

# Metodologia per il monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sulle aree montane delle Alpi Marittime: il progetto di cooperazione transfrontaliera ACLIMO

Filiberto Chiabrando<sup>1</sup> [0000-0002-4982-5236], Francesca Gallitto<sup>2</sup>, Fabio Giulio Tonolo<sup>1</sup> [0000-0001-5783-0951], Chiara Graziani<sup>2</sup>, Saeed Hemmatianzadeh<sup>2</sup>, Andrea Maria Lingua<sup>2</sup> [0000-0002-5930-2711], Stefania Manca<sup>2</sup>, Paolo Felice Maschio<sup>2</sup> [0000-0001-7706-9354], Francesca Matrone<sup>2</sup> [0000-0002-9160-1674], Parastoo Mohseni<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Torino, Italy –  
(filiberto.chiabrando@polito.it, fabio.giuliotonolo@polito.it)

<sup>2</sup> Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria dell’Ambiente, del Territorio e delle  
Infrastrutture, Torino, Italy – (francesca.gallitto@polito.it, s305596@studenti.polito.it,  
saeed.hemmatianzadeh@studenti.polito.it, andrea.lingua@polito.it, stefania.manca@polito.it,  
paolo.maschio@polito.it, francesca.matrone@polito.it, parastoo.mohseni@studenti.polito.it)

## 1 Introduzione

Il progetto qui proposto nasce dalla collaborazione di ricerca tra il Politecnico di Torino e APAM (Ente di gestione delle Aree Protette delle Alpi Marittime) nell’ambito del progetto Francia-Italia ALCOTRA (Alpi Latine COoperazione TRAnsfrontaliera) 2021/2027, che coinvolge parchi ed enti italo-francesi. In particolare: il *Parc National du Mercantour*, l’Ente di Gestione delle Aree Protette delle Alpi Marittime (APAM), il *Parc National des Ecrins*, l’Ente di gestione dei Parchi delle Alpi Cozie, il *Parc national de la Vanoise*, il Parco Nazionale Gran Paradiso, il Parco Naturale Regionale delle Alpi Liguri e il Comune di Cuneo.

Gli obiettivi della collaborazione includono l’analisi degli impatti dei cambiamenti climatici sulle regioni montane del Parco delle Alpi Marittime, con particolare attenzione a ghiacciai, foreste, praterie, torbiere, zone umide e risorse idriche [1]. Inoltre, il progetto si propone di supportare la gestione del territorio attraverso lo studio delle condizioni di rischio e vulnerabilità, oltre alla previsione delle possibili evoluzioni dinamiche future.

## 2 Metodologia

La metodologia è basata su un approccio multi-piattaforma, multi-sensore e multi-scala, quest’ultima su tre livelli: piccola, media e grande scala (Fig. 1), che prevede l’identificazione di un flusso di lavoro standardizzato, basato su algoritmi consolidati e robusti, a supporto delle attività di monitoraggio e dei processi decisionali di APAM.

Le analisi a **piccola scala** utilizzano immagini satellitari per l'individuazione di trend e variazioni nell'area di studio, in particolare relativi a innevamento, vegetazione, uso del suolo e livello dell'acqua dei laghi alpini. A questo scopo vengono utilizzati sia il servizio *Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS<sup>1</sup>) sia le immagini acquisite dalle costellazioni Landsat e Sentinel in un arco temporale di circa 20-25 anni nei mesi di aprile (periodo generalmente di massimo innevamento in base ai dati Arpa Piemonte - Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale), giugno (massimo vigore della vegetazione e in generale massimo livello idrico dei laghi) e agosto (per analizzare i nevai perenni e residui e il livello idrico dei laghi in tarda estate). I trend spaziali di copertura del suolo verranno poi comparati con i dati delle stazioni meteorologiche di Arpa Piemonte situate nei pressi del Parco (archivio a partire dagli anni '80); tali dati saranno anche utilizzati per validare ulteriormente le stime dei parametri ambientali fornite dal servizio Copernicus CLMS.

Per la **media scala** il focus è sulla vegetazione, sulle aree umide e sui ghiacciai. I dati da fotogrammetria aerea, laddove possibile multispettrali, sono utilizzati per poter realizzare una carta di copertura del suolo aggiornata e a maggiore risoluzione geometrica del dataset *Corine Land Cover*, attraverso una classificazione automatica o semiautomatica, anche mediante tecniche di intelligenza artificiale, in particolare di *deep learning*.

