

Numero Speciale: Progetto ALForLab (PON03PE_00024_1 - PON R&C - PAC 2007-2013)

“Laboratorio Pubblico-privato per l’applicazione di tecnologie innovative ad elevata sostenibilità ambientale nella filiera foresta-legno-energia”

Guest Editors: Alessandro Paletto (CREA, Trento), Giorgio Matteucci & Mauro Maesano (CNR-ISAFOM)

Protocollo di simulazione, calibrazione e validazione del modello 3D-CMCC-CNR-FEM: il caso studio del bacino altamente strumentato del Bonis in Calabria

Alessio Collalti⁽¹⁻²⁾, Corrado Biondo⁽²⁻³⁾, Gabriele Buttafuoco⁽¹⁾, Mauro Maesano*⁽¹⁾, Tommaso Caloiero⁽¹⁾, Federica Lucà⁽¹⁾, Gaetano Pellicone⁽¹⁾, Nicola Ricca⁽¹⁾, Riccardo Salvati⁽³⁾, Antonella Veltri⁽¹⁾, Giuseppe Scarascia Mugnozza⁽¹⁻³⁾, Giorgio Matteucci⁽¹⁾

(1) Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo (CNR-ISAFOM), Rende, CS (Italia); (2) Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Impatti su Agricoltura, Foreste e Servizi Ecosistemici (CMCC-IAFES), Viterbo (Italia); (3) Università degli Studi della Tuscia, Dipartimento per l’Innovazione nei sistemi biologici, agroalimentari e forestali (Unitus-DIBAF), Viterbo (Italia) - *Corresponding Author: Mauro Maesano (mauro.maesano@isafom.cnr.it).

Abstract: *Simulation, calibration and validation protocols for the model 3D-CMCC-CNR-FEM: a case study in the Bonis’ watershed (Calabria, Italy).* At present, the climate changes issue is perhaps the greatest threat that is affecting people and the environment. Forest ecosystems have a key role in the mitigation of climate change. In this context, the prediction of the evolution and growth dynamics of the forests including carbon and water fluxes, and in relation to forest management has become a primary objective. The present study aims at defining a protocol for data collection and the workflow for using the 3D-CMCC-CNR-FEM model in a small mountain watershed in the Calabria region. Within this work we synergistically integrate data coming from different methods (e.g., LiDAR, eddy covariance and sample area) to predict forest dynamics (growth, carbon and water fluxes). Carbon and water fluxes will be simulated considering also the effects of forest management.

Keywords: Forest Model, Climate Change, Forest Management, Eddy Covariance, Lidar

Received: Jan 20, 2017; Accepted: Jun 13, 2017; Published online: Aug 14, 2017

Citation: Collalti A, Biondo C, Buttafuoco G, Maesano M, Caloiero T, Lucà F, Pellicone G, Ricca N, Salvati R, Veltri A, Scarascia Mugnozza G, Matteucci G, 2017. Protocollo di simulazione, calibrazione e validazione del modello 3D-CMCC-CNR-FEM: il caso studio del bacino altamente strumentato del Bonis in Calabria. *Forest@* 14: 247-256 [online 2017-08-14] URL: <http://www.sisef.it/forest@/contents/?id=efor2368-014>

Introduzione

Negli ultimi decenni, il problema dei cambiamenti climatici a scala globale, in particolare dovuto all’aumento della concentrazione di CO₂ antropogenica in atmosfera e il conseguente innalzamento della temperatura media del pianeta, ha assunto una rilevanza prioritaria. Nel secolo appena trascorso la tempera-

tura della superficie terrestre ha subito un incremento di circa 0.74 °C (IPCC 2007) con incrementi record negli ultimi anni (IPCC 2014). Nel periodo compreso tra il 1995 ed il 2000, la temperatura media della superficie del pianeta è aumentata di circa 0.15 °C (IPCC 2001), mentre dal 2000 ad oggi si sono verificati 12 degli anni più caldi dall’inizio delle misura-

zioni strumentali. Nei prossimi decenni sono previsti incrementi di temperatura atmosferica compresi tra 1.3 e 7 °C, con un aumento medio di circa 2.5 °C (IPCC 2013, 2014).

In tale contesto, gli ecosistemi forestali rivestono un ruolo di primo piano nella regolazione/mitigazione dei fenomeni climatici, in particolare degli scambi di materia ed energia fra biosfera e atmosfera. Negli ultimi decenni, le foreste hanno assorbito fino al 30% delle emissioni globali annue di CO₂ (Bellassen & Luyssaert 2014), sotto forma di carbonio organico, nei diversi *pool* di carbonio (biomassa epigea, biomassa ipogea, necromassa legnosa, lettiera e suolo) attraverso il processo di fotosintesi (Produttività Primaria Lorda, PPLF) e rilasciando in atmosfera i prodotti della respirazione.

Un fattore che influisce in modo significativo sulla capacità di stoccaggio del carbonio da parte delle foreste è costituito dalle pratiche di gestione forestale. Diversi metodi colturali, quali il recupero dei soprassuoli degradati, l'allungamento del turno, sia nei boschi cedui che nelle fustaie, e la conversione dei boschi cedui in fustaia possono consentire un potenziamento dei serbatoi forestali con un conseguente aumento dei valori di Produttività Primaria Netta Ecosistemica nel lungo termine (Barbati et al. 2014). Quantificare i flussi di CO₂ tra atmosfera ed ecosistemi forestali, anche in relazione alle pratiche selvicolturali, significa disporre di utili informazioni non soltanto per perseguire una gestione sostenibile delle foreste, ma anche per definire strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici (Alkama & Cescatti 2016, Naudts et al. 2016).

