



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

Modelització espaciotemporal de dinàmiques d'interacció social

Una aproximació multiescalar a la reconstrucció
d'activitats humanes al NE peninsular a través
de les dades arqueològiques

Maria Yubero Gómez

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Modelització espaciotemporal de dinàmiques d'interacció social

UNA APROXIMACIÓ MULTIESCALAR A LA
RECONSTRUCCIÓ D'ACTIVITATS HUMANES AL NE
PENINSULAR A TRAVÉS DE LES DADES
ARQUEOLÒGIQUES

Maria Yubero Gómez

dirigida per

Dr. F. Javier LÓPEZ CACHERO

Dr. Xavier RUBIO CAMPILLO

Programa de doctorat de Societat i Cultura
Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia
Facultat de Geografia i Història



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Barcelona, 11 de novembre de 2015

Agraïments

La meva tesi doctoral no hagués arribat a bon port si no hagués estat per l'ajuda desinteressada de molta gent m'he trobat pel camí. Aquí va el meu petit homenatge a totes elles. Espero no deixar-me a ningú.

En primer lloc, aquesta tesi s'ha dut a terme gràcies a un ajut predoctoral de formació investigadora concedit per l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca, i a dues beques per a estades de recerca a l'estranger concedides per la mateixa institució.

Gràcies als meus directors de tesi F.Javier López Cachero i Xavier Rubio Campillo per animar-me en els moments més complicats, per no deixar-me defallir i guiar-me en aquesta empresa. Se que a vegades no ho he posat fàcil!

Durant aquests anys he tingut la sort de viatjar i aprendre molt. Gràcies a David Wheatley i a la Patricia Murrieta Flores la meva estada a Southampton va ser més que profitosa. Gràcies també a en Vasko, el Costas, l'Angeliki, l'Emilie i el Tomeu per totes les bones estones, converses i dinars al pati de la universitat. Una especial menció es mereix la Clara Crespo, per fer-me sentir com a casa i compartir les ofertes de la nutella amb mi.

La meva estada al Institute of Archaeology no hagués estat possible sense l'Andrew Bevan. I no hagués estat igual de càlida (i amb un cafè tan bo!) sense l'Enrico, la Carolyn, l'Eugenio i la Javiera.

Gràcies a tots els companys i companyes del SERP, que sempre ha estat allà per donar-me un cop de mà quan ho he necessitat. Gràcies al Josep Maria Fullola, la Maria Àngels Petit, el Xavier Mangado, en Santi Riera, la Núria Rodríguez, la Marta Sánchez, el Xavi Esteve i a la resta de l'equip.

La vida del doctorand no és fàcil, per això ens hem de buscar noves aventures. Una d'elles va ser la formació d'AINUBHA i l'organització de les JIA 2013. Gràcies a tots els companys i companyes d'equip va ser una experiència altament gratificant i on vaig aprendre moltíssim. Comptar amb gent com la Ruth, l'Edu, la Carme, el Leandro, el Juanjo, la Patri, el Sergi, el Pau, la Jero i el Francesc C. Conesa fa que la diversió estigui assegurada! Tampoc em vull oblidar dels companys medievalistes, la Carme i en Pau, que sempre han allà quan els he necessitat per dubtes, canyes o concerts de Belle

and Sebastian.

I en la mateixa línia, aquí va el meu petit homenatge als companys d'organització dels Seminaris del Departament durant els cursos 2011-2012-2013. En especial al Joan Daura, la Montse Sanz i la Marta Portillo. Va ser un cicle de seminaris espectacular!

Excavant he tingut la sort de conèixer al Xavier Oms, la Susana Mendiola, la Patricia Martín, al Jonàs Alcaina i també al Manuel Sánchez Elipe. Gràcies per les canyes, les converses i les visites en els moments adequats.

No tot ha estat recerca durant aquest temps, per això vull donar les gràcies a la Débora, la Carla, el Marco, l'Stefano i el Jito per tot el suport donat i per tots els vermuts i kilòmetres compartits. Estic segura que han estat de gran inspiració per la tesi.

Gràcies a l'equip de SIRIS Academic i la seva comprensió en els moments d'acabar la tesi. En especial, a la Solange, en Bernardo, la Sebastian i en Philipp. I no em puc deixar al Víctor, a l'Alba i l'Anna per tants cafès i galetes. Estic segura que han estat un bon combustible per la tesi!

En aquestes línies no em vull deixar al F.Xavier Hernández Cardona a qui vaig conèixer ja fa uns anys i que sempre m'ha inspirat per tirar endavant en el món de la recerca.

El meu agraïment també va per la Cristina i la Laura, amigues de tota la vida, que sempre han estat al meu costat durant tot aquest temps.

Menció especial la mereixen la Marta Mateu, la Cristina Puig i la Laia Font. Elles són les millor companyes de viatge (i de doctorat) que tothom voldria desitjar. Gràcies per les converses profundes, i no tant profundes, durant tots aquests anys. I pels que estan per venir.

No m'oblido del Rafa, que gràcies a que hem estat doblement acompanyats per la força, hem pogut acabar les respectives tesis doctorals.

Per últim, vull donar les gràcies a la meua família, i en especial als meus pares, Mari i José Luís, per haver-me animat sempre en tirar endavant aquesta empresa. I al Xavi, el Newton i la Leïa, que han mostrat una paciència i un amor infinit durant la redacció d'aquesta tesi. Moltes gràcies per animar-me en els moments més baixos, treure'm un somriure i fer possible que la tesi arribés a bon port.

Índex

Resum	15
1 Presentació	17
1.1 Presentació dels treballs	17
1.2 Unitat temàtica	18
1.3 Context global de la recerca	20
1.4 Estructura	22
2 Introducció	25
2.1 La identificació de patrons espacials en l'estudi del passat . . .	25
2.2 Objectius de la recerca	27
2.3 L'ús de models geogràfics en arqueologia	28
2.4 Marc teòric	32
3 Metodologia	39
3.1 Una introducció als SIG	39
3.1.1 Què és un SIG	39
3.1.2 Breu història dels Sistemes d'Informació Geogràfica . .	41
3.2 Potencial i capacitats dels SIG	43
3.2.1 Estructura	43
3.2.2 Elements espacials	45
3.2.3 Dades i atributs	48
3.2.4 Les bases de dades espacials	49
3.2.5 Modelització geogràfica	51
3.2.6 Tipus de formats: ràsters i vectors	53
3.2.7 La millor opció: ràster o vector?	55
3.2.8 El Model Digital d'Elevació del Terreny	56
3.3 Eines	58
3.3.1 Bases de dades	59
3.3.2 Sistemes d'Informació Geogràfica	60
3.3.3 Llenguatges de programació	62
3.4 Recursos emprats	63

3.4.1	Geografia i topografia	63
3.4.2	Arqueologia	64
3.4.3	Història i Cartografia	65
3.5	Bases de dades	66
3.5.1	Base de dades de jaciments prehistòrics	66
3.5.2	Base de dades històriques	74
3.6	Anàlisi espacial	74
3.6.1	Consultes	76
3.6.2	Mesures	77
3.6.3	Generació de noves dades	78
3.6.4	Resums descriptius i geoestadística	81
3.6.5	Dades generades a partir del DEM	81
3.6.6	Rutes òptimes i accessibilitat	82
3.6.7	Contrastació d'hipòtesis	85
4	Spatiotemporal model of a city siege	87
4.1	Introduction	88
4.2	Modeling the siege of a city	89
4.2.1	The historical event	90
4.2.2	The components of the model	91
4.3	Analyzing the model	95
4.3.1	Defensive support	95
4.3.2	Relation between casualties and distance to defenses	97
4.3.3	Relation between casualties and type of work	98
4.4	Results and discussion	98
4.4.1	Defensive structure of the city	99
4.4.2	The origin of besieger's casualties	102
4.5	Concluding remarks	107
4.6	Acknowledgements	108
5	Mapping changes in late prehistoric landscapes	109
5.1	Introduction	110
5.1.1	Late Bronze Age and Early Iron Age in the NE Iberian coast	111
5.1.2	Mesoscalar analysis of settlement location	114
5.2	The case study	114
5.3	Methodology	117
5.4	Results	120
5.4.1	Geographical variables	120
5.4.2	Visibility analysis and accessibility	123
5.4.3	Natural corridors	124

5.4.4	Multivariate analysis	125
5.5	Discussion	127
5.6	Acknowledgments	130
6	The study of spatiotemporal patterns in NE Spain	135
6.1	Introduction	136
6.1.1	The study of temporally explicit patterns	136
6.1.2	Uncertainty	137
6.2	Case study	139
6.3	Model concepts	143
6.3.1	Spatial site database	144
6.3.2	Geographical variables	144
6.3.3	Temporal uncertainty	145
6.4	Methodology	145
6.4.1	Aoristic model	145
6.4.2	Monte Carlo simulations	147
6.4.3	Cross-validation of the aoristic model with radiocarbon dates	148
6.4.4	Calculation of spatial values	153
6.4.5	Detection of variation	153
6.5	Discussion	154
6.6	Acknowledgments	157
7	Discussió	159
7.1	Esdeveniment de curta durada	159
7.2	Esdeveniment de mitja durada	161
7.3	Esdeveniment de llarga trajectòria	162
7.4	Reflexions generals	165
8	Conclusions	167
8.1	Resultats dels casos d'estudi	167
8.1.1	Cas d'estudi 1: Esdeveniment de curta durada	167
8.1.2	Cas d'estudi 2: Esdeveniment de durada mitjana	168
8.1.3	Cas d'estudi 3: Esdeveniment de llarga trajectòria	169
8.2	Assoliment d'objectius	169
8.3	Propostes de recerca futures	170
A	Còpia d'articles publicats	173
A.1	Spatiotemporal model of a city siege	173
A.2	Mapping changes in late prehistoric landscapes	191
A.3	The study of spatiotemporal patterns in NE Spain	204

Índex de figures

3.1	Nivells d'abstracció d'un model geogràfic	52
3.2	Estructura del format ràster	55
3.3	Estructura del format vectorial	55
3.4	Model Digital del Terreny en format vectorial	57
3.5	Model Digital del Terreny en format ràster	58
3.6	Base de dades del Libre Office, a on es mostren les vistes de formulari, consultes i taules.	60
3.7	Interfície de treball de GRASS	61
3.8	Integració entre GRASS i QGIS	62
3.9	Model entitat-relació del nostre cas d'estudi. Es mostren els diferents conceptes, relacions i característiques que haurem de reflectir a la base de dades final	67
3.10	Vista de formulari de la base de dades	68
3.11	Model relacional final de la base de dades. Es mostren les diferents taules i el grau de relació que hi ha entre elles	70
3.12	Model entitat relació de la base de dades històrica	75
3.13	Les tres vistes existents en la interfície gràfica d'un GIS (en aquest cas Quantum GIS)	77
3.14	Aplicació de l'algoritme de veïnatge. La gradació de blau a vermell indica un nombre creixent d'intervencions arqueològi- ques a l'àrea.	80
3.15	Mapa de gradients	83
3.16	Mapa d'orientacions	83
4.1	A sample of the maps used to georeference the city defenses: (a) city map: " <i>Le Plan de Barcelonne et de ses environs. Tres exactement Levés sur les Lieux en 1706</i> ", drawn by Nicolas de Fer and (b) " <i>Plan des attaques de Barcelonne en 1714</i> ", drawn by the second chief-engineer of the French army, Lozi- eres d'Astier.	94

4.2	Defensive perimeter of Barcelona during the siege of 1713-1714, based on the georeference of different maps and text descriptions. The southern part is controlled by the fortress of Montjuïc, built on top of a hill.	95
4.3	Earthworks developed by the besiegers during the siege.	97
4.4	Defensive support between city defenses at artillery range (300 m.), in increasing intensity from white to darker grey.	99
4.5	Defensive support between city defenses at musket range (80 m.), in increasing intensity from white to darker grey.	100
4.6	Defense perimeter split in 4 sectors. This classification is based on the descriptions of city walls written during sieges undertaken before 1714.	101
4.7	Evolution of distance to the covered way. X axis defines the temporal scale of the action, marking the beginning of the activity for the different siege works.	103
4.8	Evolution of daily casualties. X axis defines the temporal scale of the action, marking the beginning of the activity for the different siege works.	104
4.9	Relation between daily casualties and average distance to defenses.	105
4.10	Average casualty rate for each type of siege work. The dark tone shows the average casualties for every siege work, from white (less risky) to black (most dangerous areas)	106
5.1	Current geographical map and features of the case study: the current Catalan coast.	111
5.2	Distribution of sites by period: top) LBA and down) EIA. . .	116
5.3	The Besòs river has been traditionally identified as a boundary between areas with different dynamics. We have chosen these areas (left and right bank) as our spatial units of analysis. . .	117
5.4	Example of the visibility algorithm. For each site the total amount of visible area (green color-coded) up to 10 km. is quantified.	119
5.5	Example of the accessibility analysis. The least-cost path of each cell within a 1km radius to the site is computed. It is based on the slope cost of the cells (red to green gradient). A final value for site is quantified averaging the cost in accumulated degrees of slope.	120

5.6	Definition of natural corridors. A perimeter of points is defined outside our studied region at regular intervals. The least-cost path is calculated between each pair of points, and the number of paths passing through each cell is computed. In this example the paths for 3 points (A, B and C) is shown.	121
5.7	Density estimates of settlement altitude for the various combinations of areas and chronologies.	122
5.8	Density estimates of settlement slope (measured in degrees).	123
5.9	Density estimates of settlement aspect (measured in degrees).	125
5.10	Density estimates of settlement visibility.	126
5.11	Density estimates of settlement accessibility.	127
5.12	Natural corridors in relation to the sites for a) the LBA and b) the EIA. The analysis makes use of all least-cost routes from each point on the perimeter to all other points, with the colour of each segment of the network identifying the number of routes that pass through it.	132
5.13	Density estimates of settlement distance to natural corridors	133
6.1	Spatial analysis of an archaeological dataset comprising two imaginary chronological units: number of sites	138
6.2	Spatial analysis of an archaeological dataset comprising two imaginary chronological units: spatial distribution	139
6.3	Spatial analysis of an archaeological dataset comprising two imaginary chronological units: time series	140
6.4	Late prehistoric archaeological sites located in the study area, depicted over a Digital Elevation Model raster map	141
6.5	The sum of aoristic weights for the archaeological sites of the Besòs valley in relation to time steps.	146
6.6	Number of sites per time step based on relative dating of pottery phases	147
6.7	Density plots for standard deviations of 100, 1 and 10 k sample sizes of the Monte Carlo distributions	149
6.8	Number of sites generated by Monte Carlo simulations. Each <i>grey line</i> shows the results for a different run, and the <i>white shape</i> is the average trajectory.	150
6.9	Slope of existing sites, generated by Monte Carlo simulations. Each <i>grey line</i> shows the results for a different run, and the <i>white shape</i> is the average trajectory.	150
6.10	Distance of existing sites from natural routes, generated by Monte Carlo simulations. Each <i>grey line</i> shows the results for a different run, and the <i>white shape</i> is the average trajectory	151

6.11	The average for the variable slope described for the different models at time steps 4250, 1900 and 650 BCE. The value was computed from the collection of sites existing in these time steps. C14 values are taken from the mean value of the probabilistic distribution.	152
6.12	The average for the variable distance from natural routes described for the different models at time steps 4250, 1900 and 650 BCE. The value was computed from the collection of sites existing in these time steps. C14 values are taken from the mean value of the probabilistic distribution.	152
6.13	Variation in number of sites for the chronological model	154
6.14	Variation in slope for the chronological model.	154
6.15	Variation in distance from natural routes for the chronological model	155

Índex de taules

3.1	Models de superfície que podem obtenir a partir del DEM (a partir de (Conolly & Lake, 2006, 147)	82
4.1	Siege phases. Each day is shown as an absolute date, starting with 12th July, 1714 (day 1) and ending the 62nd day (11th September, 1714). The activities were usually performed from 19:00 to 05:00 of the next day.	96
5.1	Pairwise KS tests for height. Blue values are significant with p-value<0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process	124
5.2	Pairwise KS tests for slope. Blue values are significant with p-value<0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.	124
5.3	Pairwise KS tests for aspect. Blue values are significant with p-value<0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.	126
5.4	Pairwise KS tests for visibility. Blue values are significant with p-value<0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.	128
5.5	Pairwise KS tests for accessibility. Blue values are significant with p-value<0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.	128
5.6	Pairwise KS tests for distance to natural corridors. Blue values are significant with p-value<0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.	129
5.7	ANOVA test for a logistic multivariate regression model for bank location of the LBA sites. Height and accessibility are the most important factors to explain the differences between the river bank where sites are located	129

5.8	ANOVA test for a logistic multivariate regression model for bank location of the EIA sites. Distance, accessibility and height are the significant variables that explain the differences between the river bank where sites are located.	130
6.1	Chronological span for each chronological unit of late prehistory in the northeastern Iberian Peninsula, after Barceló (2007b)	142
6.2	A single Monte Carlo execution of our case study recording the existence (1) or nonexistence (0) of different sites for the period 1050–600 BCE	148

Resum

Aquesta tesi doctoral versa sobre una proposta metodològica per estudiar els fenòmens espaciotemporals en contextos històrics i arqueològics.

A partir de tres casos d'estudi proposem un marc de treball que permeti estudiar dinàmiques temporals succeïdes a escales diferents, tot tenint en compte les particularitats de cada escenari, les preguntes de recerca i els tipus de dades utilitzats per a respondre-les. Els casos d'estudi són els següents: a) el setge de Barcelona de 1714, b) una comparació de la zona que comprén la Depressió Prelitoral durant el bronze final i la primera edat del ferro, i c) l'anàlisi dels patrons de poblament durant la prehistòria recent a la zona de la conca del riu Besòs. Els resultats de cadascun d'aquests escenaris han estat presentats en forma d'article de recerca en revistes d'alt impacte internacional. En conjunt conformen una imatge global a on estan representades les tres escales temporals comunes a qualsevol estudi del passat: un esdeveniment de curta durada (dies), una dinàmica de mitjana durada (segles), i un de llarga trajectòria (mil·lennis).

Aquest projecte de tesi fa servir aquests tres casos d'estudi per tal de realitzar una proposta d'aproximació metodològica integradora per l'anàlisi espaciotemporal de les dades arqueològiques i històriques.

Abstract

This PhD dissertation presents a methodological proposal to study spatio-temporal phenomena within historical and archaeological contexts.

The proposal is based on the application of a common framework to three case studies. The aim of this approach is the analysis of temporal dynamics at different scales while taking into account the particularities, research questions and data sources defined in the different scenarios. The case studies were defined as follows: a) the 1714 siege to the city of Barcelona, b) a comparative analysis of late bronze age and first iron age periods for the catalan coastal and precoastal ranges, and c) the analysis of settlement patterns during late prehistory in the Besòs river basin. The results of each

of these works have been presented as indexed paper in international high-impact journals. They form together a global perspective encompassing the three temporal scales commonly used in any study of the past: a short-term event (days), mid-term dynamics (centuries) and long-term trajectories (millenia).

This PhD project integrates the three case studies into a methodological integrative approach designed to improve the spatiotemporal analysis of archaeological and historical data.

Capítol 1

Presentació

En aquest primer apartat presentem els treballs que formen part d'aquesta tesi doctoral, així com la seva unitat temàtica i el context del projecte del grup del recerca on s'han realitzat.

1.1 Presentació dels treballs

Aquesta tesi doctoral es presenta com a compendi d'articles amb el vist i plau i sota la regulacions de l'Escola de Doctorat de la Universitat de Barcelona. El treball inclou tres articles originals que han estat publicats en revistes amb un sistema de revisió per pars. Les tres revistes presenten un factor d'impacte dins del primer quartil, d'acord amb el 2014 Journal Citation Report (JCR), per les categories de *Anthropology, Social Sciences & Interdisciplinary*.

La llista completa de referències dels articles que formen aquesta tesi i el seu factor d'impacte és:

- Rubio-Campillo, X., Cardona, F.X.H., **Yubero-Gómez, M.**, 2014. "The Spatiotemporal Model of an 18th-Century City Siege". *Social Science Computer Review* doi:10.1177/0894439314558559 - *Factor d'impacte (2014): 1.36*
- **Yubero-Gómez, M.**, Rubio-Campillo, X., López-Cachero, F.J., Esteve-Gràcia, X., 2015. "Mapping changes in late prehistoric landscapes: A case study in the Northeastern Iberian Peninsula". *Journal of Anthropological Archaeology* 40, 123–134. doi:10.1016/j.jaa.2015.07.002 - *Factor d'impacte (2014): 1.906*
- **Yubero-Gómez, M.**, Rubio-Campillo, X., López-Cachero, J., 2015. "The study of spatiotemporal patterns integrating temporal uncertainty

in late prehistoric settlements in northeastern Spain". *Archaeological Anthropological Sciences* 1–14. doi:10.1007/s12520-015-0231-x - *Factor d'impacte (2014): 1.878*

1.2 Unitat temàtica

Els tres articles presentats responen a una mateixa unitat temàtica, en tant que tots tres proposen solucions i aproximacions multidisciplinars per integrar la incertesa espaciotemporal en l'estudi del passat, tot integrant tota l'evidència disponible (especialment arqueològica però també històrica) mitjançant un Sistema d'Informació Geogràfica. Els tres casos d'estudi presenten característiques úniques que fa que siguin complementaris des d'un punt de vista metodològic. Tots tres presenten escales temporals diferents: dies, segles i mil·lennis. De la mateixa manera, en els tres casos hem creat models formals per tal de poder treballar amb dades fragmentades, informació espacial de les dades arqueològiques i històriques i alhora integrar la incertesa inherent en aquestes dades.