Infine, per la **grande scala**, con densità di informazione e precisioni di posizionamento almeno decimetriche, sono analizzati due laghi alpini, considerati tra gli indicatori chiave del cambiamento climatico [2]: il lago Brocan e il Vej del Bouc (Fig. 1). In entrambi sono stati effettuati rilievi batimetrici, rilievi da drone con sensori a colori reali e multispettrali. Anche in questo caso, verrà utilizzato un approccio basato su tecniche di intelligenza artificiale applicate alle immagini aeree per il riconoscimento automatico di elementi d'interesse nei due bacini idrici, come piante erbacee e arbustive alloctone o per la ricostruzione automatica della batimetria in acque poco profonde.

L'elenco dei dataset e sensori utilizzati è riassunto in Tabella 1.

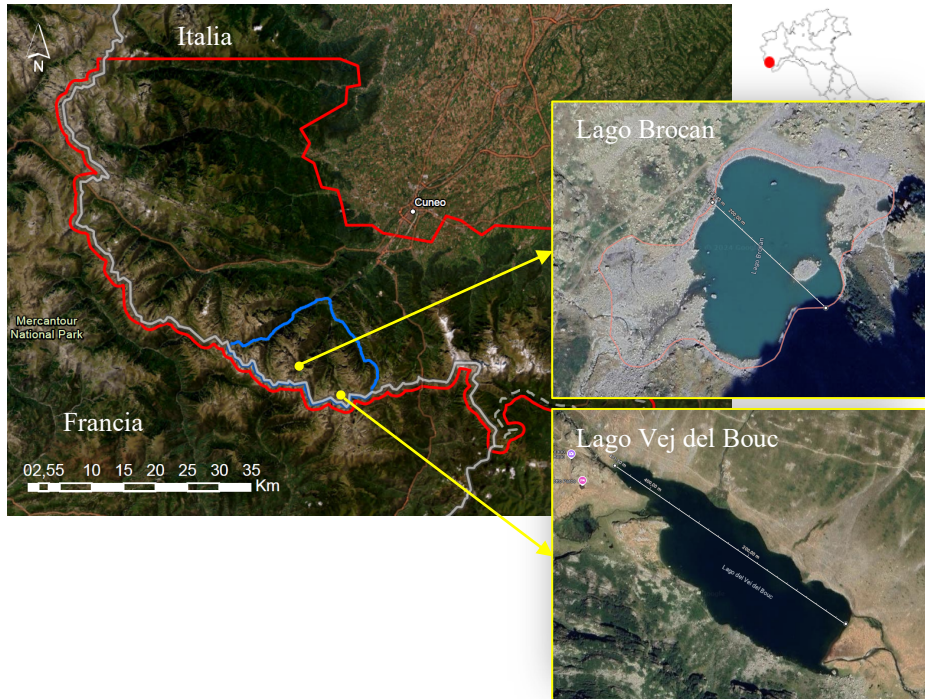
### 3 Risultati preliminari

Per tutte le scale di studio sono stati già acquisiti i primi set di dati e si è proceduto all'elaborazione di parte di essi per la validazione e finalizzazione della metodologia proposta.

In particolare, nel mese di luglio 2024 si è concluso il primo sopralluogo dei due laghi, durante il quale si è potuto testare l'ecoscandaglio e un ROV di superficie, la *BlueBoat USV (Uncrewed Surface Vessel)*. Sono inoltre stati acquisiti dati da drone multitemporali nei mesi di luglio e ottobre 2024.

---

<sup>1</sup> <https://land.copernicus.eu/>



**Fig. 1.** Superficie dell'area di interesse a piccola scala (rosso) e a media scala (blu) e laghi in analisi per la grande scala (giallo).



**Tab. 1** - Elenco sensori e dataset.

<b>Piccola scala</b>	<b>Landsat 5<sup>2</sup> e Landsat 8<sup>3</sup></b> Immagini dei mesi aprile, giugno e agosto 1990-2013 (Landsat 5), 2013-2015 (Landsat 8) Risoluzione spaziale 30 – 120 m (Landsat 5) 15 – 30 – 100 (Landsat 8) Risoluzione spettrale 7 bande (Landsat 5), 11 bande (Landsat 8)
	<b>Sentinel-2</b> Immagini dei mesi aprile, giugno e agosto 2015-2023 Risoluzione spaziale 10 – 20 - 60 m Risoluzione spettrale: 13 bande <sup>4</sup>

<sup>2</sup> <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>

<sup>3</sup> <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>

<sup>4</sup> <https://sentinel.esa.int/en/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath>