Nell'arco degli ultimi anni numerosi sono stati i modelli numerici sviluppati capaci di simulare i meccanismi di crescita degli ecosistemi forestali e di stimare grandezze quali la GPP e la Produttività Primaria Netta (PPN), allo scopo di prevedere il ruolo degli ecosistemi forestali sull'evoluzione futura dei cambiamenti climatici (*feedback - feedforward*). In particolare, l'evoluzione di modelli di processo (*Process Based Models*, PBMs) in ambito forestale ha permesso una maggiore applicabilità della modellistica ad ecosistemi forestali di diversa tipologia.

Il modello 3D-CMCC-CNR-FEM verrà utilizzato nell'ambito del progetto MIUR-PON Ambi.Tec.Fil.-Legno (PON03PE_00024_1) su un bacino sperimentale altamente strumentato in Calabria localizzato sull'altopiano della Sila denominato "Bacino del Bonis". Il bacino è stato attrezzato a partire dal 1986 allo scopo di valutare gli effetti della gestione forestale e la conseguente dinamica evolutiva sui processi

idrologici e sui deflussi superficiali, anche ai fini del controllo dell'erosione superficiale (Bovio et al. 2001, Callegari et al. 2003).

Con l'applicazione del modello 3D-CMCC-CNR-FEM si cercherà di:

- simulare flussi di carbonio, il tasso di crescita della foresta e l'allocatione nei suoi diversi *pool* di carbonio;
- simulare i flussi idrici tra atmosfera e foresta, anche valutando l'efficienza di uso dell'acqua;
- valutare gli effetti di diverse opzioni di gestione forestale sul ciclo del carbonio e sul ciclo dell'acqua ed in particolare sull'andamento della crescita e sulla struttura della foresta (anche mista e disetanea), cercando di valutare anche gli effetti su gli altri servizi ecosistemici (SE) forniti dalla foresta stessa.

L'applicazione del modello 3D-CMCC-CNR-FEM sul Bonis costituisce il punto in cui confluiranno tutte le attività svolte sul bacino in esame, relative allo studio di differenti aspetti, nel corso degli anni. I rilievi dendrometrici e da piattaforma aerea UAV, oltre che i campionamenti della componente suolo e le analisi delle grandezze meteorologiche, convergono all'interno dei dati utili alla inizializzazione e validazione del modello. Sulla base di un'impostazione del lavoro che prevede l'interazione di attività caratterizzate da diversa natura, si valutano le performance del modello 3D-CMCC-CNR-FEM applicato a formazioni forestali.

Il lavoro potrà contribuire al processo di conoscenza del ruolo degli ecosistemi forestali nella regolazione del clima.

Materiali e metodi

Il modello 3D-CMCC-CNR FEM

Il 3D-CMCC-CNR-FEM (Collalti et al. 2014, 2016) è un modello dinamico di processo in grado di simulare flussi di carbonio ed idrici, incrementi di biomassa nei vari *pool* di carbonio, evoluzione strutturale e ulteriori aspetti legati anche alla gestione forestale, partendo dalla simulazione dei principali processi eco-fisiologici (Fig. 1). La rappresentazione della foresta avviene attraverso una matrice composta da celle di dimensione variabile tra 100 e 10.000 m², seguendo l'approccio di Klausmeier & Tilman (2002), in cui la foresta è suddivisa in diversi piani (*layers*), in base alle classi di età, di diametro (DBH, *diameter at breast height*) e di altezza presenti su base specie-specifica, mentre gli alberi sono al livello spaziale uniformemente distribuiti in funzione della densità.

denza della vasca di chiusura è installata una sonda multi-parametrica Geoves serie Smx-485 per le misure dei parametri chimico-fisici e di qualità dell'acqua, quali il livello idrometrico, pH, torbidità, ossigeno disciolto, conducibilità, redox e temperatura dell'acqua. Il livello idrometrico nella vasca è anche misurato tramite un sensore ad ultrasuoni.

In passato sono state attive altre due stazioni meteorologiche. Una dal 1986 al 2000 in località Don Bruno, nella zona sud-ovest, e un'altra dal 2005 al 2008 ubicata in corrispondenza della torre *Eddy Covariance* nella zona sud del Bonis, per la misura degli scambi di massa (CO_2 , H_2O) ed energia (calore sensibile e latente, H e LE) tra bosco ed atmosfera.

Protocollo di campionamento della parte epigea

Rilievo parametri dendrometrici

I rilievi effettuati sul soprassuolo e la scelta della modalità di campionamento hanno tenuto conto dei criteri con cui era stata effettuata la caratterizzazione del soprassuolo all'inizio della sperimentazione (1986), e gli interventi di diradamento sull'intera superficie del bacino nel 1993 (Fig. 2).

La scelta delle nuove aree da rilevare è stata compiuta in base alla posizione delle aree di saggio dei precedenti campionamenti (1986 e 1993). Le aree già esistenti sono state localizzate tramite fotointerpretazione e successivo controllo a terra utilizzando un ricevitore GPS Trimble. La correzione differenziale in tempo reale effettuata dallo strumento GPS ha consentito di individuare la posizione delle aree di sag-

gio storiche con un errore compreso in un intervallo di 1-5 metri (Floris & Scrinzi 2004).

Nello specifico, il protocollo di rilievi adottato ricomprende quello impiegato per i quattro macroscenari scelti come rappresentativi delle risorse forestali della Calabria (Pollino, Catena Costiera, Sila, Serre) individuate dal progetto "AlForLAB", con l'introduzione di ulteriori elementi di dettaglio utili ai fini di una più completa ed esaustiva caratterizzazione dei popolamenti forestali presenti.

