

**Serie / NOVA TERRA**

## **Cainozoic deformation of Iberia**

**A model for intraplate mountain building and basin  
development based on analogue modelling**

Javier Fernández Lozano

INSTITUTO UNIVERSITARIO DE GEOLOGÍA "ISIDRO PARGA PONDAL"

**A Coruña, 2014**

ISSN: 1131-3503  
ISBN: 978-84-9749-602-5  
Depósito Legal: C 1662-2014  
Imprime: Tórculo Comunicación Gráfica, S.A.  
A Coruña, 2014

Ilustración de cubierta: Atlas de Iberia con el filtro de 250 km  
Maquetación: Javier Fernández Lozano  
Portada: Juan Ramón Vidal Romaní  
Revisión ortográfica y tipográfica: Ana Martelli Emancipato

### FICHA DE CATALOGACIÓN

FERNÁNDEZ LOZANO, Javier

Cainozoic deformation of Iberia. A model for intraplate mountain building and basin development based on analogue modelling

161 pp; 75 fig; tablas 5 ; 24 cm; (Serie Nova Terra; 46)

Tesis Doctoral de Universidad Complutense de Madrid y The Netherlands Research Centre for Integrated Solid Earth Sciences (ISES - Bibliografía: p. 143-161. - Incluye índice. (Editor científico: Juan Ramón Vidal Romaní)

ISBN: 978-84-9749-602-5 D. L: C 1662-2014

ISSN: 1131-3503

1- Cainozoic; 2- Iberia Peninsula; 3- Tertiary tectonic; 4- Iberian plate tectonics – Intraplate mountain building; 5- Lithospheric folding development; 6- Cainozoic deformation of Iberia; 7- Cainozoic intraplate basins; 8- Model IBERIA I,II,III, IV, V, VI, VII and VIII; 9- Gravity modelling; 10- IBERIA –I, XIX, X,.

2.- I. Vidal Romaní, Juan Ramón; II. Instituto Universitario de Geología, Universidade da Coruña, ed. III. Laboratorio Xeolóxico de Laxe, ed. IV. Universidad Complutense de Madrid- The Netherlands Research Centre for Integrated Solid Earth Sciences (ISES), ed. V. Serie; (Nova Terra 46); VI. Tít.

Esta publicación se ha realizado con papel procedente de una fuente gestionada responsablemente



## Summary

---

Long-term topography in Europe results from the interaction between Alpine continental collision and anomalously raising mantle material. The Alpine belt runs from southern Europe all the way to the Himalayas along thousands of kilometres. It resulted from the closure of oceanic realms and subsequent continental subduction and collision (Pyrenees, Alps, Carpathians, Dinarides, and Himalayas). However, far from the suture zone, little is known about the mountain building processes within plate interiors. For this reason, new research projects such as Topo-Europe (see Cloetingh et al., 2011b, in Topo-Europe Tectonophysics volume) and Topo-Iberia have recently arisen under international cooperation. The aim of these multi-scale investigations is to add new insights into deep Earth and surface processes.

Following this line of research, this thesis builds on analogue modelling and spectral analysis of topography and gravity data, aiming to portray and discuss the mechanisms of mountain building in intra-plate settings. More specifically the research focuses on the evolving topography and formation of related basins in Iberia, although the results can be extrapolated to other intra-plate areas where geophysical and geological data are scarce.

As is evident from aerial pictures, western Iberia is characterised by a regular pattern of topography from the Cantabrian Mountains in the north to the Sierra Morena Mountains in the south, following E-W to NE-SW trends. This periodic pattern has been linked to large-scale folds affecting the entire lithosphere. In contrast, in the Eastern part of the Peninsula topography relief follows E-W, NW-SE and NE-SW trends without any observable regularity. Although many theories have been formulated to explain these differences, none of them reconcile surface topography with deep earth processes. Among the questions that have not been answered yet by previous studies in Iberia the following stand out: what is the nature of the lithosphere in terms of possible strength variations inherited from different episodes of mountain building (Variscan) or rifting (Mesozoic); what are the process of intra-plate mountain development and the high elevation of the Duero Basin, or the Cainozoic influence of pre-existent late-Variscan tectonic structures over present-day topography.