Els tres articles presentats corresponen a tres casos d'estudi triats per poder modelitzar la incertesa espaciotemporal en diferents escales temporals. Els casos d'estudi són els següents:

- Esdeveniments de curta durada: *Setge de Barcelona a l'estiu de 1714*

L'important paper que el terreny juga dins la guerra ha promogut una intensa relació entre els conflictes militars i l'ús de tècniques dissenyades per entendre l'espai. Aquest és especialment rellevant des de l'època moderna. Els enginyers, que tant construïen com assaltaven les defenses de les ciutats, registraven els esdeveniments amb diferents tipus de documentació, incloent informes, diagrames i mapes. La gran majoria d'aquests documents contenen informacions espacials i temporals, però són difícils d'integrar en un marc de treball comú degut a la seva heterogeneïtat. En aquest context, els Sistemes d'Informació Geogràfica proporcionen les eines necessàries per analitzar tot el potencial que presenten aquestes fonts de caràcter militar. Aquest treball proposa una nova aproximació a l'estudi dels setges utilitzant un model espaciotemporal capaç d'integrar fonts cartogràfiques, arqueològiques i textuals.

Els principal objectiu d'aquest primer treball és definir una metodologia par tal d'avaluar hipòtesis de treball concretes a partir d'evidència procedent de múltiples fonts de dades. El cas d'estudi per aplicar aquesta metodologia és el setge Franco-Espanyol de la ciutat de Barcelona al

1714. Els protagonistes del setge van enregistrar el desenvolupament de l'acció. Igualment, diferents autors van descriure l'esdeveniment com a paradigma d'una ciutat assetjada. Per aquesta raó, el model ha estat emprat per explorar per què les accions reals varen ser desviades de les guies que apareixen als manuals. En aquest context, explorem dues qüestions: a) per què els atacants escullen assaltar un sector particular de la ciutat i b) els factors que expliquen les baixes dels assetjats.

Els resultats de l'article serveixen per a proposar eines metodològiques capaces d'integrar informació heterogènia per entendre un fet històric de curta durada. En particular, entendre les dinàmiques d'un setge del segle XVIII no només té un abast militar, sinó que també explica la configuració del paisatge urbà de l'època i l'impacte del mateix en l'Europa actual.

- Esdeveniments de durada mitjana: *Estudi comparatiu de les dinàmiques de canvi del bronze final a la primera edat del ferro entre les dues ribes del Llobregat*

Durant el bronze final i la primera edat del ferro (1300-550 ane) el Mediterrani va ser un focus intens d'interconnectivitat. El desenvolupament de l'intercanvi comercial va incrementar de manera exponencial al llarg de les seves costes com es pot observar en l'evidència arqueològica. Aquests processos de gran magnitud van tenir un impacte en totes les escales i territoris propers a les principals vies de comerç. No obstant, aquest procés va ser altament divers en totes les seves formes. Aquest treball presenta un cas d'estudi enfocat en dues zones adjacents a la costa del nord est de la Península Ibèrica, comprnent el territori corresponent avui en dia al Baix Llobregat, Barcelonès, Vallés Occidental, Vallés Oriental, Maresme, Garraf i Alt i Baix Penedès. L'anàlisi espacial ha estat portat a terme per explorar les trajectòries de les dinàmiques de poblament durant aquests dos períodes.

Per comparar ambdues àrees i períodes, i identificar-ne les diferències principals hem explorat variables geogràfiques bàsiques, els patrons de mobilitat i la distància als corredors naturals. No obstant, una de les àrees va ser radicalment influenciada per les rutes de comerç a la primera edat del ferro, mentre que l'altre sembla no estar afectada de la mateixa manera per aquest factor extern. La interpretació d'aquestes anàlisis suggereixen que l'augment de la connectivitat no va ser homogeni en tot el Mediterrani Occidental, però en les regions on va tenir lloc, aquest factor va esdevenir decisiu per explicar la seva trajectòria històrica.

- Esdeveniment de llarg recorregut: *Estudi de l'evolució del poblament als jaciments localitzats a la conca del riu Besòs del neolític a la primera edat del ferro.*

Aquesta article explora la integració de dos factors que són típicament difícils d'emprar en l'anàlisi espacial: temps i incertesa. El marc de treball ha estat desenvolupat per analitzar a mig i llarg termini la variació en les dinàmiques de poblament durant la prehistòria recent al NE peninsular. Seguint propostes d'obres anteriors hem creat un model aorístic construït a partir de les datacions relatives de materials arqueològics. Aquest model ha permès integrar la incertesa de les dades en l'avaluació d'hipòtesis de treball a partir d'un mètode estocàstic conegut com a simulacions Monte Carlo.

El mètode ha permès explorar el cas d'estudi emprant una aproximació discreta als passos de temps i calculant les probabilitats d'absència i presència de poblaments en funció de les datacions existents. Igualment, les datacions radiomètriques disponibles també han estat incloses per validar la precisió dels resultats de la simulació. Partint de la clàssica anàlisi estàtica de les variables inherent als Sistemes d'Informació Geogràfica el model proposa una aproximació on els investigadors poden integrar la variable temporal i la incertesa associada. Els resultats mostren que els patrons detectats per l'anàlisi espacial clàssica poden ser artefactes derivats de la falta d'aquesta integració espaciotemporal. El model és també utilitzat per comparar variacions idèntiques on la ràtio de canvi, analitzada des d'aquesta perspectiva, és totalment diferent. En altres paraules, més enllà de comparar diferents períodes es proposa calcular la velocitat de canvi en els patrons d'assentament per tal de trobar possibles variacions difícilment identificables amb un anàlisi espacial tradicional.

1.3 Context global de la recerca

Aquesta recerca s'ha portat a terme dins del marc del grup de recerca Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques (SERP) de la Universitat de Barcelona liderat pel Dr. Josep Maria Fullola i Pericot, del qual l'autora en forma part en qualitat d'investigadora.

El SERP és un grup de recerca en el camp de la Prehistòria vinculat a la càtedra de Prehistòria del Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia, i que fou fundat l'any 1986. D'aleshores ençà centra el seu treball en la reconstrucció paleoambiental i l'estudi de l'evolució cultural dins

la Prehistòria partint de la premissa de la interdisciplinarietat¹.

El projecte de recerca presentat en aquesta tesi doctoral encaixa perfectament amb les línies d'investigació del SERP, i en concret en el marc dels estudis transdisciplinaris relatius a les poblacions holocenes. Aquests s'han dut a terme dins diferents projectes finançats HAR2011-26193, HAR2013-48010-P, 2009SGR-01145 aportant noves visions que fan servir el potencial de l'anàlisi espacial i altres metodologies quantitatives.

El nostre director i tutor F.Javier López Cachero forma part del mateix grup de recerca, a on lidera la línia dedicada a prehistòria recent. Ha fonamentat aquesta línia a través de la participació en nombrosos projectes i publicacions centrats en l'estudi de les societats del bronze final i primera edat del ferro al Nord-est peninsular. Pel que fa al nostre segon director (i també coautor dels articles), Xavier Rubio Campillo, forma part del grup de recerca Computer Applications in Science & Engineering CASE del Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación, a on aplica mètodes quantitius per estudiar els processos de canvi cultural (amb especial èmfasi en els escenaris de conflicte). La combinació de tots dos va ser crucial pel desenvolupament dels casos d'estudi on s'havien de combinar dades quantitatives i qualitatives, tot aplicant mètodes innovadors d'anàlisi a problemàtiques arqueològiques de caire divers.

Durant aquest període hem treballat amb diversos investigadors del SERP també involucrats en les línies de recerca relacionades amb les noves tecnologies i la dinàmica d'assentaments. En concret, el SERP presenta una recerca consolidada en l'àmbit de l'anàlisi espacial gràcies a l'investigador Xavier Esteve i Gràcia (Esteve, 2006; Bouso García et al., 2004). Esteve és també coautor d'un dels articles presentats en aquest treball.

La recerca duta a terme ens ha permès també col·laborar amb altres grups de recerca. Per poder dur a terme l'anàlisi del setge de Barcelona al 1714 vàrem comptar amb la inestimable ajuda de l'investigador F.Xavier Hernández Cardona, catedràtic i investigador principal del grup de recerca DIDPATRI (Universitat de Barcelona). Fruit d'aquesta col·laboració, i juntament amb en Xavier Rubio Campillo, vàrem tirar endavant la idea de desenvolupar un marc de treball integrat per estudiar el setge de Barcelona des d'una perspectiva espaciotemporal.

Per últim, les metodologies desenvolupades pels casos d'estudi descrits no serien possibles sense les nostres estades a la Universitat de Southampton i a la University College London. A l'Archaeological Research Computing Group ens vam centrar en l'estudi de patrons de mobilitats. Pel que fa a la segona estada realitzada al GIS Lab ens vàrem centrar en l'estudi de

¹<http://www.ub.edu/SERP> consultada el dia 22/09/2015

la incertesa temporal en casos d'estudi arqueològics. L'aprenentatge dut a terme a tots dos centres està explícitament representat en aquest treball a partir de la introducció d'estudis espacials quantitativs a on s'ha integrat la incertesa inherent de les dades arqueològiques.

1.4 Estructura

Hem dut a terme una presentació dels treballs publicats i les seves característiques. Procedirem a fer una presentació de l'estructura i els apartats d'aquesta tesi doctoral. Aquest treball està estructurat en tres blocs principals d'acord amb la normativa vigent de presentació per tesis per articles de la Universitat de Barcelona. Tots ells van precedits pels abstracts traduïts al català de les tres publicacions, així com un explicació global del context on s'ha dut a terme la recerca.

El primer bloc introdueix els temes de la tesi doctoral al capítol 2. En ell es fa un repàs de les problemàtiques a abordar, els objectius de la recerca i també on s'explica el marc teòric on s'integra la tesi. Aquest primer bloc acaba amb el capítol 3, a on repassem les eines i tècniques utilitzades per realitzar la recerca. És aquest capítol un component essencial d'aquesta tesi, donada la seva alta càrrega innovadora a nivell metodològic i tècnic.

El segon bloc està format per els tres articles que conformen el treball. El capítol 4 presenta l'article *The Spatiotemporal Model of an 18th-Century City Siege*, on es mostra un anàlisi espaciotemporal del setge de Barcelona. És un exemple d'anàlisi d'un esdeveniment de curta durada. El capítol 5 presenta l'article que porta per títol *Mapping changes in late prehistoric landscapes: A case study in the Northeastern Iberian Peninsula*, on es mostra un segon cas d'estudi centrat en dinàmiques de canvi de durada mitjana. Aquest correspon a la comparació de dos territoris veïns situats al NE peninsular durant les cronologies del bronze final i la primera edat del ferro. L'últim apartat d'aquest bloc és el capítol 6, i correspon a l'article *The study of spatiotemporal patterns integrating temporal uncertainty in late prehistoric settlements in northeastern Spain* on es presenta un anàlisi espaciotemporal de llarga durada del poblament prehistòric a la zona de la conca riu Besòs.

El tercer bloc està format pels capítols 7 i 8, centrats en la discussió dels resultats i les conclusions. En el primer presentem un resum de la discussió dels treballs i una discussió global dels resultats. En el segon cas presentem les conclusions globals de la recerca.

Per últim, en l'Apèndix A es troben tots els articles publicats amb la seva maquetació original. Cal destacar que tota la informació relacionada amb les bases de dades i codi font emprats durant aquest treball estan llicenciats

com a programari lliure, i es poden trobar al següent repositori de GitHub:
<https://github.com/myubero/tesi>.

Capítol 2

Introducció

2.1 La identificació de patrons espacials en l'estudi del passat

Actualment els Sistemes d'Informació Geogràfica (GIS)¹ s'han convertit en una eina indispensable dins del món de l'arqueologia (Per una discussió més extensa sobre aquesta eina consultar el capítol 3, p. 39). La seva capacitat analítica i integradora fan que siguin necessaris en qualsevol àmbit d'estudi. Aquesta eina que és bàsicament una base de dades espacial s'ha popularitzat en els darrers 20 anys. Això ha permès que durant aquest temps el seu ús s'hagi disparat de manera exponencial en el camp de l'anàlisi espacial. Avui dia, un dels principals reptes que afronta la disciplina és treballar en un marc teòric més robust per donar resposta a reptes generats per la casuística de les dades arqueològiques i històriques. Exemples d'aquests reptes són la incertesa en les dades, la seva fragmentació, la integració de la dimensió espacial en els models geogràfics o com treballar les diferents escales d'estudi en els diferents casos d'estudi (Lock & Molyneaux, 2006).

Res millor que diversos exemples per il·lustrar la rellevància dels GIS en la recerca actual. Un dels millors exponents d'aquesta aproximació multidisciplinària basada en Sistemes d'Informació Geogràfica és el Kythera Island Project (Bevan & Conolly, 2004, 2013), dirigit per Cyprian Broodbank (University College London) i Evangelia Kiriati (Fitch Laboratory, British School of Athens). L'objectiu de la seva recerca es va basar en estudiar la diacronia del poblament durant 7000 anys a l'illa de Kythera (Grècia) emprant totes les ciències auxiliars disponibles a l'abast: geoarqueologia, GIS, geofísica, pa-

¹A mode d'aclariment volem remarcar que els acrònims GIS, provinent del terme anglès *Geographic Information System*, i SIG, conseqüència de la traducció anglesa, es fan servir com a sinònims actualment. Al llarg del text farem servir sobretot la primera de les formes.

linologia, arqueometal·lúrgia i estudis de materials ceràmics, entre d'altres. L'interès del projecte rau en què aquesta illa està situada en un lloc estratègic per a les comunicacions entre l'Egeu i la Mediterrània central, i sobretot per que havia estat molt poc estudiada. L'ús del GIS dins del projecte va tenir un paper preponderant ja que va permetre: la integració de totes les troballes en un mateix marc de treball; la creació d'una metodologia específica tenint en compte el tipus de dades; treballar les dades de procedents de la botànica, geoarqueologia i la recerca d'arxiu; i explorar quantitativament els resultats de l'excavació.

Un segon exemple, similar al cas anterior, és el projecte de La Balagne Landscape Project a la illa de Còrsega, dirigit per C. Weiss, Marcos Llobera, Keith Wilkinson i Nick Branch (Llobera et al., 2010). Es tracta d'una recerca destinada a conèixer l'evolució del paisatge a la regió de La Balagne i les implicacions simbòliques i socials que hi estan associades. Una altre vessant d'aquesta recerca està molt relacionada amb l'estat de l'art en la recollida de dades i el seu tractament amb sistemes d'informació geogràfica. Aquesta darrera qüestió és molt interessant, ja que la mateixa recerca obliga al plantejament de noves metodologies, més adequades per a cada tipus de dades.

Una tercera mostra d'aquestes rellevant innovacions metodològiques basades en els GIS és el treball de Hai Zhang, Andrew Bevan, Dorian Fuller i Yanming Fang sobre la combinació de l'arqueobotànica i les aplicacions dels GIS (Zhang et al., 2010; Silva et al., 2015). En aquesta recerca s'han pogut analitzar qüestions relacionades amb el desenvolupament de l'agricultura a la vall del riu Ying (Xina) des del neolític fins l'edat de bronze. Mitjançant l'anàlisi de components principals i el GIS s'han pogut detectar les zones més adients per l'agricultura, el seu desenvolupament i la relació d'aquest fet amb l'entorn i el medi ambient.

Els estudis centrats en la Península Ibèrica presenten també nombrosos exemples d'aquesta tendència. Un cas comú és l'estudi de dinàmiques d'assentament i localització, des d'exploracions a nivell micro (registre en superfície i anàlisi de densitat de materials) a grans estudis a nivell regional i macro (captació de recursos, pautes de visibilitat i vies de pas). En qualsevol cas, l'ús de GIS s'ha establert com una tècnica interessant per a qualsevol recerca del passat (Parcero Oubiña & Fábrega Alvarez, 2006; Murrieta-Flores, 2012, 2010; García-Sanjúan et al., 2006; Bermúdez Sánchez et al., 2006).

Altres estudis com els de visibilitats entre assentaments o l'ús de rutes de mínim cost són també usals, tant per cronologies prehistòriques com en casos més moderns. Exemples en tenim amb els estudis d'art rupestre a la zona d'Alacant (Fairén-Jiménez, 2004) o a la zona de Santolea a Teruel (Martínez Bea, 2006), on la visibilitat, en les seves diferents variants i les rutes

òptimes s'utilitzen conjuntament per buscar les possibles variables geogràfiques que porten a la ubicació de les pintures llevantines. L'estudi de les gradients, aspectes, vies de pas i les visibilitats donen noves dades per a la interpretació de l'art rupestre llevantí i els assentaments neolítics. Altres treballs com els realitzats als conjunts megalítics de Sierra Morena Occidental (Huelva i Sevilla) (Murrieta Flores & Wheatley, 2008; Wheatley et al., 2010; García-Sanjúan et al., 2006; Murrieta Flores & Wheatley, 2008) han permès analitzar mitjançant el mètode de la conca visual acumulada un conjunt de 36 monuments megalítics i 4 assentaments. Els investigadors han treballat les relacions visuals existents tant entre els megàlits, com entre aquests i els assentaments, per intentar definir comportaments de caire simbòlic i ideològic. Un altre exemple d'anàlisi de visibilitats en època ibèrica i romana el trobem en el treball de Ruestes i Bitrià (2006), que a partir d'aquesta tècnica i dels polígons Thiessen tracta d'analitzar els patrons d'assentament en aquestes dues èpoques a la zona de la Laietània litoral.

Ens agradaria remarcar que aquests són alguns dels exemples que podríem posar, però n'hi ha molts i de molta qualitat. La quantitat de treballs que hi ha sobre les aplicacions del GIS a l'arqueologia és molt destacable, però per desgràcia sembla que això no ha anat acompanyat d'una similar repercussió al nostre país. En aquests moments sembla que existeix cert creixent interès sobre aquestes aplicacions, però val a dir que encara queda molt a treballar. En concret, cal afrontar una sèrie de reptes que encara són presents a l'ús de GIS en l'estudi del passat, i és en aquest context de recerca que s'emmarca aquest projecte de tesi doctoral.

2.2 Objectius de la recerca

La finalitat principal d'aquesta tesi doctoral és la generació d'eines d'anàlisi i coneixement entorn a l'estudi de variables espaciotemporals en contextos arqueològics i històrics. Els objectius de la recerca que ens plantegem, tenint en compte les consideracions anteriors, els podem agrupar en dos grans conjunts: objectius globals i objectius concrets. Els primers corresponen al desenvolupament d'una metodologia flexible, integradora i acurada que ens permeti treure el màxim rendiment a les dades de les quals disposem i replicable en altres contextos històrics i arqueològics. Els segons fan servir l'aproximació metodològica proposada per tal de generar coneixement a partir de la seva aplicació a casos d'estudi particulars.

Els objectius global d'aquesta recerca es poden definir de la següent manera:

- Adaptar la metodologia existent a les peculiaritats dels casos d'estudi i

de les seves variables espacials i temporals. És a dir, tenint en compte el nostre registre volem desenvolupar una metodologia que ens permeti aproximar-nos als patrons espacials i temporals.

- Aportar una millora a les tècniques d'anàlisi espacial incloent la incertesa com eix de les anàlisis. D'aquesta manera, volem fer un pas més enllà i incloure les variables temporals en el model d'estudi. Aquest objectiu és de vital importància, ja que permet aportar una dimensió temporal. El principal problema que presenten els SIG és que la seva capacitat d'anàlisi serveix per estudiar una imatge estàtica, no esdeveniment continuu.

Aquests objectius globals són la base amb la qual s'han definit objectius concrets per tres casos d'estudi, corresponent a tres escales temporals diferents i a la vegada complementària: a) esdeveniments de curta durada, b) esdeveniments de durada mitjana i c) esdeveniments de llarga durada. Així doncs, a continuació exposem els objectius concrets de la nostra recerca:

- Respecte al primer cas d'estudi, l'objectiu principal és crear un marc de treball on combinar les dades procedents de l'arqueologia, fonts escrites i geogràfiques i avançar cap a un model més quantitatiu que permeti avançar fer interpretacions més informades, no només descriptives. Aquest esdeveniment és ideal per acomplir aquest objectiu. La relació que s'estableix entre la geografia, el temps, i el procés de decisió dels enginyers és tan heterogeni que no pot ser analitzat emprant només una única font. Per aquest motiu, un model geogràfic és la millor solució per integrar aquesta informació.
- Pel que fa al segon cas d'estudi, l'objectiu és comparar espacialment dues zones veïnes i similars en les cronologies del bronze final i la primera edat del ferro com són les dues ribes del riu Llobregat. Per una banda tindriem Alt i Baix Penedès, el Garraf i el Baix Llobregat, i per l'altra Vallès Occidental i Oriental, el Maresme i Barcelonès.
- I per últim, pel que fa al tercer cas d'estudi, és analitzar el poblament prehistòric a la conca del riu Besòs tenint en compte la fragmentació de les dades i la seva incertesa.