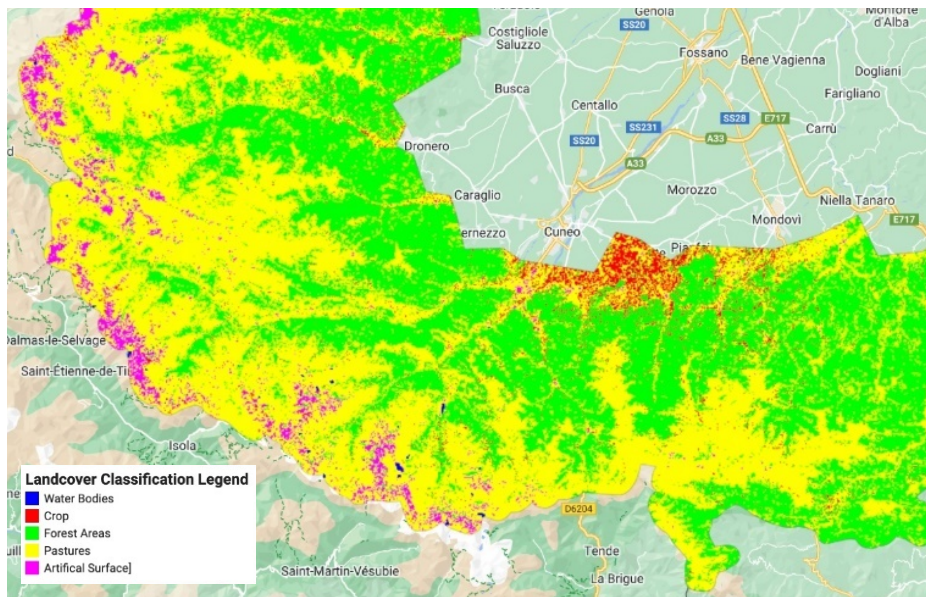
<b>Media scala</b>	<p><b>Voli aerei della Regione Piemonte</b> CGR- Rossi del 1991 (RGB), Rossi Brescia del 2000 (RGB), ICE del 2010 (RGB + NIR), AGEA del 2015-2018-2021 (RGB + NIR)</p>
<b>Grande scala</b>	<p><b>BlueBoat USV, BlueRobotics</b> Velocità massima 3 m/s, Peso 14,5 kg, Portata per controllo ~ 250 m Autonomia con 8 batterie 62 h</p>  <p><i>equipaggiata con</i> <b>Echosounder STX-Echos</b> Range di profondità 0.2 - 200 m, Risoluzione 8 mm, Angolo di acquisizione 8° GNSS:GPS, GLONASS, BDS, GALILEO, QZSS Peso 1200 g</p>
	 <p><b>DJI Mavic 3M</b> GNSS RTK, 5 sensori, RGB 4/3 17.3x13 mm, 20 Mpix, 5280x3956, Pixel size 3.3x3.3 μm Lunghezza focale 13 mm, Multispec 1/2.8", 6.058x 4.415mm, 5 MPix, 2592x1944 Bande: Verde (G): 560 ± 16 nm; Rosso (R): 650 ± 16 nm; Red Edge (RE): 730 ± 16 nm; Near-InfraRed (NIR): 860 nm ± 26 nm, Peso 951 g</p>

### 3.1 Piccola scala

Sono stati eseguiti dei primi test di generazione di coperture del suolo (utilizzando come classi il primo livello gerarchico *Corine*) attraverso la classificazione (Fig. 2) delle immagini satellitari Sentinel-2 addestrando il classificatore *Random Forest* disponibile sulla piattaforma *Google Earth Engine* e sfruttando il dato *Corine Land Cover* del 2018 per la definizione dei campioni di addestramento. L'approccio multi-temporale prevede la generazione di un'immagine sintetica, per la quale ogni pixel di

ogni banda multi-spettrale rappresenta il valore mediano delle riflettanze delle singole immagini disponibili nel periodo di interesse.