The models presented in this thesis are based on geological and geophysical data available from Spain. The first series of models aims to understand the mechanism behind intra-plate mountain building and basin development in Iberia by testing two different lithosphere set-ups. I describe favourable conditions for the evolution of lithosphere folds that led to present-day topography. A de-coupled lithosphere where strength resides in the upper crust and mantle seems to be the key for the evolution of large-scale folds. However, the Iberian lithosphere is far from being homogenous in terms of lithospheric strength. Inherited structures stemming from Variscan phases of deformation as well as the weakening of the lithosphere related to Mesozoic extension possibly affected deformation during Cainozoic times. Therefore, a new set of experiments was carried out in order to study the mode of deformation under different thermo-mechanical conditions prior to the onset of Alpine shortening. Since analogue experiments allow the direct observation of the lithosphere after deformation, I established a new approach in order to reconcile surface and deep earth architecture through the study of gravity and topography.

Digital elevation models obtained from the model surface, together with the theoretical gravity data calculated from digitized model cross-sections, were analysed in terms of spectral analysis and compared with the Moho depth maps. This analysis allowed differentiating between periodic and non-periodic signals, which may explain the mechanism of mountain building (folding versus crustal thickening, respectively). Finally, models with heterogeneous lithosphere were implemented with the addition of pre-existent late-Variscan faults which may have influenced the position of the lithosphere folds and in turn the final configuration of topography. In order to study the influence of these tectonic structures, surface particle displacement field techniques were performed (Particle Image Velocimetry or PIV). PIV, therefore, aimed to discriminate between re-activation of old structures and neo-formed tectonic structures. The results of analogue models were compared with fieldwork carried out along the boundary between the Spanish Central System and the Iberian Range, where interfering structures (E-W to NE-SW oriented) are coeval with NE-SW, NW-SE and E-W striking structures in Central Spain. Interestingly, field data and analogue modelling concluded that different topographic trends can be caused by folding of the lithosphere with laterally different thermo-mechanical conditions under a single N-S stress field during the Pyrenean stage of the Alpine Orogeny.

*Chapter 1* provides a brief introduction of the observed topographic trends and introduces the main theories concerning mountain building in Iberia. In *chapter 2*, I summarise the principal mechanisms for single and multi-layer folding, studying the existing relationships between faulting and folding at large-scale. Moreover, I review the differences and similarities between folding of oceanic and continental lithosphere on the basis of areas where lithospheric folding has been described.

The tectonic evolution of the Iberian Peninsula is presented in *chapter 3*, where geological and geophysical data has been compiled in order to describe the rheology and evolution of the Iberian lithosphere. A series of analogue models are shown where I investigate folding of a de-coupled lithosphere and the associated uplift of the northwestern corner of Iberia (Galicia Massif) related to the opening of the Kings Trough in the Atlantic offshore.

*Chapter 4*, addresses the new methodology carried out on the analogue experiments combining the calculation of the theoretical gravity and spectral analysis of topography from model cross-sections. The results show differences on mode of deformation between a simple scenario comprising a homogeneous strong and cold (Variscan in age) lithosphere and a weak and hot heterogeneous lithosphere, representing lateral variations in strength from western to eastern Iberia. The results show similar wavelengths of gravity and topography between models and nature (short ~50 km and long ~250km), indicating the presence of periodic signals to the west. Therefore, the regular pattern of topography can be related to folding of the Variscan lithosphere, whereas the lack of hardly any periodicity to the eastern part of Iberia can be related to other processes like crustal thickening by thrusting and lower crustal flow processes.

*Chapter 5* shows the surface particle displacement field analysis carried out on the analogue experiments comparing the results with the intra-plate configuration of topographic reliefs in Spain. The influence of lateral lithosphere strength variations and pre-existent tectonic structures on strain localization and the surface expression of deformation is investigated. The structural interpretation of modelling results displacement vector field indicates re-activation of pre-existent structures (NE-SW and NW-SE oriented) during uni-directed N-S compression illustrating a scenario of strain partitioning that may favour the observed differences of present-day topographic trends in Iberia.