2.3 L'ús de models geogràfics en arqueologia

Abans de definir la metodologia de recerca és necessari establir el context en el qual s'emmarca aquesta projecte. aquest punt és realment important,

sobretot, des dels canvis radicals en la manera d'entendre la investigació a partir dels anys 60. Així doncs, és essencial entendre com aquestes *eines informàtiques*, que van entrar en ple funcionament en la dècada dels anys 90, han estat integrades dins els estudis arqueològics, tant a nivell teòric com pràctic. En conseqüència, és necessari explorar com han estat inclosos els GIS dins d'aquests marcs de pensament i de treball. Les corrents teòriques i pràctiques, en definitiva, són les que modelen la forma de fer arqueologia: com recollir dades, tractar-les i estructurar-les i com, en darrer terme, interpretar els anàlisis i extreure'n conclusions (Lock, 2009a, 75).

La creació de models geogràfics mitjançant Sistemes d'Informació Geogràfica no es va popularitzar dins la recerca històrica i arqueològica fins la dècada dels anys 80. Va ser a l'àmbit anglosaxó on van aparèixer les primeres publicacions (Kholer & Parker, 1986) sobre aquesta temàtica, donant molta èmfasi als models predictius. De fet, es tracta d'una disciplina jove, ja que només té uns 35 anys de tradició.

Tot i que el seu ús no està completament normalitzat ni generalitzat, es tracta d'una de les renovacions metodològiques més importants dels darrers anys, en quant arqueologia es refereix. Aquest factor es combina tradicionalment amb altres tecnologies de caire computacional, del que n'és un exemple el congrés internacional que es celebra anualment dedicat a aquests temes, conegut com a *Computer Applications in Archaeology*².

Malauradament cal dir que tant a Catalunya com a l'estat espanyol aquesta metodologia no està encara ben assentada. L'ús sistemàtic del GIS és encara una feina pendent a resoldre en el nostre país, especialment en relació a la seva integració dins una metodologia científica i sistemàtica. Malgrat tot, la última dècada ha vist un augment en el número d'obres que apliquen metodologies espacials a la recerca arqueològica, tot establint les bases per una popularització de la metodologia que permeti transformar els GIS en una eina quotidiana per a l'arqueòleg (veure per exemple Parcero Oubiña & Fàbrega Alvarez, 2006; Esteve, 2006; García-Sanjúan et al., 2009; Wheatley et al., 2010).

D'altra banda, cal destacar que encara que es tracti d'una branca de recerca relativament jove, el seu ús en els darrers anys ha experimentat un augment de caire exponencial. Tot i això, les bases que presenta per realitzar una aproximació científica encara no han estat fixades totalment. Això no és necessàriament dolent, ja que permet adaptar aquest tipus de metodologies als problemes que presenten les Humanitats i les Ciències Socials, i donar solucions diferents a les qüestions que presenten aquestes disciplines. Al mateix temps, actualment noves branques de coneixement procedents de la

²<http://caaconference.org> consultada el dia 22/09/2015

Intel·ligència Artificial i la simulació computacional s'estan combinant amb el GIS per a permetre realitzar una aproximació menys determinista i més completa de la realitat. Exemples d'això són la Modelització Basada en Agents o les anàlisis de xarxes complexes, mitjançant els quals podem realitzar simulacions de sistemes complexos, amb els que és més fàcil modelar la dinàmica de població humana, tant ara com en el passat (veure per exemple els recents monogràfics que el *Journal of Archaeological Method and Theory* ha publicat en relació a tots dos temes: Madella et al., 2014; Collar et al., 2015). D'aquesta manera podem respondre i aproximar-nos d'una manera més real a les comunitats pretèrites i als seus comportaments (Rubio Campillo, 2009, 158).

Aquests últims desenvolupaments volen fer front a la crítica fonamental que es realitza a les recerques d'anàlisi espacial a partir dels Sistemes d'Informació Geogràfica. Segons aquesta, en la gran majoria de casos els projectes que fan servir GIS només tenen en compte les dades geogràfiques, tot ignorant d'altres procedents de l'arqueologia experimental o l'etnoarqueologia (Grau i Mira, 2006, 17-18). L'ús de simulació ha permès superar aquesta barrera, ja que possibilita afegir variables relatives al comportament humà a les dades estrictament geogràfiques. Com a conseqüència, en els darrers anys s'està treballant per ampliar l'ús del GIS com a eina d'anàlisi sobre els patrons d'ocupació espacials de les comunitats passades a un marc molt més ampli, que tingui en compte diverses àrees de treball per generar hipòtesis de treball més versemblants (Grau i Mira, 2006, 17-18).

A banda de les crítiques, els avantatges de l'aplicació dels Sistemes d'Informació Geogràfica a l'arqueologia són molt evidents, ja que la majoria de dades que es tracten són espacials, en tant que procedeixen del registre arqueològic. De la mateixa manera, l'ús d'aquesta eina s'ha anat estenent també a diferents camps de la disciplina, com és per exemple la gestió patrimonial de jaciments o bé la modelització predictiva, la prospecció o la organització d'una excavació.

Aquestes dades d'entrada procedents dels registre arqueològic, és a dir, les dades que introduïm i tractem amb un GIS, provenen d'origen diferents:

- **L'excavació.** Es tracta de la recollida exhaustiva de la informació en un jaciment concret, on s'ubiquen espacialment els materials documentats i es descriuen les seves característiques. Cal dir que aquí els materials es situen tridimensionalment, tot prenent la X, Y i la Z.
- **La prospecció.** Es tracta de dades que ens ajuden a fer-nos una idea global del territori, suggerint-nos possibles localitzacions de jaciments i la seva possible extensió.

La diferenciació entre els dos mètodes és important, ja que un ens proporciona una visió detallada d'un jaciment en concret, mentre que l'altre ens dóna una perspectiva global de l'entorn o la regió. Cal esmentar una diferència important entre els dos mètodes, i és que les dades procedents de la prospecció acostumen a estar situades sobre el terreny, mentre que en l'excavació les dades dels materials tenen tres dimensions, factor que cal tenir en compte.

Aquesta tercera dimensió i la seva integració en el model geogràfic és un dels problemes de l'aplicació del GIS a l'arqueologia. La representació d'aquesta en un model més àgil, que no pas com a valors dins d'un ràster és encara un problema a resoldre. Generalment el programari GIS actual no dóna una resposta del tot eficient, tant si es tracta d'un jaciment a l'aire lliure, com en el cas d'una cova, on es compliquen encara més les coses (Grau i Mira, 2006, 23-24). Aquesta problemàtica és especialment greu en els casos de les excavacions preventives, ja que en aquestes intervencions seria molt útil poder registrar tota les informacions possibles de manera àgil i intuïtiva. Recalquem la importància de l'ús del GIS en aquest darrer cas, per que la majoria de les vegades un cop realitzada la intervenció el jaciment és destruït, i no queda cap altra manera d'accedir a la informació.

Un problema similar al comentat anteriorment succeeix amb la representació temporal. La majoria d'utilitzacions del GIS no tenen en compte aquest factor, ja que en general no és rellevant per a problemes d'enginyeria i geografia. Les dades amb les que es treballa són del nostre present i serveixen per resoldre problemàtiques actuals o bé del futur immediat. Però contràriament, en arqueologia el factor temporal és altament important, ja que les nostres dades poden presentar cronologies diferents i molt concretes. A més, en el cas de que la nostra informació procedeixi de l'excavació, el factor temporal està íntimament lligat al factor espacial, perquè aquestes dades provenen d'una estratigrafia particular de cada jaciment.

Darrerament hi ha un interès per representar aquesta tercera dimensió tant a nivell intra-site (Barceló & Maximiliano Castillejo, 2006) com ja de forma més global, en la corrent coneguda com a *TimeGIS*³.

Per acabar, una altra crítica usual a l'ús de Sistemes d'Informació Geogràfica és el tractament de dades amb incertesa temporal, doncs la eina original no va ser dissenyada per a tractar amb aquest repte (Lock & Harris, 1997; Lock & Molyneaux, 2006; Crema, 2012). El tercer cas d'estudi d'aquesta obra, centrat en esdeveniments de llarga durada, és un bon exemple d'aquesta problemàtica. El fet d'analitzar gairebé 5.000 anys de trajectòria temporal va obligar-nos a modelar de manera específica la incertesa de les

³Per conèixer més, veure treballs com els de Hlásny (2005).

datacions; en concret, seria difícilment justificable analitzar un patró d'assentaments sense tenir en compte que una mateixa localització no estava en actiu durant tot el període en el qual està datada, sinó probablement una fracció o fraccions del mateix. Això es tradueix en la necessitat de validar les hipòtesis tot integrant la incertesa de les dades en el propi anàlisi. En aquest cas d'estudi es va proposar una aproximació basada en l'ús de models aorístics i un tipus de simulació coneguda com a Monte Carlo (consultar capítol 6, p. 135 per a més informació).

2.4 Marc teòric

Els GIS, com qualsevol altra eina o subdisciplina dins de l'arqueologia com a ciència, han estat emprats i discutits dins de les diferents corrents teòriques des del seu primer ús. Cal recalcar, que tot i ser una eina, és important conèixer les diferents corrents teòriques que han tractat el tema de l'espai, en tant que el GIS s'utilitza per registrar, analitzar i interpretar l'evidència arqueologia.

Primer de tot, ens sembla obligatori descriure la base d'allò que descrivim i analitzem amb el GIS: l'espai. En primer lloc, podem diferenciar el dos conceptes d'espai que estan presents a la literatura científica i filosòfica: l'espai entès com a contenidor o bé l'espai entès com una relació entre coses. En el primer dels casos, el concepte absolut de l'espai s'entén com un contenidor de tots els objectes materials, l'existència del qual és independent dels objectes que conté. Aquesta visió, que prové dels filòsofs atomistes grecs, va perdurar i agafar força durant el Renaixement i moments posteriors (Conolly & Lake, 2006, 18).

En el segon cas, trobem el concepte relatiu de l'espai, on s'interpreta aquest com una qualitat posicional del món dels objectes materials o esdeveniments. D'aquest fet es dedueix que no es pot parlar d'espai en absència de les coses que el conformen. Com a reacció a la teoria desenvolupada per Newton basada en la relativitat del concepte d'espai, els filòsofs de la ciència del segle XIX es van decantar per la idea del concepte relatiu (Conolly & Lake, 2006, 18-19).

El GIS descriu el món mitjançant els atributs, el registre d'allò que és present i les localitzacions, és a dir, allò que registra on està. Per estudiar-los, analitzar-los i entendre els vincles que reflecteixen existeixen dos models de dades diferents, que representen dues maneres ben diferenciades d'entendre el concepte d'espai, com ja hem vist.

Per una banda, trobem el model de camps continus, que proposa un espai on algun atribut varia, generalment de forma lleu i constant. Un exemple

d'això seria l'esmentat Model d'Elevacions Digital del Terreny (DEM), on cada localització, en principi, té un valor determinat. Atès que aquest model de camps continu tracta les dades com un conjunt de localitzacions predeterminades a l'espai, el podem relacionar amb el concepte absolut de l'espai.

D'altra banda, tenim el model de dades d'entitats alternatiu que proposa que un conjunt de dades espacials tenen una localització i es caracteritzen per posseir atributs espacials i no espacials. Un exemple el podríem trobar en el format vectorial, que representa els resultats d'una prospecció on el territori s'ha organitzat en polígons, i a aquests hi ha informació associada en forma d'identificador i un atribut precís, com és la cronologia dels materials. Si el comparem amb l'exemple anterior, aquí podem trobar localitzacions que no tinguin un valor d'atribut.

El model d'entitats presenta una certa relació amb el concepte filosòfic relatiu de l'espai, en tant que organitza la informació en funció dels objectes i no pas segons els conjunts de situacions predeterminades a l'espai (Conolly & Lake, 2006, 20-21). Cal recordar, però, que tant els mapes ràsters com els vectorials són estructures de dades i no models de dades. En els exemples anteriors que hem mostrat són l'associació estàndard entre models de dades i el concepte d'espai, però val a dir que també els podem trobar a la inversa.

Un altre debat important a comentar, abans d'entrar més en profunditat en el tema de la teoria arqueològica i el GIS, és la contraposició per alguns autors d'espai i lloc. De la mateixa manera que en el cas anterior, aquests conceptes van lligats a la manera d'entendre els Sistemes d'Informació Geogràfica i el seu ús. Per un costat trobem el *PaleoGIS* que entén l'espai de la manera *tradicional*: mesurant àrees, realitzant cartografia i anàlisi espacial, però sense anar més enllà. Per contra, existeix el *GIS2*, que es defineix per la representació dels elements bàsics de la experiència humana que donen sentit al món. És a dir, allò que es busca són les diferents connexions de la *comunitat* amb el seu comportament i el *lloc*. Val a dir, que tots aquests conceptes de lloc, espai, comunitat i paisatge humanitzat encara tenen un debat obert en el món de l'arqueologia⁴. Aquestes idees van ser proposades per Curry (1998) i van tenir un ressò en el camp de l'arqueologia, sobretot en quant a la idea de *comunitat* que es proposava.

Una comunitat crea i es sustenta conjuntament compartint una sèrie de categories construïdes per donar sentit al món social i material que l'envolta, categories que també permeten expressions individuals i variacions. Aquestes categories poden ser espacials i aquests llocs poden arribar a ser llocs on els grups humans hi duen a terme activitats individuals o col·lectives, i que poden perdurar i ser negociades i renegociades, pervivint al llarg del temps.

⁴Per conèixer més a fons aquest debat, consultar Lock (2001, 2009a).

Aquesta visió del paisatge i de la seva relació amb les comunitats humanes contrasta amb el concepte tradicional de paisatge desenvolupat al segle XVI pels artistes, on aquest és observat des de la distància i bastant allunyat de tot allò que es desenvolupava en ell. Aquesta visió ha estat reforçada encara més per la cartografia i el GIS (Lock, 2001, 156). L'etern problema de la representació del temps i l'espai està molt lligat a aquesta qüestió, així com també la incapacitat del GIS per representar correctament dinàmiques de caire temporal.

Un cop descrits aquests conceptes principals, mostrarem l'evolució de l'ús del GIS i el seu vincle amb la teoria arqueològica. Com ja hem exposat abans, en geografia hi ha un debat important sobre si el GIS és una eina o bé una ciència, i sobre el seu ús, en la vessant teòrica i ètica. En arqueologia, ha succeït un fenomen similar, però sense donar-hi tanta importància al valor ètic del seu ús. Resumint en poques paraules aquest debat, els que consideren el SIG com una eina, opinen que és potencialment aplicable a altres disciplines, tant si s'empra dins d'un marc inductiu, molt típic de les ciències naturals i experimentals, com si s'utilitza dins d'altres marcs teòrics, com els que podríem trobar a les humanitats. D'altra banda, aquells que consideren el SIG com una ciència, sovint el veuen estretament lligat al model de les ciències naturals, restringint amb aquesta visió, el seu ús en altres disciplines.

En la història de l'arqueologia i el GIS, sembla que aquest sempre ha estat més present en l'àmbit de la recerca, és a dir, on la finalitat de l'estudi era entendre l'organització humana de l'espai. Des de les primeres aplicacions fins a l'actualitat, les prioritats d'estudi han estat diferents, buscant maneres distintes per aproximar-se a diferents facetes de la conducta humana (Conolly & Lake, 2006, 23).

Anteriorment a l'aparició de la Nova Geografia, durant la dècada dels 60, la gran part dels treballs sobre la ocupació humana del territori consistien en resums merament descriptius on discursivament s'explicava el que havia passat a cada lloc. Aquest mateix fet es va donar a l'arqueologia en general, fins a la dècada dels anys 70, on el discurs i la descripció, en la majoria dels casos, sense anàlisi, eren la base per tractar tots els fenòmens arqueològics.

Un exemple el podem trobar en el desenvolupament de les seriacions cronològiques i tipològiques dels materials, que tot i estar dins del que entenem com a lògica inductiva, no tenien cap motivació ni necessitat de justificar teòricament aquestes explicacions ni aquests desenvolupaments, ja que tot estava englobat dins del "sentit comú". És curiós que alguns treballs d'arqueologia espacial de finals del segle XX i principis de l'actual encara es continuaven i es continuen fent servir les mateixes premisses. Encara que les idees siguin correctes i les anàlisis també, molts cops l'error recau en no justificar suficientment la recerca. Per exemple, sovint en el nostre país es

parla de que els assentaments ibèrics es situen en llocs elevats per estar connectats visualment. Pot ser que aquesta afirmació sigui la millor hipòtesi i sigui corroborada amb anàlisis de visibilitat mitjançant un GIS, però si no s'argumenta correctament i s'analitza que no és fruit de l'atzar o d'algun altre factor favorable, aquest estudi peca de caure en el nostre "sentit comú". Si evitem donar per suposat la interrelació entre els assentaments, i tan sols prenem com a variable rellevant per a la seva localització la tria de zones amb una àmplia visibilitat del seu entorn, sense tenir en compte a on estan els altres, potser trobaríem el mateix patró d'establiments, i no caldria afegir la regla "poder veure altres assentaments", tot descartant la hipòtesi anterior segons el principi de *parsimònia* estretament lligat al mètode científic.

Així doncs, seguint amb el fil cronològic, durant els anys 60 i amb la Nova Arqueologia que anava paral·lela al desenvolupament de la Nova Geografia, els estudis van ser realitzats des d'un punt de vista positivista i "científic" (Lock, 2009a, 76). L'aplicació d'un pensament lògic volia arribar a determinar lleis de caràcter general pel comportament humà. Tot i l'entusiasme inicial de l'aplicació d'un mètode hipotètic deductiu a l'arqueologia, com si es tractés d'una ciència experimental, la seva aplicació es va veure truncada quan es va començar a aplicar en recerca arqueològica. Aquest enfoc processual també destacava l'ús de mètodes quantitius, sobretot de l'estadística. Això va derivar en lleis molt vagues i bàsiques, que en darrer terme no aportaven nous coneixements sobre el comportament humà. Tant es així que els seus crítics les van anomenar "Lleis de Mickey Mouse" (Flannery, 1973, 51).

Com a resposta a aquest enfocament processual, als anys 70 la geografia va incorporar una crítica humanista o antipositivista a les ciències socials positivistes, de la mateixa manera que ho va fer als anys 80 l'arqueologia postprocessual. A partir d'aquesta crítica basada en els que els seus autors definien com simbolisme, experiència, coneixement i "l'altretat", els usuaris del GIS han pogut incloure nous matisos en els estudis, evitant els enfocaments positivistes que la crítica postprocessual ja havia refusat. Segons J. Conolly i Mark Lake (Conolly & Lake, 2006) podem trobar tres tendències sobres l'ús del GIS en aquest marc postprocessual, tot i que no són excloents entre elles i sovint les podem trobar lligades:

- La primera de les corrents considera que allò important és la manera que tenim d'aproximar-nos al passat. És una aproximació radicalment diferent de les propostes que utilitzaven la metodologia de les ciències experimentals i xoca amb la finalitat de trobar una explicació científica. Basant-se en models de pensament idealistes i en les idees de Hodder (Hodder & Orton, 1979), nombrosos arqueòlegs postprocessu-

als proposen que l'acció humana només es pot entendre adoptant la perspectiva de qui la realitza.

Aquesta corrent s'ha vist enriquida i emfatitzada pels enfocaments fenomenològics, que proposen la creació de l'experiència a partir d'un compromís personal amb el món físic. Un exemple el trobem en les paraules de Tilley (1990): "l'espai no pot existir al marge de les activitats i esdeveniments en els que està implicat". Des d'aquest punt de vista, una de les crítiques que se li ha retret als treballs de GIS és el voler jugar a ser Déu, és a dir, a presentar una visió absoluta del paisatge. Com diu Julian Thomas (2000):

fer que tot sigui visible ens dona uns paisatges del passat que els seus habitants no reconeixien [...] sinó que a més representa una espècie d'apropiació intel·lectual.

En aquesta línia, cada cop hi ha més autors que suggereixen l'ús de la realitat virtual, combinada amb el GIS, per poder dur a terme estudis més complexos, en quant a la obtenció d'experiències similars a les condicions materials en el passat. Aquest model és radicalment diferent del que havíem vist anteriorment, on els mètodes quantitius i la inducció eren la base de la metodologia per dur a terme la recerca.

