



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

DISS. ETH NO. 20560

**Constraining glacial reshaping of the European Alps:
insights from morphometric analyses, paleo-topographic
reconstructions and numerical modeling of glacial erosion**

A dissertation submitted to

ETH Zurich

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Pietro Sternai
Laura Magistrale in Geologia,
Università degli Studi di Milano

19/09/1984

citizen of

Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. S. D. WILLETT
Prof. Dr. F. HERMAN
Prof. Dr. F. SCHLUNEGGER

2012

Abstract

A mountain belt like the European Alps is a near ideal setting for studying the tectonic processes that uplift and deform the Earth's surface and climate-modulated erosion mechanisms that lower topography. Addressing the complex interactions between tectonics and climate in shaping a mountain belt like the Alps requires the use of a variety of methodologies. This thesis focuses on the effects of glaciation in the recent Alpine history by means of morphometric analyses, paleo-topographic reconstructions and numerical modeling. The present-day hypsometry of the Alps reveals that glacial morphologies are mostly preserved at or above the long term glaciers' equilibrium line altitude. The present-day topography, however, is more prone to bear information about the most recent stages of glacial erosion, as erosion itself erases evidence of past processes and landforms. In order to achieve a more complete understanding of the effects of glaciation on the topographic evolution of the Alps, significant effort was dedicated to the reconstruction of the pre-glacial Alpine topography. Spatial variations of pre-glacial channel steepness suggest a significant effect of rock erodibility in setting the pre-glacial river network elevations and a potential change in regional isostatic support of the western Alps, for example, by detachment of the European slab. The comparison between the modeled pre-glacial topography of the Alps and the present-day landscape highlights the occurrence of significant glacial erosion in the lower and peripheral parts of Alpine catchments, below the long term glaciers' equilibrium line altitudes. In addition, glacial erosion seems to have decreased the mean elevation and increased valley scale topographic relief across the entire range, by up to a factor of two. Although these results appears to be at odds with the outcomes of the hypsometric analysis of the present-day Alpine landscape, numerical modeling of glacial erosion on the pre-glacial and modern topography provide an explanation for this apparent discrepancy. Glacial erosion on the pre-glacial and present-day topography, in fact, is different and the overall effect suggests an initial increase of topographic relief followed by enhanced erosion at higher elevations during late phases of glaciation. These stages of glacial erosion are linked

by a headward propagation of glacial erosion through time. Glacial erosion also influences the sediment yield. If no additional cooling trends are superimposed to climate oscillations, a tectonic component of rock uplift of 0.5 mm yr^{-1} is sufficient to increase the production of sediments, in agreement with measurements of sediment yield from the Alps. In addition, a shift of the period of climate oscillations from 40 kyr to 100 kyr can enhance the sediment yield by extending the time spans of glacial erosion and promoting new transient conditions. This mechanism or a change in regional isostatic support of the Western Alps are likely factors to explain, for example, the discrepancy between the age of the earliest glacial deposits in the northern foreland and in the Po plain.

Sommario

Le Alpi Europee sono il contesto ideale per lo studio dei processi tettonici e erosionali alla base della formazione di catene montuose di tipo collisionale. Per comprendere le complesse interazioni tra processi tettonici, che sollevano la topografia e ispessiscono la crosta terrestre, e climatici, che definiscono i meccanismi di erosione e redistribuzione delle masse, è necessario, tuttavia, utilizzare svariate tecniche. Lo scopo di questa tesi è quello di definire gli effetti che le glaciazioni del Quaternario hanno avuto sull'evoluzione topografica delle Alpi tramite analisi di tipo morfometrico, ricostruzioni paleo-topografiche e modellizzazione numerica di processi di erosione glaciale. L'ipsometria attuale delle Alpi rivela che le morfologie glaciali sono prevalentemente preservate ad una quota corrispondente o superiore a quelle che la Linea di Equilibrio dei ghiacciai ha assunto durante il Quaternario. È tuttavia importante considerare che sulla topografia attuale sono preservate più facilmente le tracce di erosione recente piuttosto che antica, in quanto l'erosione stessa cancella le prove di topografie passate. Una parte importante di questa tesi è perciò dedicata alla ricostruzione della topografia Alpina antecedente alla glaciazione. La morfologia Alpina pre-glaciazione suggerisce che l'erodibilità della roccia è un fattore primario nel definire le quote topografiche. Inoltre, pendenze più elevate del reticolo fluviale pre-glaciazione nelle Alpi Orientali suggeriscono un cambiamento di supporto isostatico in quest'area dovuto, per esempio, alla rottura dello slab Europeo. Il confronto tra la topografia attuale e

quella antecedente alla glaciazione mostra come l'erosione glaciale sia piú importante nelle parti piú basse e periferiche della catena, ben al di sotto della Linea di Equilibrio dei ghiacciai. L'erosione glaciale, in particolare, sembra aver diminuito l'elevazione media delle Alpi ma aumentato il rilievo topografico alla scala di singole valli, fino a raddoppiarlo. Benché queste conclusioni sembrino essere in contrasto con i risultati dell'analisi ipsometrica, la modellizzazione numerica dei processi di erosione glaciale avvenuti sulla topografia antecedente alla glaciazione e quella attuale fornisce una valida spiegazione a questa apparente contraddizione. I ghiacciai, infatti, erodono in modo significativamente diverso la topografia preglaciazione e quella moderna. L'effetto complessivo nell'arco di tutta la glaciazione è quello di un iniziale aumento del rilievo topografico, seguito da erosione a quote piú elevate durante gli stadi finali della glaciazione. L'erosione glaciale, inoltre, influenza la produzione di sedimenti. Se le oscillazioni climatiche sono costanti nel tempo, una componente di sollevamento tettonica di 0.5 mm yr^{-1} è sufficiente ad aumentare la produzione di sedimenti, come effettivamente viene osservato nel record Alpino. Anche un cambiamento del periodo delle oscillazioni climatiche da 40 kyr a 100 kyr puó aumentare la quantità di sedimenti prodotti dall'erosione glaciale, in quanto viene esteso l'intervallo di tempo durante il quale si sviluppa l'azione erosiva dei ghiacciai e sono favorite nuove condizioni transitorie alle quali il sistema topografico si deve riadattare. Questo processo, o un cambiamento del supporto isostatico delle Alpi Orientali, sono entrambi fattori plausibili per spiegare le differenti età dei primi depositi glaciali nell'avampaese Alpino e nella pianura Padana.