Finally, in *Chapter 6*, I provide the summary and conclusions. A brief discussion between well-known areas affected by lithospheric folding is shown. Moreover, I argue about

the connection between regular E-W, NE-SW trends of topography observed in western Spain with those along the Moroccan Atlas in northern Africa. Similar discussion is focussed on the area of the Tian Shan and Pamir mountains in Central Asia, where long-term topography has been linked to lithosphere folds. A synthesis concerning the influence of pre-existent faults on the final configuration of a deformed intra-plate area is compared with the tectonic structures from models and the Merida Andes in Venezuela, illustrating the main differences and similarities related to intra-plate reactivation of inherited tectonic structures.

## Resumen

---

A largo plazo, la topografía en Europa es el resultado de la interacción entre la colisión continental Alpina y la presencia de una anomalía mantélica ascendente hacia la superficie terrestre. El cinturón Alpino se extiende desde el sur de Europa hacia los Himalayas a lo largo de miles de kilómetros. Esta masa montañosa resulta del cierre de océanos y la posterior subducción de los mismos, provocando una colisión continental (como por ejemplo, los Pirineos, Alpes, Cárpatos, Dinarides e Himalayas). Sin embargo, lejos de la zona de sutura, en el interior de las placas tectónicas, se conoce muy poco sobre los procesos de formación del relieve. Por esta razón, nuevos proyectos como Topo-Europe (ver Cloetingh et al., 2011b, en el volumen especial de Tectonophysics) y Topo-Iberia han surgido como resultado de una estrecha colaboración científica internacional. Los nuevos proyectos surgidos permitirán obtener nuevos conocimientos sobre el interior terrestre y los procesos que operan en la superficie.

Siguiendo esta línea de investigación, en esta Tesis se establece una relación entre modelación análoga y análisis espectral de datos de topografía y anomalía de la gravedad, permitiendo conocer y discutir los mecanismos de formación de relieves montañosos en zonas de interior de placas. De modo más específico, la investigación se centra en la evolución de la topografía y la formación de cuencas adyacentes en la Península Ibérica, aunque los resultados pueden extrapolarse a otras zonas intra-placa, donde la ausencia de datos geológicos y geofísicos impiden el estudio del interior terrestre.

Como evidencian las fotos aéreas, la zona occidental de la Península Ibérica se caracteriza por un patrón regular de la topografía que se extiende desde la Cordillera Cantábrica en el norte, hacia Sierra Morena en el sur, siguiendo una dirección E-O a NE-SO. Este patrón periódico ha sido relacionado con la presencia de unos pliegues que afectan a toda la litosfera (corteza superior, inferior y manto superior litosférico). En cambio, hacia la parte oriental de la Península, el relieve topográfico sigue un patrón E-O, NO-SE y en algunas ocasiones NE-SO sin que pueda observarse regularidad alguna. Aunque se han postulado muchas teorías para explicar estas diferencias, ninguna de ellas establece una relación sostenible entre los procesos de modelado del relieve superficial y del interior terrestre. Entre algunas de las cuestiones no resueltas, en la actualidad, destacan: la naturaleza de la litosfera en términos de posibles variaciones de resistencia, heredados de episodios disferentes de formación de montañas (Orogenia Varisca) y extensión tectónica (rifting Mesozoico); conocer los procesos intra-placa que dan lugar a la elevada topografía que se observa en la Cuenca del Duero, así como la influencia de estructuras tectónicas post-Variscas durante el Cenozoico (Terciario), que podrían haber jugado un papel importante en la disposición del relieve topográfico Peninsular actual.

Los modelos presentados en esta Tesis Doctoral están basados en un extenso conocimiento geológico y en los datos geofísicos disponibles en España. La primera serie de modelos ayuda a comprender el mecanismo que está detrás de la formación del relieve topográfico y la evolución de cuencas sedimentarias que los acompañan en el interior de placa, mediante la comparación de dos modelos litosféricos con distintas características de partida. Se describen las condiciones favorables para la evolución de pliegues litosféricos que llevan a la