- La segona corrent postprocessual té com a objecte d'estudi aquells elements del passat que els investigadors han triat per estudiar. Com a contraposició a l'arqueologia processual, que es centrava en els factors ecològics i econòmics del comportament humà, aquesta corrent proposa canviar l'enfocament i prioritzar la dimensió humana del simbolisme i la significació. Un exemple el trobem en l'explicació de l'expansió de l'agricultura a Europa, on es passa d'un model basat en la substitució d'un sistema de subsistència a un altre basat en el canvi de significat (Hodder, 1991). Així doncs, la majoria d'intents de trencar amb el determinisme mediambiental anterior s'han basat en anàlisis de visibilitat en el paisatge. Irònicament aquest canvi pot caure en el mateix parany, ja que tendeix a fabricar un altre determinisme, tot i que basat en diferents factors. A més, cal tenir en compte que un anàlisi de visibilitat per ell mateix no és una base fiable per a la recerca, ja que es necessiten altres eines per complementar els seus resultats. La resposta a aquesta crítica s'ha realitzat donant tres possibles solucions o opcions al problema comentat. En el primer dels casos, es canvia la base de la recerca en les línies de visibilitat per una modelització d'aspectes més complexos de percepció visual (Gillings & Wheatley, 2001; Wheatley

& Gillings, 2002). D'altra banda, en el segon cas, es combina la psicologia gibsoniana i el càlcul de moltes o totes les vistes possibles per a tractar de plasmar les “possibilitats” del paisatge, juntament amb el moviment de les comunitats en aquest (Llobera, 2000; Lock, 2009b). En últim lloc, altres autors també han intentat modelar altres sentits a part de la vista (Mlekuž, 2010).

- La tercera i darrera corrent postprocessual a considerar està relacionada amb el concepte de “l'altretat” del passat. Si la gent del passat va ser diferent i tenia maneres diferents de pensar, l'experiència mateixa de la individualitat i la seva relació amb l'entorn potser va ser radicalment diferent a la que nosaltres podem tenir (Thomas, 2000; Tilley, 1990). Aquest fet implica reconèixer que el passat va poder ser diferent a com nosaltres el plantejem i que el que en realitat estem fent és plantejar un reflex de la nostra mateixa societat (Sánchez-Elipé Lorente, 2011). Respecte el paper que juga el GIS en aquesta posició, hi ha autors que plantegen que l'ús de models geogràfics i llenguatges determinats estan intrínsecament lligats al pensament occidental.

La principal crítica teòrica que rep l'ús del GIS i els recursos informàtics en general, és que aquest tipus de sistemes de recerca no copen en tota la seva mesura la relacionalitat que dóna sentit a les coses (Thomas, 2000). Els investigadors han respost a aquestes crítiques donant un sentit diferent a l'ús del GIS en les seves recerques, plantejant nous objectius i tenint en compte altres factors que potser abans no tenien aquesta importància. En concret, a principis dels anys 90 el GIS va ser part d'una revalorització de les tècniques quantitatives en arqueologia que, a més, integraven nous elements per respondre a les crítiques esmentades. Diversos autors van emprar l'estadística de manera integral, juntament amb el GIS, de manera que els diferents tests aplicats podien servir per analitzar les associacions entre jaciments i entorn mediambiental, patrons de localització, etc. Cal dir que a partir d'aquest moment va haver un interès més gran per un enfoc més inductiu (Conolly & Lake, 2006, 25). Així, l'estudi basat en l'objecte o una revisió de l'anàlisi intra-site, pot ajudar a realitzar un model on les relacions entre objectes i activitats dins un espai concret estiguin més presents. D'altra banda, en resposta a la crítiques de caire postprocessual i al problema ja comentat de representar processos de llarga durada amb el GIS ha sorgit la integració de GIS amb simulacions i models basats en agents per a simular processos relacionats amb els humans i l'entorn en el qual vivien.

En resum, i de manera breu, hem fet un repàs als conceptes més importants de teoria arqueològica i la seva repercussió en l'ús dels Sistemes

d'Informació Geogràfica. Tot i ser una eina molt potent al servei de l'arqueologia, ha rebut nombroses crítiques pel fet de ser utilitzada massa a la lleugera i, en ocasions, sense cap rerefons teòric important. Tot i que aquests punts de vista crítics són vàlids, una de les parts positives d'aquesta eina en arqueologia és la diversitat de les seves aplicacions. Tant en el seu caràcter més bàsic, com podria ser ordenar de manera diferents les informacions referents a un jaciment arqueològic, com en la preparació i gestió d'una prospecció, o bé en un estudi més global d'una zona geogràfica, el fet de crear un sistema d'aquestes característiques ja ens dóna nova informació i ens obliga a reformular els nostres plantejaments inicials.

Així doncs, un coneixement exhaustiu i complet de les possibilitats i utilitats que planteja el GIS, juntament amb una base teòrica on sustentar la nostra recerca, segurament ens permetrà desenvolupar metodologies adequades i un major èxit en les nostres investigacions. Per últim, tampoc cal perdre de vista altres eines ja esmentades com la modelització basada en agents, la intel·ligència artificial, la realitat virtual o la realitat augmentada, que amb la seva integració amb el GIS poden esdevenir recursos molt potents, tant en el camp de la recerca com en la divulgació del patrimoni arqueològic.

Capítol 3

Metodologia

En aquest capítol exposarem les bases metodològiques i les tècniques emprades per a explorar els diferents casos d'estudi. El tractament comú es basa en la modelització formal de les dades espaciotemporals mitjançant Sistemes d'Informació Geogràfica, i per aquest motiu ens centrarem en aquesta eina. Els GIS són en l'actualitat una de les eines fonamentals en la recerca del passat, i per tant cal analitzar la manera com s'ha tractat aquest ítem des de les diferents corrents teòriques dins de l'arqueologia.

En un primer punt, analitzarem i definirem alguns conceptes teòrics dels Sistemes d'Informació Geogràfica i les capacitats que aquests ofereixen. Així com també tractarem l'ús d'aquestes aplicacions per a modelitzar la interacció social, definint quin tipus de coneixement podem generar a partir d'aquesta idea. Seguidament exposarem les eines i recursos emprats, per acabar definint les bases de dades dissenyades i els algorismes d'anàlisi espacial aplicats per dur a terme la recerca.

3.1 Una introducció als Sistemes d'Informació Geogràfica

3.1.1 Què és un SIG

Podríem definir els Sistemes d'Informació de Geogràfica com el conjunt d'eines integrades i integradores que permeten als usuaris interactuar i comprendre la informació espacial. Cal dir, però, que tot i que els seus orígens estiguin lligats a la cartografia digital, els GIS no només serveixen per elaborar mapes o en manipular digitalment les dades que apareixen en aquests mapes (Conolly & Lake, 2006, 30).

Altres definicions, com les de (DeMers, 2003), potser són escadusseres,

però donen una idea concisa de que és el GIS: un conjunt d'eines que permeten processar dades de tipus espacial, transformant-les en informacions lligades a una porció de la Terra i que poden ser emprades en processos de presa de decisions sobre aquest fragment del planeta. En general, podríem trobar moltes definicions de què són els Sistemes d'Informació Geogràfica, però la majoria conflueixen en que es tracta d'una eina que es caracteritza per la visualització, gestió i l'anàlisi de dades espacials presentades en forma de mapes digitals. És a dir, no són uns programes monolítics, sinó més aviat són una *spatial toolbox* (Wheatley & Gillings, 2002, 9) que permet integrar varies tecnologies.

Cal destacar aquest darrer concepte, a diferència dels CAD (*Computer Assisted Drafting*), utilitzats sobretot en arquitectura, i els CAC (*Computer Assisted Cartography*), que no són Sistemes d'Informació Geogràfica, ja que no tenen la capacitat d'anàlisi espacial que caracteritza als anteriors (Wheatley & Gillings 2002, 9; Rubio Campillo 2009, 131).

D'altra banda, darrerament cada cop és més freqüent distingir entre el GIS i el GISc (*Geographic Information Science*). El primer fa referència a les eines del software emprat per a processar les dades geoespacials. En canvi, el GISc és la ciència de la informació geogràfica que s'encarrega dels temes més teòrics i conceptuals de les relacions espacials i espaciotemporals i també de l'impacte de les tecnologies geoespacials en les humanitats i en les ciències socials¹ (Conolly & Lake, 2006, 30).

També podríem matissar que els Sistemes d'Informació Geogràfica s'encarreguen de tractar específicament dades relacionades amb qüestions d'escala geogràfica. És a dir, no s'encarreguen de problemes referents a pocs metres quadrats, per exemple, una sola estructura arqueològica. Ni tampoc estudien qüestions superiors a l'escala planetària (Rubio Campillo, 2009, 132).

Un altre tema a tenir en compte és que els GIS permeten treballar amb dades que no són, en principi, espacials (política, religió, cultures...), malgrat que totes aquestes poden tenir la seva vessant espacial, tenint en compte, per exemple la seva distribució en un territori o un país.

Per últim, una altra de les característiques dels GIS és la possibilitat que ofereixen de resoldre mitjançant les seves eines els buits que hi pot haver entre preguntes molt generals i les dades molt concretes. Per una banda permeten una anàlisi a macroescala, mesoescala o microescala. I d'altra banda, permet fer d'enllaç entre aquests diferents tipus de dades gràcies a les seves capacitats d'anàlisi, emmagatzematge i gestió d'informació (Rubio Campillo 2009, 132; Longley et al. 2005, 14-15). És precisament aquest el motiu pel qual

¹Per més informació sobre aquest tema, consultar (Marble, 1990; Curry, 1998; Longley et al., 2005)

el GIS és la base de la metodologia emprada, doncs és l'eina adient per estudiar successos passats a través de l'evidència arqueològica en les seves diverses escales.

Cal destacar que davant d'aquest ventall d'opcions els investigadors es poden veure desbordats per la quantitat de dades a les que es pot tenir accés. Per tant, en cadascun dels treballs hem plantejat unes preguntes inicials abans de començar a treballar amb un GIS, per tal d'intentar respondre-les i utilitzar l'eina en conseqüència. Així doncs i, tenint en compte les problemàtiques concretes, s'han triat les dades que ens interessava treballar, de la mateixa manera que hem escollit els algorismes adients per avaluar les hipòtesis de treball formulades per cada recerca (Rubio Campillo, 2009, 132-133).

3.1.2 Breu història dels Sistemes d'Informació Geogràfica

De la mateixa manera que passa amb altres camps de la informàtica, com Internet, el primer ordinador, etc. actualment hi ha un cert debat sobre l'origen dels Sistemes d'Informació Geogràfica. Aquest fet es deu a que de forma paral·lela han coincidit diferents nuclis de desenvolupament, que en darrer terme també s'han influït els uns als altres. Actualment, Amèrica del Nord, Austràlia i el Regne Unit són punters en aquesta disciplina i la seva aplicació a l'arqueologia.

En general, però, tots els investigadors conflueixen en què la primera aplicació GIS, tal com nosaltres l'entenem, va ser desenvolupada a Canadà a principis del anys 60 i s'anomenava *Canadian Geographical Information System* (CGIS). El seu disseny va venir donat per la necessitat de conèixer i classificar els recursos del gran i despoblat territori canadenc, per tal d'analitzar les seves possibilitats en quant a usos presents i futurs. El problema que se'ls va plantejar va ser el següent (DeMers, 2003, 5):

You are a part of a team working for the department of natural resources and development for a large country. Among your many duties in managing the resources in your area is to inventory all the available forest and mineral resources, wildlife habitat requirements, and water availability and quality. Beyond just a simple inventory, however, you are also tasked with evaluating how these resources are currently being exploited, which are in short supply and which are readily available for exploitation. In addition, you are expected to predict how the availability and quality of these resources will change in the next 10, 20 or even 200 years.

Juntament amb aquestes qüestions sobre recursos i la seva gestió, també se'ls hi va plantejar la relació de les poblacions amb aquestes explotacions, temes com el soroll que provocaven les indústries i com afectaven a la qualitat de vida dels habitants, quins inconvenients els hi suposava, etc. Tot això lligat a l'aplicació de legislació a nivell local i regional. Aquest problema complex, dinàmic, multivariat i profundament espacial va ser el motor per desenvolupar el primer GIS. Abans d'aquest esperonament, el principal problema que trobaven els geògrafs del projecte era la impossibilitat de mesurar correctament les àrees a partir dels mapes tradicionals.

També algunes aplicacions del GIS deuen la seva existència al treball i a les iniciatives de la elaboració de mapes per part de la NASA i l'exèrcit dels EEUU, doncs aquesta empenta a la cartografia digital va ser una de les bases del GIS modern.

En la mateixa línia, ja a inicis dels anys 70 els britànics van contribuir a la renovació de la cartografia a partir del disseny assistit per ordinador (CAD). Cal dir, però, que les bases per aquest desenvolupament les podem trobar als anys 50 i 60 quan va néixer la idea de tractar informàticament les dades cartogràfiques. El primer exemple el trobem a l'*Institute of Terrestrial Ecology* (Huntingdon, Anglaterra) on van emprar el *Power Samas Card Calculating System* per elaborar mapes de les diferents espècies de plantes d'Anglaterra. El resultat va ser que van processar, classificar i elaborar mapes temàtics de més de 200 espècies de plantes.

Durant els anys 1960 i 1970 van sorgir diferents programaris que permetien la creació de mapes geogràfics digitals que, per primer cop, van poder ser reproduïts en una pantalla d'ordinador i impresos (Wheatley & Gillings, 2002, 14). Arrel del desenvolupament de la cartografia digital i del primer GIS, durant els anys 1970 diverses agències federals d'Estats Units van elaborar diferents programaris de cartografia, processament d'imatge i GIS, fet pel qual aquests van avançar considerablement. Un exemple és el DIME (*Dual Independent Map Encoding*), un software molt semblant al CGIS, però orientat a analitzar el cens de població del país. A finals del anys 70, la Universitat de Harvard va dissenyar un GIS de caràcter general anomenat Odyssey GIS, que partia dels seus antecessors. Durant aquesta dècada es va anar introduint a cada estat l'ús de cartografia assistida per ordinador.

Però tot i així, no va ser fins el 1995 que un país, el Regne Unit, va tenir una base de dades informàtica que contingué el 100 per cent del seu territori (Rubio Campillo, 2009, 133).

Val a dir, però, que tots aquests avenços van ser possibles gràcies al gran desenvolupament dels fons de dades espacials i cartogràfiques procedents dels primers satèl·lits militars. És en aquest moment quan es desenvolupen aquestes eines capaces de recollir informacions relacionades amb la superfície del

planeta. Primerament aquests satèl·lits van estar estrictament lligats als departaments militars en el context de la Guerra Freda. És dins aquesta casuística que es van desenvolupar nous sistemes de posicionament per disparar correctament els *Inter Continental Ballistic Missile* (ICBM). D'aquí, les noves tècniques de posicionament georeferenciat i l'aparició d'aparells com els GPS (*Global Positioning System*). Ja cap als anys 70 existien aparells que van sobrepassar la seva funció primària i eren capaços de realitzar fotografies i altres tipus de dades, que per primer cop van poder ser utilitzades per a usos civils. Així doncs, podem dir que l'ús dels Sistemes d'Informació Geogràfica fins finals dels anys 70 va estar limitat a les agències estatals i militars més poderoses. Gràcies a la popularització i abaratiment dels ordinadors personals durant els anys 80, aquestes aplicacions informàtiques (GIS, cartografia digital, ...) van poder ser emprades de manera regular en un entorn civil.

En aquest context van néixer les primeres empreses dedicades a aquest tipus de recursos, i d'altra banda, aquestes eines van ser assequibles per a petites i mitjanes empreses. Per exemple, ESRI (*Environmental System Research Institute*) una de les empreses més punteres en el sector va ser fundada a Califòrnia a principis dels 70. Actualment desenvolupa un dels paquets de softwares comercial més popular, integrant un conjunt d'utilitats GIS com ArcGis, ArcView, ArcMap, etc.

D'altra banda, i com a exemple de desenvolupament del programari lliure trobem el programa GRASS (*Geographic Resources Analysis System*). Va ser dissenyat pel cos d'enginyers militars dels Estats Units, i actualment és un dels programaris lliures més potents per fer anàlisi ràster i té un actiu desenvolupament, especialment en relació al sistema operatiu GNU/Linux, a banda de gaudir d'una important comunitat a Internet.

3.2 Potencial i capacitats dels Sistemes d'Informació Geogràfica

3.2.1 Estructura

Tots els Sistemes d'Informació Geogràfica tenen en comú una estructura compartida, definida pels següents elements i capacitats:

1. *L'obtenció de dades espacials.* Els GIS presenten una plataforma per obtenir i integrar informacions espacials, com poden ser mapes topogràfics, localització i morfologia de jaciments, planimetries arqueològiques, etc. Tots ells poden incorporar a un mitjà analític comú, tot i que els GIS permeten també incorporar fonts de dades variades i procuren

compatibilitzar els diferents formats (Conolly & Lake 2006, 31; Rubio Campillo 2009, 134).

2. *La gestió de dades espacials.* Es tracta de sofisticats sistemes de gestió de base de dades per emmagatzemar i relacionar dades espacials i atributs. Aquest aspecte implica la transformació de sistemes de coordenades per poder integrar les dades procedents de les diferents fonts, la construcció de topologies² vectorials, la georeferenciació de dades espacials recentment digitalitzades i la creació de metadades geoespacials.
3. *La gestió de bases de dades.* Una de les principals virtuts de GIS és la seva potència per vincular i explorar les relacions entre dades espacials i no espacials. És a dir, cal una modelització conceptual i lògica de les dades; de la mateixa manera, que cal una creació i “manteniment” d’una base de dades relacional on els components espacials i no espacials estiguin correctament vinculats. Aquesta és una de les bases per dur a terme correctament les anàlisis posteriors, ja que si els diferents tipus d’informacions no estan correctament relacionats i la base de dades no és funcional, les exploracions posteriors seran complicades de realitzar-se o directament s’haurà de refer la base de dades. En relació amb aquesta darrera qüestió, cal que la base de dades relacional tingui capacitat d’actualització, d’edició i consulta.
4. *L’anàlisi de dades espacials.* Mitjançant diversos algorismes i funcions matemàtiques concretes els Sistemes d’Informació Geogràfica possibiliten l’anàlisi i el tractament de les dades. Aquesta anàlisi pot ser a nivell microespacial o macroespacial. D’altra banda, també tenim eines per estudiar la visibilitat, el moviment i l’accessibilitat a través del paisatge. A més, disposem de potencialitats com la possibilitat de crear models geoestadístics i predictius, entre d’altres.
5. *La visualització de les dades espacials.* En darrer terme, és molt important la capacitat del GIS per plasmar de forma gràfica les dades i els resultats, ja sigui en forma de gràfics, taules o directament en mapes. El resultat de les visualitzacions permeten entendre millor la naturalesa dels problemes als quals ens enfrontem i pot ajudar als investigadors/es a prendre decisions i fer interpretacions de manera més informada.

²S’entén per topologia la part de la matemàtica que estudia aquelles propietats dels conjunts de punts de la recta, del pla, de l’espai o d’espais de dimensions superiors que no són alterades per les transformacions contínues.

De tots aquests punts el més important és el factor d'anàlisi espacial, ja que és el que permet més potència, flexibilitat i utilitat per tal d'entendre les relacions entre les dades de diferents orígens, que sempre tenen en comú el factor espacial. D'altra banda, aquesta capacitat és la que permet generar noves informacions tot establint patrons o generant nous models que a simple vista, i sense una eina com el GIS, no serien "visibles". Com a últim avantatge, el fet de quantificar les dades de caire arqueològic en un sistema d'informació comú possibilita l'ús de tests estadístics per tal de rebutjar hipòtesis de treball a partir de l'evidència existent; sense aquesta capacitat seria doncs impossible respondre preguntes de recerca a on les coordenades espacials juguessin un paper rellevant.

3.2.2 Elements espacials

Per començar a treballar en un GIS, primer de tot, cal tenir molt clar quin tipus de preguntes volem respondre i amb quin tipus de dades treballarem. En funció d'això, tractarem i manipularem les informacions d'una manera determinada. Tenim 4 maneres bàsiques de representar els elements espacials del món real:

- Punts
- Línies
- Àrees
- Superfícies

Globalment, aquests quatre conceptes són capaços de representar espacialment la majoria de fenòmens humans i naturals que ens podem trobar al món. Dins del GIS es fan servir, per a modelar els objectes del món, tres de les formes: punts, línies i àrees. D'altra banda, els volums o superfícies sovint són representats mitjançant punts d'elevació o altres estructures computacionals. Allò important, però, és la característica explícitament espacial de totes aquestes dades dins del GIS. És veritat que els fenòmens, per naturalesa, no són espacials (idees, creences, política), però mitjançant el GIS els podem traslladar a entitats espacials per a poder estudiar-los (DeMers, 2003, 25).

Cal destacar que aquesta tipologia de representacions dins d'uns sistema cartogràfic (com un CAC o un GIS) no és directa, sinó que s'ha de traduir. És a dir, cal pensar en quina escala volem utilitzar, en la complexitat de cadascun dels objectes, etc. A mode d'exemple, si volguéssim representar un

edifici a escala molt detallada podríem fer-ho delimitant el seu perímetre, és a dir, marcant la seva àrea. Si ens allunyéssim i estiguéssim estudiant una zona més gran amb milers d'edificis, hauríem de representar les cases amb punts, doncs en cas contrari el mapa seria massa complicat d'interpretar i la delimitació dels edificis innecessària. D'altra banda, si el que ens interessa és la densitat de superfície urbanitzada a nivell nacional, ens serà més útil una representació volumètrica que ens doni el valor de densitat d'edificis en cada punt concret del mapa. Aquest darrer cas, per exemple, també el podem veure amb les elevacions del terreny. Encara que estem parlant, en principi, d'una dada volumètrica, la podríem transformar i representar-la amb línies, és a dir, amb les corbes de nivell, o també podríem marcar tots els turons amb una simbologia concreta expressant-ho a la llegenda. En definitiva, els elements que triem per representar els nostres objectes d'estudi han d'anar estretament lligats a l'escala a la que nosaltres volem treballar i a l'ús que volem donar a cada variable (Rubio Campillo, 2009, 135).