I rilievi hanno interessato 36 *plot* circolari (Fig. 3), aventi dimensioni di 20 metri di raggio e con centro nel punto di campionamento al suolo, distribuiti all'interno della superficie del bacino.

Per ogni area di saggio è stata eseguita sia una descrizione stazionale (tipo colturale, trattamento selvicolturale, struttura del popolamento, pratica colturale recente, rocciosità stazione, età strato superiore, età strato inferiore, tipologia rinnovazione, copertura rinnovazione, danni rinnovazione, presenza di passaggio fuoco, abbondanza di legno morto a terra), sia il rilievo dendrometrico di tipo classico (distanza dal punto centrale dell'area di saggio e Azimut, specie, diametro a petto d'uomo, altezza totale e altezza di inserzione della chioma, dendrotipo, vitalità, danni morfologici).

La massa legnosa e la biomassa epigea sono state determinate tramite le equazioni elaborate per i pini mediterranei in occasione dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di carbonio (Gasparini & Tabacchi 2011).

Inoltre, per l'esatta determinazione dell'età del po-

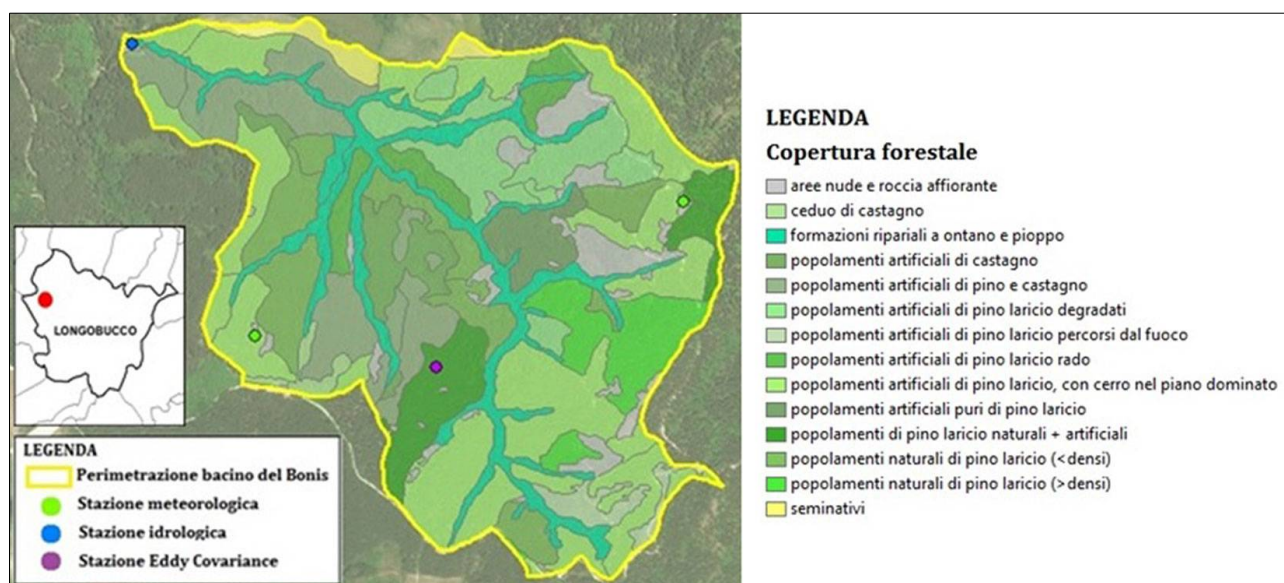
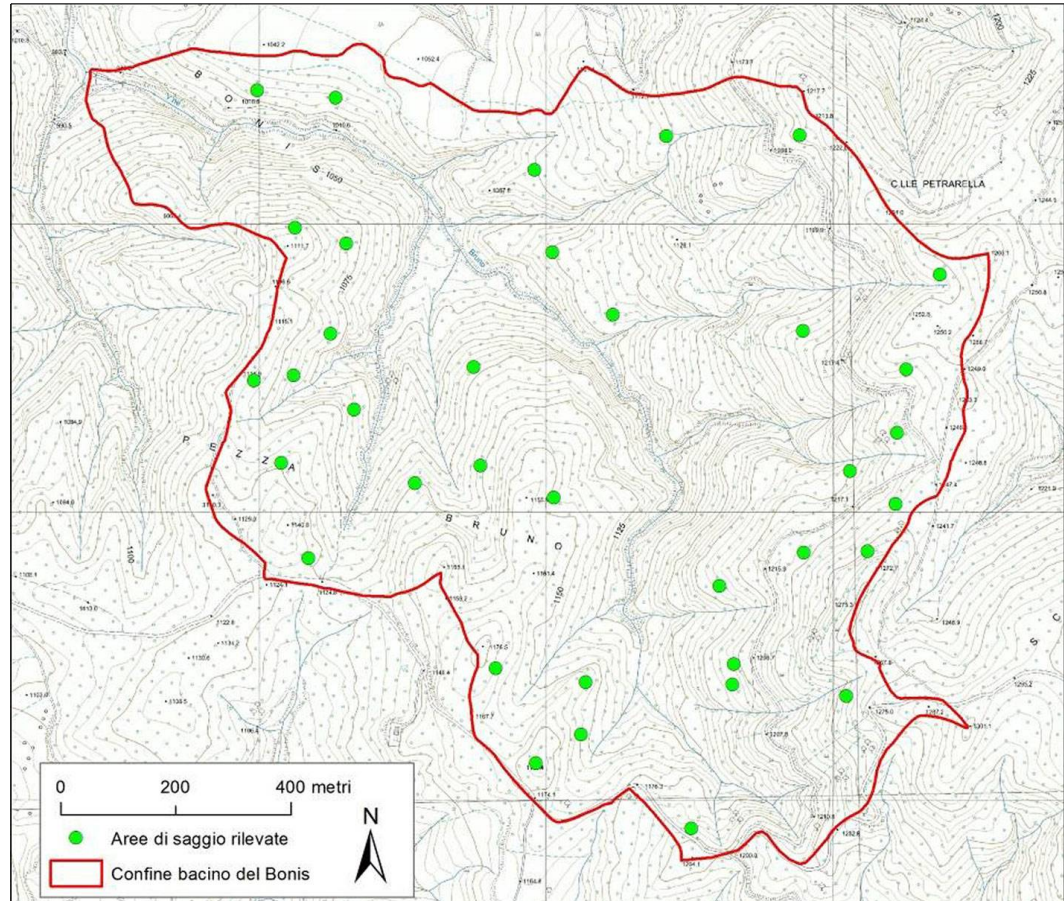


