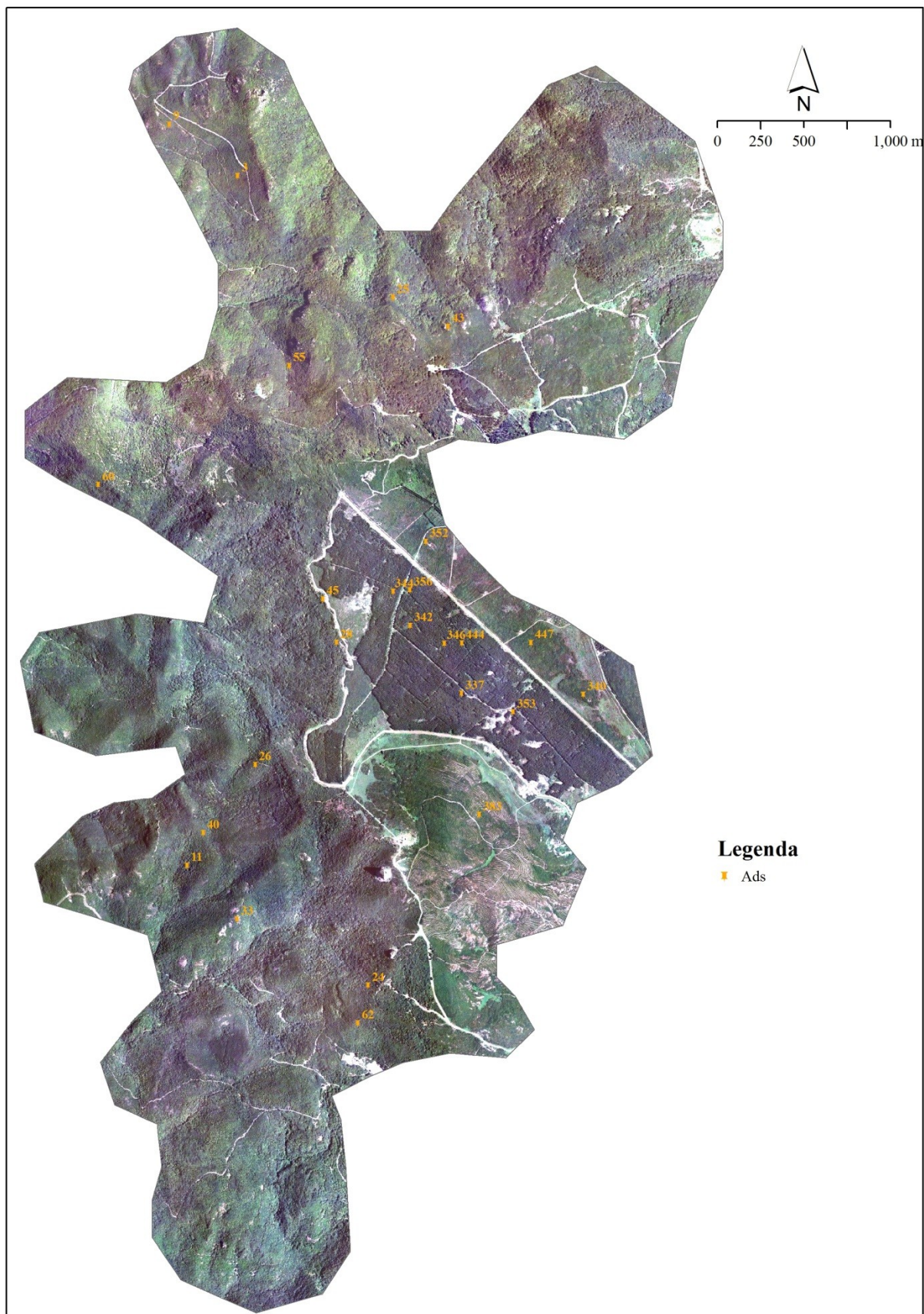


Fig. 3.8. Numerazione e localizzazione delle aree di saggio.

All'interno di ogni area di saggio, per ogni individuo arboreo misurato, vengono riportati nel database i seguenti attributi dendrometrici utilizzati ai fini di questo lavoro:

- Diametro a 1,30 m (DBH, espresso in cm);
- Altezza (m);
- Altezza media del soprassuolo;
- Origine (gamica, agamica);
- Trattamento (ceduo, fustaia, pollone).

Dai dati riportati per ciascuna Ads sono state valutate le principali grandezze dendrometriche quali numero di fusti arborei a ha (N_{ha}), area basimetrica ($G \text{ m}^2/\text{ha}$) per Ads e ad ha^5 riepilogate in Tab. 3.8 e 3.9. Poiché il contributo del novellame, descritto nei rilievi qualitativamente, non è direttamente valutabile ai fini del calcolo della biomassa, si considererà la categoria bosco a partire dalle aree di saggio solo ed esclusivamente rispetto agli individui arborei rilevati. Per semplicità di rappresentazione, le Ads saranno analizzate in blocchi separati per la categoria forestale dei Boschi di leccio e quella dei Rimboschimenti e Boschi puri o misti di conifere.

Ads	N	N (ha)	G (m ² / ha)	G/N (ha)	Altezza (m)
9	8	151	1,05	0,007	3,21
25	11	207	3,04	0,015	6,34
24	16	302	2,03	0,007	4,40
11	29	546	1,92	0,004	4,46
40	30	565	13,24	0,023	12,03
28	42	791	10,72	0,014	5,14
33	42	791	12,68	0,016	8,03
45	44	829	18,12	0,022	8,26
3	49	923	0,673	-	-8,03
26	54	1018	7,54	0,007	5,41
43	75	1413	14,22	0,010	7,84
60	86	1621	24,46	0,015	8,33
55	97	1828	23,89	0,013	8,82
62	122	2299	41,13	0,018	9,16

Tab. 3.8. Principali grandezze dendrometriche per aree di saggio caratterizzate da latifoglie e macchia mediterranea.

⁵ - il numero di fusti arborei a ettaro: $N_{ha} = N \cdot (10000/a)$, dove N è il numero di fusti arborei cavallettati nel soprassuolo (o nell'area di saggio) di superficie a (in m^2); l'area basimetrica del soprassuolo (o dell'area di saggio), in m^2 : $G = \sum_{i=1}^N g_i$ dove $g_i = (\pi/4) \cdot d_i^2$ è l'area basimetrica dell' i -esimo fusto arboreo cavallettato (in m^2), di diametro a petto d'uomo pari a d (in m).

Ads	N	N (ha)	G (m ² / ha)	G/N (ha)	h (media)
356	33	622	36,33	0,058	14,63
447	38	716	13,88	0,019	7,21
346	39	735	49,49	0,067	20,22
353	41	773	38,15	0,049	16,45
444	43	810	44,18	0,055	
342	48	905	41,68	0,046	16,69
344	49	923	41,95	0,045	18,01
337	51	961	48,91	0,051	10,54
340	52	980	47,40	0,048	20,37
352	70	1319	43,95	0,033	8,63

Tab. 3.9. Principali grandezze dendrometriche per le aree di saggio con conifere.

Come **primo step** di questa indagine (si veda diagramma di flusso in Fig. 3.7), è stata testata la correlazione lineare tra area basimetrica e numero di piante arboree (Figg. 3.9-3.10): si conferma la relazione lineare tra numero di piante/ha e area basimetrica per le formazioni a latifoglie sempreverdi mediterranee (leccete, Fig. 3.9), mentre la relazione osservata tra numero di piante/ha e area basimetrica non è valutabile per i boschi di conifere (Fig. 3.10); trattasi, infatti, di impianti artificiali dove la distanza di piantagione è pianificata dal selvicoltore. Inoltre le dinamiche di accrescimento degli individui arborei, e la conseguente struttura del popolamento, sono di tipo "coetaneo". In questi impianti sono probabilmente mancati i diradamenti tramite tagli intercalari.

Il valore di area basimetrica ad ettaro esprime la densità del popolamento e consente di valutare la competizione tra le piante all'interno del popolamento.

Nella gestione dei dati d'inventario, si è inoltre verificato che solo per alcuni degli individui prossimi al centro delle Ads sono stati rilevati (o riportati nel DB) diametro e altezza (mai oltre i 10 individui per Ads). Quindi il **secondo step** del lavoro sui dati d'inventario è consistito nella stima delle altezze mancanti nelle Ads, valutando la correlazione tra diametri e altezze rilevate e realizzando la curva ipsodiametrica (o allometrica: Fig. 3.11) di tipo logaritmico che meglio spiega l'interdipendenza tra altezza e diametro. In base alle equazioni così ottenute si sono calcolate le altezze mancanti per tutti gli individui delle aree di saggio ricadenti nella tipologia boschi di latifoglie sempreverdi (Tab. 3.10).

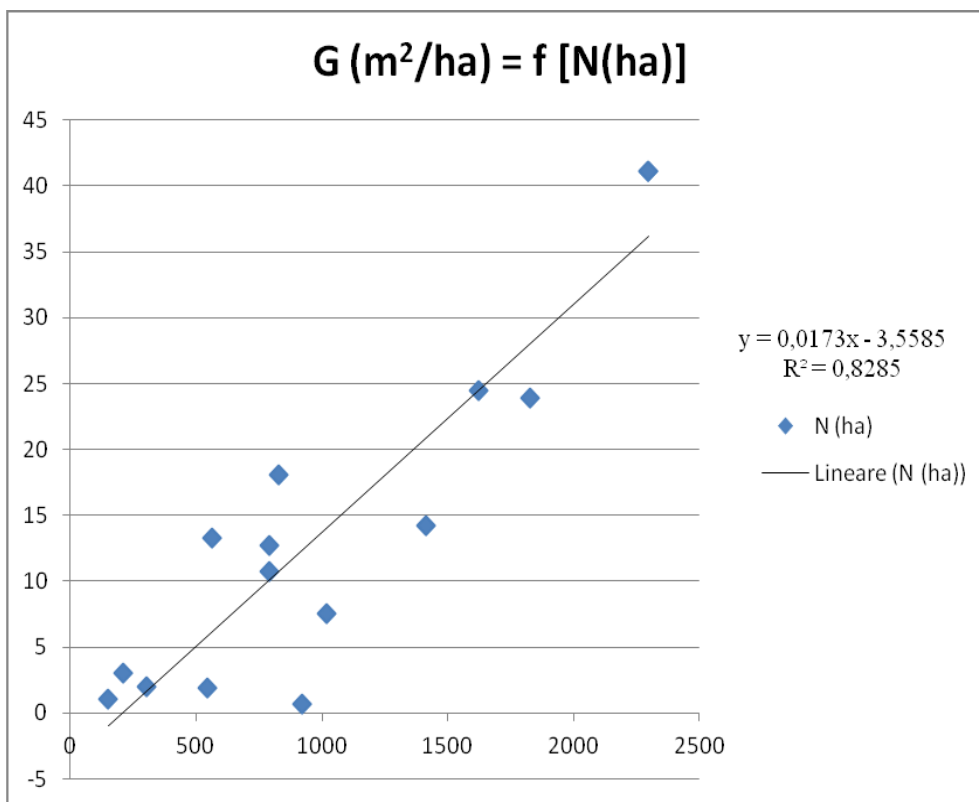


Fig. 3.9. Correlazione tra area basimetrica (m²/ha in Y) e numero di piante/ha (N in X) per aree di saggio caratterizzate da latifoglie e macchia mediterranea.

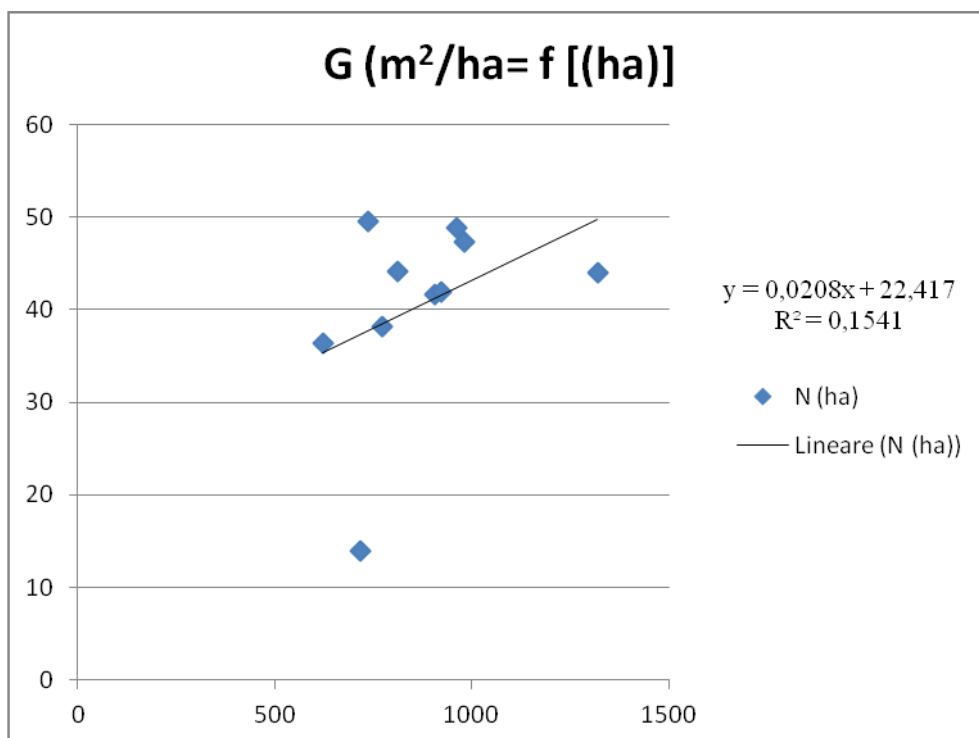


Fig. 3.10. Correlazione tra area basimetrica (m²/ha in Y) e numero di piante/ha (N in X) per le aree di saggio con conifere.

Ads	Equazioni ipsodiametriche	R ²	P (ln DBH)
45	5,6356ln(x) - 5,0776	0,86	0,003
3	5,9149ln(x) - 6,74	0,81	0,002
26	3,1868ln(x) + 0,3078	0,81	0,006
25	1,2689ln(x) + 2,6209	0,75	0,002
28	2,9583ln(x) + 0,8929	0,73	0,007
33	2,7668ln(x) - 0,704	0,72	0,153
40	1,5795ln(x) + 2,8874	0,62	0,061
9	2,9119ln(x)-0,8252	0,57	0,031
60	2,2255ln(x) + 2,6563	0,32	0,189
24	0,9866ln(x) + 2,2981	0,28	0,372
43	3,2492ln(x) + 0,7839	0,16	0,065
11	1,5807ln(x) + 8,0878	0,11	0,671
40	1,2735ln(x) + 3,7018	0,06	0,061
55	-8,963ln(x) + 27,638	0,32	0,745
62	2,286ln(x) - 1,3819	0,85	0,078

Tab. 3.10. Equazioni allometriche per le Ads a bosco di leccio (in grassetto sono evidenziati valori significativi di P).

Per le Ericacee (*Arbutus unedo* ed *Erica arborea*), si è ricavata una sola equazione ipsoallometrica a partire dai dati completi (diametro e altezza) rilevati per il totale degli individui di corbezzolo per tutte le aree di saggio. Non sono presenti rilievi completi per l'*Erica arborea*.

Di seguito l'equazione ricavata per *Arbutus unedo*:

$$y = 4,0779 \ln(d) - 3,591; R^2 = 0.462; N = 53$$

Per le Ads caratterizzate da conifere, invece, si riportano le equazioni allometriche in Tab. 3.11. Per ridurre l'errore delle equazioni ispodiametriche per le conifere sono stati valutati diametri e altezze medie per singola Ads e si è poi realizzata la curva ispodiametrica con questi valori. La performance finale è complessivamente migliorata come da Fig. 3.12.

Le equazioni ispodiametriche che saranno utilizzate per il calcolo delle altezze per gli individui di *P. insignis* e *P. pinaster* con diametro noti sono riportate in Tab. 3.12.