Seguidament descriurem els diferents tipus de representació espacial. Primerament tenim els punts, que els hem d'entendre com un fenomen espacial concret que està en una única localització a l'espai i al temps. Només poden existir en un lloc determinat en unes coordenades concretes. És a dir, són dades discretes que no tenen continuïtat a l'espai representat. Des del punt de vista de la modelització conceptual, aquests objectes no tenen dimensió, i per això no es pot calcular ni la seva llargada ni el seu volum (DeMers, 2003, 25). En realitat aquesta assumpció és falsa, ja que per força tot ha de tenir tres dimensions, sinó no és podria ni mesurar ni veure. Però per poder treballar amb el GIS assumim aquesta simplificació, ja que sinó el nivell de càlcul requerit per dur a terme el mínim dels processos seria molt elevat. Exemples d'aquests tipus de dades de 0 dimensions podrien ser els arbres, persones, senyals de tràfic o encreuaments de camins. Però tot i aquesta simplificació, encara podem processar i analitzar aquestes dades mitjançant anàlisis com els algorismes de veïnatge, les diferències de valors entre diferents punts o les rutes més òptimes entre dos punts.

Pel que fa a les línies, són objectes representats de manera unidimensional, la longitud dels quals és sempre molt més gran que la seva amplada en qualsevol dels seus punts. També és un element discret, ja que una línia està composta per un número de punts finit i enllaçat. De fet, ens trobem amb el mateix problema sobre la tangencialitat que en el cas anterior, ja que els objectes unidimensionals no existeixen. Tornem al problema de simplificació i realisme que comentàvem anteriorment, que d'altra banda és inherent a la realització d'un model geogràfic. Exemples de línies podrien ser carreteres, camins, límits, rius, i també conceptes més abstractes com fronteres, fronts de guerra.... Aquests últims elements, al no existir en la realitat sí que tenen

una sola dimensió, ja que són convencions per a expressar un canvi radical d'aquesta variable en dos territoris adjacents. Els objectes linears, a diferència dels punts, ocupen com a mínim dos punts de manera simultània, essent l'inici i final d'un segment. En el cas de que hi hagi elements que no siguin rectilinis, cal afegir punts intermedis per tal d'indicar els girs i modificacions del traçat, per exemple les corbes d'una carretera. També, al ser unidimensionals, aquests objectes es poden mesurar calculant la distància entre l'origen i el final, incloent els punts intermedis, si és que els hi ha.

Quant a les àrees, són el tercer grup de variables discretes que tenim per descriure. Són objectes bidimensionals que consten d'amplada i llargada. Es representen com un conjunt de línies connectades que marquen un recorregut tancat, és a dir, el punt d'origen i final és el mateix. Per tant, és possible mesurar l'àrea delimitada per aquest objecte. D'aquesta manera podem representar la superfície compresa entre els límits d'una ciutat, l'interior d'un país o la delimitació d'unes elevacions.

Aquests tres primers elements comentats són molt fàcils de representar dins d'un GIS, mentre que els volums, el quart tipus d'objecte, comporta més dificultats. En la majoria de casos la visualització d'aquestes eines es fa a través d'una pantalla en ordinadors personals. Aquesta és una matriu bidimensional de píxels de diferents colors, que tots junts formen la imatge correcta. Com aquesta matriu té dues dimensions, resulta complicat representar un volum en ella, ja que això comportaria una tercera dimensió. És un problema important, ja que els accidents geogràfics sempre són tridimensionals i l'alçada és una variable important. En el cas de les elevacions com muntanyes i turons aquesta variable és realment essencial. Així doncs, per representar volums necessitem un canvi de concepte per representar objectes tridimensionals en entorns bidimensionals (Rubio Campillo, 2009, 137).

Podem definir un volum com una matriu bidimensional on cada punt representa una cel·la, i té assignat un valor diferent que marca l'elevació de cada sector de la graella. És a dir, l'altura s'expressa com una variable contínua, ja que cada punt comprès dins la matriu té valor, i no hi ha buits entre un i l'altre. Aquest sistema ens permet treballar i afegir dades força complexes, per exemple, un mapa de temperatures sobre la terra, nivells de contaminació o, fins i tot, corbes de nivell. Els camps continus permeten ser mesurats de diferents maneres i donar-nos múltiples informacions: podem conèixer el valor de cada variable a cada secció de la matriu, els canvis d'intensitat d'aquesta mateixa zona o el volum inclòs dins del perímetre de l'objecte.

3.2.3 Dades i atributs

En l'apartat anterior hem descrit quins objectes es poden representar dins d'un GIS. Aquestes entitats no són simples representacions, sinó que poden contenir informacions de caire no espacial que les descriguin i ens aportin dades sobre elles: els atributs.

Els atributs en ajuden a categoritzar aquests objectes i a descriure'ls des d'un punt de vista no espacial. Per exemple, si haguéssim de realitzar un mapa amb tots els jaciments romans de Catalunya, potser el més efectiu seria posar un punt a cada assentament. Però si només féssim això perdríem tota la informació d'aquests enclavaments i la qualitat que aquesta contenia. No estaríem dient ni quina cronologia tenen, ni el tipus d'assentament, ni cap altre dada més sobre ells. Així doncs, caldria crear una sèrie d'atributs que per cada assentament ens digués el nom, la cronologia, el tipus, etc. D'altra banda, hauríem de realitzar altres mapes topogràfics especificant el nom dels jaciments i els accidents geogràfics més importants a la zona.

En definitiva, cadascun dels objectes que remarquem haurà de tenir un conjunt d'atributs que el categoritzi. És un tema important, doncs, serà a partir d'aquesta informació que podrem començar a classificar les dades des d'un punt de vista no espacial. D'aquesta manera, nosaltres podrem indicar com de particular és una entitat, amb un nom propi i atributs mesurables, que estan situats en una determinada localització. Això ens afegeix nous nivells d'organització de la informació, i per tant, ens ajuda a entendre el que estem visualitzant per tal d'analitzar-lo i interpretar-lo de manera més efectiva (DeMers, 2003, 28-29).

D'altra banda, cal recordar que bona part dels atributs són quantificables, i que estableixen els diferents graus de mesura pel que fa a les dades geogràfiques. És a dir, que tenim diferents escales de complexitat per poder definir les nostres entitats.

De menor a major grau, les podem establir de la següent manera:

- *Escala nominal.* Aquesta categoria especifica aquells elements que han estat identificats de manera única. És el nivell més simple de tots, a on només s'anomenen les dades. No es poden establir ni classificacions ni comparacions entre objectes. No podem dir que una entitat és millor que un altre, perquè són inherentment diferents. És a dir, podem dir que un jaciment té un nom diferent d'un altre, però només podem dir que són jaciments.
- *Escala ordinal:* En aquesta segona escala és possible comparar diferents entitats si les assignem un valor dins d'un rang predeterminat. En el cas dels jaciments romans podem assignar un atribut en relació a la mida,

que tingui els següents valors: petit, mitjà o gran. Cada assentament tindrà definit aquest valor, per tant podrem saber si un jaciment és més gran, més petit o igual a un altre. Aquesta escala la definim de manera totalment subjectiva en el sentit que som nosaltres, de forma independent, qui definim els paràmetres. Per tant, és important tenir en compte que és l'usuari del GIS qui crea la variable, estableix els paràmetres i descriu cadascun dels objectes segons aquest atribut. Així, aquesta dada no la podem fer servir en cap altre camp, ja que està estrictament dissenyada per descriure específicament un tret que volem destacar.

- *Escala d'interval*: És el nivell més complex quant a la caracterització d'atributs. Es tracta d'establir una variable en la que cada objecte presenta un número concret. En principi, aquests atributs proporcionen una informació procedent d'una font capacitada per mesurar les variables de forma quantitativa. Seguint l'exemple dels jaciments romans, podem definir un atribut anomenat fragments de terra sigillata, que ens mostri el número mínim d'individus d'aquesta ceràmica que ha estat documentat a cada un d'ells. Altres exemples podrien ser el número de mascotes en cada ciutat o el número d'arbres per hectàrea de terreny. Aquest tipus d'atribut presenta un potencial molt alt en quant a l'anàlisi, ja que permet donar resposta a diferents casos d'estudi, com per exemple: la densitat de població a les ciutats, relacions entre diferents variables, etc.

3.2.4 Les bases de dades espacials

Una base de dades és un conjunt d'informacions organitzades d'una manera coherent segons una estructura dissenyada per a permetre fàcilment la consulta de les mateixes. Per exemple, un conjunt de fitxes d'UEs d'una excavació pot ser una base de dades, o ara bé una col·lecció de registres de mostres arqueomètriques d'un conjunt de jaciments que pugui ser accessible per web. Aquesta darrera es diferencia de l'anterior perquè requereix l'ús d'un programari específic per gestionar bases de dades, que afegeix capacitats d'edició i consulta dels registres, a més de software addicional per permetre fer-ho a través d'un navegador.

Un sistema d'aquest tipus es tradueix, a la pràctica, en un conjunt d'arxius dins els quals l'ordinador manté un registre actualitzat de les dades que hem introduït i modificat. Una classe especial de base de dades és l'anomenada relacional, en la qual hem de definir els diferents conceptes importants per a nosaltres, així com les relacions entre ells. Per cada tipus d'element

crearem una taula, a on guardarem les seves característiques com a atributs. Alguns d'aquests atributs seran relacions amb altres taules, per permetre d'aquesta manera relacionar els diversos conceptes entre sí.

A mode d'exemple, podem imaginar-nos com es dissenyaria una possible base de dades relacional a on guardar informació relacionada amb una col·lecció de discos. Una taula guardaria la informació dels autors (nom, any de naixement, nacionalitat, ...), i una altra dels diversos àlbums (títol, durada, any, ...). Cada element dins aquesta taula d'àlbums, però, hauria de tenir un atribut que marqués quin autor va crear aquest àlbum, per tal de poder relacionar les dades. Es podria anar ampliant la informació, tot creant taules per guardar les cançons, discogràfiques, estils, components dels diversos grups, etc. Aquest tipus d'estructura fa molt senzilla la cerca dins grans volums de dades, a on els usuaris poden relacionar la informació, tot creant complexes consultes que permetin, per exemple, saber en el cas anterior quins grups de música van publicar un disc en un any concret, o de quin estil és una determinada cançó.

Un Sistema d'Informació Geogràfica no és gaire diferent a una base de dades relacional, ja que part de les tasques que realitzem consisteixen en emmagatzemar entitats i dades en atributs, de manera que això ens permeti recuperar (per visualitzar, fer consultes...) aquestes entrades i realitzar combinacions amb aquests objectes. A la pràctica aquesta relació és tan estreta que s'han creat sistemes de bases de dades relacionals específicament dissenyats per a ser emprats en GIS, com per exemple PostGIS³ per a gestionar grans volums de dades i publicar-les en entorns web, o Spatialite per usos més restringits com es demostra al Capítol 6.

Segui quina sigui la eina triada, necessitem un ordinador i un software adequat, on puguem crear, localitzar, recuperar i realitzar consultes de les dades emmagatzemades. En altres paraules, les entitats espacials han de ser emmagatzemades de manera organitzada, juntament amb els seus atributs i les relacions entre elles. D'aquesta manera, si realitzem consultes i tenim ben classificats els registres, podrem obtenir els resultats de manera eficient i sense errors. La única diferència és que, a banda dels altres atributs i relacions, per cada element haurem de guardar les coordenades espacials: X, Y (i Z, si s'escau). Si en el cas anterior per obtenir les nostres cerques és clau tenir una estructura coherent que permeti fer les consultes fàcilment, en el cas de les bases de dades espacials encara és més important, atesa la multiplicitat de dades existents. Una base de dades dissenyada correctament estalviarà molts mal de caps. Si ja des d'un principi plantegem les claus

³Per veure més, podeu consultar <http://trac.osgeo.org/postgis/> consultada el dia 22/09/2015

d'aquesta, les relacions entre taules, i els atributs de les mateixes, no caldrà fer canvis costosos en temps i esforç més endavant.

3.2.5 Modelització geogràfica

Un cop tenim definides les estructures dels Sistemes d'Informació Geogràfica, analitzarem quin tipus de model podem dissenyar amb elles. La base d'un GIS és el model de dades que utilitza, és a dir, la forma com representa la realitat geogràfica que volem investigar. A partir d'aquest model, l'investigador realitza una sèrie d'anàlisis per tal de generar coneixement amb les dades existents o bé creant-ne de noves. La modelització que se'n faci de les dades és molt important, ja que d'aquest fet en dependrà en gran part les operacions que es puguin dur a terme i els resultats que s'obtingran. La modelització geogràfica a partir de Sistemes d'Informació Geogràfica implica diferents nivells d'abstracció segons podem veure a la figura 3.1. Quan nosaltres desenvolupem el nostre concepte d'espai i les pertinents relacions espaciotemporals, estem organitzant les nostres dades amb la intenció per poder donar-les un sentit. En definitiva, el mapa és el llenguatge gràfic resultant que utilitzem per representar aquest espai i aquests objectes. Malgrat tot, cal tenir en compte que el nostre llenguatge gràfic és clarament diferent en l'estructura dins de l'ordinador (DeMers, 2003, 100).

Com mostrem a la figura 3.1, el primer nivell d'abstracció correspon a la realitat concreta que volem modelitzar, com per exemple, un jaciment, una àrea o una ciutat⁴. En ella trobem les estructures, els objectes i altres elements que volem incloure, com podrien ser els edificis, la ceràmica, o les característiques paleoambientals, entre d'altres.

El segon nivell, el nivell conceptual, fa referència a la selecció d'aquells elements de la realitat que ens interessen per resoldre un problema concret. Es tracta d'un procés de pensament humà, ja que cal un bon raonament per tal d'escollir el model que més s'escaigui a la nostra recerca. Un cop triats els elements a representar, cal que analitzem també les relacions entre ells. Aquest punt és molt important, ja que si copsem malament les relacions entre objectes, podríem caure en l'error de representar-les de manera incorrecta i extreure'n conclusions que no s'adiuen a la realitat estudiada. El perill recau en que, mentre el nostre model podria ser totalment vàlid, les relacions entre els objectes estarien malenteses i les conclusions a les que arribaríem no serien

⁴Normalment es parla de modelar la realitat, però en el nostre cas la "nostra realitat" és inexistent. Si apliquem el GIS per resoldre problemàtiques relacionades amb el passat, estem analitzant problemes que actualment no existeixen, i aquest fet s'ha de tenir en compte. Podríem dir que els arqueòlegs creen un model a partir d'un altre, és a dir, a partir de la idea preconcebuda que tenim d'allò a investigar.

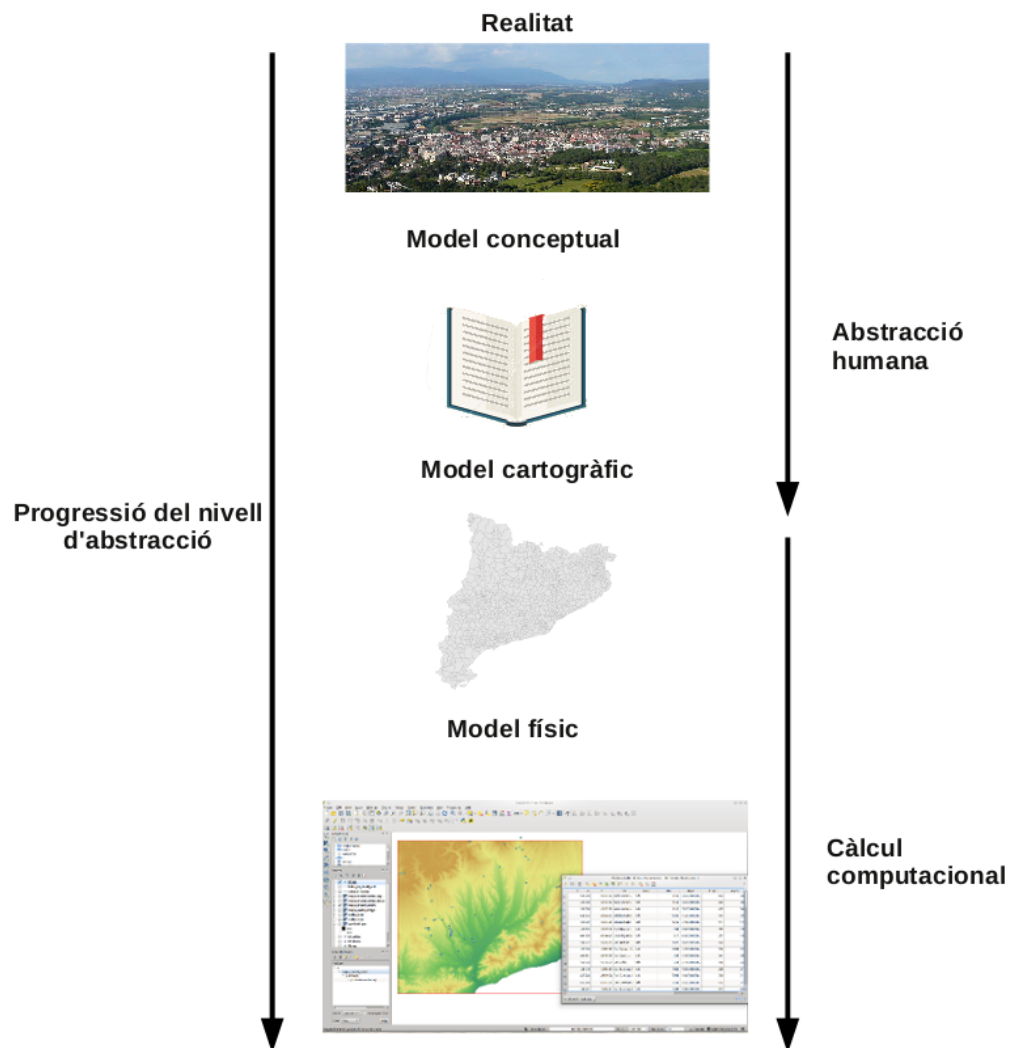


Figura 3.1: Nivells d'abstracció d'un model geogràfic

vàlides.

El següent pas és el model lògic. En aquest tercer nivell necessitem fer servir alguna eina per traslladar el model de dades conceptual a un altre entenedor per l'ordinador. L'objectiu d'aquesta fase és la creació d'un model d'estructures de dades intel·ligible per un sistema informàtic. Aquest pas pren com a base les dades escollides i les relacions establertes en el moment de desenvolupar el model conceptual, convertint-les en un llenguatge que tots els GIS puguin entendre. És a dir, les dades d'entrades i les relacions entre aquestes, que eren totalment abstractes en el model anterior, es tradueixen en estructures de dades computables. En aquest moment encara no hem traslladat tot el model a un Sistema d'Informació Geogràfica, però l'hem traduït a un llenguatge més proper a un model geogràfic.

Finalment, el darrer pas és el model físic. En aquest punt convergeix tot el procés anterior, és a dir, hem passat de tenir un model conceptual a tenir un seguit de fitxers, bases de dades i valors. En aquesta fase final hem traslladat la realitat a un model de dades geogràfiques informatitzat, que és la nostra base per a començar l'anàlisi del mateix⁵.

3.2.6 Tipus de formats: ràsters i vectors

Els objectes i els seus atributs són conceptes teòrics que ens són útils per a poder modelar geogràficament la problemàtica que estem intentant respondre. D'aquesta manera, cal dissenyar curosament la implementació que farem del nostre model mitjançant diversos tipus de dades. En concret, els objectes es poden transformar dins el model computacional a dos tipus de dades: discretes o contínues, tenint cadascuna els seus problemes per a modelar la realitat.

En el primer cas, si desitgéssim representar cada objecte de manera discreta i completa faríem servir un número infinit d'atributs. No només això; hauríem de definir tot allò que des d'un punt de vista geogràfic necessitaríem per descriure la complexitat del fenomen. Així per cadascun dels elements que componen una entitat tindríem el mateix problema. Si per exemple volguéssim modelar un arbre, al seu torn hauríem de definir les seves fulles, arrels, etc.

En el segon cas, la quantitat d'informació existent és infinita. Si a cada punt geogràfic li correspon un valor, i entre dos punts geogràfics real hi ha infinits punts més, la conclusió és que una variable continua presenta infinits valors i, d'aquesta manera, tampoc la podem representar a un ordinador.

⁵Ens referim a una petita part de la realitat. Seria impossible encabir-la tota en un model. Per entendre això, només cal fer-se una pregunta, quants atributs necessitem per definir una persona en concret?

En tots dos casos necessitem simplificar la realitat per poder traslladar-la a un entorn computacional. Per realitzar aquesta abstracció, ho podem fer en dos tipus de format: ràster i vector. Ambdós tipus de dades (discretes i contínues) poden ser representades amb aquests dos formats, tot i que generalment es fan servir els vectors per les dades discretes i els ràster per les contínues.