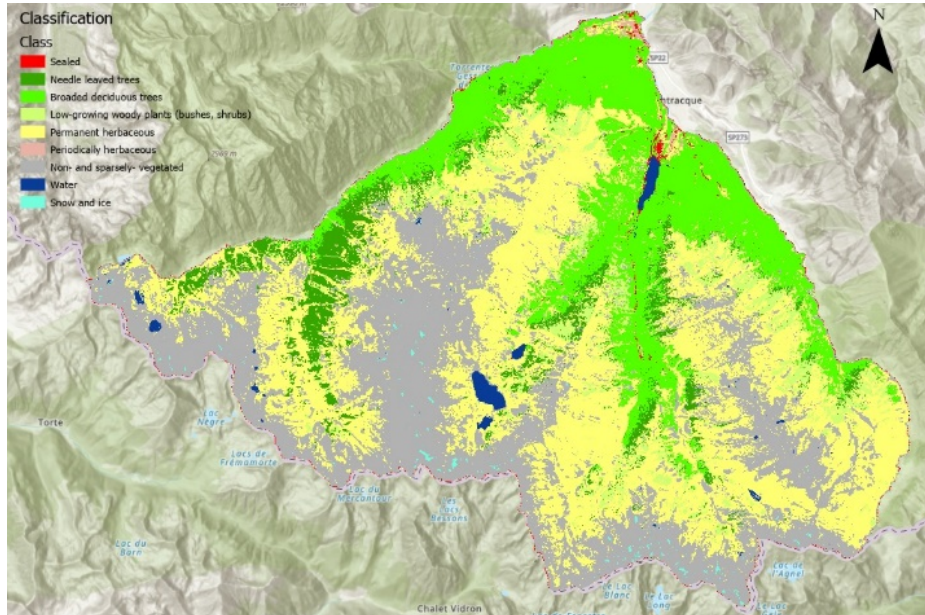
I risultati sono validati attraverso il calcolo della matrice di confusione, sfruttando nuovamente i dati Corine Land Cover (coevi) come dato di *ground truth* (scegliendo campioni diversi da quelli utilizzati per l'addestramento). L'analisi dei primi test ha evidenziato accuratèzze tematiche complessive dell'ordine 82-86 %.



**Fig. 2** - Risultati preliminari della classificazione delle immagini da Sentinel-2.

### 3.2 Media scala

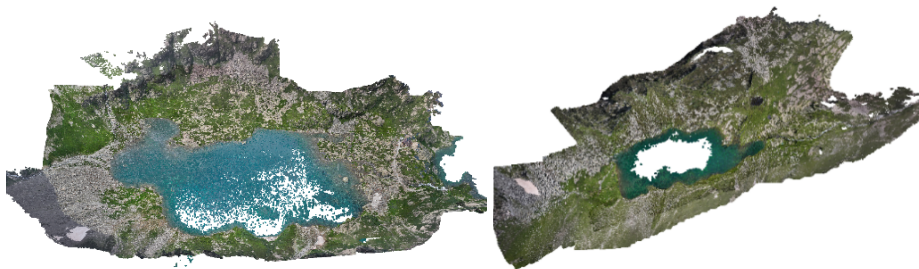
I test di classificazione sono stati svolti su due immagini: l'ortofoto proveniente dal volo aereo ICE 2010 e l'ortofoto del volo aereo AGEA 2018, con risoluzione di 50 cm e 30 cm, rispettivamente. Il processo di classificazione è stato elaborato dal software ESRI ArcGIS Pro, utilizzando approcci di *deep learning*, in particolare i modelli U-Net [3] e MMsegmentation [4]. In Fig. 3 viene mostrato il risultato di uno dei test, svolto con modello U-Net sull'immagine AGEA 2018 con le classi del Corine Land Cover 2018 + Backbone. Per migliorare il processo di classificazione, oltre alle bande del visibile e dell'infrarosso vicino, sono stati considerati il modello digitale di elevazione e l'indice di vegetazione NDVI, con un incremento dell'accuratèzza complessiva pari al 14% (da 66% con solo RGB all'82%).



**Fig. 3** - Test di classificazione AGEA 2018, modello U-Net.

### 3.3 Grande scala

Nelle campagne di acquisizione di Luglio e Ottobre 2024 sono stati eseguiti due voli fotogrammetrici con DJI Mavic 3M con modulo RTK sulle aree dei due laghi alpini considerati, per un totale di 4947 foto acquisite per il lago del Veje del Bouc e 6116 foto per il lago Brocan. Per la prima campagna di acquisizione, l'elaborazione con il software DJI Terra ha prodotto due nuvole di punti, rispettivamente di 28.083.475 punti per il lago Veje del Bouc e 32.467.868 per il Brocan con RMSE tra i 2-3 cm (7 GCPs per il lago del Veje del Bouc e 10 GCPs per il lago Brocan).