Fig. 2 - Bacino del Bonis con copertura forestale e ubicazione della stazione di misura.

Fig. 3 - Distribuzione spaziale dei *plot* rilevati all'interno del bacino sperimentale del Bonis.



polamento è stato effettuato un campionamento di carotine prelevate a 1.30 m da terra, con succhiello di Pressler, con le quali è in fase di esecuzione la misura dello spessore degli anelli, mediante uno stereomicroscopio binoculare Rinntech Lintab 6, interfacciato ad un computer tramite il *software* TSAPWin V. 4.70d, per la simultanea registrazione dei dati.

Nel complesso, questi rilievi rivestono particolare importanza perché hanno consentito di raccogliere informazioni utili non solo per l'aggiornamento dei dati sulle formazioni forestali presenti all'interno del bacino sperimentale ma anche per la parametrizzazione del modello 3D-CMCC-CNR-FEM.

Rilievo da piattaforma area UAV

Successivamente al rilievo dei parametri dendrometrici delle risorse forestali all'interno del Bacino del Bonis, sono stati pianificati i campionamenti da remoto mediante l'impiego di una piattaforma aerea UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) per l'acquisizione di dati LIDAR e iperspettrali (Fig. 4). La piattaforma aerea ultraleggera utilizzata si configura come un laboratorio mobile *hi-tech* intelligente, in grado di fornire dati multisensoriali ad altissima risoluzione. La piattaforma aerea è composta da una componente aereo-

mobile, a pilotaggio remoto, equipaggiata da sensoristica dedicata all'osservazione prossimale del territorio (*proximal sensing*) e da una stazione di controllo a terra (*ground station*). Sulla piattaforma sono montati i sensori Nano Hyperspec (VNIR 400-1000 μ m) ad alta risoluzione con 270 bande spettrali e 640 bande spaziali, MicroLidar a 32 laser con elevate precisioni (< 2 cm) e un campo di vista orizzontale di 360°.

Il mezzo UAV della piattaforma è costituito dal drone multirottore Skycrane G4 V2 della casa costruttrice tedesca Multirotor Service-Drone, realizzato interamente in fibra di carbonio e con motori alimentati da una coppia di batterie Lipo 5S con capacità di 8000 mA. I dati LiDAR sono stati acquisiti mediante emanazione di un laser stratificato. Il laser impatta gli oggetti che si interpongono tra il livello del suolo sottostante ed il sensore, il quale restituisce una nuvola di punti.

Il protocollo dei rilievi ha previsto il sorvolo del 25% delle aree di saggio campionate all'interno del Bonis. In tutte le aree di riferimento i limiti del piano di volo sono stati di 30 \times 30 m, ad eccezione dell'area in cui sarà presente la torre *Eddy Covariance* in cui sono stati impostati limiti pari a 40 \times 40 m. Le missioni