Aquesta és la manera que tenim de representar els nostres objectes i la manera que es relacionen a nivell lògic, seguint una serie de regles explícites. Aquesta conversió permet a l'ordinador *entendre* i reconèixer tots aquests punts, línies i àrees representats en algun punt de la terra i alhora les relacions entre ells. En definitiva, vectors i ràsters són la resposta a la necessitat de crear un llenguatge per expressar aquestes relacions espacials. Seguidament veurem les diferències entre aquests dos tipus de formats:

- **Format ràster.** La representació geogràfica mitjançant un ràster converteix l'espai en una sèrie regular de cel·les que conformen una matriu bidimensional. Les variacions geogràfiques són expressades amb valors dins de cada cel·la, com es veu a la figura 3.2. Així doncs, sorgeix un paràmetre important que abans no teníem, la resolució. Es tracta del valor que expressa la distància entre dos valors diferents. Per exemple, una matriu 1000x1000 cel·les amb una resolució de 200 metres descriu un valor concret per un territori de 200.000x200.000 metres. És a dir, la qualitat del ràster serà inversament proporcional a la resolució, doncs a menors valors de resolució tenim menys distància entre dos punts i, per tant, perdem menys informació. Es tracta d'un concepte molt important, ja que aquest paràmetre marcarà la nostra recerca i l'obtenció de les dades.

Hem de tenir en compte que en un ràster es perd qualsevol mena de variació entre dos punts, perquè estan separats per la distància equivalent a la resolució del ràster. Si escollim com a valor un punt central a cada cel·la, potser estem descartant dades interessants entre un punt i el següent. En aquestes situacions sempre s'han de prendre altres solucions o estratègies, com trobar el valor més alt o més baix de cada cel·la, o bé fer mitjanes en diversos punts triats en aquella cel·la.

- **Format vectorial.** Des d'una perspectiva geogràfica un vector és un conjunt successiu de punts georeferenciats que poden estar aïllats, o ara bé connectats per línies rectes. D'aquesta manera, un objecte lineal és anomenat polilínia, que es defineix pel conjunt de punts connectats entre ells que la formen (veure els diferents tipus de vector a la figura 3.3. Al seu torn un polígon és una polilínia tancada, tot representant el

1	1	1	1	1
2	2	2	1	1
1	1	1	3	3
1	1	1	3	3
2	2	4	4	4

Figura 3.2: Estructura del format ràster

perímetre d'una àrea. Així, assumim que l'espai geogràfic és continu, o millor dit, que en aquest cas es tracta de petites cel·les discretes que podem quantificar (DeMers, 2003, 115).

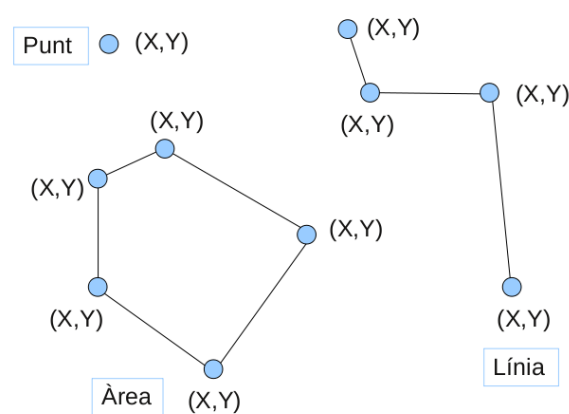


Figura 3.3: Estructura del format vectorial

3.2.7 La millor opció: ràster o vector?

Escollir el millor format per a representar cada concepte involucrat en la nostra recerca no és una qüestió trivial. En la majoria dels casos no hi ha

una resposta única, ja que tot depèn del tipus de problemàtica que vulguem resoldre.

El format vectorial és més econòmic, ja que emmagatzema la informació de manera compacta. Destaca per detallar de forma definida i resumida les determinades entitats geogràfiques que vulguem mostrar o que ens puguem trobar. De fet, un conjunt de punts pot representar qualsevol mida desitjada independentment del seu número, ja que la distància entre dos punts la tria el propi investigador, igual que l'exactitud amb que està feta cada representació.

Per exemple, el riu Ebre el podríem representar amb una polilínia de milers de punts determinant el seu curs, o bé amb 4 o 5 punts. Tot depèn de la nostra recerca i de la finalitat de les dades recollides. Si estem treballant a un nivell de macroescala, representarem amb més detall i amb una major resolució aquelles entitats més rellevants, mentre que tendirem a simplificar les altres.

D'altra banda, aquest format és molt útil per elaborar projectes relacionats amb bases de dades de catàlegs patrimonials, materials d'excavacions arqueològiques o similars. És, doncs, la millor opció per a treballar qüestions relacionades amb entitats relacionades o realitzar anàlisis basats en xarxes.

Al seu torn, el format ràster permet representar l'espai d'una manera continua i predictable, motiu pel qual sempre implica un major volum d'informació. En alguns casos, això resulta inútil, ja que si tenim un valor que no varia al llarg de moltes cel·les, estem emmagatzemant el mateix a cadascuna d'elles. En canvi, si empréssim el format vectorial només guardaríem les variacions.

Els ràsters són tremendament útils quan estem treballant amb dades de camps continus o bé quan necessitem treballar amb capes temàtiques. Un bon exemple el trobaríem amb les fotografies aèries, les imatges procedents de satèl·lit, cartografia antiga georeferenciada, o també en treballs de cartografia o densitats de materials en superfície, com podria ser una prospecció.

3.2.8 El Model Digital d'Elevació del Terreny

Per tal d'exemplificar aquests dos tipus de dades pararem especial atenció a una variable particularment rellevant dins qualsevol model: l'elevació del terreny. A banda de marcar l'altura de la zona de treball, altres factors com la inclinació del terreny, la possible xarxa hidrogràfica, o la visió del territori depenen d'aquest. Les diverses representacions que hi ha són conegudes com a DEM (*Digital Elevation Model*). Com hem comentat, totes les dades geogràfiques poden ésser representades amb dos formats diferents: vectors i ràsters, i els DEM no són una excepció.

En el cas del format vectorial, els DEM es presenten en formes de corbes

de nivell. Es tracta de polígons tancats que mitjançant una gradació determinada denoten els canvis significatius del terreny. D'aquesta manera podem trobar DEMs de corbes de nivell que representin elevacions cada 50m, 20 m, etc. Aquesta estructura, però, no és particularment eficient per representar les gradients i aspectes, o realitzar un mapa del relleu ombrejat amb aquest tipus de model del dades (DeMers, 2003, 345).

En el segon cas, el DEM a partir d'un ràster ens mostra les elevacions del terreny com a una matriu discreta de punts, cada un dels quals té un valor concret en alçada i situació espacial. En quant a la seva representació, es mostra un model tridimensional d'aquesta malla de punts, tenint en compte els valors de l'altura. Aquests tipus de DEMs són la base per anàlisis com les rutes de mínim cost, el càlcul de les gradients, etc. A tall comparatiu mostrem el territori de la zona de treball que tractarem al tercer cas d'estudi (l'àrea de la conca del riu Besòs), en format vectorial a la figura 3.4, i en ràster a la figura 3.5.

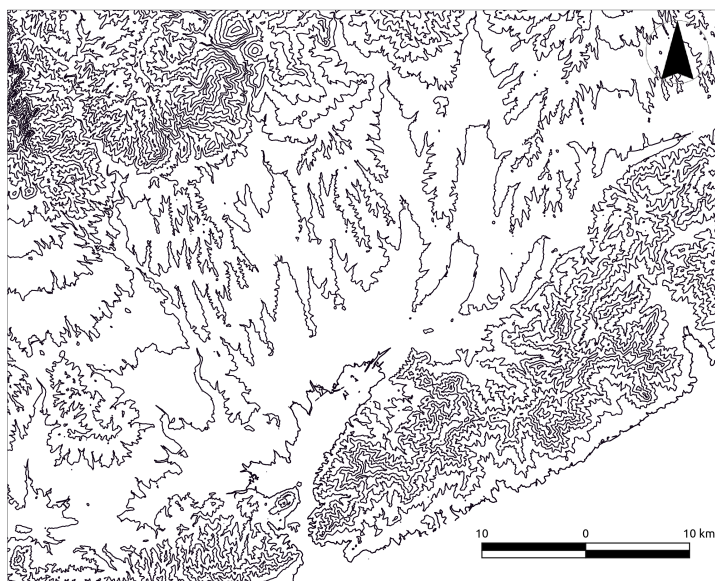


Figura 3.4: Model Digital del Terreny en format vectorial

El segon format ha estat l'emprat per dur a terme els anàlisis dissenyats als tres casos d'estudi (veure per exemple la figura 5.1, p. 111 i la figura 6.4, p. 141). D'altra banda, la visualització de la informació a vegades es beneficia de l'ús simultani dels dos formats. Aquesta solució és especialment interessant quant el terreny presenta poques variacions, com és el cas del Pla de Barcelona en el primer cas d'estudi (figura 4.1, p. 94).

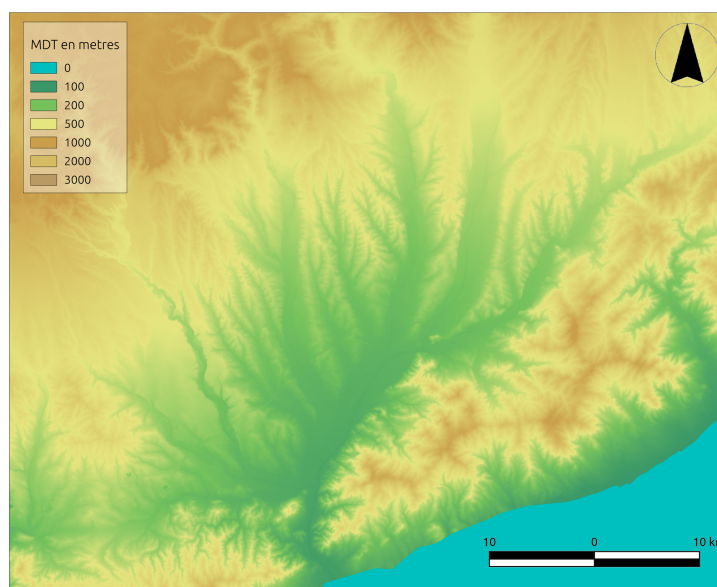


Figura 3.5: Model Digital del Terreny en format ràster

3.3 Eines

Presentem inicialment el programari utilitzat en la nostra recerca. El software utilitzat està especialitzat en els diversos components necessaris per a dur a terme els treballs: a) bases de dades, b) Sistemes d'Informació Geogràfica i c) llenguatges de programació. Cal destacar que tot el programari utilitzat està llicenciat com a programari lliure, és a dir, aplicacions que tenen una llicència oberta, que permet als usuaris veure, modificar i executar el codi font del programa. La llicència és coneguda com a GPL (General Public License). Per aquest motiu es diferencien dels programes “tancats”, que comercialitzen l'executable binari, i per tant els usuaris no saben que és exactament allò que s'està executant al seu ordinador ni tampoc el poden modificar per tal d'adaptar-se a les seves necessitats concretes. Aquest fet és important, ja que existeixen comunitats d'usuaris realment potents d'alguns d'aquests programes. D'aquesta manera, al existir la possibilitat de modificar el codi lliurement, els usuaris poden crear petites aplicacions especialitzades per a tasques molt concretes. A més, existeixen diverses versions per a cada algorisme, per la qual cosa es pot triar el que més s'adapti al problema que volem resoldre. Així doncs, l'aplicació original és constantment actualitzada, essent una eina molt útil per a la recerca.

El programari dels GIS més utilitzat en l'actualitat són els que pertanyen a l'empresa ESRI (ArcView, ArcMap, ArcGis,...), tot i que trobem que l'opció

de l'*open source* és realment positiva per les possibilitats que ofereix en el camp de la investigació. Permetre conèixer els algoritmes emprats, aplicar-ne de nous o modificar el codi informàtic són part d'aquests beneficis, a més d'evitar problemes amb futures versions de programes tancats que no puguin obrir arxius antics.

D'altra banda, un altre qüestió interessant és la compatibilitat entre programari. Normalment, si es tracta de software tancat, això acostuma a ser un problema. En canvi, en l'entorn del programari lliure es possible compatibilitzar diversos programes en un mateix marc de treball, com veurem seguidament amb el cas de Grass i Qgis. En aquest context, existeix l'*Open Source Geospatial Foundation*⁶, una fundació sense ànim de lucre que vetlla pel desenvolupament i col·laboració entre els diferents programes d'anàlisi geoespacial lliure en funcionament actualment.

3.3.1 Bases de dades

Libre Office Base

Libre Office Base⁷ és un sistema gestor de bases de dades relacionals publicat sota llicència de programari lliure. Va començar a desenvolupar-se al 2010, arrel de la bifurcació del projecte d'Open Office. És similar al MS Access, però a diferència d'aquest, és lliure. Per aquest motiu té una millor compatibilitat amb altres programes, com per exemple els SIG.

Aquest programa permet crear, modificar i gestionar bases de dades, alhora que pots elaborar taules, formularis, consultes i informes ben gestionats des del sistema gestor de bases de dades HSQL que ve inclòs amb Base o bé, qualsevol altre. L'aplicació proporciona diferents assistents, vistes de disseny i de treball, i també vistes SQL⁸, per usuaris avançats.

D'altra banda, un gran avantatge que presenta és la integració amb altres programes com Calc o Math, de Libre Office. Això permet accedir a fonts de dades comunes des de diferents programes, facilitant la gestió de tota la informació. Això, i la seva compatibilitat per traslladar les dades al GIS fan del Libre Office Base una eina molt útil per gestionar i tractar tot el corpus de dades dels casos d'estudi que posteriorment analitzarem amb el SIG i R.

⁶<http://www.osgeo.org> consultada el dia 22/09/2015

⁷<https://es.libreoffice.org/descubre/base> consultada el dia 22/09/2015

⁸Sigles de *Structured Query Language*. Aquest tipus de llenguatge és l'estàndard en desenvolupament de bases de dades.

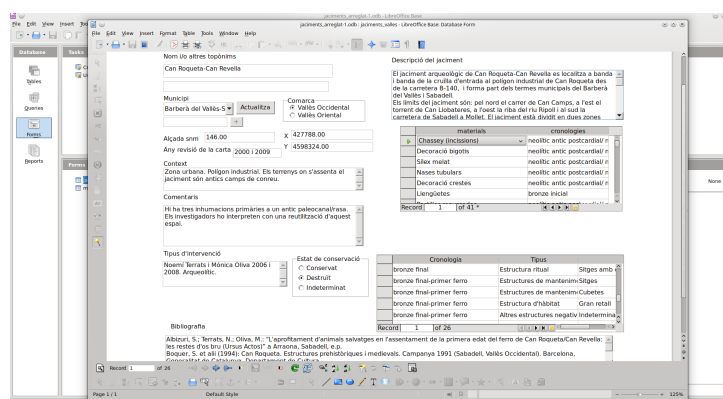


Figura 3.6: Base de dades del Libre Office, a on es mostren les vistes de formulari, consultes i taules.

Spatialite

En alguns casos és necessari integrar d'arrel les coordenades espacials en les fonts de dades. Libre Office Base, tot i ser útil, té limitacions en aquest aspecte per la qual cosa una alternativa possible és l'ús d'Spatialite (Furieri, 2014). Aquest programari segueix els mateixos conceptes basats en el protocol estàndard de bases de dades relacionals SQL (Date & Darwen, 1997), però permet introduir estructura espacial als diferents atributs seguint els conceptes bàsics de qualsevol GIS (punt, línia i polígon). Tot i existir altres projectes molt més potents com PostGIS, la tria d'Spatialite ha estat basada en la seva simplicitat i claredat d'ús, adequada a les necessitats d'aquest treball.

3.3.2 Sistemes d'Informació Geogràfica

GRASS

El programa GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) és una sistema GIS molt sofisticat emprat per gestionar la informació, processament d'imatges, producció de gràfics, modelització geogràfica i visualització de diferent tipus de dades⁹ (GRASS Development Team, 2015).

Grass, en origen, va ser desenvolupat per l'exèrcit nord-americà, concretament per la secció dels laboratoris de recerca del US Army Corps of Engineers el 1982. Aquest programari va ser ideat com a eina per a la gestió territorial amb finalitats militars. En 1995 el codi va fer-se lliure i va donar lloc a un

⁹Hem treballat amb la versió 7.0.0. La web del projecte és <https://grass.osgeo.org> consultada el dia 22/09/2015

software extremadament potent que presenta una gran gama d'aplicacions científiques. Tenint en compte que es distribueix de manera lliure i gratuïta és molt utilitzat per investigadors dedicats a l'anàlisi espacial. Altres agències estatals amb necessitats de gestionar informació espacial com la NASA o el *National Park Service* també utilitzen aquest sistema de manera intensiva.

Una de les avantatges que presenta és la integració de diverses utilitats lliures addicionals que han permès l'augment de les seves capacitats progressivament. D'altra banda, un altre punt extremadament positiu és la seva capacitat de carregar gairebé la totalitat de formats ràsters i vectorials existents.

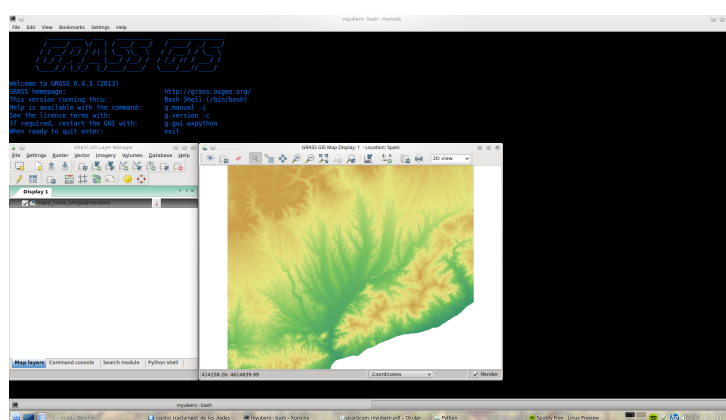


Figura 3.7: Interfície de treball de GRASS

Quantum GIS

De la mateixa manera que GRASS, QGIS és un aplicació lliure que ha nascut dins del projecte OSGEO (Open Source Geospatial Foundation)¹⁰(Quantum Gis Development Team, 2014). A diferència de l'anterior, aquest software està destinat a la visualització de dades, la producció cartogràfica i anàlisis senzilles gràcies a la seva combinació amb altres programaris. Un d'aquests és GRASS, i per això, ha permès crear una nova eina que és un potent recurs per els investigadors/es en l'anàlisi espacial (veure com a exemple la Figura 3.8).

QGIS va néixer al 2002, quan oficialment va començar la seva programació. Es tracta d'un software molt jove. La idea en la que es basa l'inici del projecte era la creació d'una eina per a la visualització de dades de manera àgil, i que alhora fos capaç de carregar un gran nombre de formats georeferenciats diferents. Tot aquest ràpid desenvolupament és possible gràcies als

¹⁰La versió utilitzada ha estat la QGIS 2.10 Pisa. Per més informació sobre el projecte, podeu consultar la següent web <http://qgis.org/en/site/> (visitada el 1/09/2015)

beneficis del programari lliure. La capacitat d'integrar programes diferents en un mateix projecte, modificant el codi i creant-ne de nou quan és necessari és un gran avantatge.

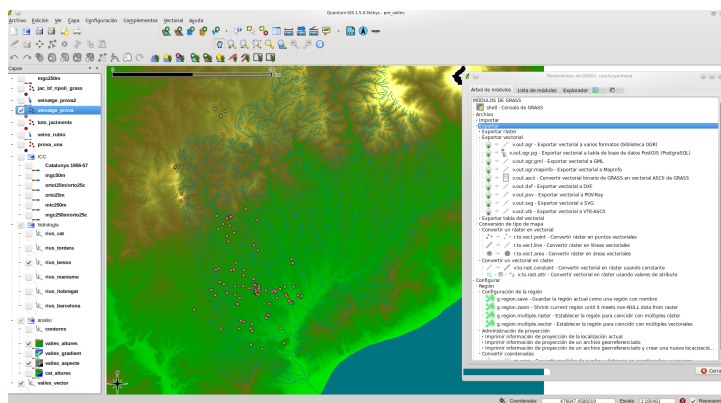


Figura 3.8: Integració entre GRASS i QGIS

3.3.3 Llenguatges de programació

R Project for Statistical Computing

R és un llenguatge de programació i un *framework* complet per a realitzar anàlisi estadístic i visualització d'informació (R Development Core Team, 2008). És un projecte GNU que és similar al llenguatge S i desenvolupat al mateix ambient, els Bell Laboratories. R proveeix d'una gran varietat de tècniques estadístiques (regressions, simulació, tests estadístics clàssics, anàlisi de series temporals, classificació, clusterització, etc) i tècniques sofisticades de visualització de la informació.

Està molt estès en el camp científic i és fàcilment compatible amb els software comentats en la secció anterior atès que també és una iniciativa Open Source¹¹.

Python

El llenguatge de programació R ha estat complementat puntualment per Python, un llenguatge d'*scripting* que permet implementar processos d'anàlisi i generació de dades de manera simple i intuïtiva (van Rossum, 1995)¹². Tot i ser un dels llenguatges més joves, la seva popularització ha crescut de manera

¹¹Per més informació consultar <https://www.r-project.org/> (visitada el 1/09/2015)

¹²Per més informació consultar <http://python.org/> (visitada el 1/09/2015)

exponencial en la última dècada fins al punt que disputa a R la supremacia en quant a programació en entorns científics es refereix.

