

## L'uso della stereoscopia digitale e dell'analisi morfometrica del MDT per il riconoscimento dei circhi glaciali relitti in Toscana

Francesco Manetti (\*), Lorenzo Arcidiaco (\*\*), Massimo Perna (\*\*),  
Lorenzo Bottai (\*), Guido Lavorini (\*\*\*)

(\*) Consorzio LaMMA, tel. +39 0554483057, fax: +39 055444083, manetti@lamma.rete.toscana.it

(\*\*) Consorzio LaMMA - CNR IBIMET, tel. +39 0554483036, arcidiaco@lamma.rete.toscana.it

(\*\*\*) Regione Toscana, tel. +39 0554383955, fax +39 0554383570, guido.lavorini@regione.toscana.it

### Riassunto

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo lo studio delle morfologie glaciali presenti sul territorio toscano al fine di individuare e circoscrivere i circhi glaciali relitti formatesi durante l'ultimo periodo glaciale nelle aree di crinale Appenninico e delle Alpi Apuane. Al fine di tracciare con precisione le geometrie dei circhi glaciali relitti e analizzare statisticamente le principali variabili morfometriche sono stati realizzati 12 modelli digitali stereoscopici con l'ausilio del software Erdas LPS, utilizzando le foto aeree digitali fornite dalla Regione Toscana. Le attività di fotointerpretazione e digitalizzazione in modalità 3D sono state effettuate con il modulo software *StereoAnalyst - Erdas per ArcGIS 10*.

Le analisi statistiche eseguite sulle geometrie acquisite ed in parte verificate in campagna, hanno permesso di valutare e mettere in luce differenze significative tra le forme presenti in Appennino e quelle identificate sulle Alpi Apuane.

### Abstract

The aim of this paper was to analyze relict glacial morphologies in order to identify the glacial cirques geometry in Tuscany by the aid of stereoscopic digital models. This research was carried out on ridge sites of the Tuscan Apennine and in Apuane Alps. Twelve stereoscopic digital models were realized through the use of the Erdas LPS software using the digital aerial photos provided by tuscan Regional Governement. The photo-interpretation and digitization activities in 3D mode were carried out with the software module StereoAnalyst - Erdas for ArcGIS 10. Finally the main morphometric variables of cirques and the difference between occurrences in tuscan Apennine and in Apuane Alps were assessed.

### Introduzione

Si definiscono circhi glaciali (Evans, Cox, 1974) “conche ad anfiteatro o nicchie prodotte dall'erosione glaciale, larghi avvallamenti dal fondo piatto e poco inclinato aperti sul fianco della montagna poco al di sotto delle creste”. Testimoniano la presenza di un antico ghiacciaio e in genere si presentano come una spianata rocciosa, più o meno ripida, più o meno regolare, circondata quasi sempre su tre lati da erte pareti rocciose e con un ciglio strapiombante sulla valle sottostante. Essi sono la tipica espressione dell'azione esaratrice esercitata da un ghiacciaio. La realizzazione del DB dei circhi glaciali è stata finalizzata all'individuazione e rappresentazione delle aree tutelate per legge di cui alla lettera “e” dell'art. 142 del D.lgs 42/2004, in merito all'integrazione riguardante il Piano del Paesaggio, nell'ambito della revisione del PIT della Regione Toscana.

### Aree di studio

A seguito dell'esame della documentazione raccolta e delle basi cartografiche disponibili sono state circoscritte le aree del territorio toscano dove sussiste la possibilità di individuare morfologie

glaciali, presenti dal termine dell'ultimo periodo glaciale (15.000 anni fa'), nell'ambito delle quali indirizzare la fotointerpretazione.

La ricerca è stata svolta ponendo maggiormente attenzione alle aree a quote più alte del crinale appenninico tosco-emiliano e delle Alpi Apuane (fig.1), in particolare nelle porzioni dove l'acclività minore ha reso possibile un maggior accumulo ed una più lunga conservazione dei ghiacci.