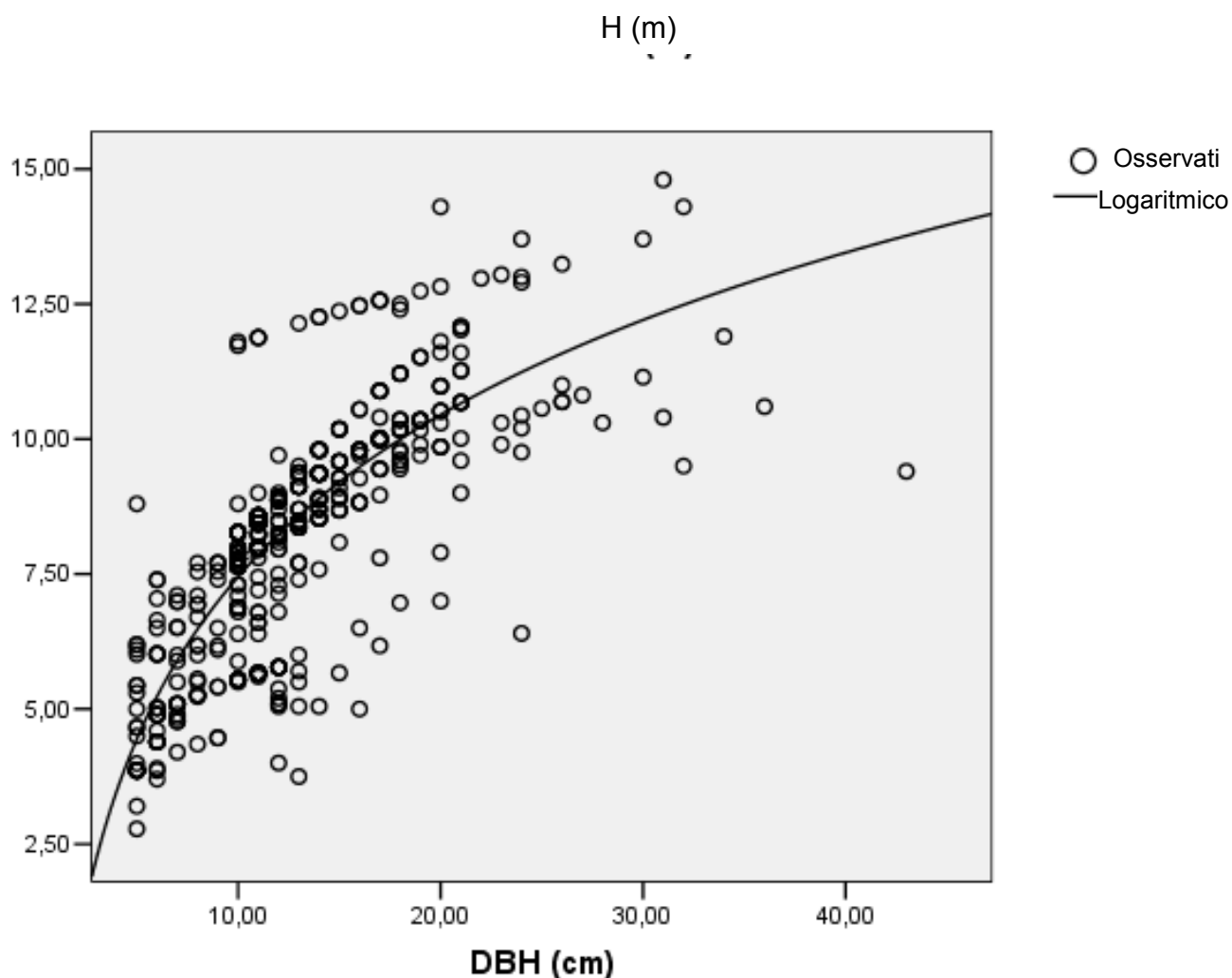


Figura 3.11. Espressione logaritmica per le altezze ricalcolate, con le equazioni ipsodiametriche, per gli individui di *Q. ilex* e *Q. suber* per ciascuna area di saggio, a partire dalle altezze note per alcuni degli individui rappresentativi di ciascun plot. $R^2 = 0.3512$; $N=621$; retta di regressione logaritmica $y=3.2596\ln(d)+0.2056$. Elaborazione SPSS software.

Ads	equazione allometrica	R^2	P (ln DBH)
447 (solo <i>P. pinaster</i>)	$12,967\ln(x) - 28,165$	0,796	-
346	$8,5886\ln(x) - 7,827$	0,6755	0.045
344	$6,0287\ln(x) - 0,6694$	0,6435	0.030
342	$13,211\ln(x) - 23,928$	0,7377	0.068
352	$6,436\ln(x) - 10,223$	0,315	0.012
337	$0,373\ln(x)+7,646$	0,41	0.023
353	$10,805\ln(x) - 17,492$	0,5349	0.025
356	$4,775\ln(x)-1,654$	0,534	0.040
447 (<i>P. radiata</i>)	$11,833\ln(x) - 24,568$	0,7317	0.219
340	$3,7055\ln(x) + 9,0342$	0,8138	0.528
444	$-1,248\ln(x) + 20,845$	0,0045	0.874

Tab. 3.11. Equazioni allometriche per le Ads a conifere (in grassetto sono evidenziati valori significativi di P).

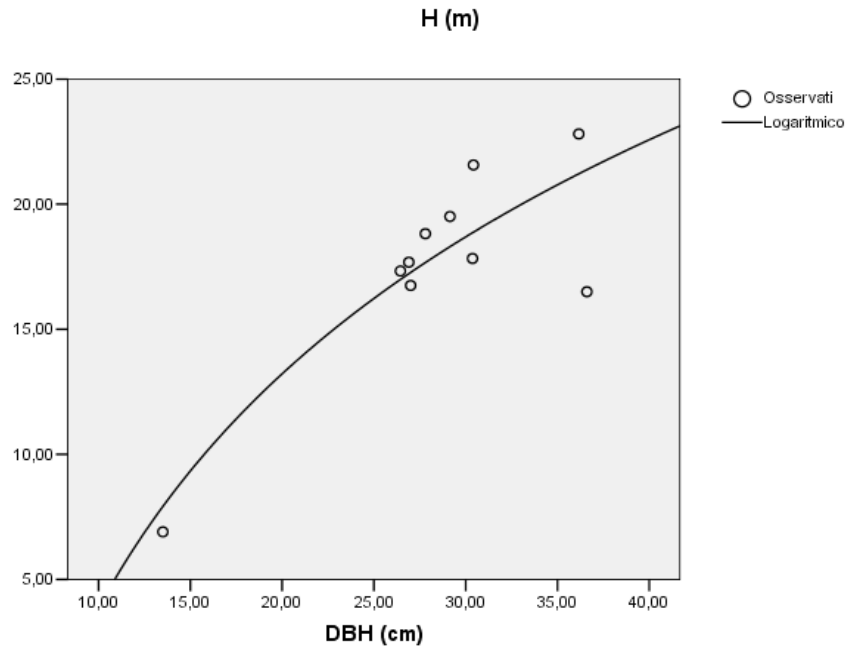


Figura 3.12. Espressione logaritmica per le altezze ricalcolate, con le equazioni ipsodiametriche, per gli individui di *Pinus* spp. per ciascuna area di saggio, a partire dalle altezze note per alcuni degli individui rappresentativi di ciascun plot. $R^2 = 0.76$; $N=10$; retta di regressione logaritmica $y = 13.502 \ln(d) - 27.228$. Elaborazione SPSS software.

Equazione ipsodiametrica	H (m)	R^2	P
<i>P. pinaster</i>	$4,5611 \ln(d) - 4,8287$	1,00	-
<i>P. insignis</i>	$13.502 \ln(d) - 27,228$	0,76	0.001

Tab. 3.12. Equazioni ipsodiametriche utilizzate per il calcolo delle altezze per gli individui di *P. insignis* e *P. pinaster* con diametro noti.

3.5. Stima della Carbonio forestale

La variazione degli stocks di carbonio nei pools forestali è imputabile ai processi di fotosintesi e di respirazione a livello di ecosistema, riferita ad un dato intervallo di tempo. Tra le moderne tecniche di monitoraggio degli scambi gassosi nell'interfaccia suolo-pianta-atmosfera, o stima della produttività lorda degli ecosistemi, si annoverano le tecniche di *eddy covariance*, in grado di determinare i flussi orari di CO₂ (ma anche vapore acqueo e altri gas) in funzione di condizioni micrometeorologiche (temperatura, umidità, velocità del vento, etc.) sito-specifiche rilevate mediante strumentazioni, sistemi di acquisizione dati e tecniche di elaborazione complessi, ma anche tramite tecniche basate sul *remote-sensing* che vedono l'impiego di indici spettrali, elaborati a partire da immagini satellitari (*i.e.* NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*), calibrati su rilievi a terra (Chirici et al., 2011).

La scelta del metodo più opportuno è funzione dell'obiettivo, dell'approccio e della scala cui si opera. L'esigenza di produrre periodicamente inventari sulle emissioni del carbonio e altre finalità, quali la certificazione del sequestro di carbonio a partire da sistemi di gestione forestale, rende utile integrare là dove possibile le tecniche utilizzate e confrontarne i risultati per aumentare la precisione della stima.

L'istituzione a livello nazionale del Registro di Carbonio, permette oggi la contabilizzazione a grande scala dei flussi dello stesso, funzionali al cambiamento/continuità degli usi del suolo, alla biomassa stimata nelle foreste, alle emissioni delle attività antropiche e degli incendi riportati e descritti attraverso strumenti inventariali tra loro coordinati quali lo IUTI - Inventario d'Uso delle Terre d'Italia- che fornisce le unità e i cambiamenti di uso del suolo su cui si basa l'ISCI - Inventario degli Stock di Carbonio - che a sua volta è aggiornato dall'INFC - Inventario Forestale delle Foreste e del Serbatoi di Carbonio -; infine va ricordato, e tenuto da conto, il CIFI (Censimento degli Incendi Forestali d'Italia) (Barbati et al., 2014; Lumicisi et al., 2007; Pulighe et al., 2013).

In questa ricerca la stima del carbonio forestale segue l'approccio delle IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006) che al cap. 4 del vol. IV, dedicato

alle foreste, individua "gain-loss" e "stock-difference" methods, ovvero metodi finalizzati rispettivamente alla stima delle variazioni annuali nella biomassa (valido qui per l'anno 2010) e negli stocks di carbonio al tempo t_2 e t_1 (qui rispettivamente 2040 e 2010).

Nel **terzo step** di lavoro quindi, a partire dai dati di inventario per le aree di saggio ricadenti entro la serie di vegetazione *Galio scabri-Quercetum ilicis*, si è valutata la biomassa del soprassuolo forestale, limitatamente a fusto e branche principali, utilizzando le equazioni di Tabacchi et al. (2011) riportate in Tab. 3.13.

Tabacchi et. al 2011		Volume del fusto e dei rami grossi	Fitomassa (peso secco) del fusto e rami grossi
<i>Specie</i>	<i>campione</i>	$d_w = b_1 + b_2 d^2 h + b_3 d$	$d_w = b_1 + b_2 d^2 h + b_3 d$
<i>Quercus ilex</i>	n = 83; p = 3	$b_1 = -2.2219$ $b_2 = 3.9685 \cdot 10^{-2}$ $b_3 = 6.2762 \cdot 10^{-1}$	$b_1 = -2.6095$ $b_2 = 3.1220 \cdot 10^{-2}$ $b_3 = 3.9794 \cdot 10^{-1}$
<i>Pinus pinaster</i>	n = 26; p = 2	$d_w = b_1 + b_2 d^2 h$ $b_1 = 2.9963$ $b_2 = 3.8302 \cdot 10^{-2}$	$d_w = b_1 + b_2 d^2 h$ $b_1 = 6.3157 \cdot 10^{-1}$ $b_2 = 1.5840 \cdot 10^{-2}$
<i>Pinus spp. esotiche</i>	n = 24; p = 2	$d_w = b_1 + b_2 d^2 h$ $b_1 = 2.6279$ $b_2 = 3.3389 \cdot 10^{-2}$	$d_w = b_1 + b_2 d^2 h$ $b_1 = 7.4835 \cdot 10^{-1}$ $b_2 = 1.2202 \cdot 10^{-2}$

Tabella 3.13. Equazioni per la valutazione di volume e biomassa per *Quercus ilex* (leccio), *Pinus pinaster* (pino marittimo), *Pinus radiata* (pini esotici). Da Tabacchi et al. (2011). (v [dm³], d [cm], h[m]); (dw= kg/m³).

Le specie quercine quali *Q. suber* e *Q. pubescens* (roverella) sono state assimilate al *Q. ilex*.

Per la stima della fitomassa di *Arbutus unedo*, il volume è stato calcolato secondo le equazioni allometriche di Tabacchi et al. (2011) per il *Q. ilex* (vedi Tab. 3.13), mentre si è utilizzato il valore di densità specifica (peso secco), come valutato da Barboutis & Philippou (2007), pari a 760 kg/m³. Anche per l'*Erica arborea*, assumendo che lo sviluppo della chioma fosse comparabile a quello del ceduo di *Quercus ilex*, si è calcolato il volume con la stessa equazione, mentre le altezze di riferimento sono ricalcolate per ciascun individuo a partire dall'equazione di regressione per il corbezzolo. La fitomassa è stata, infine, calcolata moltiplicando il volume ottenuto per il peso specifico riportato da Barboutis & Philippou (2007): anche in questo caso 760 kg/m³.

Per la *Phillyrea* spp., invece, non è stato possibile osservare alcuna relazione tra diametro e altezza e per i dati rilevati sul totale delle Ads (l'equazione ipsoallometrica ottenibile ha $R^2 = 0,1$), né relativamente all'ambito delle singole Ads, per l'insufficienza di rilievi completi (n. 5 individui per l'Ads 33, n. 3 per l'Ads11, n. 2 per l'Ads3).

Tuttavia, per quantificare il contributo di questi individui alla stima della biomassa totale di ciascuna Ads, si è utilizzato l'approccio di Kaye et al. (2010), che per il calcolo del volume di *Phillyrea* spp. hanno utilizzato l'equazione valida per individui di *Quercus coccifera* ($60,516 d^{2,396}$), in scala logaritmica:

$$\ln(60,516) + 2,396 * \ln(d)$$

d è il diametro espresso in cm.

Si è, poi, utilizzato il peso specifico riportato da Barboutis & Philippou (2007) che, per uno studio di alberi modello e campioni di biomassa secca $N = x$, $P = Y$, risulta pari a 910 kg/ m^3 .

Il **quarto step** del lavoro è successivamente consistito nell'inserire le formule in un foglio di calcolo Excel ed eseguirle per 1169 individui, suddivisi in 705 individui distribuiti per n. 14 Ads per la sottocategoria Boschi di Leccio - tipi forestali "Leccete" e "Leccete con latifoglie sempreverdi" – e secondo le descrizioni contenute nei rilievi inventariali (Tab. 3.14) – 464 individui distribuiti per n. 10 Ads per la sottocategoria "Impianti di Conifere" (Tab. 3.15).

Il valore medio di biomassa forestale e carbonio per l'i-esimo individuo arboreo nella singola area di saggio è, quindi, stimato considerando 1 g di peso secco di biomassa = $0,5 \text{ g}$ di carbonio (Costa & La Mantia, 2005). Sono stati, così, calcolati i valori di biomassa totale e carbonio per il soprassuolo forestale (*aboveground biomass*, abgb) e la biomassa radicale (*belowground biomass*, bgb), per le aree di saggio ricadenti nelle principali categorie caratterizzate da latifoglie autoctone (Tab. 3.16) e da impianti di conifere (Tab. 3.17). L'Ads 60 non verrà tenuta in considerazione perché il valore supera di gran lunga il dato medio ottenibile sul totale delle Ads per i boschi di leccio e di latifoglie.

Ads	Tipo forestale (DB)	Individui <i>Quercus ilex</i>	Individui <i>Quercus suber</i>	Individui <i>Arbutus unedo</i>	Individui <i>Erica arborea</i>	Individui <i>Phillyrea sp.</i>	Totale
3	L	37		3		2	42
9	LLS	26				3	29
11	L	22		5		3	30
24	L	8		7	1		16
25	L	51		3			54
26	L	44					44
28	L	79		7			86
33	L	26		9	2	5	42
40	L	7		1	3		11
43	L	110	12				122
45	L	87		10			97
55	L	49					49
60	L	60			3	12	75
62	L	1		7			8
Totale	-	607	12	52	9	25	705

Tab. 3.14. Numero di individui suddivisi per specie, rilevati per ciascuna area di saggio ricadente nella categoria della Carta Forestale "Bosco di leccio" del territorio di studio (L = bosco di leccio; LLS, bosco di leccio a latifoglie sempreverdi).

Ads	tipo forestale (DB)	Individui <i>Arbutus unedo</i>	Individui <i>Quercus ilex</i>	Individui <i>Pinus insignis</i>	Individui <i>Pinus pinaster</i>	Totale
337	BCE			51		51
340	BCE		1	51		52
342	BCE	1		47		48
344	BCE			49		49
346	BCE		1	38		39
352	BCM			3	67	70
353	BCE			41		41
356	BCE			33		33
444	BCE			43		43
447	BCE			6	32	38
Totale		1	2	362	99	464

Tab. 3.15. Numero di individui suddivisi per specie, rilevati per ciascuna area di saggio ricadente nella categoria della Carta Forestale "Impianti di conifere" del territorio di studio (BCE = Boschi di Conifere Esotiche; BCM = Boschi di Conifere Mediterranee).