3.4 Recursos emprats

Per tal de contextualitzar la nostra recerca i establir un marc de treball, cal fer referència a les dades i recursos emprats per dur-la a terme. Podem diferenciar dos grups de dades, per les fonts de dades geogràfiques i les arqueològiques i històriques.

3.4.1 Geografia i topografia

Pel que fa a les fonts de dades geogràfiques generals utilitzades en el nostre cas d'estudi, provenen de l'agència pública de Catalunya encarregada de la cartografia: l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICC)¹³. Es tracta d'una institució puntera en el seu camp, ja que la qualitat i quantitat de les dades que ofereix és extraordinària i la gran majoria dels seus recursos són d'accés obert.

Quant als serveis que ofereix l'ICC, són nombrosos, des de mapes topogràfics a ortofotografies i mapes geològics a diferents escales, que van fins a 1:5000. A tot això li hem de sumar mapes i fotografies antigues georeferenciades, juntament amb gravats i mapes antics del segle XVI en endavant. Un altre servei molt interessant que ofereix és l'ortoXpres¹⁴, l'objectiu del qual és permetre la visualització dels darrers vols fotogramètrics que ha realitzat l'ICC en cadascuna de les tres escales habituals de vol.

En aquesta línia, un altre punt a valorar molt positivament de l'ICGC és l'establiment d'un servidor WMS (Web Map Server) gratuït, de manera que fàcilment podem connectar aquestes aplicacions GIS a la nostra base de dades¹⁵. El WMS és un protocol estàndard internacional definit per l'Open Geospatial Consortium (OGC) que serveix per establir una comunicació entre qualsevol programari o aplicació que ho desitgi amb servidors que proporcionin informacions de caire geogràfic. Així doncs, emprant aquest servei ofert per l'ICC podem integrar aquestes dades amb altres que hàgim adquirit per altres vies: NASA, el cadastre, SIGPAC (Sistema de Identificación de Parcelas Agrícolas), IGME (Instituto Geológico y Minero de España), entre d'altres.

¹³www.icc.cat consultada el dia 05/09/2015

¹⁴<http://www.ortoxpres.cat/client/icc/> consultada el dia 6/09/2015

¹⁵Durant l'elaboració del present treball l'adreça era <http://geoserveis.icc.cat/>. A mode de referència, l'enllaç va ser emprat el dia 21/9/2015.

A més dels recursos oferts per ICC, també hem utilitzat algunes de les capes que ofereix el servei de cartografia del Departament de Medi Ambient i Habitatge¹⁶ de la Generalitat de Catalunya. L'accés a elles és totalment gratuït, només cal tenir el programari adequat per poder visualitzar-les i treballar-les¹⁷. La majoria de les dades que ofereixen estan destinades a projectes relacionats amb urbanisme, planificació, transport o medi ambient, però hi ha algunes que ens poden resultar útils. Per exemple, mapes sobre els usos dels sòls en les diferents comarques, la xarxa hidrogràfica dels rius principals amb tots els seus afluents o dels antics camins i vies ramaderes, ens poden ser interessants de tenir en compte per a la nostra recerca. Per el cas d'estudi que nosaltres presentem en aquest treball, hem emprat l'arxiu descarregables en format vectorial de la xarxa hidrogràfica catalana ¹⁸.

3.4.2 Arqueologia

Pel que fa al tipus d'evidència més comú del projecte, les dades arqueològiques, tot seguit farem una breu explicació sobre la seva obtenció i el seu ús. Cal dir, que en la gran majoria provenen de les cartes arqueològiques dels municipis de la biblioteca de Patrimoni Cultural del Departament de Cultura i Mitjans de Comunicació de la Generalitat de Catalunya. A banda, també hem tingut la possibilitat de consultar l'eGIPCI. Tal com ho defineixen els seus propis administradors, es tracta d'un sistema a l'entorn extranet del Departament de Cultura i Mitjans de Comunicació que permet l'accés controlat a la consulta de determinada informació del Patrimoni Cultural Immoble català. El projecte eGIPCI vol donar solució a la necessitat d'un sistema únic i centralitzat que permeti la consulta diferenciada de la informació del patrimoni arquitectònic, arqueològic i paleontològic de Catalunya, així com la consulta de l'estat de tramitació i altres dades significatives de les sol·licituds dels permisos d'intervenció arqueològica i/o paleontològica.

La majoria de cartes arqueològiques presentaven informacions prou actualitzades, ja que en gran part s'havien revisat als anys noranta i presentaven totes les fitxes de les darreres excavacions preventives realitzades als municipis. Tot i així, en alguns casos les dades provenien de revisions dels anys vuitanta. Pel que fa al tipus d'informacions, les més útils pel nostre cas eren les referents a les coordenades geogràfiques en UTM dels jaciments, com arribar-hi, la cronologia, la seva descripció, les campanyes realitzades,

¹⁶<http://territori.gencat.cat> consultada el dia 5/09/2015

¹⁷La majoria estan en format Miramon i en DFX (Digital eXchange Format). El primer correspon a un programa GIS desenvolupat a Catalunya, i el segon a un format vectorial procedent de l'Autocad.

¹⁸<http://aca-web.gencat.cat/> enllaç consultat el dia 5/09/2015.

l'estat de conservació i la bibliografia relacionada. Aquesta darrera dada ha estat molt important, ja que hem pogut complementar les informacions de jaciments que a la carta estaven molt breument detallades. També hem consultats les memòries i publicacions dels jaciments estudiats, així com en el cas del cas d'estudi sobre l'evolució del poblament a la zona de la conca del riu Besòs hem visitat la majoria de jaciments per assegurar la fiabilitat de les dades o corregir les coordenades en alguns casos.

Així doncs, aquesta recerca es basa en dades arqueològiques ja publicades, però que malgrat tot no havien mai estat estudiades des d'una perspectiva integral. Un dels objectius bàsics dels tres casos d'estudi era, doncs, demostrar com és possible tractar totes les dades recollides de forma global. D'altra banda, cal destacar que alguns resultats d'aquesta recerca podrien permetre desenvolupar un model predictiu del territori analitzat, a partir del qual fos possible preparar properes campanyes de prospecció en les zones estudiades (particularment els dos estudis prehistòrics). Això seria possible gràcies a l'establiment de patrons espacials capaços de detectar àrees amb elevat potencial arqueològic.

3.4.3 Història i Cartografia

El cas d'estudi d'esdeveniments de curta durada està centrat en un fet succeït en un període històric (1714). Com a tal, va ser necessari incorporar a l'estudi dades de tipologia diversa més enllà de l'arqueologia. Gràcies al detall amb que el setge de Barcelona va ser cobert, s'han pogut integrar tant fonts escrites com nombrosos mapes antics. És aquest un dels punts més interessants en l'ús de SIG, ja que no seria possible referenciar geogràficament totes aquestes evidències i enllaçar-les amb material arqueològic sense aquesta eina.

En concret, es van fer servir diverses narracions i registres del setge de nombroses procedències, bona part d'ells recollits al portal de patrimoni digital Europea¹⁹. Els mapes georeferenciats en aquesta obra van ser també accedits des del mateix portal, i addicionalment des de la Cartoteca Digital de Catalunya del mateix Institut Cartogràfic de Catalunya²⁰. Es pot veure un resum dels dos tipus de dades a la Secció 4.2.2, p. 91.

¹⁹<http://www.europeana.eu>, accedida el 23/9/2015

²⁰<http://cartotecadigital.icc.cat/> accedida el 23/9/2015

3.5 Bases de dades

L'eix principal de la nostra recerca ha estat desenvolupar eines per entendre millor els processos arqueològics i la seva dimensió espacial. Per aquest motiu, la metodologia emprada per a cada cas d'estudi ha estat enfocada tenint en compte la tipologia de dades particular de cada cronologia. Els casos d'estudi sobre Prehistòria es van basar en una mateixa base de dades desenvolupada en Libre Office Base, mentre que l'estudi històric va necessitar d'una base de dades diferent creada amb Spatialite. En conjunt formen un bon exemple de quin tipus d'estructura de dades relacional pot ser generada per la integració de dades procedents de períodes prehistòrics i, alternativament, històrics.

3.5.1 Base de dades de jaciments prehistòrics

Com hem esmentat, la fundació en les que s'assenta qualsevol model geogràfic és una bona base de dades creada específicament per les necessitats i usos del cas d'estudi. Si des d'un bon principi plantegem aquestes qüestions com a prioritàries, ens estalviarem més d'un mal de cap en el moment de treballar les dades. La planificació de la base de dades és vital, ja que ha de convertir-se en una de les eines de treball per nosaltres. Aquesta ha de ser útil i ens ha de permetre emmagatzemar, buscar i realitzar les consultes que siguin necessàries. Alhora, també ha de ser prou flexible per que puguem realitzar les modificacions que siguin necessàries sense haver de canviar tots els continguts.

A la figura 3.9 mostrem el model de base de dades que hem elaborat pels casos d'estudi segon i tercer. A continuació descriurem l'estructura de la base de dades, taula a taula, i fent una especial incidència a les relacions que hi ha entre elles. Cal dir que per omplir-la de manera més còmoda vam dissenyar un formulari que integrés totes les taules, per tenir-ho tot en una mateixa vista, com es pot veure a la figura 3.10.

La primera de les taules que vam elaborar ha estat la de *Jaciments*. Aquesta taula inclou els següents camps:

- **ID:** és l'identificador de cada jaciment. Aquest número l'assigna automàticament el programa a cada jaciment introduït a la base de dades i mai es pot repetir, ja que és únic.
- **Nom del jaciment:** nom del jaciment, tal com està introduït a la carta arqueològica.
- **Altres topònims:** altres possibles noms que pot rebre o que se li han atribuït al jaciment.

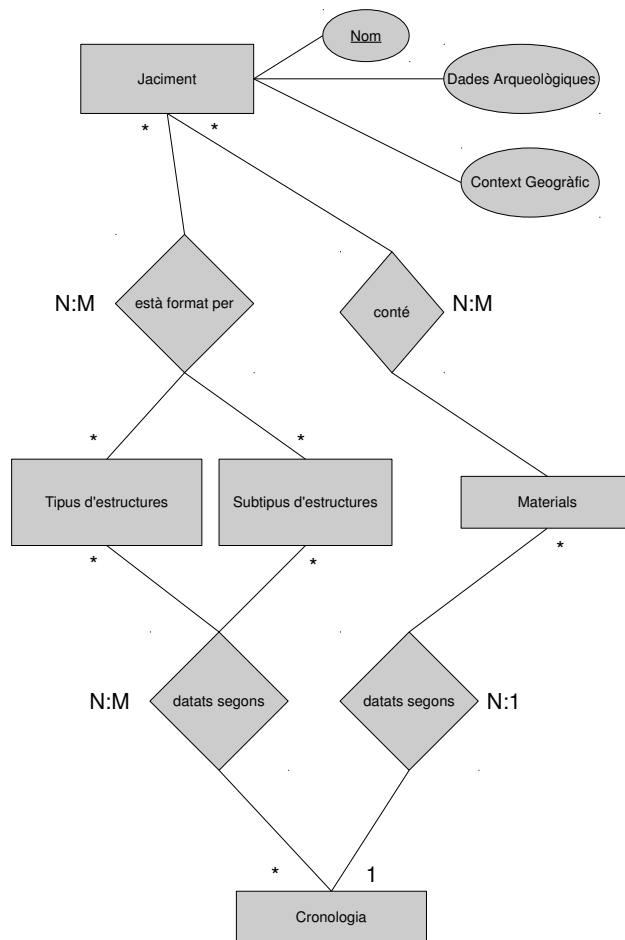


Figura 3.9: Model entitat-relació del nostre cas d'estudi. Es mostren els diferents conceptes, relacions i característiques que haurem de reflectir a la base de dades final

Figura 3.10: Vista de formulari de la base de dades

- **X i Y:** les coordenades UTM dels jaciments. En el nostre cas aquestes estan dins de la zona 31N, que correspon a la zona de Catalunya.
- **Municipi:** poblacions on es troben els jaciments. En alguns casos els jaciments poden estar en més d'un terme municipal.
- **Comarca:** comarca on es troba el jaciment.
- **Alçada:** alçada sobre el nivell del mar del jaciment.
- **Comentaris:** dades interessants o rellevants relacionades amb el jaciments.
- **Descripció:** informacions sobre les excavacions dutes a terme i sobre el registre arqueològic. És una breu descripció del jaciments i dels materials trobats. Es tracta d'una de les parts més útils de la base de dades, sobretot per aproximar-nos a la realitat arqueològica del jaciment.
- **Context:** tipus de terrenys on està ubicat l'assentament. També en alguns casos està inclosa una breu descripció de com arribar-hi.
- **Tipus d'intervenció:** el caràcter de les intervencions dutes a terme, si es tracta d'excavacions antigues, preventives, programades, prospeccions o troballes puntuals. En els casos que ens és possible apuntem quina empresa o quin treballador particular a dut a terme la intervenció.
- **Datació:** aquest camp no ha estat utilitzat en aquesta recerca. Està destinat a ser més complet en futurs treballs i incloure les datacions de ¹⁴C existents dels jaciments.

- **Estat de conservació:** situació de conservació en la que es troba el jaciment: destruït, conservat o indeterminat.
- **Revisió de la carta:** any en que es va revisar la informació de la carta arqueològica.

La taula que hem descrit anteriorment és la taula principal de treball. Però com necessitàvem altres camps més complexos, que ens permetessin organitzar millor la informació i realitzar consultes més acurades, vam dissenyar altres taules que poguessin acomplir aquesta funció. D'altra banda, per relacionar aquestes taules entre elles de manera correcta vam crear taules auxiliars on es formalitzaven les relacions que incloïen a més de dues taules (figura 3.11). En aquesta imatge es representa mitjançant un llenguatge formal l'estructura relacional de la base de dades.

Així doncs, la següent taula que descriurem és la de *Cronologies*. En aquesta només hi ha dos camps:

- **ID:** Aquesta ID correspon a cada cronologia introduïda i no es pot repetir. Ens és molt útil, a banda de la seva funció dins de la base de dades, ja que és l'ítem que fem servir per fer estadística amb aquesta variable qualitativa.
- **Nom:** Aquest camp correspon a les diferents cronologies que hem introduït.

Aquesta taula és molt útil, ja que mitjançant dos taules més que ens fan d'intermediàries, podem relacionar la cronologia amb els materials i el tipus d'estructures que trobem a un jaciment. Les cronologies que hem fet servir són les següents:

- **neolític antic cardial:** 5500-5000 cal ane.
- **neolític antic epicardial:** 5000-4.400 cal ane.
- **neolític antic evolucionat** o postcardial: 4400 – 4000 cal ane.
- **neolític mig:** 4000-3300 cal ane.
- **neolític final:** 3300-2300 cal ane.
- **neolític indeterminat:** Es tracta d'una categoria on hem inclòs aquells jaciments que a la carta o als treballs publicats apareixien com a “neolítics” amb materials pendents d'estudi o similar.

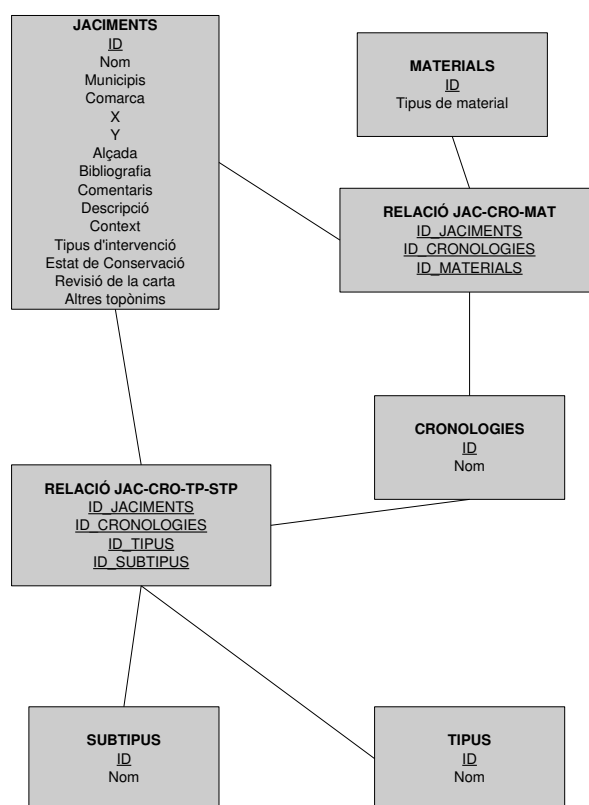


Figura 3.11: Model relacional final de la base de dades. Es mostren les diferents taules i el grau de relació que hi ha entre elles

- **III mil·lenni:** 3200-2200 cal ane. Es tracta d'una categoria que inclouria el neolític final i el calcolític. Hem respectat la categoria de neolític final, citada més amunt, ja que els autors l'han utilitzat sovint.
- **bronze inicial:** 2300-1300 cal ane.
- **bronze inicial-mig:** 2300-1300 cal ane. Aquesta categoria la hem inclòs per respectar la nomenclatura de certs autors. Quan hem analitzat les dades, aquestes han estat incloses al mateix grup que el bronze inicial.
- **bronze final:** 1300-750 cal ane.
- **bronze final-primer ferro:** 1300-550 cal ane. Categoria que hem inclòs per introduir els jaciments que no estaven definits en les publicacions ni com bronze final ni com primer ferro. Es tracta de jaciments que no presenten datacions radiocarbòniques ni materials arqueològics suficientment clars com per adscriure el jaciment dins d'una de les dues etapes.
- **primer ferro:** 750-550 cal ane.
- **prehistòric indeterminat:** Es tracta d'una categoria on hem inclòs per classificar tots aquells jaciments que a la carta i a les publicacions surten vagament com prehistòrics.

La següent taula que descriurem és la de *Tipus de jaciment*. En aquesta hem establert unes tipologies, que a grosso modo, engloben tots els tipus possibles en el context de la prehistòria recent al Vallès. Aquesta taula està relacionada amb tres taules més (*Jaciments*, *Cronologies i Subtipus*) a partir de la taula de nexa *Rel_Jac_Crono_Tipus_Sub*. Així doncs, en aquesta taula trobem dos camps:

- **ID:** Identificador per a cada una de les tipologies establertes.
- **Nom:** En aquest camp hem introduït les diferents categories que hem establert per classificar els diferents tipus de jaciments.

En la descripció hem volgut incloure els atributs de la taula *Subtipus* que estan intrínsecament lligats amb aquests. Les categories són les següents:

- **Cova habitacional:** cova on es desenvolupen activitats relacionades amb l'hàbitat. Com a subtipus, tindríem les següents tipus d'estructures: sitges, altres estructures negatives, cubetes, forats de pal i llars.

- **Estructures de manteniment:** estructures relacionades amb les activitats de manteniment de la comunitat. Així doncs entenem aquest grup com aquelles estructures relacionades amb la subsistència de la comunitat. Així doncs, com subcategories tindriem: rases, sitges, cubetes i cisternes.
- **Sitja-estructura aïllada:** elements allunyats de la resta d'estructures. Més que una categoria específica, descriu les condicions de coneixement que es té d'un jaciment.
- **Estructura d'hàbitat:** estructures relacionades amb l'hàbitat de les comunitats. Els elements a incloure en aquesta categoria serien els següents: grans retalls, llars, forns, forats de pal, cubetes i bancs.
- **Troballa ocasional:** troballes fortuïtes o fora de context.
- **Altres estructures negatives indeterminades:** estructures negatives (retalls als subsòl) on és impossible determinar la seva funcionalitat.
- **Estructura ritual:** estructures relacionades amb contextos simbòlics que no estan relacionades amb contextos d'hàbitat o de manteniment. Els elements a incloure són els següents: recinte de menhirs, menhirs, grans estructures de combustió, sitges amb dipòsits de fauna i sitges amb restes humanes sense connexió anatòmica.
- **Context funerari d'inhumació:** estructures relacionades amb el món funerari de les comunitats on la pràctica habitual és la inhumació, tant si es tracta d'un enterrament aïllat o d'una necròpolis. Les subcategories són les següents: cista, càmera, galeria, sepulcre de corredor, altres estructures dolmèniques, fossa, hipogeu senzill, hipogeu complex (amb pou i/o nínxol), sitja, sitja amb nínxol, cova sepulcral i cova-abric paradolmènic.
- **Context funerari incineració:** estructures relacionades amb el món funerari de les comunitats on la pràctica habitual és la incineració, tant si es tracta d'un enterrament aïllat o d'una necròpolis. El subtipus són els següents: necròpolis incineració, estructura d'incineració aïllada, sitja o cova sepulcral.
- **Indeterminat:** estructures on és difícil atribuir alguna funcionalitat o ús. O bé les dades disponibles són antigues i no tenim informació suficient del jaciment.

La següent taula a descriure és la de *Subtipus* que està lligada a l'anterior. En aquesta hem establert uns subtipus d'estructures que es poden localitzar dins dels grans tipus descrits anteriorment. Aquesta taula és relaciona amb tres més (*Tipus*, *Jaciments* i *Cronologies*) a partir de *Rel_Jac_Crono_Tipus_Sub*, que les articula vincula a totes.

