

Cross-scale modeling of mountain building and the seismic cycle: From Alps to Himalaya

Doctoral Thesis**Author(s):**

Dal Zilio, Luca

Publication date:

2019-01

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000377255>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Funding acknowledgement:

154434 - SWISS-AlpArray - Assessing Alpine Orogeny in 4D-space-time Frame (SNF)

Swiss Federal Institute of Technology
Department of Earth Sciences
Institute of Geophysics

DISS. ETH NO. 25709

**CROSS-SCALE MODELING OF MOUNTAIN BUILDING
AND THE SEISMIC CYCLE: FROM ALPS TO HIMALAYA**

A dissertation submitted to
ETH ZÜRICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

LUCA DAL ZILIO

M.Sc. in Geology, University of Padova, Italy
Born on January 25th 1989
citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Taras V. Gerya	ETH Zürich	Examiner
Prof. Ylona van Dinther	Utrecht University	Co-Examiner
Prof. Edi Kissling	ETH Zürich	Co-Examiner
Prof. Stefan Wiemer	ETH Zürich	Co-Examiner
Prof. Romain Jolivet	ENS Paris	Co-Examiner
Prof. Onno Oncken	GFZ Potsdam	Co-Examiner

Abstract

Orogenesis—the process of mountain building—forms some of the most spectacular features of the Earth’s surface. This complex geological process operates on a wide range of time and length scales and is characterized by fold-and-thrust belts that grow through sequential stacking of thrust sheets. These faults trigger large earthquakes, often close to densely populated areas. Understanding the dynamics and deformation of collisional orogens thus constitutes an important and challenging step towards improving seismic hazard assessment. By integrating the approaches of numerical modeling, seismology, geodesy, and tectonophysics, this thesis provides a thorough and advanced analysis to improve our understanding of the seismotectonics evolution of collisional mountain ranges. Generic models as well as specific examples—from the Alps to the Himalayas—are explored to evaluate the relation between long-term mountain building processes and short-term seismogenesis.

First, I present a novel model to investigate the partitioning between tectonic and kinematic processes and assess seismic behaviour of mountain belts. These models obtain a Gutenberg–Richter frequency magnitude distribution due to spontaneous events occurring throughout the orogen. I propose that both the corresponding slope (b value) and maximum earthquake magnitude correlate linearly with plate convergence rate through a rheological feedback with temperature and strain rate. This is in agreement with earthquakes recorded across the Alps, Apennines, Zagros and Himalaya.

I then explore the self-driven evolution of a convergent margin, from subduction to collisional orogeny and spontaneous slab breakoff. I show how slow—but persistent—bending of a post-collisional residual slab controls the latest evolution of the orogen, including crustal delamination, the construction of the foreland basin, and the seismicity pattern throughout the orogen. Based on these new insights, I argue that tectonic processes across the Central Alps are related to vertical forces driven by a *Slab Rollback Orogeny* model.

To facilitate a comparison to natural settings, I develop a tool for the design of realistic and accurate model setups. By including a number of tectonic constraints, I use this tool to set a rigorous setup of the present-day lithospheric structure of the Nepal Himalaya. This model allows me to explore the conditions that could explain the bimodal seismicity ($M_w \leq 7.8$ vs. $M8+$) of large Himalayan earthquakes. Results reproduce realistic earthquake sequence of irregular magnitude—including events similar to the 2015 M_w 7.8 Gorkha earthquake—and provides an excellent match to the interseismic observations. Most importantly, this model shows that fault frictional and non-planar geometry of the Himalayan megathrust introduce a shallow region of large strength excess, which can only be activated once enough stress is transferred by partial (blind) ruptures.

Finally, I use a Bayesian sampling method to propose a new coupling model of the Himalayan megathrust. This inversion benefits from an objective weighting of the various datasets by combining observational and modelling errors. In particular, this approach does not include any contamination from the smoothing regularization used in standard approaches. The impact of this model is distinct, as it shows three potential barriers of low coupling separating discrete and large highly coupled patches. These new findings raise the possibility of a heterogeneous coupling distribution of the Himalayan megathrust, both along-strike and down-dip.