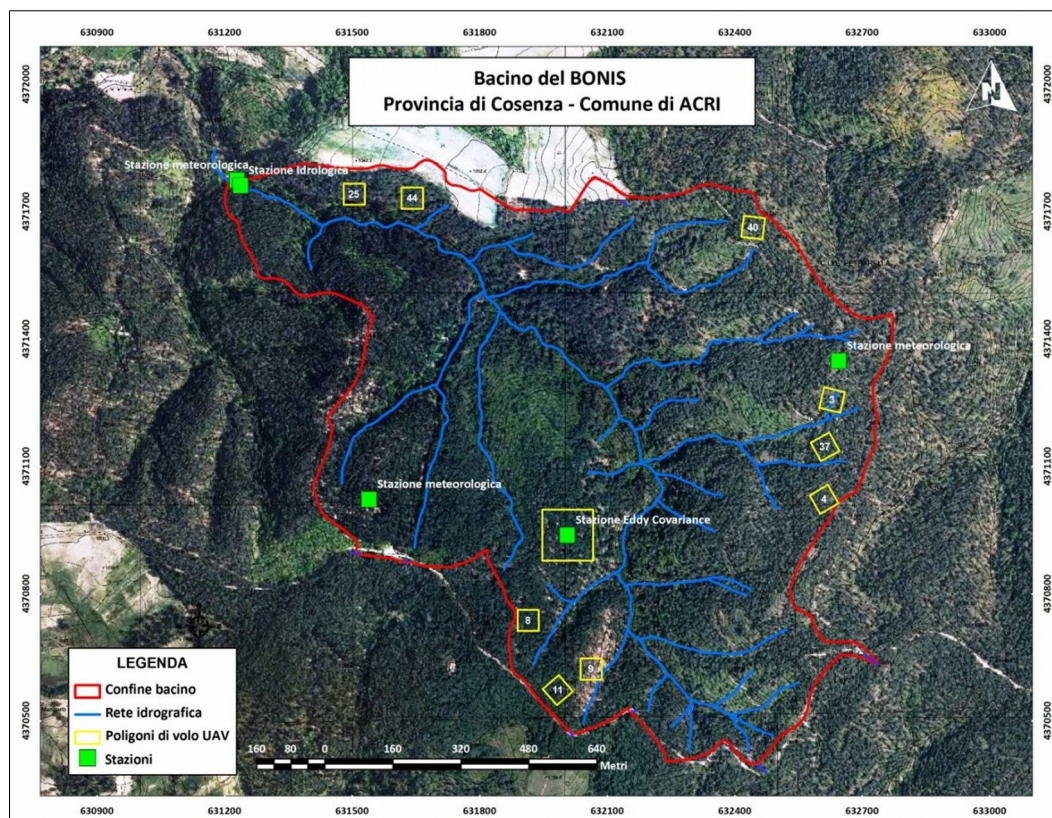


Fig. 4 - Aree campionate con piattaforma multi-sensore all'interno del Bacino del Bonis.

e il piano di volo sono stati pre-programmati in ufficio e trasferiti al drone direttamente in campo.

In Fig. 3 sono riportate le aree di saggio campionate per l'acquisizione del dato LiDAR e iperspettrali.

Protocollo di campionamento del suolo

La pianificazione di uno schema ottimale di campionamento ha rivestito particolare importanza poiché il numero e la disposizione dei campioni influenzano i tempi e i costi delle analisi in campo e laboratorio, oltre che l'affidabilità dei risultati.

L'ubicazione dei campioni è stata ottimizzata tramite l'algoritmo dello *Spatial Simulated Annealing* (SSA) implementato all'interno del software SANOS (Van Groenigen & Stein 1998, Van Groenigen et al. 2000, Van Groenigen 2000, Castrignanò et al. 2006). Tramite una procedura iterativa, l'algoritmo SSA genera una configurazione casuale di punti, modificata ad ogni iterazione con la finalità di soddisfare un criterio di ottimizzazione o di minimizzare un indice areale di efficienza.

Disponendo di limitate informazioni pedologiche pregresse per l'area di studio (Busoni et al. 2002, Castrignanò & Buttafuoco 2004), il campionamento è stato ottimizzato e suddiviso in due fasi. In una prima fase è stata ottenuta una copertura rappresentativa dell'area in esame. Nella seconda fase il campio-

namento è stato intensificato nelle aree con maggiore variabilità spaziale (Lucà et al. 2016). Considerata l'estensione del bacino in esame (139 ha) e tenendo conto dei costi derivanti sia dalle attività di campionamento che da quelle di laboratorio, si è deciso di prelevare circa un campione per ogni ettaro, escludendo le aree con affioramento del substrato granitico e quelle in prossimità del corso d'acqua.

L'allocazione della prima metà dei campioni è stata effettuata minimizzando la distanza fra ogni punto non campionato del dominio e il punto di campionamento più prossimo (criterio MMSD, *Minimized Means of Shortest Distances*) su una griglia con risoluzione di 5 m.

La seconda metà dei campioni è stata invece allocata utilizzando una funzione che, attribuendo un peso più elevato ai settori da studiare con maggiore dettaglio, consente di ottenere una distribuzione più fitta per le aree in questione. Poiché le proprietà dei suoli sono caratterizzate da una maggiore variabilità in corrispondenza di aree con pendenze elevate, il campionamento è stato infittito per mezzo del criterio WMSD (*Weighted Means of Shortest Distances*) utilizzando la pendenza come variabile peso (Lucà et al. 2016).

Seguendo lo schema di campionamento ottimizzato tramite i due criteri dell'algoritmo SSA, il campio-

Tab. 1 - Valori di Y e R^2 relativi alla correlazione tra la stazione meteo di Cecita e quella della torre *Eddy Covariance*.

| Grandezza Meteo | Retta di Regressione | R^2 |
|---------------------------|----------------------|-------|
| Precipitazione | $Y = 0.95x + 0.4$ | 0.61 |
| Temperatura media | $Y = 1.035x + 2.67$ | 0.95 |
| Temperatura minima | $Y = 1.09x + 4.95$ | 0.82 |
| Temperatura massima | $Y = 0.92x + 1.28$ | 0.93 |
| Radiazione solare globale | $Y = 1.01x - 8.65$ | 0.85 |
| Umidità relativa | $Y = 1.10x - 7.06$ | 0.73 |

namiento della porzione superficiale di suolo è stato effettuato tramite cilindri in acciaio di volume noto, alle profondità 0-0.5 m e 0-0.20 m. Rispetto al prospetto iniziale, l'ubicazione di alcuni punti è stata spostata in funzione dei vincoli fisiografici (ad es., scarpate di frana, affioramenti rocciosi) o evidenti fenomeni di pedoturbamento di pregresse situazioni naturali, riscontrati in fase di rilevamento sul campo. Per ciascun punto di campionamento, le coordinate sono state registrate utilizzando il GPS differenziale Trimble 5700 in modalità RTK. I campioni prelevati sono stati sottoposti in laboratorio ad analisi chimico-fisiche-biologiche e spettrali.