Ads	<i>Arbutus unedo</i>		<i>Erica arborea</i>		<i>Q. ilex</i>		<i>Phillyrea spp.</i>		<i>Q. suber</i>		total abgb	total bgb	total abgb	total bgb
	abgb (kg)	bgb (kg)	abgb (kg)	bgb (kg)	abgb (kg)	bgb (kg)	abgb (kg)	bgb (kg)	abgb (kg)	bgb (kg)	t/ha	t/ha	t C ha	t C ha
3	59,45	60,64			2627,31	1760,30	14,88	7,44			50,91	32,61	25,46	16,31
9					188,36	126,20	22,52	11,26			3,97	2,45	1,99	1,23
11	53,15	54,22			3566,93	2389,84	22,86	11,43			68,65	43,80	34,32	21,90
24	44,61	45,50	2,82	4,88	154,90	103,78					3,81	2,75	1,91	1,37
25	37,99	38,75			905,27	606,53					17,78	11,51	8,89	5,75
26					4010,75	2687,20					75,58	47,93	37,79	23,96
28	124,86	127,36			4679,09	3134,99					90,53	58,19	45,26	29,09
33	96,99	98,93	2,43	4,20	1525,00	1021,75	38,43	19,22			31,34	20,41	15,67	10,20
40	2,82	2,88	10,85	18,78	496,22	332,47					9,61	6,32	4,80	3,16
43					7539,91	5051,74					1181,82	791,82	82,18	45,05
45	148,10	151,07			4955,34	3320,08					96,17	61,91	48,09	30,96
55					946,80	634,35					17,84	11,31	8,92	5,66
60			16,26	28,12	2460,93	1648,83	62135,51	31067,76			1217,59	584,04	608,80	292,02
62	66,50	67,83			33,56	22,48					1,89	1,61	0,94	0,81

Tab. 3.16. Dati di biomassa totale e carbonio per il soprassuolo forestale (*aboveground biomass*, abgb) e biomassa radicale (*belowground biomass*, bgb) per le aree di saggio ricadenti nelle principali categorie caratterizzate da latifoglie autoctone. Dati validi per l'anno 2010.

Ads	kg ads	t ha	t C ha (abgb)	t C ha (bgb)
337	3153,56	59,43	29,71	21,99
340	6949,02	130,95	65,48	48,46
342	6189,52	116,64	58,32	43,16
344	5895,89	111,10	55,55	41,11
346	8115,11	152,92	76,46	56,58
352a	658,22	12,40	6,20	4,59
352b	3776,67	71,17	35,58	26,33
353	5506,03	103,76	51,88	38,39
356	5320,57	100,26	50,13	37,10
444	5246,29	98,86	49,43	36,58
447a	100,37	1,89	0,95	0,70
447b	1146,77	21,61	10,81	8,00

Tab. 3.17. Dati di biomassa totale e carbonio per il soprassuolo forestale (*aboveground biomass*, abgb) e biomassa radicale (*belowground biomass*, bgb) per le aree di saggio ricadenti nelle principali categorie caratterizzate da impianti di conifere. Dati validi per l'anno 2010.

Nel **quinto step** di lavoro, si è attribuito ai poligoni della Carta forestale coerenti con la descrizione delle categorie e sottocategorie delle aree di saggio, il dato di carbonio medio per Ads "aggregabili" secondo la categoria gestionale, come indicato dalla Carta in cui le Ads ricadono (Tabb. 3.18-3.19).

Tuttavia, le coordinate di alcune aree di saggio e la loro descrizione non sono coerenti con la Carta forestale: di conseguenza si sono esclusi i dati dell'Ads 352 e 447 in quanto per la prima, la categoria forestale della Carta entro cui ricade è quella del Rimboschimento di latifoglie autoctone; per la seconda, il dato non è di immediata attribuzione alle categorie e sottocategorie presenti (si veda la mappa di spazializzazione delle Ads nell'area di studio, Fig. 3.8).

Sebbene talvolta vi sia poca coerenza tra gli attributi della carta forestale e il dato rilevato a terra e riportato nel data base, gli attributi della prima possono considerarsi più esaustivi in termini di descrizione rispetto a quelli ricavabili dal secondo. Per questo, anche al fine di evitare errori macroscopici nella stima qualitativa della distribuzione del carbonio da inferire proprio per i poligoni della carta sull'area di studio, la ricerca ha previsto che le categorie della carta determinino/correggano, quando di diversa descrizione, le categorie delle Ads (i.e. alcune Ads che descrivono un bosco di leccio pur ricadenti nella categoria "Macchia evoluta e preforestale" della Carta).

Il conteggio dei poligoni per categoria secondo la Carta Forestale del distretto Arci-Grighine, e le categorie corrispondenti nelle descrizioni inventariali, sono riportate in

Tab. 3.20. Questo ha portato ad assumere le ipotesi progettuali presentate in Cap. 4 - Risultati.

Ads	Categoria (CF)	Sottocategoria (DB)	Sottocategoria (CF)	Tipo forestale (DB)	% copertura (CF)	Gestione (CF)	Governo (DB)
3	Boschi di leccio	Bosco di leccio	Leccete	Leccete		Ceduo a regime	Ceduo avviato ad alto fusto
33, 55, 62	Boschi di leccio	Bosco di leccio	Leccete	Leccete		Ceduo in abbandono culturale	33. ceduo 55. ceduo 62. ceduo
11	Boschi di leccio	Bosco di leccio	Leccete	Leccete	>80%	Ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	fustaia
24	Boschi di leccio	Bosco di leccio	Leccete	Leccete	>80%	Ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	ceduo
25	Boschi di leccio	Bosco di leccio	Leccete	Leccete	-	Ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	ceduo
28, 45,	Boschi di leccio	Bosco di leccio	Leccete	Leccete		Fustaia	ceduo
26, 40, 43	Macchia evoluta e preforestale	Bosco di leccio	Form. miste di corbezzolo, erica e fillirea	Leccete	>80%	-	ceduo
9	Macchia evoluta e preforestale	Bosco di leccio	Form. miste di corbezzolo, erica e fillirea	Leccete con latifoglie sempreverdi	-	-	ceduo

Tab. 3.18. Categorie della Carta Forestale di Distretto nelle quali ricadono le Ads (latifoglie).

Ads	Sottocategoria (CF)	Tipo forestale (DB)	% copertura (CF)	Gestione (CF)	Governo (DB)
383	Rimboschimenti di latifoglie autoctone	Rimboschimenti di latifoglie autoctone sempreverdi e/o caducifoglie	-	Rimboschimento	Fustaia
337 - 340-342-344-346-353	Boschi puri o misti di conifere esotiche (di origine artificiale)	Formazioni a prevalenza di <i>P. insignis</i>	-	Fustaia	
444 356	Boschi puri o misti di conifere mediterranee (di origine artificiale)	Formazioni a prevalenza di <i>P. pinaster</i>	-		
352	Rimboschimenti a latifoglie autoctone a prevalenza di leccio		-		
447	Macchia evoluta e preforestale		-		

Tab. 3.19. Ads per altre categorie della Carta Forestale di Distretto.

nr. poligoni	Categoria	Sottocategoria	Gestione	% copertura	Specie principale	% presenza specie principale	H media (CF)
5	n.r.	Aree di pertinenza dei sistemi agricoli	-	-	-	-	-
25	Boschi di leccio	Leccete	Ceduo in abbandono colt.le	-	-	-	-
7	Boschi di leccio	Leccete	Ceduo a regime	-	-	-	-
5	Boschi di leccio	Leccete	Ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	-	-	-	-
4	Boschi di leccio	Leccete	Fustaia	-	-	-	-
4	Boschi di leccio	Leccete con latifoglie sempreverdi	Ceduo in abbandono colt.le	-	-	-	-
2	Boschi di leccio	Leccete	Ceduo in abbandono colt.le	>80%	-	-	-
2	Boschi di leccio	Leccete	Ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	>80%	-	-	-
2	Boschi di leccio	Leccete con latifoglie sempreverdi	Ceduo a regime	-	-	-	-
2	Boschi di leccio	Leccete con latifoglie sempreverdi	Ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	-	-	-	-
1	Boschi di leccio	Leccete	Coesistenza Ceduo Fustaia	-	-	-	-
1	Boschi di leccio	Leccete	Fustaia	>80%	-	-	-
1	Boschi di leccio	Leccete con copertura < 50% su formazioni erbacee	Fustaia	-	-	-	-
1	Boschi di leccio	Leccete con latifoglie sempreverdi	Ceduo in abbandono colt.le	>80%	-	-	-
6	Boschi di sughera	Sugherete con latifoglie sempreverdi	Coesistenza Ceduo Fustaia	-	-	-	-
1	Boschi e boscaglie a olivastro	Formazioni termofile miste con olivastro	Bosco non definito	-	-	-	-
6	Boschi puri o misti di conifere esotiche (di origine artificiale)	Formazioni boscate a prevalenza di Pino radiata	Fustaia	-	-	-	-
6	Boschi puri o misti di conifere mediterranee (di origine artificiale)	Formazioni boscate a prevalenza di Pino marittimo	Fustaia	-	-	-	-
16	Garighe e arbusteti prostrati	Formazioni rupestri	-	-	-	-	-
48	Macchia evoluta e pre-forestale	Formazioni miste di corbezzolo, erica e fillirea, con eventuali specie quercine	-	>80%	ilatro	-	> 4 m
15	Macchia evoluta e pre-forestale	Formazioni a prevalenza di corbezzolo	-	>80%	corbezzolo	-	> 4 m
13	Macchia evoluta e pre-forestale	Formazioni miste di corbezzolo, erica e fillirea, con eventuali specie quercine	-	50-80%	corbezzolo	-	> 4 m
6	Macchia evoluta e pre-forestale	Formazioni a prevalenza di erica	-	50-80%	erica arborea, e. scoparia	-	<2 m
2	Macchia evoluta e pre-forestale	Formazioni a prevalenza di corbezzolo	-	50-80%	corbezzolo	-	2 - 4 m

2	Macchia evoluta e pre-forestale	Formazioni a prevalenza di fillirea	-	>80%	ilatro	-	> 4 m
2	Macchie termoxerofile e di degradazione	Formazioni a prevalenza di cisti	-	-	-	-	<2 m
1	Macchie termoxerofile e di degradazione	Formazioni a prevalenza di mirto e lentisco	-	50-80%	lentisco	-	2 - 4 m
2	n.r.	Formazioni di post-coltura e/o sinantropiche	-	-	-	-	-
7	n.r.	Praterie perenni a prevalenza di asfodelo	-	-	-	-	-
1	Rimboschimenti di latifoglie autoctone	Rimboschimenti a prevalenza di roverella	Rimboschimenti	-	roverella	75 %	-
4	Rimboschimenti di latifoglie autoctone	Rimboschimenti di latifoglie autoctone sempreverdi e/o caducifoglie	Rimboschimenti	-	leccio (arboreo-arbustivo)	75 %	-
3	Rimboschimenti di latifoglie autoctone	Rimboschimenti a prevalenza di leccio	Rimboschimenti	-	leccio (arboreo-arbustivo)	100 %	-
1	Rimboschimenti di latifoglie autoctone	Rimboschimenti a prevalenza di leccio	Rimboschimenti	-	leccio (arboreo-arbustivo)	50%	-
1	Rimboschimenti di latifoglie autoctone	Rimboschimenti di latifoglie autoctone sempreverdi e/o caducifoglie	Rimboschimenti	-	castagno	75 %	-
1	Rimboschimenti di latifoglie autoctone	Rimboschimenti di latifoglie autoctone sempreverdi e/o caducifoglie	Rimboschimenti	-	ciliegio selvatico	75 %	-
7	Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere (transitorie)	Rimboschimenti di latifoglie autoctone sempreverdi e/o caducifoglie con conifere	Rimboschimenti	-	-	-	-
5	Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere (transitorie)	Rimboschimenti a prevalenza di leccio con conifere	Rimboschimenti	-	leccio (arboreo-arbustivo)	-	-
1	Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere (transitorie)	Rimboschimenti a prevalenza di leccio con conifere	Rimboschimenti	-	leccio (arboreo-arbustivo)	75 %	-
6	n.r.	Viali parafuoco	-	-	-	-	-

Tabella 3.20. La tabella riassume la distribuzione e il numero dei poligoni per categorie e sottocategorie forestali, gestione come da carta. La percentuale di copertura e la descrizione della consistenza della specie principale per poligono hanno poi supportato l'attribuzione media del dato.

Capitolo 4 - Risultati

4.1. Attribuzione del dato medio di carbonio ai poligoni della Carta Forestale

Per ciascuna categoria della Carta Forestale (e relativo poligono) coerente con gli attributi gestionali del rilievo inventariale, si è attribuito il valore corrispondente di tonnellate di C/ha ottenuto mediando il dato per Ads omogenee (Tab. 4.1). In alcuni casi le descrizioni per alcuni poligoni della Carta nell'area di studio non combaciano per descrizioni con quelle relative alle Ads che vi ricadono. Per ovviare si è scelto di attribuire la categoria più opportuna con il supporto di immagini satellitari. Questa ricerca infatti non ha previsto la verifica e validazione dei dati a terra. Tuttavia, la visualizzazione delle aree di interesse con immagini Ikonos (2006), risoluzione pixel 80 cm, ha supportato la verifica per le categorie attribuite dalla Carta, in accordo con indirizzi e approcci delle "Istruzioni per il rilievo degli attributi di seconda fase" (Gasparini, 2004), e consentito l'attribuzione ex-novo di categorie forestali ritenute più opportune (i.e. categoria Gariga e arbusteti prostrati *versus* Macchia termo-xerofila e di degradazione, Macchia termo-xerofila di degradazione *versus* Macchia evoluta e preforestale, etc). Si è assunto che tutte le superfici della Carta non siano state interessate da incendi per l'anno 2010.

Gestione (CF)	Ads	Stima media t C/ha per categoria gestionale
Ceduo a regime	3	25.46
Ceduo in abbandono colturale	33-55-62	8.52
Ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	11-24-25	15.04
Fustaia (leccio)	28-45	46.68
Fustaia (conifere esotiche)	337-340-342-344-346-353-353-444-447	64.97
Fustaia (conifere mediterranee)	352	58.52

Tabella 4.1. Dato medio Ads attribuito ai poligoni della Carta forestale per categorie gestionali omogenee.

Il dato medio per le Ads ricadenti nella categoria forestale "Macchia evoluta e preforestale" è pari a 41,58 t C/ha. Il dato non si discosta molto da quello registrato da Bianchi et al. (2005, Tab. 4.2), che allo stesso territorio attribuisce un valore medio di 55,82 t C/ha, riferibile a un dato intermedio per una formazione a macchia evoluta prossima alla condizione di bosco avviato ad alto fusto (dato medio delle Ads escluse 31,19 t C/ha).

Macchia evoluta e preforestale	Pool Aboveground biomass	Pool Belowground biomass
	111.64 t/ha	119.59 t/ha
	55.82 t C /ha	59.795 t C/ha

Tab. 4.2. Valori di biomassa per transetti di macchia mediterranea effettuati sul Monte Arci da Bianchi et al. (2005).

Nella serie del *Galio scabri-Quercetum ilicis* la macchia preforestale è per lo più costituita dall'associazione *Erico-Arbutetum*, cenosi mista con *Erica arborea* e *Arbutus unedo* (Farris et al., 2007). Non di rado sono presenti individui di *Phillyrea* spp. In questo lavoro si è assimilata la sottocategoria forestale "Formazioni a prevalenza di *Erica arborea*", come da Tab. 3.20 con "Formazioni a prevalenza di *Arbutus unedo*", come indicato nella Carta. Ergo la categoria "Macchia evoluta e preforestale" non avrà sottocategorie, salvo ridurre con un coefficiente derivante dalla percentuale di copertura, come riportato dalla Carta, il dato medio di carbonio, che qui non utilizzerà - per semplificare - quello medio calcolato da Ads ricadenti nella categoria "Macchia evoluta e preforestale", ma il dato di Bianchi et al. (2005). Quest'ultimo è relativo ad aree di saggio del Monte Arci a macchia mediterranea, ascrivibili alla categoria inventariale "Macchia evoluta e preforestale" della Carta.

Dai dati di Bianchi et al. (2005) si nota come il dato di stima della biomassa radicale superi quello valutato per la biomassa epigea. Sebbene la macchia mediterranea dunque contribuisca fortemente al sequestro del carbonio atmosferico, tuttavia non costituisce categoria forestale utile ai fini di una contabilizzazione degli stocks di carbonio per gli inventari nazionali forestali e dei serbatoi di carbonio, così come già accade per le colture arboree.

La categoria "Macchia termo-xerofila e di degradazione" (0,58 ha) è stata assimilata a formazioni caratterizzate dalla presenza di Cistacee quali *Cistus salvifolius* e *Cistus monspeliensis*, alle quali è stato assegnato il dato medio di Bianchi et al. (2005, Tab. 4.3)

relativo al contributo della biomassa rilevata ad ha per tali formazioni, riferibile a coperture comprese tra il 50-75% , verificata a video per i poligoni interessati.