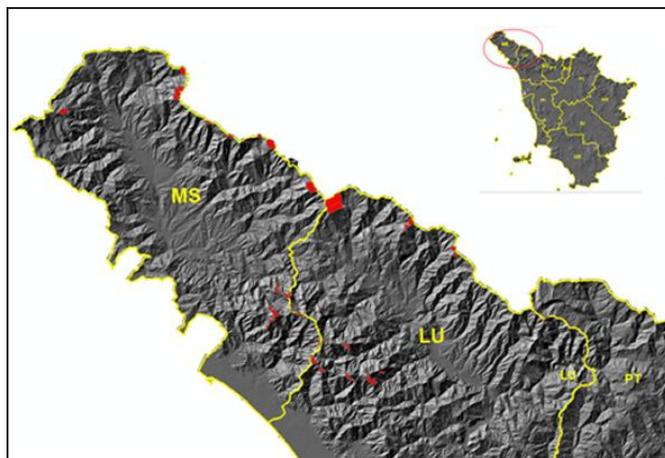


Figura 1 □Aree di studio.

Considerando i meccanismi di formazione di un circo glaciale vediamo che (Baroni, 2004) “al momento del loro sviluppo i circhi si trovano topograficamente al di sopra del limite delle nevi persistenti; per la formazione di un circo è infatti essenziale la presenza di depressioni in grado di consentire l'accumulo di neve al suolo, la sua trasformazione in nevato e, successivamente, la formazione di un ghiacciaio. Una combinazione di processi periglaciali (ruscellamento delle acque di fusione nivale e crioclastismo al margine e alla base del ghiacciaio) determina il progressivo allargamento e approfondimento della depressione che ospita il nevato. L'eventuale incremento degli accumuli di neve determina la formazione di un vero e proprio ghiacciaio che fluisce verso valle con movimento rotazionale. Ne consegue che il ghiacciaio di circo esercita la propria azione erosiva sul fondo e sui margini, determinando un progressivo approfondimento della depressione, una netta accentuazione della concavità del profilo longitudinale e un arretramento della testata.

Il crioclastismo (cicli di gelo/disgelo) e la nivazione (valanghe) agiscono al di sopra del limite superiore del ghiacciaio e verticalizzano le pareti della testata e formando sottili creste aguzze”.

In base alla conoscenza del suddetto meccanismo di formazione e sapendo da letteratura che il limite delle nevi perenni in Appennino Settentrionale durante il massimo glaciale (pressoché sincrono con quello delle Alpi, Würm Principale o Würm III Auct., intorno a 20 mila anni dal presente) era posto fra 1250 e 1550 m (Federici, 2004), è stato possibile individuare le seguenti aree dove indirizzare le attività di fotointerpretazione:

- Intero versante toscano del crinale tosco-emiliano (M. Orsaro, M. Matto, M. Alpe di Succiso nella valle del Lagastrello e sul M. La Nuda e il monte Tondo e più ad Est, M. Giovo e M. Rondinaio);
- Valle del Torrente Sestaione (PT) (nella testata della valle del Sestaione in provincia di Pistoia, vicino all'Alpe Tre Potenze sono stati individuati alcuni circhi glaciali, di cui quattro sul versante sud della valle, disposti in una forma circolare;
- Alpi Apuane (M. Pizzo d'Uccello e il M. Sumbra, Arni tra Passo del Vestito e M. Altissimo, M. Corchia, Panie, M. Borla e M. Sagro).

## Metodi

Attraverso l'utilizzo delle coppie stereoscopiche è stato possibile ottenere una rappresentazione digitale 3D della superficie terrestre utilizzando i parametri delle immagini. Trasformare le immagini in dati GIS 3D coinvolge diversi processi comunemente associati con la fotogrammetria digitale, la strumentazione attuale in questo campo ci consente di utilizzare sia le risorse tradizionali (es. fotografia aerea), sia le immagini satellitari da fotocamera digitale.