Protocollo di ottenimento dei dati meteo

Il modello 3D-CMCC-CNR-FEM necessita in *input* di fattori meteorologici su scala giornaliera riferite all'area in cui ricade il bacino del Bonis. Le principali grandezze meteo richieste dal modello sono costituite da precipitazione, temperatura minima e massima dell'aria, radiazione solare globale e deficit della pressione di vapore (in alternativa, umidità relativa dell'aria). Tenendo conto della disponibilità, qualità e completezza delle serie storiche registrate dalle stazioni ubicate in prossimità dell'area di studio, la scelta della stazione di riferimento è ricaduta su quella di Cecita, posta ad alcuni chilometri di distanza dal Bonis. Per tale stazione risultano disponibili serie storiche di precipitazione, a partire dal 1923 fino al 2016, di temperatura media, minima e massima dal 1955 al 2016, di radiazione globale e umidità dell'aria dal 2000 al 2016, sia pur con alcune lacune temporali.

Per verificare che la stazione di Cecita (CS) fosse rappresentativa della variabilità climatica del Bonis, è stato effettuato il confronto, riferito al medesimo intervallo temporale (2005-2008), tra i dati registrati da Cecita e quelli misurati dalla torre *Eddy Covariance*, quest'ultima attualmente in fase di risistemazione e temporaneamente non funzionante. Il confronto è stato compiuto per ognuna delle grandezze meteo-

logiche misurate, calcolando i valori di R^2 (Tab. 1).

Per completare le serie storiche giornaliere delle grandezze meteorologiche relative alla stazione di Cecita, si è scelto di ricorrere all'uso di MT-CLIM (Glassy & Running 1994), un modello di simulazione del microclima montano, sviluppato negli anni passati dallo *United States Department of Agriculture* (USDA).

Per un singolo anno di simulazione, il modello MT-CLIM consente di generare valori giornalieri di radiazione solare globale e deficit della pressione di vapore partendo da precipitazione e temperatura dell'aria. Il modello richiede in *input* parametri relativi alla "base", cioè alla stazione per la quale sono disponibili le serie storiche delle grandezze meteorologiche di *input* (Cecita), e al "site", cioè all'area per la quale si intende generare i dati di *output* (Bonis). I parametri richiesti sono costituiti da: latitudine, quota, pendenza, esposizione dei versanti, gradiente di temperatura minima e massima dell'aria, precipitazione media annuale. Inoltre, sono richiesti come *input* i valori medi giornalieri di precipitazione, temperatura minima e massima registrati dalla stazione "base" in corrispondenza di uno specifico anno.

Protocollo di simulazione, calibrazione e validazione del modello

Il modello sarà inizializzato fornendo come *input* i dati dendrometrici e di biomassa legnosa, oltre che i dati meteo e quelli relativi alla componente suolo.

Verranno forniti come *input* i dati meteorologici relativi alle serie storiche giornaliere registrate dalla stazione di Cecita e completate attraverso l'uso di MT-CLIM, oltre ai dati riferiti alle proprietà chimico-fisiche del suolo, quali ad esempio lo spessore dello strato di suolo e la tessitura.

Inoltre, verrà effettuata la fase di parametrizzazione del modello attraverso l'uso di parametri eco-fisiologici riferiti al pino laricio, i cui valori saranno individuati principalmente tramite ricerca bibliografica, utilizzando pubblicazioni scientifiche e dati uti-

lizzati da altri modelli di simulazione. Per i parametri eventualmente mancanti si farà riferimento a specie forestali ecologicamente simili al pino laricio. Una volta definiti i dati di *input* e completata la fase di parametrizzazione, la fase successiva consisterà nell'analisi di sensitività e calibrazione del modello, prima di effettuare le simulazioni relative alla crescita forestale del bacino. Per ridurre l'incertezza nell'attribuzione dei valori associati ai parametri, si farà riferimento ai metodi statistici presenti in letteratura comunemente usati per parametrizzare i modelli ecologici. Il modello verrà quindi calibrato ed ottimizzato mediante il metodo Bayesiano (Bloom & Williams 2015, Van Oijen et al. 2011, 2005, Svensson et al. 2008, Chevallier et al. 2006) misurandone la relativa incertezza degli *output*. Tale metodo nella pratica distribuisce i valori di *input* e *output* nella forma di una distribuzione di probabilità in un processo di iterazione, quale ad esempio la catena di Monte Carlo (Van Oijen et al. 2005), restituendone il miglior compromesso tra dati in *input* e risultati del modello. Potendo disporre di una serie decisamente limitata di dati relativi alla GPP misurati dalla stazione della torre *Eddy Covariance* dal 2005 al 2008, la fase di calibrazione ed ottimizzazione sarà compiuta in riferimento al primo anno disponibile (2005). I successivi tre anni verranno invece utilizzati per la sua validazione.

In questa fase si sperimenterà come la gestione forestale influisca sulla crescita della foresta e sulla fornitura dei servizi ecosistemici, attraverso la pianificazione di tre tipologie di trattamento. Il primo è uno "scenario" di controllo, in cui non sarà effettuato nessun intervento, il secondo applicando un diradamento classico di gestione delle pinete e il terzo con un intervento innovativo, definito selettivo, in base a quanto esposto nel progetto LIFE "SelPiBio-Life" (Bettini et al. 2016) che studia interventi multifunzionali per il pino nero.

Un'altra fase fondamentale consiste nella validazione del modello applicato sul Bonis, per valutarne le prestazioni. In questa fase, i valori simulati di GPP e NPP, a differenti scale temporali e per le differenti pratiche di gestione previste, saranno confrontati con quelli misurati dalla stazione *Eddy Covariance* del Bonis nei rimanenti anni a disposizione (2006-2008), mentre la parte di produttività primaria potrà anche essere confrontata con i dati di produttività ottenuti dai rilievi dendrometrici e dai dati rilevati da piattaforma aerea UAV.

Verranno effettuate le simulazioni del modello per ognuno dei tre trattamenti di gestione forestale pre-

visti per il Bonis, calcolando per ogni applicazione le grandezze di *output* relative alla crescita forestale.