	Pool Aboveground biomass	Pool Belowground biomass
	3.32 t/ha	0.63 t/ha
<i>Cistus salvifolius</i>	1.66 t C/ha.	0.315 t C/ha
	0.21 t/ha	0.11 t/ha
<i>Cistus monspeliensis</i>	0.105 t C/ha	0.055 t C/ha.
Totale	1.765 t C/ha	0.370 t C/ha

Tab. 4.3. Valori di biomassa per transesti di macchia termo-xerofila e di degradazione effettuati sul Monte Arci da Bianchi et al. (2005).

Nell'inventario non sono presenti dati quantitativi pertinenti a rilievi della categoria “Rimboschimenti di latifoglie autoctone” e “Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere transitorie”, nell'ambito della serie di riferimento. La valutazione della biomassa e relativo contenuto di carbonio è così avvenuta attraverso alcuni postulati, a partire da informazioni qualitative presenti nell'inventario (Ads 383, dati non dendrometrici) e nel Resoconto tecnico e programma delle attività 2011 per il distretto forestale dell'Arci (in seguito RTPA RAS, 2011).

Sulle note del rilevatore, si evince come la disposizione delle sistemazioni preveda filari/gradoni interdistanti 8 m e sia stata realizzata parallelamente alle curve di livello (Fig.4.1).

L'RTPA RAS (2011) riporta un numero medio di piante ad ha, per questa ultima categoria forestale, di 414 individui, indicando un'età degli impianti di circa 15 anni (al 2010). Dai dati descrittivi di inventario, l'altezza media dello strato arboreo è approssimabile a 2,5 m. La classe diametrica assunta come riferimento è pari a 5 cm, ragionando sulle note che descrivono individui arborei di stentata crescita per le limitanti condizioni stazionali.

La Carta forestale distingue rimboschimenti con presenza di leccio dominante per il 100%, 75% e 50%, con presenza relativa di specie secondarie (per la restante percentuale) quali roverella, sughera e orniello (*Fraxinus ornus*). Per la stima della biomassa e del relativo quantitativo di carbonio si assume che le altre latifoglie arboree ivi presenti, siano assimilabili in tutto al *Q. ilex* (100%).



Figura 4.1. Dettaglio di alcuni poligoni della Carta forestale per le categorie “Boschi puri o misti di conifere esotiche”, “Rimboschimenti di latifoglie autoctone” e “Macchia evoluta e preforestale” dell'area di studio.

La media di 414 piante/ha, altezza media per le latifoglie e classe diametrica come su esposte, è stata assunta anche per la categoria “Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere transitorie”. Quest'ultima è descritta nella Carta in due sottocategorie legate ad una diversa percentuale di specie dominanti: 50% latifoglie e 50% conifere (*P. pinaster*) – in un rapporto di 1:1 - e 75% conifere, 25% latifoglie, con rapporto 3:1 (un individuo di *Quercus ilex* ogni tre conifere).

Approssimando alla linearità le interfile delle sistemazioni rimboschite interdistanti 8 m, si è semplificata l'unità di superficie (ha) come matrice regolare di filari lineari in piano per un totale di 12,5 file/ha di rimboschimento, lunghe ciascuna 100 m, per un totale di 1250 m di impianto/ha; si è inoltre assunta una distanza tra gli individui piantumati di 3 m, come misurato dalle immagini satellitari.

La biomassa di ciascun albero, idealmente assimilato al *Quercus ilex* (sebbene presenti anche esemplari di *F. ornus* e *Q. pubescens*), valutata per un'altezza media di 2,5 m e

diametro medio di 5 cm, è di 9,29 kg ad individuo (fusto e branche principali secondo l'equazione di Tabacchi et al., 2011). Per 1 ha di rimboschimento a leccio, il totale di biomassa del soprassuolo così stimabile è di 3,84 t/ha, con il contenuto di carbonio equivalente (assumendo per 1 g di sostanza secca 0.5 g di carbonio), pari a 1,92 t C/ha. La stima della biomassa e del carbonio radicale è invece pari a 2,57 t/ha e 1,29 t C/ha, rispettivamente, assumendo come Root shoot ratio (Rsr) 0,67.

Per i poligoni di cui alla categoria “Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere transitorie” (*P. pinaster*), con percentuali del 50% di *Q. ilex* e conifere, si è assunto quale fitomassa individuale del pino marittimo di diametro medio 19 cm e altezza media 8,63 m (secondo RTPA RAS, 2011 e altezze medie da Ads), 51 kg. Assumendo nella percentuale del 50% un numero medio di 207 individui arborei di conifere/ha, la biomassa stimabile è di circa 10,55 t/ha ovvero 5,28 t C/ha.

Sommando a queste conifere il valore medio di 207 individui di leccio/ha (1,92 t/ha di biomassa, ovvero 0,96 t C/ha), si ottiene un valore totale di 6,24 t C/ha. Per i rimboschimenti in cui il 75% di copertura è invece costituito da conifere (14,07 t di biomassa/ha per 276 individui e 1,28 t di biomassa per un numero medio di 138 individui di *Q. ilex*, con diametro medio di 5 cm e altezza media di 2,5 m), la stima del carbonio potenzialmente stoccato per il 2010 è di circa 15,35 t C/ha. Per i rimboschimenti in cui il 75% di copertura è costituito da leccio, il valore assegnato è pari a 1,6 t C/ha per il leccio, 3,52 t C/ha per le conifere, 5,12 t C/ha totali.

4.2. Stima del contributo di biomassa radicale allo stock di carbonio totale

Il suolo costituisce il principale pool terrestre di carbonio. Diversi studi riportano come il suolo concorra al sequestro di quantitativi circa doppi di quanto contenuto in atmosfera, tre volte quanto ne possa invece immagazzinare nei processi di fissazione della CO₂ la biosfera epigea (Schlesinger, 1984). Se i processi di degradazione e accumulo della sostanza organica nel suolo sono imputabili agli apporti di lettiera e copertura vegetale, al netto di

processi di mineralizzazione e mobilità negli strati verticali, consumo di suolo e fenomeni di erosione, un pool a sé stante è costituito dal C contenuto nella biomassa radicale.

Dal punto di vista pratico, la biomassa radicale è descritta in letteratura e spesso assunta negli approcci speditivi di stima, come proporzionale a quella epigea. La proporzionalità può essere assunta facilmente riassumibile nel rapporto "radici-soprasuolo", più noto come Root-shoot ratio (Rsr), adimensionale. Il coefficiente, moltiplicato per il dato di biomassa epigea, restituisce la stima di quella radicale.

I dati contenuti nel database utilizzato nella presente ricerca non riportano misure riguardanti l'apparato radicale degli individui arborei a causa dell'assenza dell'utilizzo di alberi modello. Per i boschi del Monte Arci risulta ancora una volta significativo il contributo di Bianchi et al. (2005) che hanno rilevato invece la biomassa epigea e radicale proprio attraverso l'uso di alberi modello. I dati su alcune importanti specie della macchia mediterranea - *Arbutus unedo*, *Erica arborea* e *Cistus monspeliensis* – e su *Pinus pinaster* sono presi qui come riferimento per la valutazione della biomassa radicale.

L'Rsr di *Arbutus unedo* ed *Erica arborea* è notevole: 1.07, a significare che l'apparato radicale per le specie della macchia mediterranea è maggiore in termini di volumi (e quindi capacità di accumulo del carbonio) rispetto al soprasuolo. Per la stima del contributo alla biomassa radicale di ciascun individuo rilevato per le aree di saggio, saranno considerati qui coefficienti pari a 1.02 e 1.73, rispettivamente per *Arbutus unedo* ed *Erica arborea* (Bianchi et al., 2005), per *Phillyrea* spp. pari invece a 0.5. Per *Quercus ilex* e *Q. suber*, invece, si è calcolato il dato della biomassa radicale utilizzando un Rsr pari a 0.67, valido per il ceduo di leccio e simile a quanto riportato da Hilbert & Candell (1995) (0.64 ± 0.3) come riportato da Laconi (2009), come valore medio per i boschi mediterranei.

Per le conifere si è utilizzato invece il coefficiente evinto dai dati di Bianchi et al. (2005) valido per il *P. pinaster* e pari a 0.74. Lo stesso coefficiente è applicato per la stima di biomassa radicale nei soprasuoli a *P. insignis*.

Le informazioni riportate nel database di inventario sono di tipo qualitativo e ad ogni modo insufficienti per un'analisi esaustiva sia per la lettiera (o strato della necromassa a terra), che per il suolo (strato minerale e organico). Tuttavia, l'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (INFC 2005: Gasparini et al., 2013) riporta dati medi

regionali ad ha per le categorie forestali per l'uno e l'altro pool, relativamente alle categorie “Boschi alti” (boschi di leccio e sughera) e “Impianti di arboricoltura da legno” (rimboschimenti con conifere mediterranee e conifere esotiche) che sono stati utilizzati a corollario. Per le categorie forestali della Carta quali “Rimboschimenti di latifoglie autoctone” si è considerata la categoria INFC “Piantagioni di altre latifoglie”, per i “Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere (transitorie)” si è invece mediato tra il valore della categoria precedente dell'INFC (1,1 t C/ha) e quella per “Piantagioni di conifere” (0,9 t C/ha).

Per le conifere mediterranee, il dato di carbonio della lettiera è, invece, relativo alla macrocategoria INFC “Boschi puri o misti di conifere mediterranee”. Per la “Macchia evoluta e preforestale” come da Carta è stato invece attribuito lo stesso valore di lettiera quale attribuito al bosco di leccio (2,4 t C/ha). Per “Macchie termoxerofile e di degradazione”, invece, si è utilizzato il valore riportato per “Aree temporaneamente prive di soprassuolo” (INFC 2005: Gasparini et al., 2013) assumendole quali formazioni capaci di ricostituire una copertura maggiore del 10% di specie arboree con altezza potenziale in situ di almeno 5 m (Glossario - INFC 2005: Gasparini et al., 2013).

I dati sono stati così spazializzati con software GIS (ArcGIS 9.3) per l'elaborazione delle mappe seguenti (Figg. 4.2 – 4.5).

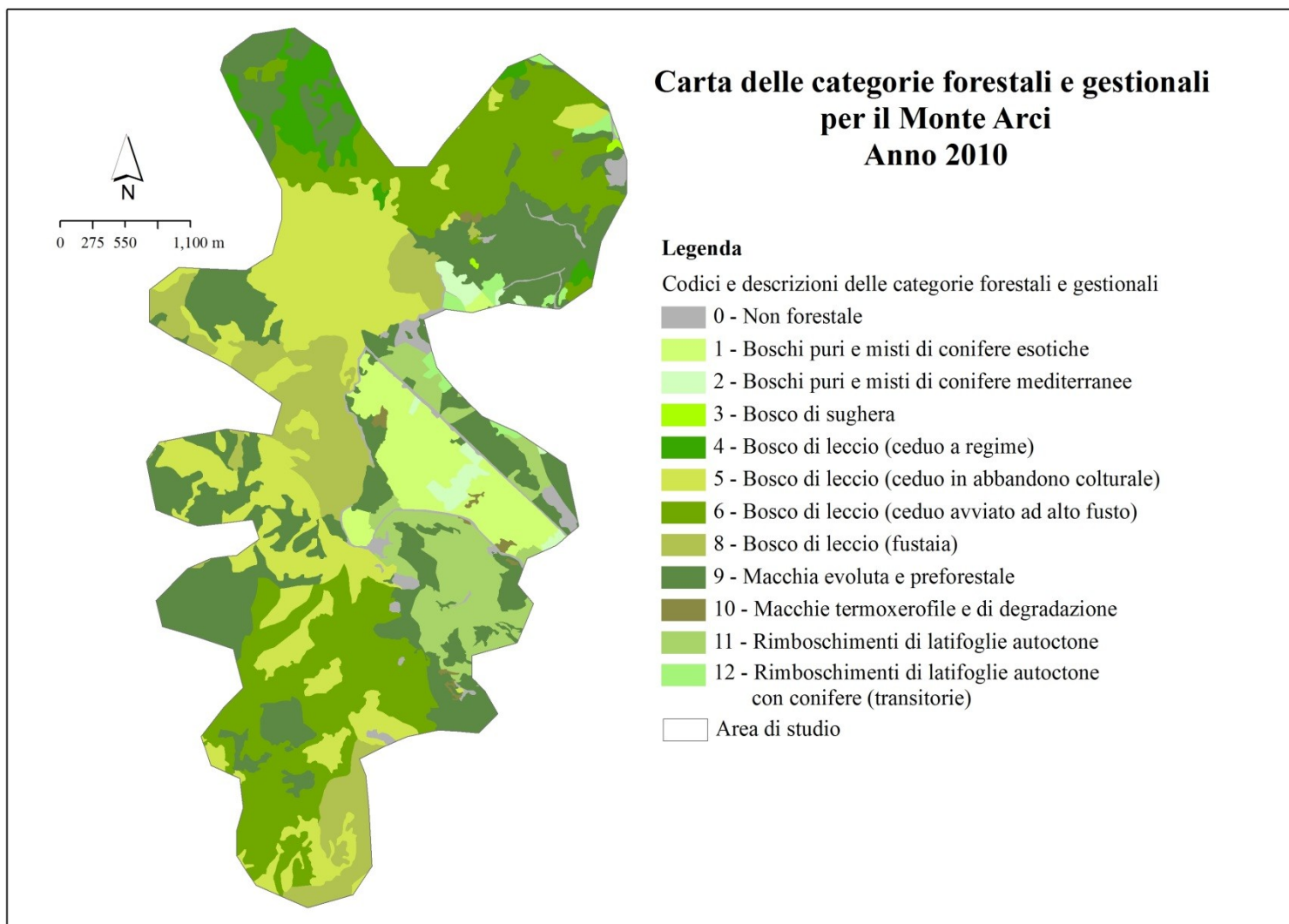


Fig. 4.2. Carta delle categorie forestali e gestionali per il Monte Arci – anno 2010.

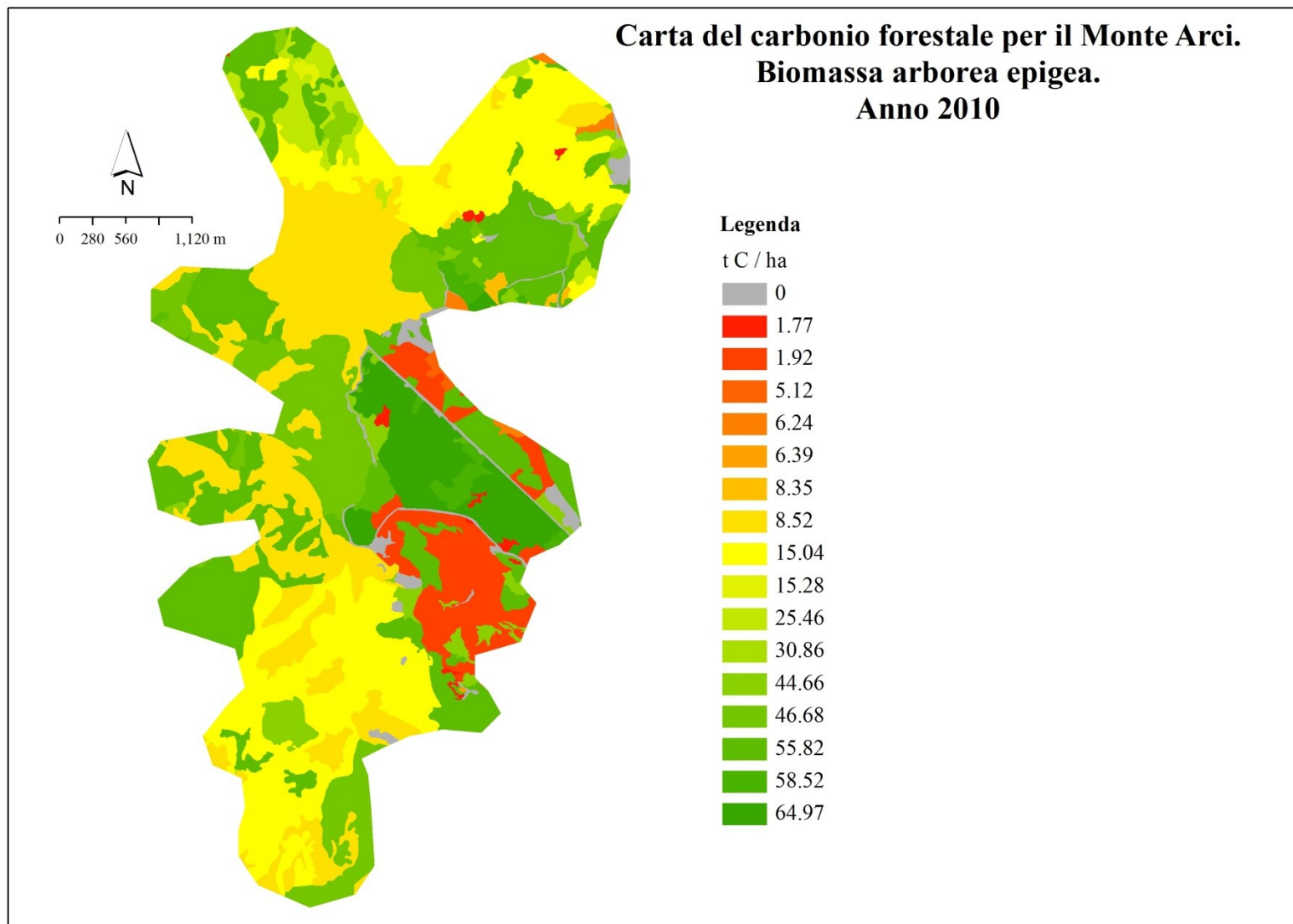


Fig. 4.3. Distribuzione qualitativa del carbonio per il soprassuolo forestale del Monte Arci. Serie *Galio scabri-Quercetum ilicis*.