Per ottenere la visione 3D abbiamo bisogno di stabilire una relazione matematica tra le immagini, il modello della fotocamera o del sensore e la superficie terrestre questo processo è chiamato "triangolazione" ed è richiesto come input per la creazione di un modello 3D e per la successiva ortorettifica. Per questo studio è stato utilizzato, al fine di creare modelli 3D delle aree di interesse, il software *Erdas LPS*®, mentre per la visualizzazione, l'editing e la raccolta di dati geografici 3D è stata utilizzata l'estensione di *Erdas Stereo Analyst* per *ESRI*® *ArcGis 10*.

Per ottenere la visualizzazione 3D è stato utilizzata la stazione "*Planar*", basata su tecnologia *Stereo Mirror*.

La possibilità di visualizzare e modificare i dati geografici in 3D ha fornito un aiuto sostanziale nell'interpretazione delle forme glaciali. La visualizzazione della superficie terrestre con il supporto stereo 3D, grazie alla profondità dell'immagine e alla ottima definizione della visualizzazione a video fornita dalla stazione *Planar Stereo Mirror* ha consentito di aumentare il dettaglio delle morfologie acquisite. Inoltre, utilizzando il cursore 3D è stato possibile acquisire direttamente i dati di elevazione Z dalle immagini durante il processo di editing.

Per coprire l'area di interesse è stato necessario produrre 12 modelli stereoscopici, utilizzando 450 foto aeree digitali, relative alla campagna AGEA, volo (2010) con utilizzo di DMC01 (Camera Mapping Digital - Intergraph-ZI imaging- virtuale focale lunghezza 0.12m).

## Analisi DTM

Le analisi preliminari delle aree di studio sono state svolte utilizzando il DTM della Regione Toscana attraverso uno studio morfometrico del modello digitale del terreno denominato Topographic Position Index (Jenness, 2006).

Il TPI fornisce la misura di quanto un punto si trova a quota maggiore minore o uguale rispetto ad un intorno di punti predefinito, nel caso del presente lavoro è stato applicato rispetto ai punti circostanti fino ad una distanza di 5 metri con l'obiettivo di individuare preliminarmente le depressioni a conca nelle zone di crinale.

## Fotointerpretazione

Dalla definizione di circo glaciale (Baroni, 2004) sappiamo che questi sono "conche semicircolari dovute all'erosione glaciale e comprendono morfosculture diverse per aspetto ed estensione, ma accumulate dall'aspetto di *depressione a poltrona* delimitata da pareti ripide, quasi verticali con la classica forma ad anfiteatro, di un pavimento a fondo concavo e di una soglia all'entrata costituita da roccia e/o morena, in pianta il bacino è di norma quasi circolare".

Gli elementi distintivi di un circo da fotointerpretare sono stati principalmente tre:

- una testata o corona con pareti rocciose subverticali delineate da sottili creste aguzze;
- una soglia modellata in roccia che lo delimita verso valle e che può sorreggere una morena;
- un pavimento concavo, il quale generalmente delinea una contropendenza e si raccorda alla testata con una netta variazione di pendenza.

Tale descrizione caratterizza con precisione gli elementi di un circo che si sia sviluppato in modo completo e che non abbia subito fenomeni erosivi e/o carsici dal momento della completa fusione del ghiaccio.

Considerato che gli areali oggetto del presente studio riferiscono a morfologie relitte di circo glaciale, i processi di degradazione hanno causato in alcuni casi l'obliterazione totale o parziale delle morfologie originarie lasciando, ad esempio coni e falde di detrito che lasciano la base delle pareti della testata occupando il pavimento. Questo aspetto è particolarmente evidente nelle Alpi

Apuane dove forme, spesso anche non completamente evolute, sono state in seguito sottoposte ai processi di degradazione dal termine dell'ultima glaciazione. I suddetti motivi legati alla degradazione, hanno impedito in alcune aree, di individuare e tracciare i contorni che racchiudono possibili aree di circo a valle degli orli di circo glaciale che erano già presenti negli archivi del Continuum Geologico e della Banca dati geomorfologica della Regione Toscana.

Queste considerazioni hanno inoltre guidato la scelta, concordata con la committenza della Regione Toscana, di tracciare gli orli dei circhi glaciali direttamente sulle creste data la difficoltà di individuare le tracce degli antichi i limiti di riempimento da parte del ghiacciaio sulle pareti al di sotto delle creste.