Risultati attesi

I parametri raccolti rispetto a dati dendrometrici, dati di suolo e dati meteorologici confluiranno nel database di progetto e, oltre ad essere utilizzati per le simulazioni modellistiche qui descritte, saranno inseriti nel Sistema Osservativo Integrato delle Risorse Forestali della Calabria (SIRFOR), prodotto dal laboratorio pubblico-privato ALForLab.

Nelle precedenti versioni, il modello ha fornito risultati di qualità decisamente elevata per 11 foreste europee di diverse tipologie (decidue, sempreverdi e con specie forestali miste). È stata riscontrata una correlazione elevata tra la GPP e la produttività simulata e quella osservata, come altresì confermato dai valori degli indici statistici calcolati (Collalti et al. 2016).

Alla luce delle buone prestazioni del modello sui siti europei, per i popolamenti di una specie sempreverde (il pino laricio) presenti sul bacino del Bonis sono attesi risultati altrettanto positivi, con valori di GPP simulati che risultino prossimi a quelli osservati nei 3 anni disponibili (2006-2008) non utilizzati per la calibrazione. Si prevede che il modello sia in grado di stimare gli andamenti di grandezze quali la produttività e gli incrementi di biomassa, che potranno essere confrontati con i dati di accrescimento rilevati nella aree di saggio, anche tenendo conto delle variazioni che si verificano in corrispondenza degli interventi di gestione forestale previsti, in particolare dei diradamenti e dei tagli selettivi.

Discussione

Il lavoro svolto finora si fonda su alcuni elementi che costituiscono una solida base di partenza. Oltre a disporre di un modello di simulazione che si è dimostrato predittivo fornendo ottimi risultati in altri siti di foreste sempreverdi e decidue, nell'area del Bacino del Bonis è stata compiuta una campagna di rilievi dendrometrici e di parametri del suolo particolarmente dettagliata e intensiva che ha consentito di delineare un quadro chiaro della copertura forestale e delle caratteristiche dei suoli del bacino. Ciò contribuirà a definire un'adeguata inizializzazione del modello e fornirà anche informazioni sulla validazione e sul confronto tra dati modellizzati e dati misurati.

Non mancano, tuttavia, elementi che andranno opportunamente valutati per determinare la validità del lavoro compiuto, quali l'impossibilità di disporre di serie storiche sufficientemente estese misurate da

una stazione meteorologica installata all'interno del Bacino del Bonis, con la conseguente scelta di ricorrere ad una stazione esterna al bacino, quella di Cecilia. Inoltre, è stato necessario generare i dati di radiazione globale e VPD tramite MT-CLIM, non potendo disporre di serie storiche misurate sufficientemente estese per tali grandezze.

Un ulteriore fattore da tenere particolarmente in considerazione è costituito dal ristretto intervallo temporale, compreso tra il 2005 e il 2008, sul quale si effettueranno la calibrazione e la validazione del modello per la parte di fotosintesi lorda (GPP). A questo proposito, i dati di accrescimento che si otterranno con l'analisi delle carote legnose e l'analisi dei dati strutturali dei rilievi precedenti potranno fornire un supporto per valutare il comportamento del modello rispetto agli accrescimenti.

Il modello è attualmente pronto per partire con le simulazioni che potranno successivamente essere ampliate ad altre aree test del progetto ALForLab, contribuendo ad una quantificazione su scala vasta di importanti servizi ecosistemici delle foreste calabresi.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato realizzato nell'ambito del progetto "ALForLab" (PON03PE 00024 1) cofinanziato dal Programma Operativo Nazionale Ricerca e Competitività (PON R&C) 2007-2013, attraverso il Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR) e risorse nazionali (Fondo di Rotazione (FDR) - Piano di Azione e Coesione (PAC) MIUR).

Bibliografia

Alkama R, Cescatti A (2016). Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science* 351 (6273): 600-604. - doi: [10.1126/science.aac8083](https://doi.org/10.1126/science.aac8083)

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. - doi: [10.4129/ifm.2014.4.01](https://doi.org/10.4129/ifm.2014.4.01)

Bellassen V, Luyssaert S (2014). Carbon sequestration: managing forests in uncertain times. *Nature* 506: 153-155. - doi: [10.1038/506153a](https://doi.org/10.1038/506153a)

Bettini G, Bianchetto E, Butti F, Cantiani P, Chiellini C, De Meo I, D'Errico G, Fabiani A, Gardin L, Graziani A, Landi S, Marchi M, Mazza G, Mocali S, Montini P, Plutino M, Roversi PF, Salerno E, Samaden S, Canencia IS, Torrini G (2016). Il diradamento selettivo - Accrescere stabilità e biodiversità in boschi artificiali di pino nero. *Compagnia delle Foreste Srl, Arezzo*.

Bloom AA, Williams M (2015). Constraining ecosystem

carbon dynamics in a data-limited world: integrating ecological "common sense" in a model-data fusion framework. *Biogeosciences* 12: 1299-1315. - doi: [10.5194/bg-12-1299-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-1299-2015)

Bovio G, Callegari G, Camia A, Francesetti A, Iovino F, Porto P, Veltri A (2001). Prove sperimentali per valutare l'impatto degli incendi boschivi sull'idrologia superficiale e sull'erosione dei suoli (Primi risultati). *L'Italia Forestale e Montana LVI* (4): 233-256.

Busoni E, Dimase AC, Buttafuoco G (2002). Soils description in the Don Bruno plot. Technical Report, CNR - Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo, Sezione di Cosenza, Italy.