Overall, this thesis provides a better understanding of the interaction between mountain building processes and seismicity, and a valuable improvement to this fast-moving cross-field of seismotectonics, seismology and geodynamics.

Riassunto

L'orogenesi—il processo di costruzione delle montagne—forma alcune delle caratteristiche più spettacolari della superficie terrestre. Questo complesso processo geologico opera su una vasta gamma di scale di tempo e lunghezza ed è caratterizzato da un impilamento sequenziale di pieghe e faglie. Queste faglie innescano grandi terremoti, spesso vicini ai grandi centri abitati. Comprendere le dinamiche e la deformazione degli orogeni collisionali costituisce quindi un problema importante e impegnativo per valutare meglio il rischio sismico. Integrando gli approcci di modellistica numerica, sismologia, geodesia e tettonofisica, questa tesi fornisce un'analisi approfondita e avanzata per migliorare la nostra comprensione dell'evoluzione sismotettonica delle catene montuose collisionali. Modelli generici ed esempi specifici—dalle Alpi all'Himalaya—sono esplorati per valutare la relazione tra i processi di formazione delle montagne e i meccanismi sismogenetici.

Per prima cosa, presento un nuovo modello per indagare la ripartizione tra i processi tettonici e cinematici e valutare il comportamento sismico delle catene montuose. Attraverso eventi spontanei che si verificano in tutto l'orogene, questi modelli ottengono una distribuzione della magnitudine e frequenza di Gutenberg-Richter. Questa distribuzione indica che sia la corrispondente pendenza (valore b) che la magnitudo massima dei terremoti sono linearmente correlate con la velocità di convergenza delle placche attraverso un feedback reologico con la temperatura e la velocità di deformazione. Questo risultato è in accordo con i terremoti registrati nelle Alpi, gli Appennini, Zagros e l'Himalaya.

Esamino poi l'evoluzione auto-guidata di un margine convergente, dalla subduzione all'orogenesi collisionale e alla rottura spontanea della placca in subduzione. Mostro come il lento—ma persistente—piegamento della placca in subduzione controlla l'evoluzione terminale dell'orogene, compresa la delaminazione crostale, la formazione del bacino di avampaese e la sismicità in tutto l'orogene. Sulla base di queste nuove intuizioni, sostengo che i processi tettonici attraverso le Alpi Centrali sono legati alle forze verticali guidate da un modello di affondamento della placca in subduzione.

Per facilitare il confronto con gli ambienti geologici, propongo uno strumento per la configurazione di modelli realistici e accurati. Includendo una serie di vincoli tettonici, questo strumento è utilizzato per una configurazione rigorosa dell'attuale struttura litosferica del Nepal-Himalaya. Questo modello consente di esplorare le cause che controllano la sismicità bimodale (magnitudo $M_w \leq 7.8$ vs. $M8+$) dei grandi terremoti Himalayani. I risultati riproducono una sequenza realistica di terremoti con magnitudo irregolare—compresi eventi simili al terremoto M_w 7.8 di Gorkha del 2015—e forniscono un ottimo combaciamento con le osservazioni inter-seismiche. In particolare, questo modello mostra che la frizione e la geometria non planare della faglia portano alla formazione di una regione superficiale ad eccesso

di forza, la quale può essere attivata solo dopo che una sufficiente sollecitazione è stata trasferita dalle rotture parziali più profonde.

Infine, utilizzo un metodo di campionamento Bayesiano per proporre un nuovo modello di accoppiamento del margine di placca Himalayano. Questa modellizzazione inversa beneficia di una ponderazione oggettiva dei vari set di dati combinando errori di osservazione e di modellazione. In particolare, questo modello non include alcuna contaminazione proveniente dalla regolarizzazione utilizzata negli approcci standard. L'impatto di questo modello è distinto, poiché mostra zone discrete ad alto accoppiamento intersismico separate da tre potenziali barriere. Queste nuove scoperte sollevano la possibilità di una distribuzione eterogenea dell'accoppiamento intersismico nel margine di placca Himalayano, sia in profondità che lungo l'arco.

Nel complesso, questa tesi fornisce una migliore comprensione dell'interazione tra i processi di costruzione delle montagne e la sismicità, oltre che un prezioso miglioramento di questo campo trasversale in rapida evoluzione.