### Digitalizzazione 3D

“In funzione del livello di glacializzazione di una catena montuosa, i circhi possono svilupparsi isolatamente o in gruppi, dando eventualmente origine a circhi coalescenti. Alla testata delle valli si sviluppano comunemente forme molto allungate (circhi di valle) o disposte a gradinata (circhi in gradinata)” (Baroni, 2004). Nel dataset tali specificità sono state considerate riportando le seguenti 4 categorie: circo, circhi coalescenti, circhi in gradinata e in due casi, circhi di valle.

Dato che l'oggetto della fotointerpretazione riguarda esclusivamente forme relitte è stato indicato approssimativamente lo stato generale di conservazione delle morfologie originarie dividendo le geometrie areali in quattro categorie ottimo, buono, mediocre e scarso stato di conservazione.

Gli elementi lineari quali, gli orli di circo glaciale e le soglie, sono stati anch'essi suddivisi in base allo stato di conservazione il quale implicitamente indica anche il grado di affidabilità della linea acquisita in fase di digitalizzazione

Sono stati identificati quindi quattro tipologie di limiti così descritti (fig.2):

1. Orlo di circo glaciale - nei casi in cui è stato possibile riconoscere il limite sulle creste o su variazioni nette di pendenza delle pareti.
2. Soglia di circo glaciale – nei casi in cui è stato possibile riconoscere la soglia con la scarpata sottostante.
3. Limite supposto orlo – nei casi in cui il limite non era ben riconoscibile, dove ad esempio una cresta ha subito fenomeni di crollo
4. Limite supposto soglia – in tutti i casi in cui il limite non era ben riconoscibile, dove ad esempio la scarpata è stata erosa dall'incisione di un torrente.

Il grado di affidabilità complessivo dato dai limiti è stato attribuito anche al poligono del circo individuando approssimativamente, lo stato di conservazione generale a cui accennavamo in precedenza. La fotointerpretazione in stereoscopia ha portato al tracciamento di 80 poligoni riferibili a singoli circhi glaciali o insiemi di piccoli circhi non distinguibili singolarmente .

L'utilizzo della stazione con tecnologia *Stereo Mirror* ha consentito di tracciare le geometrie lineari con alta precisione, maggiore di quanto sarebbe stato possibile fare digitalizzando in 2D anche per quanto riguarda le coordinate x, y, data la possibilità di visualizzazione di rilievi (creste) e depressioni attraverso la visione stereoscopica.

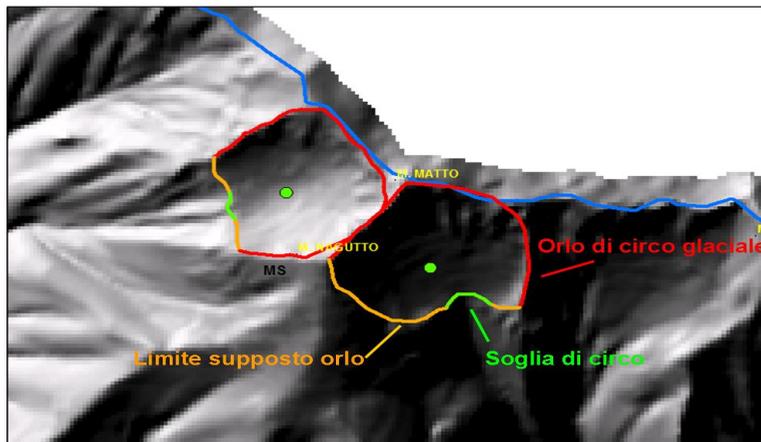


Figura 2 □ Monte Matto (MS) esempio dei limiti individuati (shaded relief - 1:10.000 DTM).

### Sopralluoghi di verifica

Per i casi in cui si sono manifestate particolari difficoltà nel riconoscimento delle geometrie dei circhi glaciali nel corso della fotointerpretazione si è provveduto ad organizzare dei sopralluoghi di verifica che hanno riguardato le seguenti località: Passo del Vestito (LU), Valle del Sestaione (PT), Valle di Equi (MS), M. Tondo (LU).