topografía actual. Una litosfera des-acoplada donde la resistencia reside en la corteza superior y el manto parece ser la clave para la evolución de grandes pliegues litosféricos. Sin embargo, la litosfera Ibérica presenta heterogeneidades en términos de resistencia litosférica. La presencia de estructuras tectónicas heredadas de las fases Variscas de deformación, así como el debilitamiento de la litosfera relacionado con la extensión litosférica Mesozoica, han jugado un papel muy importante durante la deformación Cenozoica. Por ello, se realizaron una serie de modelos para estudiar el modo de deformación bajo condiciones tectono-termales distintas de la litosfera, anteriores al comienzo del acortamiento Alpino. Como los experimentos análogos permiten la observación directa de la litosfera tras la deformación, se ha establecido una nueva metodología que permite el estudio de la litosfera superficial y profunda a través de la comparación de datos topográficos y de anomalía de la gravedad. Para ello se obtuvieron los Modelos Digitales de Elevaciones (DEMs) de la superficie de los experimentos, y se calculó la anomalía de la gravedad teórica a partir de la digitalización de los perfiles obtenidos tras la deformación de los modelos.

Finalmente estos datos se analizaron mediante la obtención del análisis espectral que se comparó con los mapas de profundidades del Moho. Este análisis sistemático permitió diferenciar entre señales periódicas y no periódicas, que pudiesen explicar el mecanismo de formación del relieve (plegamiento litosférico/engrosamiento cortical). Así mismo, los modelos con una variaciones de resistencia litosférica fueron completados con la presencia de estructuras tectónicas pre-existentes de edad post-Varisca, las cuales pudieron haber influenciado la posición de los pliegues que afectan a la litosfera, así como la configuración final de la topografía.

Para estudiar esta influencia, se estudió mediante una nueva técnica, conocida como "Campo de Velocidades de Partícula en Superficie" (con su acrónimo anglosajón PIV), la evolución cinemática de las fallas originadas en el modelo. El PIV, por tanto, permitió discriminar entre re-activación de antiguas estructuras y la neo-formación de estructuras tectónicas. Los resultados de los modelos análogos fueron comparados con estudios de campo llevados a cabo en la zona de enlace entre el Sistema Central y la Cordillera Ibérica, donde interfieren estructuras tectónicas con direcciones variadas (E-O y NE-SO, típicas del Sistema Central) coetáneas con estructuras de dirección NE-SO, NO-SE y E-O Ibéricas. Sorprendentemente, los datos de campo y la modelación análoga concluyen que los distintos patrones topográficos observados resultan de una litosfera con diferencias termo-mecánicas laterales intersectada por fallas de orientaciones diversas que favorece los procesos de plegamiento litosférico y el engrosamiento cortical por inversión tectónica bajo un campo de esfuerzos N-S Pirenaico, que tuvo lugar durante gran parte de la Orogenia Alpina.

El *capítulo 1* proporciona una breve introducción a los patrones del relieve observados y sirve de introducción a las principales teorías propuestas sobre el origen de la formación de las cadenas montañosas en la Península Ibérica. En el *capítulo 2* hago un resumen de los principales mecanismos de plegamiento para una o múltiples capas, estudiando la relación existente entre plegamiento y fracturación a gran escala. Además, llevo a cabo una revisión de las diferencias y similitudes entre el plegamiento de la litosfera oceánica y la continental, en base a las zonas donde se ha descrito el proceso de plegamiento litosférico en nuestro planeta.

La evolución tectónica de la Península Ibérica se presenta en el *capítulo 3*, donde se han recogido datos geológicos y geofísicos para describir la reología y evolución de la litosfera Ibérica. Una serie de modelos análogos donde se investiga el plegamiento de una litosfera des-acoplada, así como el origen del levantamiento propuesto en la zona noroccidental de España (Macizo Galaico), como consecuencia de la apertura del Surco de King en la plataforma Atlántica.