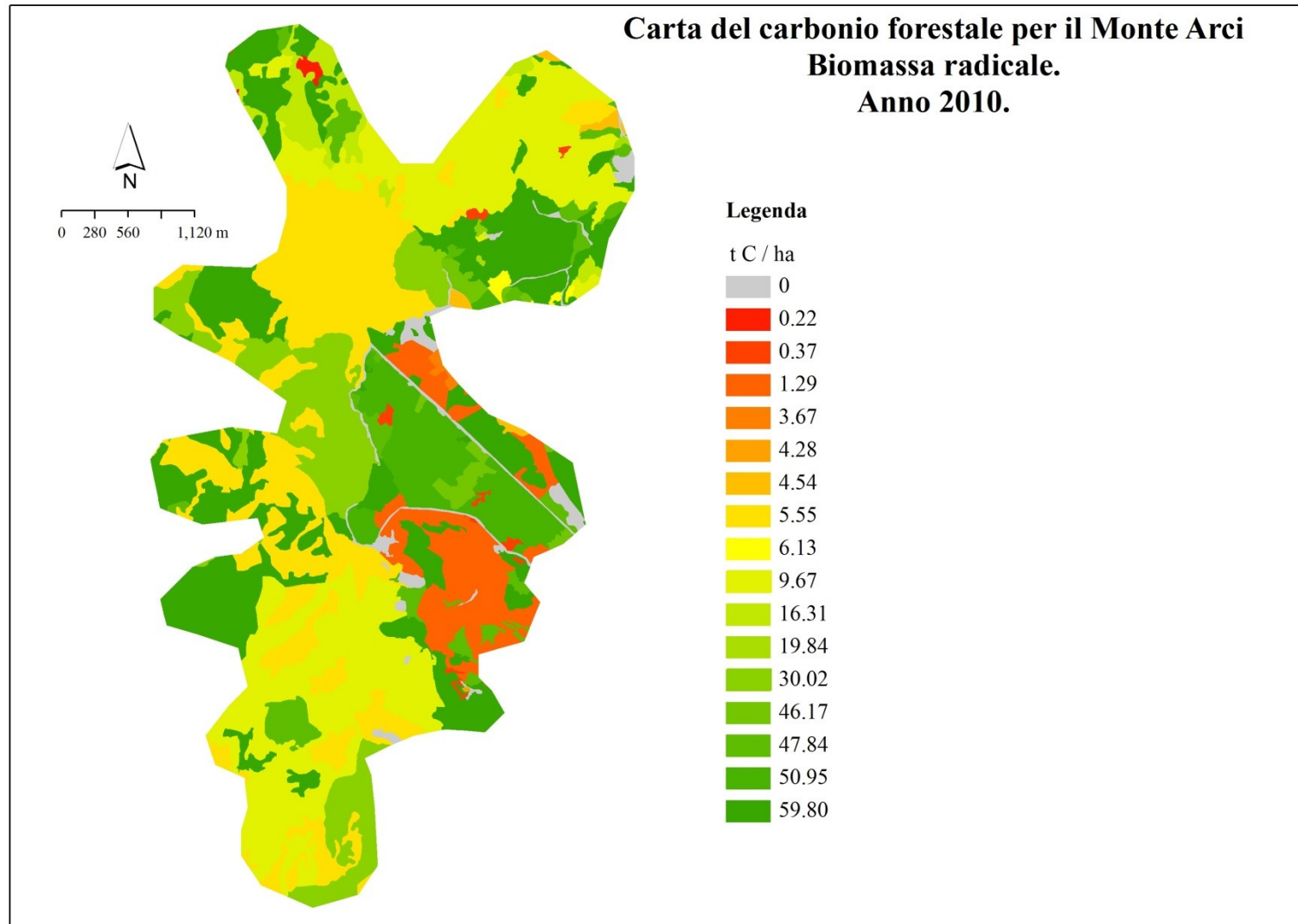


Fig. 4.4 Distribuzione qualitativa del carbonio per la biomassa radicale del Monte Arci. Serie *Galio scabri-Quercetum ilicis*.

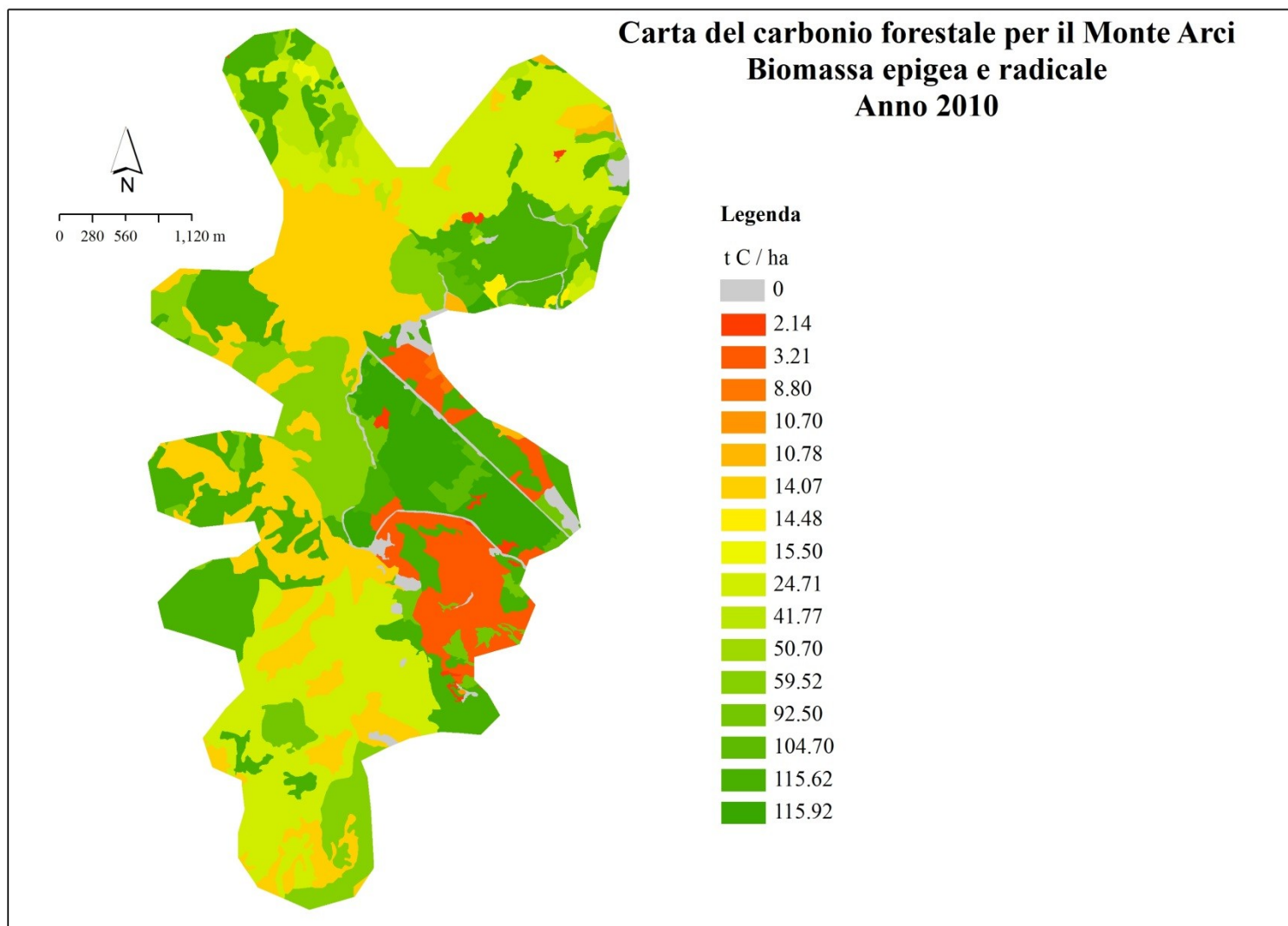


Fig. 4.5. Distribuzione qualitativa del carbonio forestale di biomassa epigea e radicale del Monte Arci. Serie *Galio scabri-Quercetum ilicis*.

4.3. Scenari

La biomassa epigea e radicale sono i pools che maggiormente incidono sulla stima del carbonio totale per un uso del suolo forestale.

Si è ritenuto opportuno ipotizzare scenari di evoluzione forestale secondo opzioni gestionali coerenti con la pianificazione forestale - ambientale regionale (vedi PFAR RAS, 2007). La scelta temporale di un trentennio di gestione (2010-2040) consente di valutare il potenziale di sequestro del carbonio nel bosco per un intervallo di tempo coerente rispetto ai processi di accumulo e perdita del carbonio appunto, nell'ambito di una gestione sostenibile. Il trentennio è inoltre l'unità di riferimento dei mercati volontari di crediti di carbonio. Incrementi legnosi e prelievi sono i fattori principali su cui sono state impostate le condizioni di scenario.

Nell'ambito delle elaborazioni dei dati di scenario e produzione delle mappe di sequestro del carbonio si è scelto conteggiare i pool di lettiera e suolo solo per l'anno 2040 (t_2), al fine di evitare doppi conteggi tra lo status dei pool al t_0 (2010) e al t_2 . La cautela può ritenersi non eccessiva se si tiene conto del ridotto peso che il valore medio utilizzato qui, in riferimento a questi pools, non avrebbe alterato la stima totale di carbonio nell'area di studio (i dati descritti infatti sono riferiti alle macrocategorie inventariali di "Boschi Alti" su scala nazionale), e sebbene si tratti di stime, le incertezze legate ai processi di accumulo e perdita di carbonio nei suoli e lettiera, per i boschi mediterranei, imputabili ai processi complessi (respirazione, erosione, pascolo, incendi, altro), sono elevate. Ad ogni modo, nel passaggio evolutivo verso il bosco, alcune categorie forestali "di transizione" causano un incremento del carbonio nei due pools, mentre le categorie forestali che si confermano anche nella gestione del trentennio i processi di accumulo, a parità delle emissioni/processi di mineralizzazione della sostanza organica a carico della microflora e microfauna, possono esser considerati costanti.

Là dove le categorie forestali dell'area di studio non trovano diretta identificazione tra le macrocategorie inventariali dell'INFC 2005 (Gasparini et al., 2013) si è mediato il valore riportato delle macrocategorie più prossime.

L'INFC 2005 (Gasparini et al., 2013) riporta come pool integrativo alla stima totale del carbonio in foresta il contributo degli alberi morti in piedi, necromassa grossolana e fine. Supponendo una gestione forestale costante si assume qui che questo tipo di contributi siano da ritenersi come Prelievi annui, stabilita per categoria gestionale e tipo di bosco e in riferimento agli incrementi di biomassa media per specie e gestione forestale in mc/ha/anno come riportato dal PFAR. È noto a chi scrive che nei moderni orientamenti della selvicoltura sistemica (Ciancio, 2002) il rilascio di alberi morti e necromassa a terra favorisce una maggior diversificazione strutturale e funzionale del bosco, auspicabile in particolare quando ci si voglia spostare da obiettivi selvicolturali in senso stretto ad obiettivi più conservativi.

Quali dunque le modalità di gestione del bosco nella prospettiva dell'evoluzione naturale "assistita" da pratiche selvicolturali dal tempo 2010 allo scenario 2040?

Assumendo che il bosco evolva senza disturbi e perturbazioni nel trentennio e che nell'area di studio le categorie gestionali si riferiscano mediamente a cedui non maturi e a fustaie giovani (attributo delle Ads), le dinamiche di accrescimento della lecceta sono riferite agli incrementi precedenti il punto di flesso quale descritto dalla curva logaritmica di accrescimento di un bosco *sensu* Anderle et al. (2002).

L'orientamento gestionale assunto in questa sede ha preso le mosse dagli indirizzi del "Piano pluriennale di rinaturalizzazione di sistemi forestali semplificati a prevalenza di conifere in ambiti territoriali critici e fragili con riferimento al dissesto idrogeologico e rischio di desertificazione" (in seguito PPRSFS - RAS, 2009). Il documento, in riferimento al Complesso Forestale del Monte Arci, prevede tra le altre azioni:

- 1) Interventi di diradamento moderati a carico delle piante dominanti e codominanti su soprassuoli a prevalenza di conifere per avviare il processo di reintroduzione delle essenze autoctone su gran parte delle superfici rimboschite.
- 2) Interventi di diradamento a carico della componente a conifere in cedui coniferati variamente modulati sul 36% delle superfici.

Ai fini di questo lavoro si ipotizza un deconiferamento forzato per il 100% delle superfici interessate (tutte le superfici caratterizzate da "Boschi puri o misti di conifere, mediterranee ed esotiche", nonché tutte le superfici ricoperte da "Rimboschimento di latifoglie autoctone

con conifere (transitorie)” a partire dall'anno 2010). Per semplicità di rappresentazione si è cumulato il deconiferamento totale al 2040. Nella semplificazione si è assunto che la biomassa radicale relativa alle conifere asportate sia pari a zero, sebbene rimangano in loco, incidendo sulla valutazione degli stocks per i due pools (soprasuolo e radici). Queste assunzioni sottostimano il contenuto di carbonio e la capacità di sequestro totale.

I prelievi ipotizzati nel trentennio di scenario sono pari a quote definite dei volumi di incremento per tipo forestale come stimato e indicato dal PFAR (RAS, 2007a - allegato III - Analisi di massima sull'utilizzo delle biomasse forestali a scopo energetico).

Per meglio ragionare sulle evoluzioni in termini di categoria forestale per il trentennio, si è attribuito/assegnato un codice relativo a categoria “Bosco” e sottocategorie "gestionale" per ciascun poligono della Carta forestale (Tab. 4.4). Laddove la categoria bosco e di gestione è ipotizzata invariata nel trentennio, il codice resta invariato. Viceversa: al trentesimo anno acquisiscono nuova etichetta/label di categoria e/o gestione i poligoni che hanno raggiunto nuovo assetto della struttura forestale. Le categorie forestali e gestionali tengono conto dell'evoluzione ecologica/dinamismo ecologico previsto per la serie di vegetazione *Galio scabri-Quercetm ilicis*.

Un ulteriore criterio che ha condizionato la definizione degli scenari di gestione al 2040 è stata la pendenza dei versanti per il territorio in esame. Le “Prescrizioni di massima e di polizia forestale per i boschi e terreni sottoposti a vincolo idrogeologico” (PMPF: RAS, 2006) assumono il 35% di pendenza come discriminante alle lavorazioni del terreno con macchinari di tipo agricolo, discriminante quindi per la difesa del suolo dall'erosione con vincolo idrogeologico. In coerenza con gli obiettivi di difesa del suolo e di implementazione di tecniche di selvicoltura sostenibile, si è assunto in questa sede il 20% come pendenza soglia per la determinazione di scelte gestionali o di tipo solo conservativo (pendenze > 20%) o di tipo selvicolturale (pendenze < 20%).

Come si può vedere dalla Tab. 4.5, per le aree che ricadono su versanti con pendenze maggiori del 20% e al 2010 sono descritte con gestione "Ceduo a regime", si ipotizza la transizione in “Cedui in avviamento o avviati ad alto fusto”. Le categorie di “Macchia evoluta e preforestale”, “Bosco con ceduo a regime” e “Ceduo in abbandono culturale” distribuite su pendenze comprese tra 0-20% avranno invece come target evolutivo per lo

scenario al 2040 il “Ceduo a regime”. Gli usi agricoli e seminaturali quali praterie annuali e perenni e l’opportunità di una loro afforestazione/cambiamento d'uso o di copertura non è stata qui presa in considerazione.

Nell'ambito di queste categorie, i prelievi previsti dall'anno 2010 all'anno 2040, per i boschi di leccio con gestione di ceduo a regime o avviati ad alto fusto (tagli di mantenimento), sono stati valutati rispettivamente pari al 20% e al 10%, in coerenza con gli artt. 4 e 33 delle PMPF (RAS, 2006), per i quali " [...] è fatto divieto di conversione di boschi di alto fusto a ceduo, per le fustaie coetanee, trattate a taglio raso o a tagli successivi". Secondo invece le prescrizioni contenute nell'allegato III del PFAR (RAS, 2007a), la macchia a corbezzolo rappresenta uno stadio di evoluzione verso formazioni forestali *strictu sensu*. Per tale motivo, nell'ambito dell'evoluzione verso la vegetazione reale, si ritiene escluso un utilizzo per finalità produttive (grado di utilizzo nullo). Si è assunto che le aree interessate dalla attuale gestione di “Ceduo a regime” vedano leccete coetanee da indirizzare a fustaia disetanea. I prelievi sono considerati distribuiti nell'arco del trentennio di riferimento.