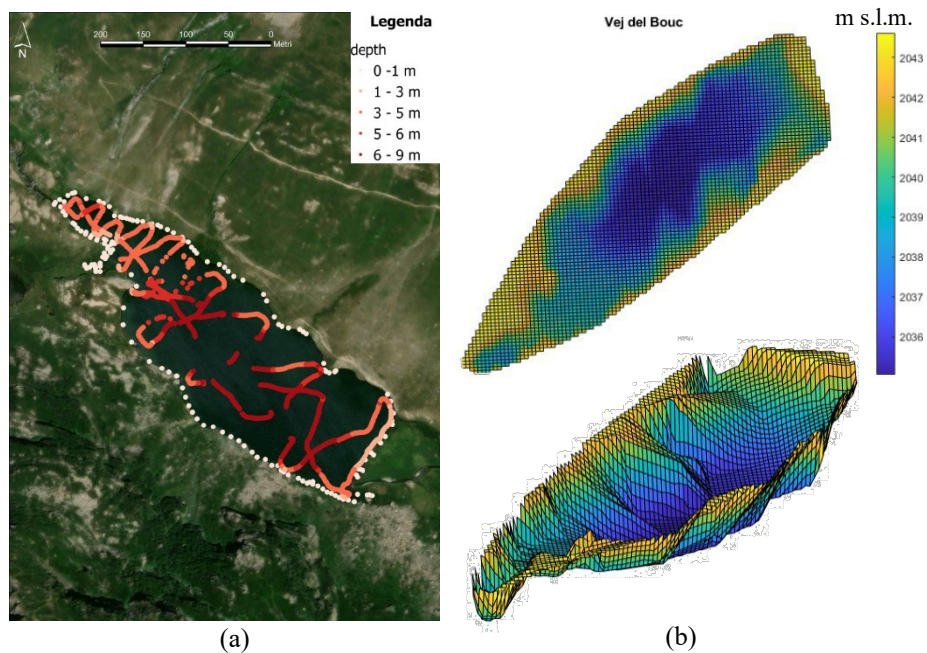


**Fig. 4** - Nuvole di punti fotogrammetriche. A sinistra il lago Brocan, a destra il lago del Veje del Bouc.

Per quanto riguarda il rilievo batimetrico del lago del Veje del Bouc è stato utilizzato l'*echosounder singlebeam* Alpha Wi STX-EchoS. Per poter raccogliere i dati,

l'*echosounder* è stato installato all'interno della BlueBoat USV, la quale, grazie alla sua compattezza e dimensioni ridotte, si è potuta trasportare in situ.

Durante la campagna di acquisizione dati al lago del Vej del Bouc sono stati raccolti 2972 punti, in Fig. 5 (a) è possibile osservare la traccia. La profondità massima riscontrata, al centro del lago, è di 8,59 m. Tramite il software MATLAB R2023a sono stati anche ricostruiti il DTM e il modello tridimensionale del fondale del lago (Fig. 5 b).



**Fig. 5** – Lago del Vej del Bouc: (a) Punti raccolti da ecoscandaglio; (b) DTM ricostruito tramite interpolazione lineare e viste della ricostruzione tridimensionale del fondale.

## 4 CONCLUSIONI

Lo studio, il monitoraggio e l'analisi degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ambienti alpini e montani possono fornire un supporto fondamentale agli enti gestori di questi territori complessi.

I risultati preliminari della metodologia multiscala e multirisoluzione proposta dimostrano come sia possibile raggiungere gli obiettivi del progetto, garantendo livelli di accuratezza adeguati alle diverse scale d'analisi per identificare trend ed evoluzioni dinamiche della copertura vegetale, nevosa e delle risorse idriche.

Le future elaborazioni dei dati permetteranno quindi di studiare le variazioni multitemporali e applicare tecniche di *change detection* per le analisi a piccola e media scala. Per quanto riguarda la grande scala, si applicheranno tecniche di intelligenza

artificiale per l'individuazione automatica delle singole specie vegetali e l'altezza corretta del fondale dei due laghi nelle aree di acque superficiali.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il personale del territorio delle Aree Protette Alpi Marittime per il supporto durante le fasi di acquisizione dati, in particolare (in ordine alfabetico): Davide Barberis, Simone Fogliacco, Luca Gautero, Costanza Luconi, Laura Martinelli, Daniela Quaranta.

## Riferimenti bibliografici

1. Mauro, G.: Cambiamenti Climatici e Foreste Nell'Area Alpina: Telerilevamento a Bassa Risoluzione Spaziale per il Monitoraggio Della Vegetazione Boschiva. *Archivio per l'Alto Adige*, 108/109, pp. 145-165 (2015).
2. Chunqiao S., Bo H., Linghong K., Keith S. R.: Remote sensing of alpine lake water environment changes on the Tibetan Plateau and surroundings: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 92, (2014).
3. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T.: U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical image computing and computer-assisted intervention–MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, proceedings, part III* 18, pp. 234-241, Springer International Publishing (2015).
4. <https://github.com/open-mmlab/msegmentation>. U.c. 22/10/2024