Callegari G, Ferrari E, Garfi G, Iovino F, Veltri A (2003). Impact of thinning on the water balance of a catchment in Mediterranean environment. *The Forestry Chronicle* 79 (2): 301-306. - doi: [10.5558/tfc79301-2](https://doi.org/10.5558/tfc79301-2)

Castrignanò A, Buttafuoco G (2004). Geostatistical stochastic simulation of soil water content in a forested area of south Italy. *Biosystems Engineering* 87 (2): 257-266. - doi: [10.1016/j.biosystemseng.2003.11.002](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.11.002)

Castrignanò A, Lopez R, Buttafuoco G, Ciampalini R (2006). La simulazione annealing per la pianificazione del campionamento: applicazione in tre areali. *Rivista di Ingegneria Agraria* 2: 1-10.

Chevallier F, Viovy N, Reichstein M, Ciais P (2006). On the assignment of prior errors in Bayesian inversions of CO₂ surface fluxes. *Geophysical Research Letters*. - doi: [10.1029/2006GL026496](https://doi.org/10.1029/2006GL026496)

Collalti A, Perugini L, Santini M, Chiti T, Nolè A, Matteucci G, Valentini R (2014). A process-based model to simulate growth in forests with complex structure: evaluation and use of 3D-CMCC forest ecosystem model in a deciduous forest in Central Italy. *Ecological Modelling* 272: 362-378. - doi: [10.1016/j.ecolmodel.2013.09.016](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.09.016)

Collalti A, Marconi S, Ibrom A, Trotta C, Anav A, D'Andrea E, Matteucci G, Montagnani L, Gielen B, Mammarella I, Grunwald T, Knohl A, Berninger F, Zhao Y, Valentini R, Santini M (2016). Validation of 3D-CMCC forest ecosystem model (v. 5.1) against eddy covariance data for 10 European forest sites. *Geoscientific Model Development* 9: 479-504. - doi: [10.5194/gmd-9-479-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-479-2016)

Floris A, Scrinzi G (2004). Procedure di individuazione, materializzazione e ritrovamento dei punti di campionamento. *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*. Edagricole, Bologna.

Gasparini P, Tabacchi G (2011). *L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005. Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e risultati*. Edagricole, Bologna, pp. 653.

Glassy JM, Running SW (1994). Validating diurnal climatology of the MT-CLIM model across a climatic gradient

- in Oregon. *Ecological Applications* 4 (2): 248-257. - doi: [10.2307/1941931](https://doi.org/10.2307/1941931)
- IPCC (2001). *Climate Change. The scientific basis* (Houghton JT ed). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (2007). *Climate Change. The physical science basis. In: "Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change"*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (2013). *Climate Change. In: "The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change"* (Stocker TF et al. eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- IPCC (2014). *Climate Change. In: "Summary for policy makers: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects"*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field CB et al. eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Klausmeier CA, Tilman D (2002). Spatial model of competition. *Ecological Studies* 161: 43-78. - doi: [10.1007/978-3-642-56166-5_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56166-5_3)
- Longobardi A, Buttafuoco G, Caloiero T, Coscarelli R (2016). Spatial and temporal distribution of precipitation in a Mediterranean area (southern Italy). *Environmental Earth Sciences* 75: 189. - doi: [10.1007/s12665-015-5045-8](https://doi.org/10.1007/s12665-015-5045-8)
- Lucà F, Ricca N, Matteucci G, Buttafuoco G (2016). Using morphometric attributes to improve the prediction of compositional data: an application to soil texture in a forested catchment. In: *Proceedings of the Conference "GEOENV 2016 Geostatistics for environmental applications"*. Lisbon (Portugal) 6-8 July 2016. Book of abstract, Paper no. 56.
- Naudts K, Chen Y, McGrath Ryder MJ J, Valade A, Otto J, Luysaert S (2016). Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science* 351 (6276): 597-600. - doi: [10.1126/science.aad7270](https://doi.org/10.1126/science.aad7270)
- Pavari A (1916). *Carta delle zone climatico-forestali*. Firenze.
- Svensson M, Jansson P-E, Gustafsson D, Kleja DB, Langvall O, Lindroth A (2008). Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand. *Ecological Modelling* 213: 331-344. - doi: [10.1016/j.ecolmodel.2008.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.01.001)
- Van Groenigen JW, Stein A (1998). Constrained optimization of spatial sampling using continuous simulated annealing. *Journal of Environment Quality* 27 (5): 1078. - doi: [10.2134/jeq1998.00472425002700050013x](https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700050013x)
- Van Groenigen JW (2000). The influence of variogram parameters on optimal sampling schemes for kriging. *Geoderma* 97 (3-4): 223-236. - doi: [10.1016/S0016-7061\(00\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00040-9)
- Van Groenigen JW, Pieters G, Stein A (2000). Optimizing spatial sampling for multivariate contamination in urban areas. *Environmetrics* 11: 227-244. - doi: [10.1002/\(SICI\)1099-095X\(200003/04\)11:2<227::AID-ENV404>3.0.CO;2-#](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-095X(200003/04)11:2<227::AID-ENV404>3.0.CO;2-#)
- Van Oijen M, Rougier J, Smith R (2005). Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data. *Tree Physiology* 25 (7): 915-927. - doi: [10.1093/treephys/25.7.915](https://doi.org/10.1093/treephys/25.7.915)
- Van Oijen M, Cameron DR, Butterbach-Bahl K, Farahbakhshazad N, Jansson PE, Kiese R, Rahnb KH, Werner C, Yeluripati JB (2011). A Bayesian framework for model calibration, comparison and analysis: application to four models for the biogeochemistry of a Norway spruce forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1609-1621. - doi: [10.1016/j.agrformet.2011.06.017](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.017)