Per accrescimenti e coefficienti di utilizzo per categorie di bosco si è considerato l'allegato III del PFAR (RAS, 2007a).

Codice	Categorie gestionali
1	Boschi puri o misti conifere esotiche
2	Boschi puri o misti di conifere mediterranee
3	Bosco di sughera - ceduo e fustaia
4	Bosco di leccio - ceduo a regime
5	Bosco di leccio - ceduo in abbandono colturale
6	Bosco di leccio - ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto
7	garighe e arbusteti prostrati
8	Bosco di leccio - fustaia
9	Macchia evoluta e pre-forestale
10	Macchie termoxerofile e di degradazione
11	Rimboschimenti di latifoglie autoctone
12	Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere (transitorie)
0	Categorie non forestali

Tab. 4.4. Codici per categorie forestali e gestionali attribuiti ai poligoni della Carta forestale per l'elaborazione dello scenario al 2040.

Categorie forestali/gestionali (t0=2010)	Codice T0 2010	Categorie forestali/gestionali (2040)	Codice T2 2040
Ceduo a regime	4	Bosco di leccio - ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto (prelievi max 10%)	6
Macchia evoluta o preforestale (pendenze < 20%)	9	Ceduo a regime (prelievi al 20%)	4
Macchia evoluta o preforestale (pendenze > 20%)	9	Bosco di leccio - ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto (prelievi max 10%)	6
Ceduo in abbandono culturale (tutte le pendenze)	5	Bosco di leccio - fustaia (prelievi max 10%)	8
Bosco di leccio - ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	6	Bosco di leccio - fustaia (prelievi max 10%)	8
Bosco di leccio - fustaia (prelievi max 10%)	8	Bosco di leccio - fustaia (prelievi max 10%)	8
Macchie termoxerofile di degradazione	10	Macchia evoluta e preforestale	9
Boschi puri o misti di conifere mediterranee - deconiferamento al 100 e Macchia evoluta e preforestale	2-9	Ceduo a regime (prelievi al 20%)	4
Boschi puri o misti di conifere esotiche - deconiferamento al 100 e Macchia evoluta e preforestale	1-9	Ceduo a regime (prelievi al 20%)	4
Rimboschimenti a latifoglie autoctone	11	Bosco di leccio - fustaia (prelievi max 10%)	8
Rimboschimenti a latifoglie autoctone e conifere (transitorie)	12	Bosco di leccio - ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto (prelievi max 10%)	6
Bosco di sughera	3	Bosco di sughera	??

Tab. 4.5. Matrice dei cambiamenti delle categorie forestali dal 2010 al 2040.

	Leccio	Sughera	Conifere	Cedui puri e misti	Macchia a corbezzolo
Accrescimento medio annuo adottato mc/ha anno	2.7	2.0	6.0	2.0	2.0
Boschivo fresco					
Densità (t/mc)	0.80	0.65	0.50	0.80	0.80
Massa totale (t/anno)					
Coefficiente di utilizzo	20%	0%	50%	50%	0%

Tabella 4.6. Accrescimenti e coefficienti medio di utilizzo per categorie di bosco.

La spazializzazione dei dati sulle categorie della Carta ha così consentito di ottenere mappe delle categorie forestali e gestionali all'anno 2040, la distribuzione qualitativa del carbonio forestale all'anno 2040 per i pool di soprassuolo e radici, e la variazione degli stocks di carbonio potenziale tra l'anno 2040 e l'anno 2010 (Figg. 4.6-4.9).

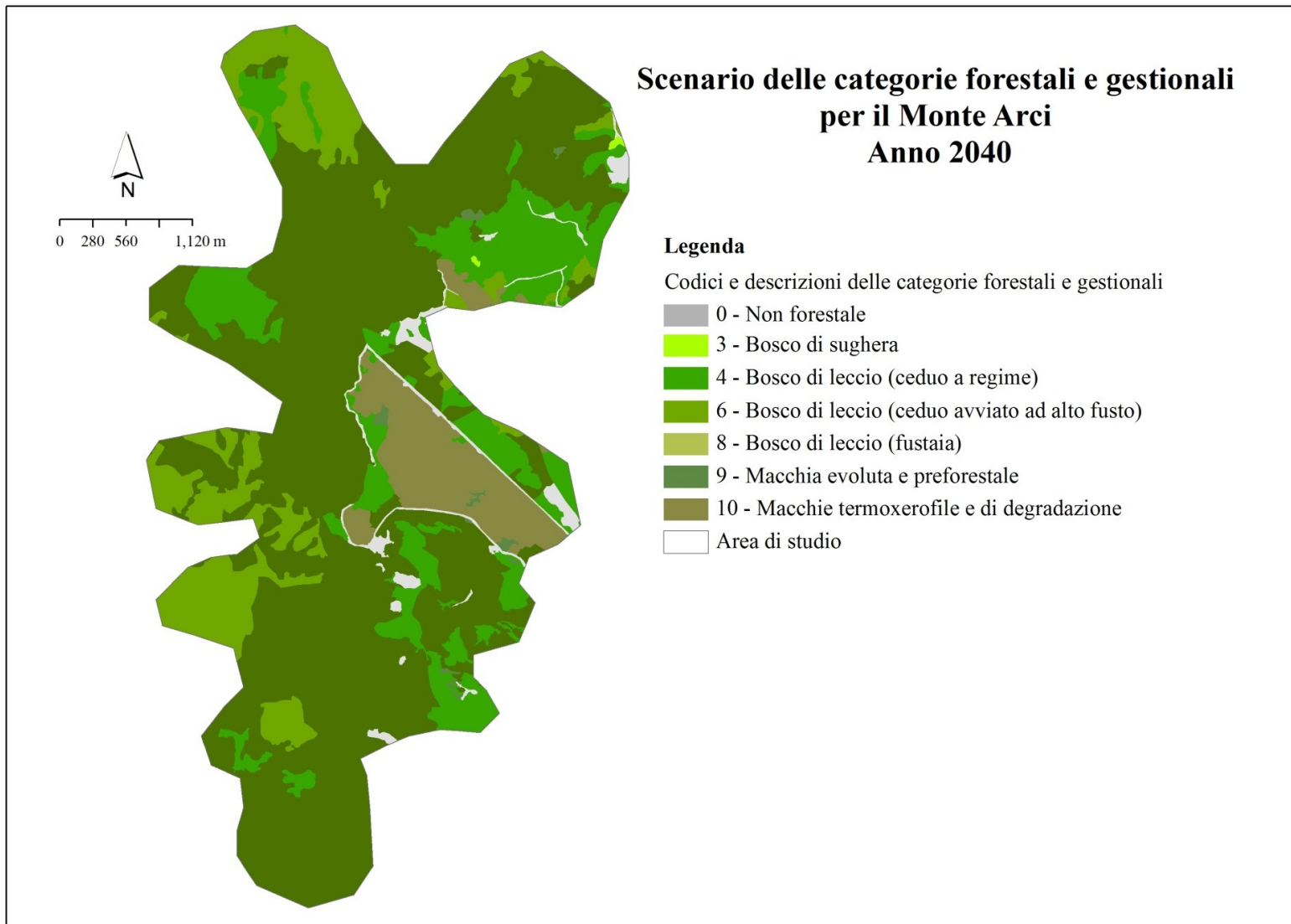


Fig. 4.6. Scenario delle categorie forestali e gestionali per il Monte Arci – Anno 2040.

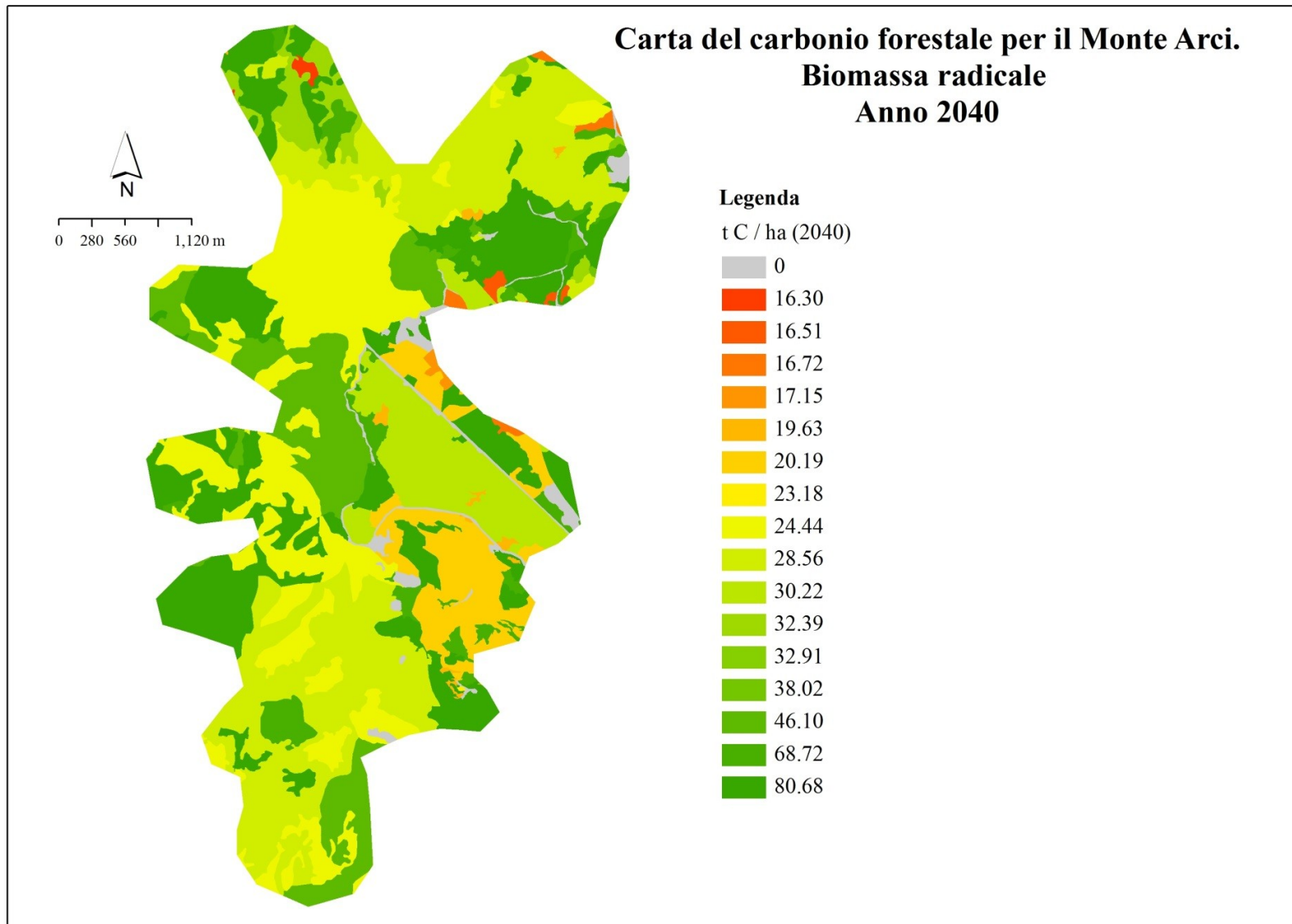


Fig. 4.7. Carta del carbonio forestale per il Monte Arci. Biomassa radicale – Anno 2040.

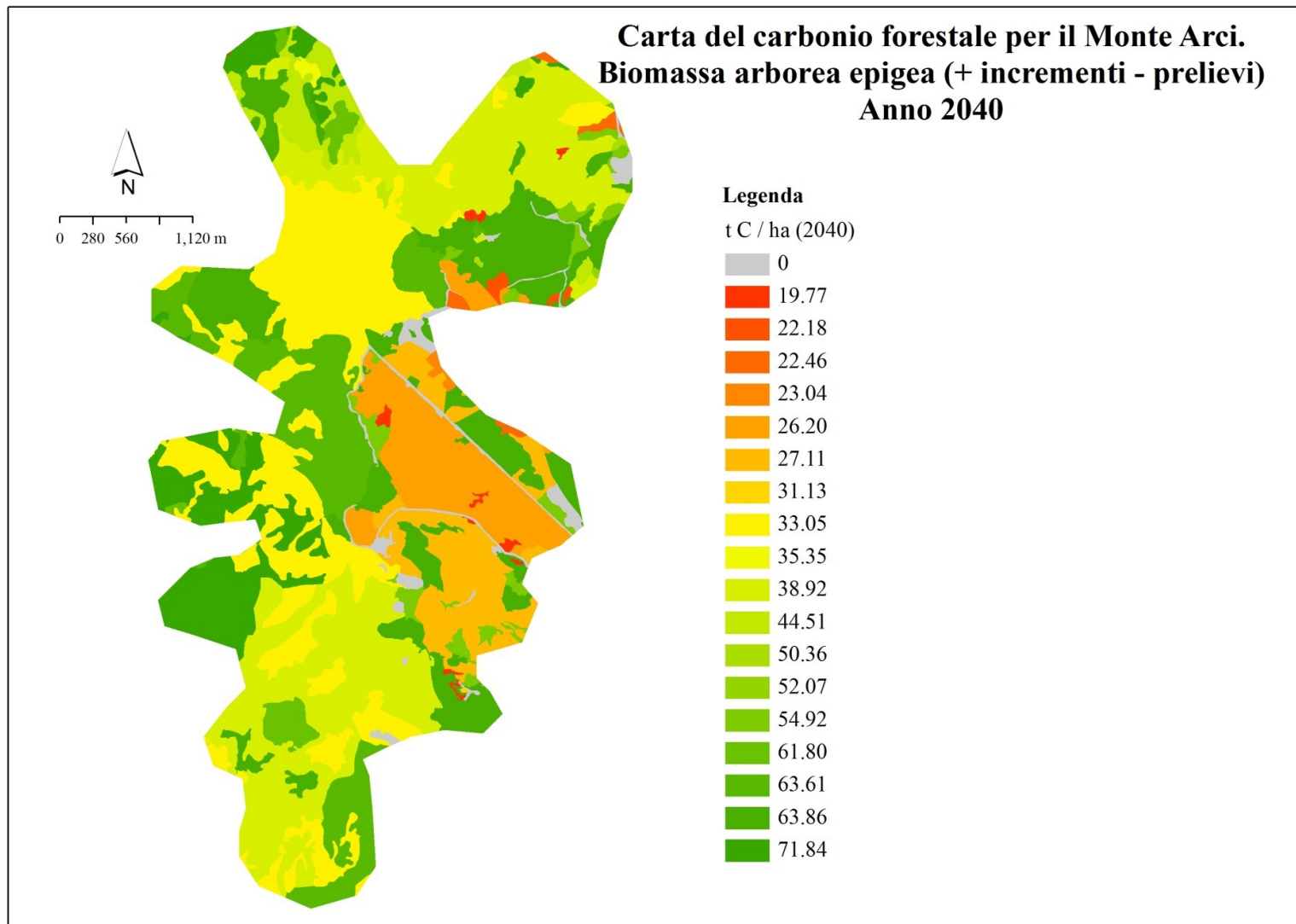


Fig. 4.8. Carta del carbonio forestale per il Monte Arci. Biomassa arborea epigea (+ incrementi – prelievi) – Anno 2040.