In particolare i sopralluoghi hanno avuto lo scopo di appurare l'effettiva presenza di forme glaciali relitte considerando sia lo stato di evoluzione da esse raggiunto, sia il successivo rimodellamento da parte degli agenti atmosferici, per arrivare ad escludere le forme dovute ad agenti esogeni diversi dalla *esarazione* e dal crioclastismo operati dal ghiaccio, quali ad esempio le forme carsiche (doline) o i movimenti gravitativi (frane).

### Analisi morfometrica

L'analisi morfometrica ha avuto come obiettivo principale il confronto tra le morfologie di circo glaciale riscontrate sulle Alpi Apuane e quelle presenti nel versante toscano dell'Appennino Tosco-Emiliano, le due aree hanno rivelato evidenti differenze anche ad una prima analisi visiva, confermate poi confrontando l'analisi statistica di alcuni parametri morfometrici. Le variabili morfometriche sono state selezionate in modo da renderle direttamente confrontabili con una serie di precedenti lavori svolti su aree differenti (Evans, Cox, 1974; Evans, 2006; Haynes, 1998; Federici, Spagnolo, 2004; Brook et al., 2006; Steffanová, Mentliik, 2007; Mîndrescu et al., 2010). I parametri individuati e studiati ad oggi sono stati: **quota media, area, lunghezza/(qmax-qmin), pendenza media, lunghezza/larghezza, circolarità** (fig.3).

Tuscan Apennine ridge	Count:	Minimum:	Maximum:	Sum:	Mean:	Standard Deviation:
Altitude mean	28	1205	1823		1598	160
Area (km <sup>2</sup> )	28	0,02	2,79	13,30	0,48	0,66
Length/amplitude	28	1,12	3,80		2,26	0,70
Slope mean	28	20,00	40,00		28,04	5,43
Length/Width	28	0,51	2,63		1,11	0,42
Circularity	28	1,02	1,25		1,11	0,06

Apuane Alps	Count:	Minimum:	Maximum:	Sum:	Mean:	Standard Deviation:
Altitude mean	52	605	1739		1290	241
Area (km <sup>2</sup> )	52	0,01	0,81	7,06	0,14	0,14
Length/amplitude	52	0,66	3,34		1,22	0,56
Slope mean	52	22,00	55,00		41,44	8,11
Length/Width	52	0,46	2,37		1,11	0,43
Circularity	52	1,04	1,40		1,14	0,07

Figura 3 □ Statistiche delle principali variabili analizzate dei circhi glaciali delle Alpi Apuane e del crinale appenninico

La **quota media** è stata calcolata all'interno dell'area di circo utilizzando il DTM della Regione Toscana (a risoluzione 10 m). La lunghezza **L** del circo è stata individuata utilizzando la retta che unisce il centroide del poligono del circo con il punto medio della soglia ed estendendo questa retta fino al bordo della parete posteriore del circo (fig. 4), in maniera simile a come attuato in precedenti lavori (Steffanová., Mentlík, 2007; Federici, Spagnolo, 2004), tale retta è stata anche utilizzata per calcolare la direzione di esposizione (**aspect**). La pendenza delle superfici dei ghiacciai che hanno creato i circhi caratterizza il rapporto tra lunghezza e **amplitude L/a** con "a" (amplitude =  $q_{max} - q_{min}$ ) che indica la differenza di quota tra il punto più basso del pavimento del circo e il punto più alto calcolati utilizzando il DTM (cella 10 m) della Regione Toscana. Piccoli valori **L/a** indicano forme profonde e poco evolute dei circhi, mentre alti rapporti caratterizzano circhi poco profondi dal pavimento piatto, questi parametri risultano legati alla pendenza media dei punti delle aree di circo. La larghezza **W** è la linea perpendicolare a **L** che passa per il baricentro del circo, viene utilizzata nel rapporto **L/W** ed insieme all'indice di circolarità serve per caratterizzare il perimetro del circo. L'indice di **circolarità** si ottiene dividendo i perimetri dei circhi (fig. 4) per la circonferenza di un cerchio che ha la stessa superficie del circo in esame (Aniya, Welch, 1981), i valori si avvicinano ad 1 nel caso di perfetta circolarità.