En el *capítulo 4*, se recoge una nueva metodología llevada a cabo en la modelación

análoga, que combina el cálculo de la anomalía de la gravedad teórica y el análisis espectral junto con la topografía, a lo largo de perfiles tomados de los modelos tras la deformación. Los resultados muestran diferentes modos de deformación entre un escenario de escasa complejidad que comprende una litosfera homogénea y resistente (de edad Varisca) y una litosfera heterogénea, caliente y débil, que representan las variaciones laterales en resistencia litosférica encontradas en la parte occidental y oriental, respectivamente en la Península Ibérica. Los resultados indican longitudes de onda para la gravedad y la topografía muy similares entre los modelos y la naturaleza (una corta ~50 km y una larga ~250 km), indicando la presencia de un patrón periódico hacia el oeste peninsular (Macizo Ibérico). Por tanto y como sugieren los modelos, este patrón regular de la topografía parece estar relacionado con el plegamiento de una litosfera estable, Varisca, mientras que la falta de periodicidad hacia el este peninsular podría estar relacionado con otros procesos como engrosamiento cortical por inversión tectónica (a través de cabalgamientos que engrosan la corteza), y por un proceso de flujo en la corteza inferior.

El *capítulo 5*, muestra el análisis llevado a cabo sobre la superficie de los modelos, basado en el estudio del campo de desplazamiento de partículas, que permitió la comparación de los resultados en la zona central de España. La importancia de esta zona reside en los distintos patrones observados en la topografía, los cuales reproducen, en una pequeña área, la multitud de orientaciones observadas, en general, en toda la Península. Se investiga la influencia de los cambios laterales de resistencia litosférica, así como la presencia de estructuras tectónicas pre-existentes y su influencia en la localización de la deformación y en la expresión final en superficie de dicha deformación. La interpretación estructural de los vectores de campo de partículas en superficie indican la reactivación de dichas estructuras pre-existentes con orientaciones principales NE-SO y NO-SE bajo un acortamiento dirigido N-S, mostrando un escenario de partición de la deformación que podría haber favorecido la formación de este patrón singular observado en la topografía actual de la Península Ibérica.

Finalmente, en el *capítulo 6*, proporciono un resumen y las conclusiones. Una breve discusión entre zonas donde se ha reconocido la presencia de pliegues litosféricos. Además, argumento sobre la conexión existente entre los patrones regulares E-O y NE-SO observados en la zona occidental de España y los relieves que forman el Atlas marroquí en el norte de África. Una discusión similar es propuesta para el área del Tien-Shan y la Cordillera del Pamir en Asia Central, donde la topografía a largo plazo ha sido relacionada con pliegues litosféricos. Una síntesis sobre la influencia de las fallas pre-existentes en la configuración final de la deformación de áreas intra-placa se presenta mediante la comparación de estructuras tectónicas de los modelos y un ejemplo en los Andes de Merida, Venezuela, mostrando las principales diferencias y similitudes en la reactivación de estructuras tectónicas heredadas en un entorno intra-placa.



<b>1</b>	<b>Cainozoic intra-plate mountain building in Iberia</b>	<b>1</b>
1.1	Introduction	1
1.2	Early evidences of intra-plate topography	4
1.3	Different hypothesis for intraplate mountain building in Iberia	4
1.4	Scope of this thesis	6
1.5	Thesis outline	7
<b>2</b>	<b>Fundamental aspects of folding</b>	<b>9</b>
2.1	Introduction	9
2.2	Mechanisms of folding development	10
2.2.1	Folding of single-layer systems	10
2.2.2	Folding of multilayer systems	12
2.3	Folding-faulting relationships	13
2.4	Lithospheric folding	14
2.4.1	Global distribution	16
2.4.2	Continental lithosphere	17
2.4.3	Oceanic lithosphere	18
2.5	Folding of the Ibero-African lithosphere	19
<b>3</b>	<b>Cainozoic deformation of Iberia: a model for intra-plate mountain building and basin development based on analogue modelling</b>	<b>21</b>
3.1	Introduction	21
3.2	Cainozoic deformation and plate reorganisation	22
3.3	The role of late-Variscan tectonic structures	28
3.4	Distribution of mountain ranges and related basins	34
3.4.1	Alpine evolution of intra-plate mountain ranges	34
3.4.1.1	Northern Spain	34
3.4.1.2	Central Iberia	36
3.4.1.3	Atlantic margin	40
3.4.2	Cainozoic intra-plate basins	45