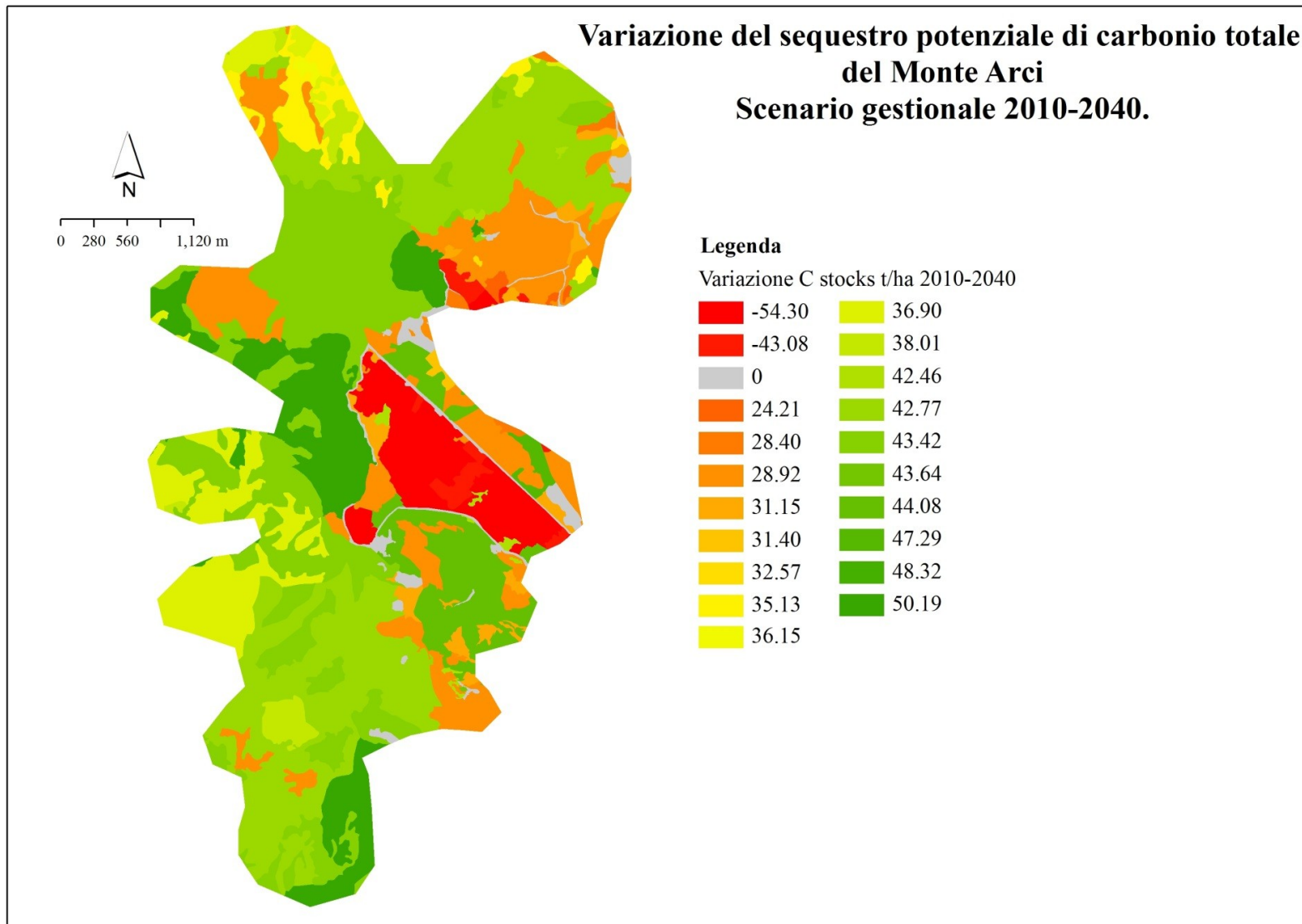


Fig. 4.9. Variazione del sequestro potenziale di carbonio totale del Monte Arci. Scenario gestionale 2010-2040.

Capitolo 5 – Discussione e conclusioni

L'esercizio di contabilizzazione di carbonio di questo studio ha cercato di "applicare" in termini speditivi l'approccio promosso dal Millennium Ecosystem Assessment, ovvero *"to highlight the best available information on ES (i.e. scientific results) to provide scientifically credible answers to policy-relevant in a clear, powerful and useable form under the critical judgment of experts"* (Haines-Young & Potschin., 2008), nell'urgenza di dare non solo una stima qualitativa sui servizi ecosistemici e "mappare" l'informazione, ma anche creare la base informativa di supporto alle decisioni in termini di sviluppo economico per un contesto ambientale ricco di potenzialità quale le aree interne della Sardegna, a partire proprio dalle risorse agro-forestali.

Lo studio cerca inoltre di comunicare i risultati ottenuti attraverso l'elaborazione di mappe e l'adozione di un linguaggio che deliberatamente contamina termini di settore, di carattere scientifico e tecnico ma anche comune, pur mantenendo una certa formalità sostanziale, come da prospettive del tipo *"citizen science"* (Dickinson et al., 2012). Comunicare le informazioni relative ai territori è per questi ultimi fondamentale per la condivisione di valori ambientali nei contesti formali e informali, soprattutto quali quelli promossi dalla pianificazione partecipativa (Pfeiffer et al., 2008), che impegnano ad oggi numerose comunità chiamate a co-pianificare la gestione delle proprie risorse ambientali insieme al Legislatore. Attualmente il distretto forestale dell'Arci-Grighine e le comunità ivi ricadenti concorrono insieme a Ente Foreste e Regione Autonoma della Sardegna ai processi partecipativi per la realizzazione di piani particolareggiati di distretto, da cui gli sforzi dell'inventario forestale qui analizzato, e del progetto Foresta Modello (www.mmf.n.info).

Già il Piano Forestale Ambientale Regionale (RAS, 2007a) ha previsto alcuni Progetti Operativi Strategici ad hoc:

- POS 05: Progetti di rimboschimento dedicato all'assorbimento del carbonio atmosferico;
- POS 07: Certificazione della gestione forestale nel patrimonio pubblico a gestione Ente Foreste Sardegna.

I due programmi possono essere aggiornati alla luce delle nuove opportunità legate allo sviluppo di mercati volontari, integrando le misure del futuro PSR

Lo studio si è posto l'obiettivo di valutare il carbonio forestale per l'area del Monte Arci. I risultati risentono senza dubbio di uno squilibrio iniziale per i dati di input, maggiormente riferiti alla caratterizzazione della biomassa delle conifere che a quella delle latifoglie mediterranee, rispondendo alle finalità iniziali dell'inventario, non orientate in prima istanza a costruire la conoscenza del bosco utilizzando come unità di analisi di riferimento l'ambito della serie di vegetazione, uno dei valori aggiunti della tesi. La valutazione della biomassa forestale inoltre presenta limiti di precisione connessi all'utilizzo di equazioni allometriche non sempre specifiche per i generi e le specie presenti nell'area di studio, connesse all'utilizzo di processi di stima di grandezze mancanti (i.e. biomassa radicale).

Inoltre, le informazioni mancanti o ritenute parziali ai fini delle elaborazioni e assunzioni sono state integrate con dati desunti da fonti bibliografiche riferite spesso ad altri contesti geografici-ambientali e, quindi, a condizioni sito-specifiche differenti dal caso studio, ascrivibili più a dati medi rilevati su siti sperimentali o a scala nazionale (si pensi ai dati di inventario).

L'eccesso di cautela ha portato probabilmente a sottostimare nell'insieme la biomassa totale, non solo in riferimento ai pools forestali di lettiera e suolo in sede di scenario, ma anche attribuendo ai singoli poligoni un dato medio di biomassa "al ribasso" rispetto ai valori ottenuti nelle singole Ads. Chi scrive è, inoltre, consapevole della necessità di integrare i risultati con validazioni che utilizzino tecniche e approcci meno speditivi, che tengano conto dell'entropia del sistema bosco a scala di ecosistema e non solo verso singole categorie gestionali (i.e. valutazione della produttività primaria netta dell'ecosistema bosco e altri), capaci di ridurre e dettagliare l'errore della stima, nonché monitorare con protocolli sperimentali gli incrementi legnosi nelle aree di saggio e valutare i processi di pressione antropica o di disturbo ecologico nel tempo (incendi, avversità biotiche e abiotiche, etc.).

Nonostante questi limiti metodologici, peraltro già noti ed esaminati in letteratura (Tabacchi et al., 2010), i risultati ottenuti permettono di fare alcune considerazioni sulla

potenzialità del sequestro di carbonio per l'area di studio: la macchia mediterranea, tra le formazioni seminaturali, contribuisce al sequestro del carbonio, almeno per l'anno 2010, superando il contributo di altre categorie forestali dagli intensi incrementi quali ceduo di leccio nell'area di studio. Questa caratteristica accentua il valore ecologico della macchia mediterranea, intrinseco al carattere di cenosi instabili quali sono quelle arbustive, che nell'evoluzione delle serie di vegetazione (successione secondaria) tendono all'equilibrio strutturale e funzionale del bosco (vegetazione naturale potenziale).

Gli elevati valori di stock della macchia mediterranea sono ascrivibili all'alto rapporto tra biomassa epigea e radicale, che accumulerebbe circa il 60% in più rispetto al ceduo di leccio (Rsr macchia mediterranea: 1,07 versus *Quercus ilex*: 0,67).

Lo scenario al raggiungimento degli obiettivi prefissati per il 2040 prevede una riduzione della variabilità gestionale dell'area di studio a vantaggio della categoria ed ecosistema bosco di leccio, con dati di sequestro di carbonio positivi; tuttavia questo scenario coinciderebbe con una riduzione della diversità fitocenotica conseguente all'evoluzione della macchia mediterranea in bosco.

L'importanza dell'utilizzo di specie autoctone negli interventi di riforestazione, rispettose della composizione floristica delle serie di vegetazione di riferimento, è la chiave per massimizzare le potenzialità degli interventi stessi finalizzati al sequestro di carbonio, come anche suggerito da altri studi (Rodriguez-Loiñaz et al., 2013). Nonostante il dato per la macchia mediterranea sia il più alto, l'INFC non ne contabilizza il contributo nella stima del carbonio forestale, perché non è assimilabile al bosco *sensu* FRA FAO2000 (FAO, 2001), proprio per il suo carattere transitorio.

Conclusioni di maggior consistenza possono esser tratte con elaborazioni riguardanti la stima della biomassa del soprassuolo per aree di saggio ricadenti nelle serie di vegetazione contigue a quella del caso di studio. I risultati inducono a riflessioni riguardo la valorizzazione delle categorie propriamente non forestali come la macchia mediterranea evoluta ai fini del sequestro di carbonio (Archer & Predick, 2014), per la quale esistono numerosi studi, sia nel contesto italiano (Gratani et al., 2013), sia in altre regioni mediterranee (Fonseca et al., 2012; Ruiz-Peinado et al., 2013), che ne dimostrano l'importanza anche in relazione alle estese superfici che le cenosi arbustive ricoprono

(0,5-0,8 milioni di ha in Sardegna).

Una valorizzazione del contributo della macchia mediterranea, tuttavia, potrebbe essere offerta dai "pagamenti per i servizi ecosistemici", attraverso la creazione di specifiche misure di sostegno ai gestori (proprietari) del bosco potenziale (ovvero delle superfici a macchia mediterranea) che si evolverà compatibilmente con le condizioni ecologiche sito-specifiche in assenza di disturbi e con forme di gestione coerenti con questo obiettivo.

La macchia mediterranea dello scenario al tempo t_1 che un selvicoltore volesse "portare" a bosco al tempo t_2 , può essere infatti considerata come l'"attualizzazione" del capitale bosco al t_2 , prendendo in prestito termini economico-estimativi. Semplificando: garantire il raggiungimento di target di carbonio sequestrato certificando il mantenimento di un determinato stock di carbonio nel tempo, può esser corrisposto in titoli. A tutti gli effetti questi possono costituire crediti di carbonio (Brunori & Ilarioni, 2007) scambiabili nei mercati volontari che ne consentono la negoziazione per schemi di trading diversi da quelli previsti dal Pk - A/R/D -, quando precedenti il 1990, *human induced* (non abbandonati). La potenzialità di crediti di carbonio per le categorie gestionali dell'area di studio, relativamente a biomassa epigea e radicale, è descritta in Tabella 5.1.

Categoria forestale gestionale	ha	Media t C/ha (ABGB & BGB)	Media t CO ₂ /ha	t CO ₂ per superficie effettiva e crediti potenziali (al 2010)	€/ha
Macchia evoluta e pre-forestale	423.10	52.88	194.05	82103.61	1358.35
Bosco di leccio - fustaia	163.91	46.68	171.32	28080.70	1199.24
Bosco di leccio - ceduo in avviamento o avviati all'alto fusto	389.14	15.04	55.20	21479.50	386.40
Bosco di leccio - ceduo a regime	46.21	23.89	87.69	4052.17	613.83
Bosco di leccio - ceduo in abbandono colturale	331.98	8.46	31.03	10301.76	217.21
Bosco di sughera - ceduo e fustaia	1.24	30.86	113.26	140.56	792.82
Boschi puri o misti di conifere mediterranee	20.51	58.52	214.77	4404.22	1503.39
Boschi puri o misti conifere esotiche	103.56	64.97	238.44	24692.88	1669.08
Rimboschimenti di latifoglie autoctone	109.72	1.92	7.05	773.16	49.35
Rimboschimenti di latifoglie autoctone con conifere (transitorie)	14.41	6.91	25.34	365.23	177.38
Macchie termo-xerofile e di degradazione	7.03	1.77	6.50	45.64	45.5
Categorie non forestali	37.10	0	0.000	0.00	0.00
Totale	1647.9			176439.43	

Tab. 5.1. Un credito di carbonio corrisponde a 1 t CO₂ eq. I dati elaborati in t C/ha sono convertiti in CO₂ attraverso l'uso di un coefficiente moltiplicativo di 3,66. L'ultima colonna si riferisce all'ipotesi di prezzo medio su mercato volontario di 7 euro per un credito di carbonio.

Dalla tabella si evince come, assegnando un prezzo medio di 7 euro per credito di carbonio - al ribasso rispetto a quanto vengono battuti all'asta i crediti di carbonio partecipanti al mercato volontario CarboMark (30 euro per t CO₂ eq.), ma maggiore rispetto alle stime di Puxeddu (2013), che fissa il prezzo ideale a 1 euro per credito - la macchia mediterranea potrebbe valere ben 1358,35 €/ha, mentre un bosco di leccio gestito a fustaia 1200 € circa.

Il prezzo medio del titolo sul mercato è il prodotto di valutazioni complesse, legate alla disponibilità del bene, all'accordo cui convengono offerta e domanda in funzione del valore sociale d'uso che ai boschi (quindi alle tonnellate di CO₂) può essere attribuito in un dato momento. In Sardegna la disponibilità di superficie boscata è pari a 0,35 ettari per abitante contro un dato medio nazionale di 0,14 (INFC 2005: Gasparini et al., 2013).

In uno scenario globale caratterizzato da una sempre minor disponibilità di risorse naturali da un lato, e da una domanda di beni ambientali sempre maggiore, il valore dei crediti di carbonio può aumentare. La volatilità dei prezzi dei crediti e l'adesione a queste pratiche da parte di gestori forestali da un lato e acquirenti dall'altro, può essere considerata più efficiente quando la scala cui *buyers* e *sellers* agiscono è quella locale, per via del ristretto contesto socio-economico in cui acquirenti e venditori operano.

Rimandando la discussione ad un contesto più proprio dell'economia ambientale, le opportunità di un mercato volontario locale, come già promosso nell'ambito delle iniziative Carbomark delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia, possono essere valutate nell'ottica di un "pensare globale ma agire locale" che trova la sua piena espressione in un approccio di "*social marketing*" (Wong-Parodi et al., 2011). Numerose infatti sono le imprese isolate le cui attività hanno un impatto sull'emissione di CO₂ (dalle compagnie aeree a industrie operanti nel settore energivoro, ma anche i distretti agricoli, i.e. lattiero-caseario e sughericolo e vitivinicolo). Le stesse emissioni "urbane" possono essere valutate, attraverso semplici tassazioni, o come "consumi" di beni prodotti o sostenuti nella produzione dagli ecosistemi naturali. Il valore dei crediti di carbonio forestale si va a sommare alle altre funzioni e "produzioni" della multifunzionalità del bosco, ma si pensi ai benefici che i boschi di collina oggi garantiscono alle attività in

pianura: dalla regimazione delle acque, alla ricarica delle falde, alla purificazione dell'aria e allo stoccaggio di carbonio. Creare un circuito virtuoso di sostegno ai territori agro-forestali di aree marginali, volto a disegnare nuovi rapporti ed equilibri territoriali tra collina e pianura, territori rurali e urbani, può invertire la rotta della crisi economica, rispetto all'abbandono delle campagne e allo spopolamento dei centri interni, favorendo lo sviluppo di economie basate e sostenute sulla gestione delle risorse seminaturali.

La gestione pubblica delle risorse forestali garantisce in Sardegna la massimizzazione delle esternalità ambientali, quali tutela e conservazione dell'ambiente e, assolvendo a funzioni sociali attraverso la gestione del bosco, apporta valore aggiunto a queste aree specialmente se periferiche o marginali. La potenzialità dei boschi pubblici come serbatoi di carbonio, alla luce delle opportunità offerte oggi dalle buone pratiche e dai pagamenti per i servizi ecosistemici dei mercati volontari locali (i.e. regionali), può offrire possibilità di sviluppo economico per i territori delle aree interne caratterizzati dalla forte presenza di aree naturali e seminaturali, sia per gestori locali che pubblici.

L'iniziativa può essere estesa ad altre esternalità ambientali volte ad assicurare la qualità della vita delle popolazioni che vivono nel territorio. Alcuni organismi di certificazione infatti, quali il Forest Stewardship Council, stanno elaborando linee guida per la certificazione di Ecosystem Services (ForCES), i cui protocolli saranno accessibili a partire dal 2015, ma numerose sono le possibilità di certificazione da parte di istituti per l'assicurazione della qualità di processi e prodotti.