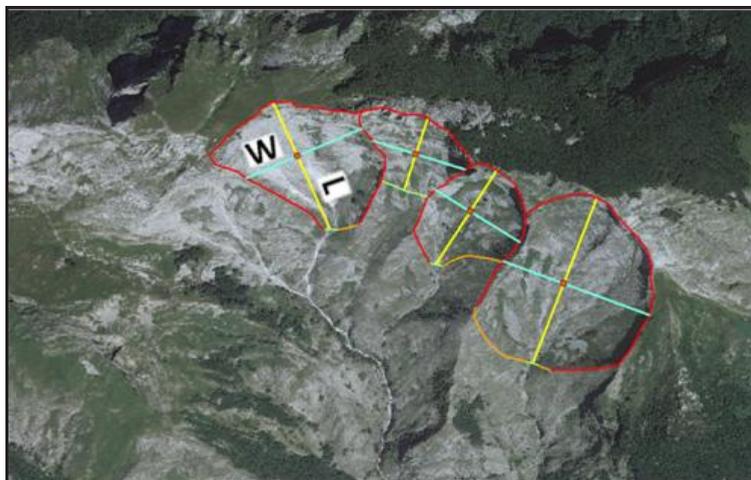


Figura 4 - Lunghezza **L** (linee gialle) e larghezza **W** (linee azzurre) dei circhi glaciali.

### Analisi statistica

L'analisi statistica della morfometria rappresenta il punto di partenza su cui possono basarsi specifici studi che prendano in considerazione le cause delle differenze morfometriche tra i circhi glaciali relitti al fine di desumere le condizioni paleoclimatiche delle aree di studio.

L'analisi delle **quote** mostra che nelle Alpi Apuane circa l'80% dei circhi è situato ad un'altitudine compresa tra 1050 m e i 1650 m, sono presenti comunque anche circhi a quote molto basse (circa 500-600 m), come quelli individuati nella valle di Equi Terme (MS).

La distribuzione delle altitudini dei circhi sul crinale appenninico differisce sia per il range di valori più popolato, il 90% delle quote medie di circhi estende tra i 1350 m e i 1950 m, sia per la mancanza di circhi a quote inferiori ai 1200 m.

La distribuzione **aree** mostra una marcata differenza tra le Alpi Apuane e il crinale appenninico, con un valore medio pari a 0,14 chilometri quadrati delle Alpi Apuane e 0,48 km<sup>2</sup> sul crinale appenninico, dove oltre il 60% dei circhi supera 0,1 km<sup>2</sup>, contando 4 circhi di larghezza più ampia di 1 km<sup>2</sup>. Nella zona delle Alpi Apuane l'80% dei circhi rientra invece fra 0,05 e 0,5 km<sup>2</sup>.

Il rapporto **L/a** (lunghezza/ $q_{max} - q_{min}$ ) differisce significativamente tra circhi glaciali delle Alpi Apuane e quelli della dorsale appenninica (versante toscano). Mentre sulle Apuane circa il 70% dei

circhi ha un rapporto compreso tra 0,8 e 1,7, nel crinale appenninico i rapporti più frequenti sono compresi tra 1,6 e 3,1 con un 70% dei casi tra 1,6 e 2,6, in linea con i risultati di altre aree di studio (Federici, Spagnolo, 2004). Il risultato per quanto riguarda le Alpi Apuane risulta parzialmente influenzato dalla decisione di digitalizzare i limiti dei poligoni esattamente sui crinali, per la difficoltà di trovare traccia dei limiti sulle pareti sotto le creste corrispondenti al livello riempimento del ghiacciaio. In questo modo si considerano differenze maggiori tra le quote massime (crinale) e del pavimento dei circhi.