---

3.4.2.1 Ebro Basin	45
3.4.2.2 Duero Basin	49
3.4.2.3 Tagus Basin	50
3.4.2.4 Minor intra-plate basins	52
3.5 The Iberian lithosphere	54
3.5.1 Crustal structure and topography	54
3.5.2 Thermal structure and rheology	57
3.6 Analogue modelling set-up	60
3.6.1 Geometry, rheology and scaling	60
3.6.2 Simplifications and general assumptions	62
3.7 Modelling results	64
3.7.1 Crust-mantle coupling	64
3.7.1.1 Model IBERIA-I: weak crust-mantle coupling (convergence rate 0.5 cm/h)	64
3.7.1.2 Model IBERIA-II: strong crust-mantle coupling (convergence rate 1cm/h)	67
3.7.2 Rheology of the lower crust and upper mantle	67
3.7.2.1 Model IBERIA-III: strong lower crust, weak upper mantle	68
3.7.3 Influence of an indenter	69
3.7.3.1 Model IBERIA-IV	69
3.7.3.2 Model IBERIA-V	69
3.7.3.3 Model IBERIA-VI	73
3.7.4 Role of model size	73
3.7.4.1 Model IBERIA-VII	73
3.7.4.2 Model IBERIA-VIII	76
3.8. Discussion of modelling results	77
3.8.1 Relationship of folding and faulting	77
3.8.2 Experimental Moho depth and surface topography	77
3.8.3 Implications for mountain building and basin development in Iberia	79
3.8.3.1 Basement uplift controlled by lithosphere folding amplification	79
3.8.3.2 Intra-mountain evolution,	

migration and subsequent basin disconnection: a broken foreland basin model	81
3.9 Conclusions	83
<b>4 Integration of gravity and topography analysis in analogue modelling: understanding lateral strength variations in Iberia and their influence on intra-plate mountain building</b>	<b>85</b>
4.1 Introduction	85
4.2 Surface structure and lithospheric configuration of Iberia	86
4.3 Integrating analogue modelling with spectral analysis of gravity and topography	87
4.3.1 Analogue modelling	87
4.3.2 Gravity interpretation of physical experiments	88
4.3.2.1 Fundamentals of gravity	88
4.3.2.2 Corrections to gravity observations	91
4.3.2.3 Geological factors and assumptions	93
4.3.2.4 Gravity modelling	93
4.3.3 Fourier analysis of periodic functions	95
4.3.3.1 Data processing	97
4.4 Modelling results	98
4.4.1 Model with homogeneous strong lithosphere (IBERIA-I)	98
4.4.2 Model with lateral strength variations (IBERIA-XIX)	98
4.4.3 Model with lateral strength variations and E-W Mesozoic depocentres (IBERIA-X)	103
4.5 Discussion	106
4.5.1 Lithosphere strength variations and topography	106
4.5.2 The role of late-Variscan structures during Cainozoic deformation of Iberia: do they really influence folding?	108
4.6 Conclusions	111
<b>5 Strain partitioning and intra-plate deformation: the role of lateral strength variations in Central Iberia</b>	<b>113</b>
5.1 Introduction	113

---

5.2 Geological framework	114
5.3 Analogue modelling experiments	118
5.4 Modelling results	120
5.4.1 Model without depocentres (IBERIA-XIX)	122
5.4.2 Model with E-W Mesozoic depocentres (IBERIA-X)	124
5.5 Discussion	125
5.5.1 Influence of lateral lithospheric strength changes on mode of deformation	125
5.5.2 Strain partitioning within intra-plate domains	126
5.6 Conclusions	127
<b>6 Discussion and conclusions</b>	<b>129</b>
6.1 Introduction	130
6.2 Folding of de-coupled lithosphere	130
6.2.1 Ibero-Atlas mountain belt	132
6.2.2 Tien Shan Mountains in Central Asia	136
6.3 Crustal architecture of intra-plate folded lithosphere: The role of pre-existent tectonic structures	139
6.3.1 The Mérida Andes (western Venezuela)	139
6.3.2 Comparison with Iberia	139
6.4 Basin response to active intra-plate mantle deformation	141
6.5 Conclusions: a new model for Intra-plate mountain building and basin development in Iberia.	141
<b>7 References</b>	<b>143</b>