Tra le esternalità suscettibili di quotazione si pensi a quella di regolazione delle acque: la capacità che i boschi e i territori agro-forestali hanno avuto nel favorire, soprattutto a monte di realtà urbane, il controllo delle acque meteoriche è oggi vanificata laddove la cultura del territorio e dell'ambiente si limita a rapporti di tipo utilitaristico e di mero consumo piuttosto che di uso sostenibile delle risorse, verificando sempre più spesso disastrosi allagamenti e alluvioni. La mitigazione del rischio può passare dal recupero delle pratiche a scala territoriale, con unità di riferimento che vanno da quelle di bacino a quelle di paesaggio, responsabilizzando imprese e cittadini, ricostruendo una cultura del territorio e del rischio per rafforzare la resilienza degli equilibri ambientali ed ecologici

insieme a quelli di comunità ed economie per fronteggiare le nuove sfide globali.

A conclusione della ricerca si ritiene quindi che il metodo misurativo/estimativo testato in questo caso studio, restituito mediante elaborati cartografici, sia coerente con un approccio di tipo multidisciplinare, in cui le discipline geografiche integrano le competenze relative ai processi attraverso cui le società umane connettono gli ambienti e le risorse esistenti sulla superficie terrestre, con valenze teoriche e applicative aperte alla pianificazione e alla programmazione dello sviluppo sostenibile. Il supporto strumentale dato dalla cartografia, in particolare quella tematica, integrata con la costruzione di sistemi informativi geografici, è oggi quanto mai indispensabile per interpretare i veloci cambiamenti sia sociali che ambientali, a differenti scale spaziali, e sostenere i processi decisionali alla base di una corretta pianificazione forestale e territoriale (Kadiogullari et al., 2014; Pinheiro et al., 2014; Segura et al., 2014).

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*. Rapporto 21/2002, APAT, Roma, pp. 58.
- Archer S.R., Predick K.I., **2014**. An ecosystem services perspective on brush management: research priorities for competing land-use objectives. *Journal of Ecology*, 102: 1394-1407.
- Arora A., Tiwari G., **2007**. *A handbook for socioeconomic impact assessment (SEIA) of future urban transport (FUT) projects*. Transportation Research and Injury Prevention Program (TRIPP). New Delhi, India, Indian Institute of Technology (available at http://tripp.iitd.ernet.in/publications/paper/SEIA_handbook.pdf).
- Bacchetta G., Bagella S., Biondi E., Farris E., Filigheddu R., Mossa L., **2010**. Le Serie di Vegetazione della regione Sardegna. In Blasi C. (ed.) *La Vegetazione d'Italia*, Palombi & Partner S.r.l. Roma. pp. 471-495.
- Barbati A., Ferrari B., Alivernini A., Quatrini A., Merlini P., Puletti N., Corona P., **2014**. Sistemi forestali e sequestro del carbonio in Italia. *L'Italia Forestale e Montana*, 69(4): 205-212.
- Barboutis J.A., Philippou J.L., **2007**. Evergreen Mediterranean hardwoods as particleboard raw material. *Building and Environment*, 42: 1183-1187.
- Blasi C., Carranza M.L., Frondoni R., Rosati L., **2000**. Ecosystem classification and mapping: A proposal for italian landscapes. *Applied Vegetation Science*, 3(2): 233-242.
- Bianchi L., Calamini G., Gregori E., Zorn G., **2003**. Valutazione degli effetti del rimboschimento in zone aride della Sardegna. Inquadramento climatico delle aree sperimentali. *L'Italia Forestale e Montana*, 5: 389-407.
- Bianchi L., Calamini G., Gregori E., Paci M., Tani A., Zorn G., **2005**. Valutazione degli effetti del rimboschimento in zone aride della Sardegna. Modificazioni ambientali relative ai processi di desertificazione (1). *L'Italia Forestale e Montana*, 7(1): 47-66
- Brunori A., Ilarioni L., **2007**. Certificazione dei crediti di carbonio e settore forestale. *Silvae*, 13: 209-220.
- Canu S., Rosati L., Fiori M., Motroni A., Filigheddu R., Farris E., **2014**. Bioclimates of Sardinia (Italy). *Journal of Maps*: in press. DOI: 10.1080/17445647.2014.988187.

- Carbomark, **2011**. *Manuale di Gestione dei Mercati locali del Carbonio. Parte Generale. Sviluppo di politiche per la realizzazione di mercati volontari locali del carbonio per la mitigazione dei cambiamenti climatici*. Progetto LIFE07 ENV/IT/000388
- Carmignani L., Oggiano G., Barca S., Salvatori I., Eltrudis A., Funedda A., Pasci S., **2001**. La Geologia della Sardegna. *Memorie Illustrative del Servizio Geologico Nazionale*, 60: 1-283.
- Cerofolini A., **2014**. La definizione giuridica di bosco nell'ordinamento italiano. *L'Italia Forestale e Montana*, 69(1): 37-45.
- Chirici R., Chiesi M., Pasqui M., Corona P., Salvati R., Barbati A., Lombardi F., Maselli F., **2011**. Stima dei flussi di carbonio degli ecosistemi forestali italiani attraverso dati telerilevati e ancillari. *Atti XV Conferenza Nazionale ASITA*, 11: 639-644.
- Ciancio O., **2002**. La salvaguardia della foresta: selvicoltura sistemica e gestione forestale sostenibile casa comune di ambientalisti e forestali. *L'Italia Forestale e Montana*, 57(1): 1-6.
- Ciancio O., **2011**. Systemic silviculture: philosophical, epistemological and methodological aspects. *L'Italia Forestale e Montana*, 66(3): 181-190.
- CICES, **2013**. *Toward a Common Classification of Ecosystem Services*. DG Environment.
- COM 2013/659. Comunicazione Della Commissione Al Parlamento Europeo, Al Consiglio, Al Comitato Economico E Sociale Europeo E Al Comitato Delle Regioni. Una nuova strategia forestale dell'Unione europea: per le foreste e il settore forestale. {SWD(2013) 342 final}; {SWD(2013) 343 final}. Bruxelles, 20.9.2013
- Corona P., Barbati A., Ferrari B., Portoghesi L., **2011**. *Pianificazione ecologica dei sistemi forestali*. Compagnia delle Foreste, Arezzo. pp. 206.
- Costa G., La Mantia T., **2005**. Il ruolo della macchia mediterranea nel sequestro del carbonio. *Forest@*, 2(4): 378-387.
- De Groot R.S., van der Meer P.J., **2010**. Quantifying and valuing ecosystem services provided by plantation forests. In: Bauhaus J., van der Meer P.J., Kanninen M. (Eds), *Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests*. Earthscan, London and Washington, 254 pp.
- Dickinson J.L., Shirk J., Bonter D., Bonney R., Crain R.L., Martin J., **2012**. The current state of citizen science as a tool for ecological research and public engagement. *Front. Ecol. Environ.*, 10: 291-297.
- Del Favero R. et al., **1991**. *Guida all'individuazione dei tipi forestali del Veneto*. Regione Veneto Ed.

Del Favero R., Lasen G., **1993**. *La vegetazione forestale del Veneto*. Progetto Ed., Padova. pp. 314.

EFI, **2014**. European Forest Intitute Proceedings No. 57. *Modelling, Valuing and Managing Mediterranean Forest Ecosystems for Non-Timber Goods and Services*. ISBN 978-952-5453-27-0.

European Commission, **2011**. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Our life insurance, our natural capital: an EU biodiversity strategy to 2020* (available at: http://ec.europa.eu/environment/nature/biodiversity/comm2006/pdf/2020/1_EN_ACT_part1_v7%5B1%5D.pdf).

European Commission, **2013**. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A new EU Forest Strategy: for forests and the forest-based sector* (available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2013:0659:FIN:en:PDF>).

FAO, **2001**. *Global Forest Resources Assessment 2000*. FAO Forestry Paper 140. FAO Roma. 479 pp. Main Report. URL: <http://www.fao.org/forestry/site/fra2000report/en>

FAO, **2014**. *State of the World's Forests. Enhancing the socioeconomic benefits from forests*. Eds.: Rametsteiner E., Whiteman A., Muller E. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.

Farris E., Secchi Z., Filigheddu R., **2007**. Phytosociological study of the shrub and pre-forest communities of the effusive substrata of NW Sardinia. *Fitosociologia*, 44(2): 55-81.

Farris E., Filibeck G., Marignani M., Rosati L., **2010**. The power of potential natural vegetation (and of spatial-temporal scale) – a response to Carrión & Fernández (2009). *Journal of Biogeography*, 37: 2211-2213.

Fattorini L., Marcheselli M., Pisani C., **2006**. A three-phase sampling strategy for large-scale multiresource forest inventories. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 11: 296-316.

Fonseca F., de Figueiredo T., Ramos M.A.B., **2012**. Carbon storage in the Mediterranean upland shrub communities of Montesinho Natural Park, northeast of Portugal. *Agroforestry Systems*, 86: 463-475.

Gasparini P. (Ed.), **2004**. *Inventario Forestale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. Istruzioni per il rilievo degli attributi di seconda fase*. Documento preparato dall'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale (ISAFa) per il Ministero per le Politiche Agricole e Forestali, Ispettorato Generale del Corpo Forestale dello Stato.

- Gasparini P., Di Cosmo L., Pompei E. (Eds.), **2013**. *Il contenuto di carbonio delle foreste italiane. Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio - INFC 2005. Metodi e risultati dell'indagine integrativa*. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, Corpo Forestale dello Stato; Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Trento, 284 pp.
- Géhu J.-M., Rivas-Martinez S., **1981**. Notions fondamentales de Phytosociologie. *Ber. Intern. Symposion. Syntaxonomie in Rinteln*: 1-33.
- Gratani L., Varone L., Ricotta C., Catoni R., **2013**. Mediterranean shrublands carbon sequestration: environmental and economic benefits. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18: 1167-1182.
- Haines-Young R., Potschin M., **2008**. *England's Terrestrial Ecosystem Services and the Rationale for an Ecosystem Services Approach*. Full Technical Report, 89 pp. plus excel spread sheet as appendix. Defra Project Code NR0107.
- Hilbert D.W., Candell J., **1995**. Biomass partitioning and resource allocation of plants from Mediterranean-type ecosystems: possible responses to elevated atmospheric CO₂. In: (Moreno JM, Oechel WC eds.) "Global change and Mediterranean-type Ecosystem". *Ecological Studies* 117. Springer, New York, NY, pp. 76-10
- INEA, **2014**. *Lo stato del mercato forestale del carbonio in Italia 2013*. Romano R. (ed.), Istituto Nazionale di Economia Agraria. Roma.
- IPCC, **2006**. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- ISPRA, **2014**. *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2012*. National Inventory Report. Rapporto 198/2014.
- Kadiogullari A.I., Sayin M.A., Celik D.A., Borucu S., Cil B., Bulut S., **2014**. Analysing land cover changes for understanding of forest dynamics using temporal forest management plans. *Environmental Monitoring and Assessments*, 186: 2089-2110.
- Kaye J.P., Romanya J., Vallejo V.R., **2010**. Plant and soil carbon accumulation following fire in Mediterranean woodlands in Spain. *Oecologia*, 164: 533-543.
- Kovats R.S., Valentini R., Bouwer L.M., Georgopoulou E., Jacob D., Martin E., Rounsevell M., Soussana J.-F., **2014**. Europe. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros V.R., Field C.B., Dokken D.J., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., White L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1267-1326.

- Laconi M., **2009**. *Strumenti dendrometrico-inventariali per la stima della fitomassa epigea nella lecceta mediterranea*. Tesi di Dottorato. Università degli Studi di Sassari.
- Lumicisi A., Federici S., Tedeschi V., **2007**. Il registro nazionale dei serbatoi forestali di carbonio. *Silvae*, 9: 67-80.
- Millennium Ecosystem Assessment, **2005**. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- PFAR, **2007a**. *Piano Forestale Ambientale Regionale*. Assessorato della Difesa dell'Ambiente, Regione Autonoma della Sardegna. <http://www.regione.sardegna.it/j/v/25?s=71168&v=2&c=9&t=1>
- PFAR, **2007b**. *Piano Forestale Ambientale Regionale. All.1 Schede di Distretto. Distretto 16- Arci-Grighine*. http://www.regione.sardegna.it/documenti/1_5_20080214174448.pdf
- Pfeiffer C., Glaser S., Vencatesan J., Schliermann-Kraus E., Drescher A., Glaser R., **2008**. Facilitating participatory multilevel decision-making by using interactive mental maps. *Geospatial Health*, 3: 103–112.
- Pinheiro H., de Castro J.P.M., Azevedo J.C., **2014**. Landscape changes and carbon sequestration in the Deilao Parish, northeastern Portugal. *Revista Arvore*, 38: 41-52.
- Pinna M., **1977**. *Climatologia*. UTET, Torino.
- Pulighe G., Lupia F., Vanino S., Altobelli F., Munafò M., Cruciani S., **2013**. *Analisi dello stato dell'arte delle fonti informative di uso e copertura del suolo prodotte in Italia*. Report GeoMedia n. 3.
- Pungetti G., Oviedo G., Hooke D. (Eds.), **2013**. *Sacred species and sites: advances in Biocultural conservation*. Cambridge University Press. pp. 472.
- Puxeddu M., **2013**. L'Ente Foreste: gestione forestale e innovazione per la Sardegna. *L'Italia Forestale e Montana*, 68 (3): 137-144.
- RAS, **2006**. *Decreto n.24/CFVA. Prescrizioni di Massima e di Polizia Forestale per i boschi e i terreni sottoposti a vincolo idrogeologico*. Regione Autonoma della Sardegna. http://www.sardegnaambiente.it/documenti/19_173_20090324161842.pdf
- RAS, **2009**. *Piano pluriennale di rinaturalizzazione di sistemi forestali semplificati a prevalenza di conifere in ambiti territoriali critici e fragili con riferimento al dissesto idrogeologico e rischio di desertificazione (PPRSFS)*. https://www.regione.sardegna.it/documenti/1_106_20090414121855.pdf
- RAS, **2011**. *Pianificazione forestale di distretto e implementazione della foresta modello Arci Grighine. Resoconto tecnico e programma delle attività 2011*. Regione Autonoma

- della Sardegna, Assessorato alla difesa dell'ambiente, Direzione generale della Difesa dell'Ambiente, Servizio Tutela del suolo e politiche forestali. Luglio 2011.
- RAS, **2012**. *Piano strategico foresta modello Arci-Grighine 2011-2014*. Regione Autonoma della Sardegna, Assessorato alla Difesa dell'Ambiente, Febbraio 2012. https://www.regione.sardegna.it/documenti/1_73_20130917103649.pdf
- Rivas-Martínez S., **1976**. Sinfitosociologia, una nueva metodología para el estudio del paisaje vegetal. *Ann. Inst. Bot. Cavanilles*, 33: 179-188.
- Rivas-Martínez S., Sánchez-Mata D., Costa M., **2001**. *Worldwide Bioclimatic Classification System*. www.ucm.es/info/cif/book/keys_02.htm.
- Rivas-Martínez S., Rivas-Sáenz S., Penas A., **2011**. Worldwide Bioclimatic Classification System. *Global Geobotany*, 1: 1-638.
- Rodríguez-Loinaz G., Amezaga I., Onaindia M., **2013**. Use of native species to improve carbon sequestration and contribute towards solving the environmental problems of the timberlands in Biscay, northern Spain. *Journal of Environmental Management*, 120: 18-26.
- Ruiz-Peinado R., Moreno G., Juárez E., Montero G., Roig S., **2013**. The contribution of two common shrub species to aboveground and belowground carbon stock in Iberian dehesas. *Journal of Arid Environments*, 91: 22-30.
- Schlesinger W.H., **1984**. Soil organic matter: a source of atmospheric CO₂. In: Woodwell G.M. (ed). *The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: measurements by remote sensing*. Wiley, New York, pp. 111–127.
- Segura M., Ray D., Maroto C., **2014**. Decision support systems for forest management: a comparative analysis and assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 101: 55-67.
- Tabacchi G., De Natale F., Gasparini P., **2010**. Coerenza ed entità delle statistiche forestali. Stime degli assorbimenti netti di carbonio nelle foreste italiane. *Sherwood*, 165: 11-19.
- Tabacchi G., Di Cosmo L., Gasparini P., Morelli S., **2011**. *Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane. Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea*. Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Trento, pp. 412.
- THINK project, **2011**. *Transition Towards a Low Carbon Energy Systems by 2050: what Role for the EU?* Final report, 2011. THINK. Advising the EC (DG Energy) on Energy Policy

Valatin G., **2010**. *Forests and carbon: valuation, discounting and risk management*. Forestry Commission Research Report. Forestry Commission, Edinburgh. i–viii + 1–32 pp. ISBN 978-0-85538-815-7
[http://www.forestry.gov.uk/pdf/FCRP012.pdf/\\$FILE/FCRP012.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/FCRP012.pdf/$FILE/FCRP012.pdf)

Wong-Parodi G., Dowlatabadi H., McDaniels T., Ray I., **2011**. Influencing attitudes toward carbon capture and sequestration: a social marketing approach. *Environmental Science and Technology*, 45: 6743-6751.