Questa scelta ha maggiore incidenza nelle aree con presenza di pareti verticali, come nel caso delle Apuane e spiega i valori molto bassi di questo rapporto per alcuni circhi, inoltre influenza per gli stessi motivi anche il parametro della pendenza media.

Differenze sostanziali della **pendenza media**, fortemente correlata con il rapporto  $L/a$ , sono stati trovati tra l'area delle Alpi Apuane e l'area del crinale appenninico. Nel primo caso quasi il 80 % dei circhi ha pendenze tra  $36^\circ$  e  $55^\circ$ , mentre nel secondo caso più del 90 % dei circhi racchiudere aree che presentano pendenze medie tra  $20^\circ$  e  $35^\circ$  - molto più vicini ai valori tipici noti in letteratura sulle aree alpine come le Alpi Marittime, (Federici, Spagnolo, 2004).

Questo indica una evoluzione inferiore delle forme nell'area delle Alpi Apuane, dove è di solito assente un piano suborizzontale che di fatto contribuisce ad abbassare il valore medio della pendenza.

Il rapporto  $L/W$  (lunghezza/larghezza) è stato utilizzato in precedenti studi (Damiani, Pannuzi, 1987) per classificare i circhi dell'Appennino centro-settentrionale in tre categorie: circhi che sono stati fortemente erosi alla loro soglia da processi periglaciali e fluviali post glaciali ( $L/W < 0,5$ ); circhi che sono o sono stati occupati da un ghiacciaio di circo ( $0,5 < L/W < 1$ ); e circhi che sono o sono stati occupati da un ghiacciaio valle con una lunga lingua di ablazione ( $L/W > 1$ ). Secondo questa classificazione 12 circhi su 28 totale identificati sul crinale appenninico ricadono nella seconda categoria e 16 nella terza categoria. Nelle Alpi Apuane la frequenza è diversa, sono presenti infatti 2 circhi con  $L/W < 0,5$ , 18 nella seconda categoria e numerosi circhi (32) con  $L/W > 1,0$ . Questo rivela un minor sviluppo in larghezza dei circhi nelle Alpi Apuane che però è indice non di una occupazione del circo da parte di un ghiacciaio di valle, ma solamente di uno stadio iniziale della formazione del circo.

### **Circolarità**

La distribuzione della circolarità mostra che il range di frequenza più alta è lo stesso sia per le Alpi Apuane sia per l'Appennino ed è pari a valori compresi tra 1,1 e 1,15. Risultano comunque valori di circolarità in genere minori per la zona delle Alpi Apuane e tale trend è abbastanza correlato al rapporto  $L/W$ .

### **Esposizione**

L'analisi statistica delle esposizioni è stata effettuata solo per le Alpi Apuane, dove erano stati considerati tutti i versanti, non è stata considerata invece la dorsale appenninica dato che i circhi glaciali studiati erano solo quelli che si trovano nel versante toscano. La distribuzione delle esposizioni segue abbastanza precedenti studi (Federici, Spagnolo, 2004) svolti in aree (Alpi Marittime) che mostrano latitudini simili e la vicinanza al Mare Ligure, indica frequenze medio-alte nei settori Nord-Est e Nord-Ovest, alta frequenza per il settore Sud-Ovest e la frequenza più bassa nel settore Sud-Est. Mentre le esposizioni a Nord possono essere spiegate dal minore irraggiamento solare, si può ipotizzare che l'aumento di frequenza a SW sia dovuto invece al maggiore contributo meteorico rispetto alle altre aree.

### **Conclusioni**

L'utilizzo di modelli stereoscopici ha permesso di ottenere alta precisione nella digitalizzazione dei limiti dei circhi glaciali, consentendo inoltre di acquisire le geometrie vettoriali in formato ShapeZ. Dalla fotointerpretazione e dall'analisi morfometrica sono emerse alcune differenze tra le forme individuate nell'area dell'Appennino settentrionale e nelle Alpi Apuane.

I circhi glaciali del crinale appenninico rispetto a quelli delle Alpi Apuane presentano infatti morfologie più evolute, spesso è presente un pavimento sub orizzontale e in alcuni casi hanno

dimensioni molto estese. Lo stato di evoluzione si avvicina in sostanza alla situazione del versante emiliano dove le morfologie sono completamente evolute e presentano forme concoidi perfettamente sviluppate dove spesso si riscontra la presenza di laghi di circo.

Tale differenza è sostenuta anche dai risultati delle analisi morfometriche, fattori come la maggiore circolarità dei poligoni, le aree più estese, il rapporto più alto tra lunghezza e “ $q_{max} - q_{min}$ ” e i valori più bassi della media delle pendenze, indicano un maggiore sviluppo della concavità ed una evoluzione dalle morfologie a “nicchia” verso quelle ad anfiteatro per l’area del crinale appenninico.

Altre cause morfologiche, climatiche, litologiche e tettoniche di tali differenze dovranno essere meglio analizzate in futuro, allo stato attuale è possibile comunque ipotizzare che le differenze delle due aree siano dovute almeno in parte alla quota media più elevata del crinale appenninico (circa 300 m) e alla minore acclività, che hanno compensato l’esposizione sfavorevole a SUD del versante.

Infine, nelle Alpi Apuane, è importante evidenziare come l’alta frequenza di circhi che mostrano una esposizione a SW sia in parte dovuta ai probabili elevati contributi meteorici da SW dovuti alla posizione geografica adiacente al Mar Ligure, ipotizzando condizioni paleoclimatiche, per quanto riguarda gli apporti meteorici, paragonabili alle condizioni climatiche attuali.

### **Bibliografia**

- AA.VV. (2011) - “Continuum Geologico” della Regione Toscana.
- AA.VV. (2012) - Banca dati geomorfologica della Regione Toscana.
- AA.VV. (2005) - Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Massa Carrara.
- AA.VV. (2000) - Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Lucca.
- AA.VV. (2010) - Carta dei geositi del Parco delle Apuane.
- Aniya M. & Welch R., 1981: Morphometric analyses of antarctic cirques from photogrammetric measurements. *Geografiska Annaler*, 63 A: 41–53
- Baroni C., (2004) - Circhi Glaciali in Atlante dei tipi geografici, pp 221, 226, Istituto Geografico Militare.
- Braschi S., Del Freo P., Trevisan L., 1986. Ricostruzione degli antichi ghiacciai sulle Alpi Apuane - P. 203-219, 1 c. geol. ripieg.: ill. Vol. 93 (1986)
- Brook M.S., Kirkbride M.P., Brock B.W., 2006. Cirque development in a steadily uplifting range: rates of erosion and long term morphometric change in alpine cirques in the Ben Ohau Range, New Zealand *Earth Surf. Process. Landf.* 31, 1167–1175.
- Damiani, A.V. and Pannuzi, L., 1987: La glaciazione pleistocenica nell’Appennino Laziale-Abruzzese. III; *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 105 (1985–86): 75-96.
- Evans, I.S., 2006. Allometric development of glacial cirque form: geological, relief and regional effects on the cirques of Wales. *Geomorphology* 80, 245–266.
- Evans I.S. & Cox N., 1974: Geomorphometry and the operational definition of cirques. *Area*. Institute of British Geographers, 6: 150–153.
- Federici P. R. (2004) — Tavola 44. Forme di glacialismo appenninico. In: Italia - Atlante dei Tipi Geografici. Istituto Geografico Militare, 250-253.
- Federici P.R., Spagnolo M., 2004. Morphometric analysis on the size, shape and areal distribution of glacial cirques in the maritime Alps (western French – Italian Alps) *Geogr. Ann.* 86A, 235–248.
- Jenness, J. 2006. Topographic Position Index (tpi\_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a. Jenness Enterprises. Available at: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.
- Mîndrescu, M., Evans, I.S., Cox, N.J., 2010. Climatic implications of cirque distribution in the Romanian Carpathians: palaeowind directions during glacial periods. *J. Quat. Sci.* 25, 875–888.
- Steffanová P., Mentlík P., 2007. Comparison of morphometric characteristics of cirques in the Bohemian Forest. *Silva Gabreta* 13, 191–204.