Així doncs, la següent taula a descriure és la de *Materials*. Incloent aquesta a la base de dades hem volgut fer un recull orientatiu dels materials més representatius de cadascun dels jaciments tractats. La qüestió de si hem pogut especificar més o menys, o afinar més la cronologia, ha depès de la bibliografia consultada i dels seus autors. Així doncs, recalquem que es tracta d'un camp orientatiu, ja que era impossible recollir el 100 per cent d'aquestes informacions. Aquesta taula està relacionada amb tres més: la de *Jaciments*, la de *Cronologies* i la de *Rel_Mat_Jac_Cro*, aquesta darrera és l'encarregada de relacionar totes les anteriors. Així doncs, aquesta taula presenta dos camps:

- **ID:** Aquest és únic per a cada tipus de material introduït, i mitjançant la taula *Rel_Mat_Jac_Cro* i la de *Cronologies* podem associar cada tipus amb una cronologia determinada.
- **Tipus de material:** Aquest camp ens permet introduir els tipus de materials, i com hem dit abans, després els podem relacionar amb una cronologia concreta.

Hi ha diferents tipus de materials inclosos, de generals i d'altres més concrets. Així doncs, aquest camp també ens ha estat molt útil pel tema de les cronologies, ja que aquestes forçosament havien d'encaixar amb les de les taules *Tipus* i *Subtipus* i en cas contrari detectaríem ràpidament el problema. D'altra banda, en jaciments sense datacions, els materials han estat un "fòssil director" orientatiu.

Així doncs, les següents taules a descriure són la de *Rel_Mat_Jac_Cro* i *Rel_Jac_Crono_Tipus_Sub*. Es tracta de taules que serveixen per solucionar relacions de M:N quan estan implicades més de dues taules. Per exemple, trobem aquest tipus de relacions al intentar definir les estructures dels diferents jaciments. Un jaciment pot tenir varis tipus d'estructures, i alhora, aquests tipus es poden trobar en més d'un jaciment. En canvi, si tinguéssim una relació de N:1 ens trobaríem en un cas diferent. Per exemple, la ceràmica amb decoració cardial només la podem trobar en cronologies del neolític antic cardial, però en aquesta mateixa cronologia hi ha molts més materials.

3.5.2 Base de dades històriques

La base de dades emprada en el cas d'estudi històric va ser dissenyada per integrar dades de caire temporal (baixes de soldats, segons diari dels assetjadors) amb dades de caire espacial (georeferenciació dels treballs de setge). Es va seguir una aproximació similar a la base de dades anterior, centrada en l'ús d'un model entitat relació (veure Figura 3.12).

- **Regiments:** Unitats participant al setge.
- **Baixes de soldats:** Registre diari de soldats ferits/morts.
- **Baixes d'oficials:** Registre diari d'oficials ferits/morts.
- **Treballs:** - Taula espacial definint l'àrea a on cada obra de setge es va desenvolupar (les paral·leles, trinxeres d'atac, bateries, etc.).
- **Activitat:** Relació d'obres de setge i l'interval temporal de la seva construcció.
- **Dia:** Llistat de dies possibles en què les baixes i els treballs es van dur a terme.
- **Graduació:** Llistat de possibles graduacions pels oficials atacants.

La única diferència a nivell tècnic amb l'altra base de dades és la taula *Treballs*, a on cada element de la mateixa té, a banda d'un conjunt d'atributs, una georeferenciació espacial (en aquest cas un polígon). Mentre que a l'altra base de dades era possible només definir els diversos jaciments amb un punt, en aquest cas l'escala d'anàlisi va forçar a fer servir una base de dades espacial per tal de permetre modelar aquests treballs com a àrees.

3.6 Anàlisi espacial

Fins aquest moment hem estat definint i mostrant les dades que podem treballar en un Sistema d'Informació Geogràfica i la manera que tenim de fer-ho. Totes aquestes qüestions són la base per a treballar en anàlisi espacial, on el GIS demostra tot el seu potencial. De fet, aquesta és la raó del funcionament dels GIS, que es basa en una llarga trajectòria de mètodes quantitius en arqueologia. Moltes de les bases de l'anàlisi espacial les van establir geògrafs quantitius en les dècades dels anys 50 i 60 del segle XX, i durant les dècades del 1970 i 1980 els arqueòlegs les van adoptar i les van modificar. Per diferents motius, i per l'emergència de determinades corrents teòriques,

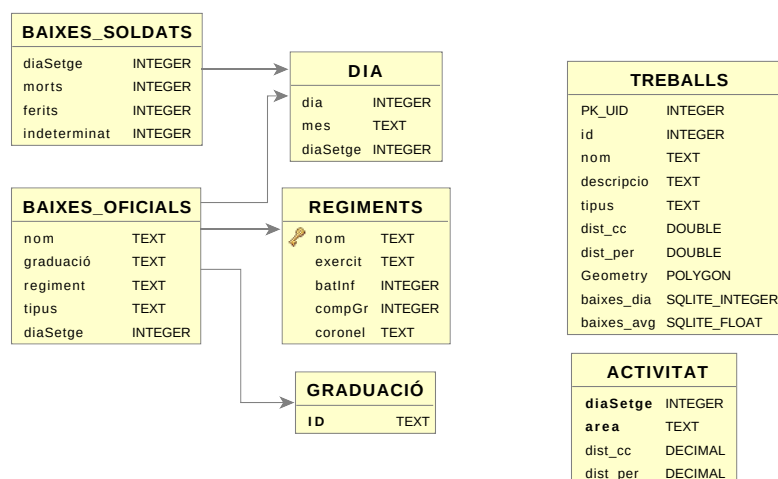


Figura 3.12: Model entitat relació de la base de dades històrica

l'anàlisi espacial en arqueologia i en les ciències socials, va deixar de ser el focus d'interès. Això es deu, en part, a que hi havia una excessiva generalització de models matemàtics massa simplistes, que no eren capaços de tractar l'alta complexitat inherent a l'estudi de l'ésser humà; i d'altra banda, al gir teòric a favor de l'estudi del comportament humà des d'una perspectiva més relativista i contextualitzada (Conolly & Lake, 2006, 202).

En les dues darreres dècades hi ha hagut una explosió i un renovat interès per l'anàlisi espacial i les aproximacions quantitatives a l'arqueologia, que ha pogut fer front a aquelles crítiques per a entendre millor l'organització espacial del comportament humà. En els últims anys, a més, en els camps de l'economia, la geografia, antropologia i altres ciències socials, s'han realitzat avenços per conèixer i interpretar patrons complexos del comportament humà en diferents nivells, del marc local al més general, emprant la geoestadística. L'arqueologia no ha participat tant activament com altres ciències en aquestes innovacions, però en els darrers anys hi hagut un creixent interès en aplicar totes aquestes tècniques d'estudi a les comunitats humanes pretèrites.

Així doncs, podem definir l'anàlisi espacial com allò que inclou les transformacions que podem realitzar a les entitats representades dins del nostre

GIS. Tenint en compte el volum de dades al que podem accedir, com les intricades i complexes relacions que s'estableixen entre elles, és necessari un període de processament de les dades per tal d'aconseguir distingir connexions que a priori semblen difícils de veure.

Per dur a terme tot el processament de dades, tenim a l'abast un nombre d'algoritmes, fórmules i tècniques molt elevat. Per tal de no quedar aclaparats per les possibilitats que ens ofereixen els diferents programes al nostre abast, cal conèixer quines aplicacions té cada eina, amb la intenció de treure un alt rendiment en la nostra recerca.

A continuació, descriurem algunes de les tècniques més utilitzades en l'anàlisi espacial, que molt sovint, han estat les més emprades en arqueologia.

3.6.1 Consultes

La primera de les maneres de realitzar un anàlisi de la informació continguda en un GIS és fent cerques i preguntes sobre les dades que ell mateix té. Això ho podem fer:

- A partir d'un atribut. El tipus de consulta que podríem realitzar seria, per exemple, *mostra una llista de jaciments que tinguin ceràmica campaniforme*.
- A partir de dades geogràfiques, amb una consulta com aquesta: *mostra'm els jaciments que estiguin a quinze quilòmetres de Barcelona*.
- Mitjançant la combinació de factors, amb una consulta com la següent: *vull saber tots els jaciments a quinze quilòmetres de Barcelona on hi hagi presència de ceràmica campaniforme*.

Alguns Sistemes d'Informació Geogràfica incorporen a les seves cerques la possibilitat d'emprar algoritmes dissenyats dins el camp de la Intel·ligència Artificial, i són prou complexos. D'aquesta manera, alguns d'ells poden respondre a preguntes més complexes, com *quina ciutat romana gran hi ha més al nord d'on estem situats*. La informació continguda en un GIS pot ser mostrada a partir de tres interfícies gràfiques diferents. En el nostre cas, utilitzem el programari Quantum GIS i farem referència a aquest per exemplificar gràficament aquests elements.

- La primera interfície és el catàleg, a on podem veure les dades en funció dels fitxers que les incorporen. Les característiques que es tenen en compte són el format (ràster o vector), tipus de fitxer, etc.

- La segona manera d'accedir a la informació és a partir de la vista de mapa, on veiem directament tota la informació georeferenciada correctament de les diferents capes temàtiques de dades. Aquestes dades poden ser consultades molt fàcilment amb una selecció del ratolí.
- I per acabar, la tercera vista és en forma de taula. En aquesta se'ns mostra la informació d'una capa concreta ordenada segons un dels atributs dels que consta.

Amb aquesta organització tenim la possibilitat de fer cerques complexes a partir dels atributs dels objectes. Normalment, per fer aquest tipus de cerca s'utilitza l'anomenat SQL (*Standard Query Language*), un llenguatge formal específicament dissenyat per a realitzar consultes en models entitat-relació. Usualment les aplicacions donen la possibilitat de realitzar les cerques tant per línia de comandes com a partir de la interfície gràfica, segons es pot veure a figura 3.13.

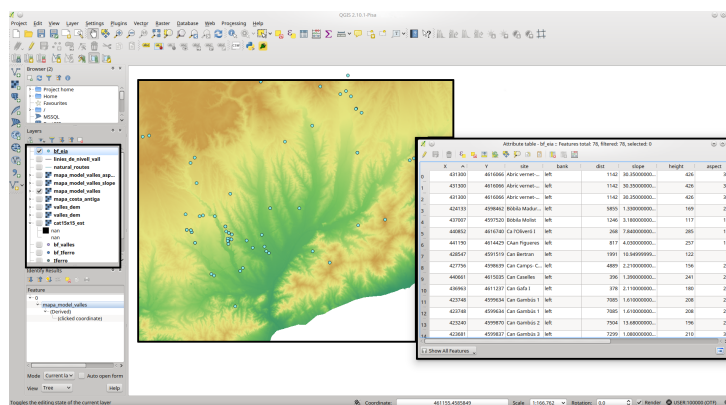


Figura 3.13: Les tres vistes existents en la interfície gràfica d'un GIS (en aquest cas Quantum GIS)

3.6.2 Mesures

Aquesta segona aproximació permet calcular els valors numèrics que descriuen una característica particular en relació a les dades geogràfiques. Això inclou la mesura dels objectes, la seva llargada, la distància entre dos punts, les relacions entre ells o bé la direcció (Longley et al., 2005, 320). Aquesta tipus d'anàlisi és un valor afegit del GIS, ja que no existeixen eines manuals precises capaces de calcular distàncies dins un model de terreny realista. De fet, com ja hem comentat fou una dels requeriments principals dels primers GIS, dissenyats per a permetre la mesura d'àrees.

Tot i això, existeixen problemes en la discretització de les dades vectorials, necessàries per representar-les en la plataforma informàtica i poder-les mesurar. El problema que es presenta recau en que les línies corbes són representades dins un GIS com a una col·lecció de punts enllaçats per línies rectes. La longitud conjunta d'aquestes línies rectes és menor que l'objecte corbat que es vol representar, donat que no segueixen exactament el mateix traçat, per la qual cosa existeix cert marge d'error, que s'incrementa en relació a la complexitat del traçat i a la simplificació del model creat. A més a més el sistema ha de ser prou sofisticat per a tenir en compte la curvatura de la Terra, doncs en cas contrari l'àrea mesurada serà inferior a la superfície real, que no és exactament plana.

A banda de les possibilitats comentades, també podem calcular perfils, és a dir, mesurar la distància entre dos punts calculant l'alçada. Això és molt important, ja que si treballem en un entorn bidimensional la distància més petita sempre serà una recta. Quan parlem de dades geogràfiques de caràcter tridimensional, però, és probable que un recorregut més llarg i en pla sigui més ràpid que un altre de més recte, però que hagi de passar per muntanyes o creuar rius.

3.6.3 Generació de noves dades

Els dos tipus d'anàlisi mostrats fins ara no han modificat en res les dades de les quals nosaltres partim, i tampoc n'han creat de noves. El següent pas, doncs, és transformar-les i generar-ne nova informació a partir d'unes regles simples (Rubio Campillo, 2009, 152).

El primer dels algorismes que podem fer servir és el *buffering* o àrea d'influència. Es tracta d'eixamplar un objecte donat, sigui un punt, una línia o un àrea. Aquest anàlisi el podem realitzar a partir d'un vector, o bé fent servir el format ràster, on assoleix tota la seva potència. Val a dir que el format vectorial permet la possibilitat de realitzar consultes espacials implementades per la superposició de polígons (Conolly & Lake, 2006, 276). Per exemple, d'aquesta manera seria fàcil localitzar tots els jaciments situats en una mateixa comarca, i alhora, els que estiguessin a 30 metres d'una futura carretera.

Així doncs, tornant al format ràster, podem parlar d'un cas concret com la generació isòcrones. Per posar un exemple il·lustratiu, pensem en un mapa en aquest format a on se'ns mostri el cost de travessar cada cel·la del mapa, és a dir, que cada cel·la tingui un valor que representi el que ens costa accedir-hi. Aquest valor s'anomena valor de fricció i globalment, aquest tipus de representacions són conegudes com a mapa de friccions o de costos. Hem de tenir en compte que el cost del desplaçament depèn del mitjà de transport i

dels atributs de la cel·la (Conolly & Lake, 2006, 282). En aquest cas podem fer servir el *buffering* per expandir-nos des d'un punt concret del ràster, tenint en compte les variables comentades anteriorment i la velocitat donada sobre els valors de fricció adjacents. Així doncs, entenem que a menor grau de fricció, més ràpid es pot avançar; i a major grau de fricció el desplaçament serà més lent, i per tant el resultat no serà uniforme en la seva expansió en totes direccions²¹.

Un altre exemple d'anàlisi que podem aplicar a partir del *buffering* és l'algoritme de veïnatge. Es tracta d'un mètode per determinar si un conjunt d'objectes a l'espai tendeix a un patró espacial aleatori o ara bé agrupat d'alguna manera. El concepte de "veïnatge" fa referència al conjunt de llocs utilitzats en una operació espacial per a calcular el nou valor d'atribut en una determinada localització. Les localitzacions d'un veïnatge no tenen per què estar espacialment pròximes. L'exemple de veïnatge més emprat es realitza a partir d'un mapa ràster, i consisteix en què cada nova cel·la pren com a valor la suma de la cel·la de referència més les 8 cel·les immediatament contigües. Per exemple, si analitzéssim mitjançant un algoritme del veïnatge més pròxim tots els jaciments romans de la comarca del barcelonès podríem observar la tendència de les agrupacions i els punts més importants, doncs tindrien valors més alts que les zones a on els assentaments estaven més dispersos.

Cal tenir en compte, però, que això és una representació esbiaixada del registre arqueològic i que, de fet, el que hem analitzat són els volums d'intervencions arqueològiques en una comarca, que en gran part dels casos van lligats al desenvolupament urbanístic. Per a solucionar aquest problema hauríem d'elaborar dos mapes: un amb tots els jaciments coneguts del barcelonès, i un altre amb tots els jaciments romans. Un cop fet això, hauríem de realitzar una operació d'àlgebra entre els dos ràsters (en aquest cas una resta), per tal de poder observar, d'una banda, on hi ha dades i on no hi ha; i de l'altra si hi ha zones buides d'informació degudes no a la inexistència de jaciments sinó a la manca d'estudis. Com a exemple, la figura 3.14 és el resultat de l'aplicació de l'algoritme de veïnatge per a jaciments de la Prehistòria recent a la zona d'estudi del tercer treball.

Més enllà del *buffering*, hi ha altres tècniques que ens permeten establir relacions entre els diferents objectes, especialment si estan modelitzats com a vectors. Entre aquests, destaquen els algoritmes que permeten veure si un punt està dins d'un polígon o calcular les interseccions i conjuncions entre tesselles.

²¹Tot i això, cal entendre que el GIS com a eina té les seves limitacions per representar i poder donar respostes a l'estudi de processos. Si volem aprofundir en aquest tema, com hem destacat abans una bona aproximació podria ser la modelització basada en agents (ABM) (Conolly & Lake, 2006; Gilbert, 2008, 386).

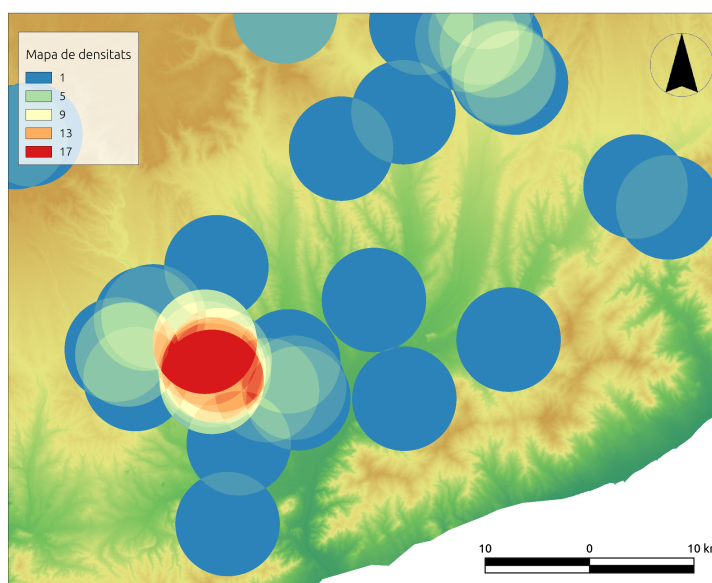


Figura 3.14: Aplicació de l'algoritme de veïnatge. La gradació de blau a vermell indica un nombre creixent d'intervencions arqueològiques a l'àrea.

Una altra línia de transformació de dades és la interpolació. Es tracta d'una tècnica que permet estimar matemàticament els valors dels atributs (com l'elevació, el tipus de sòl, etc) de localitzacions no mostrejades a partir dels valors calculats en llocs analitzats, quan els primers estan situats dins d'una zona on ja existeixen dades (Conolly & Lake, 2006, 283). Aquest algoritme el podem fer servir en casos d'estudi on ens faltin dades i vulguem augmentar la resolució, mitjançant el procés conegut com *resampling*. Cal dir, però, que la interpolació es pot aplicar a qualsevol fenomen espacial quantitatiu amb un mínim grau d'estructura, és a dir, quan els valors de les observacions no siguin aleatoris, sinó que presentin una autocorrelació positiva²². Per exemple, si estem treballant amb un DEM amb una resolució de 100x100 metres i tenim un mapa amb una resolució de 50x50, amb el que volem relacionar dades, haurem d'interpol·lar el DEM, per tal de que tinguï el doble de resolució i puguem comparar i relacionar els valors de manera correcta. Val a dir que hi ha diferents mètodes per interpol·lar dades, però en tots els casos hem de ser conscients de l'operació que estem realitzant i de l'exactitud de les dades originals. Cal recordar que en aquests processos estem obligats a pressuposar dades, amb tots els riscos que això pot comportar

²²Aquest terme descriu una forma d'estructura espacial, on tota la distribució succeeix, en major o menor mesura, que quan més a prop estan dues observacions, més similars seran els seus valors (Conolly & Lake, 2006, 132)

(Longley et al. 2005, 90; Conolly & Lake 2006, 157).

Dins l'anàlisi espacial amb GIS, els quatre mètodes d'interpolació més emprats són la ponderació a partir de la distància inversa, l'algoritme dels polígons Thiessen, el *kriging* i la interpolació a partir d'*splines*. Aquest darrer cas està molt indicat per a superfícies que varien lleugerament i lentament, com les elevacions d'un terreny poc abrupte. Cal dir que tots quatre algoritmes són complexos, i per exemple, el *kriging* requereix uns alts coneixements d'anàlisi geoestadística per poder-lo dur a terme. La selecció del mètode d'interpolació més adequat depèn de l'estructura de les dades mostrals, dels resultats que es busqui obtenir, i de les característiques del model de superfície.

D'altra banda, també podem dur a terme la operació contrària a la interpolació. És el que es coneix com reclassificació. En el cas anterior partíem d'un conjunt limitat de dades per generar-ne de noves, i en aquest cas es tracta del cas oposat. Es tracta de simplificar un conjunt de dades alterant les classes o categories utilitzades per enregistrar els atributs (Conolly & Lake, 2006, 389). És a dir, simplifiquem les dades que tenim per tal de crear un nou mapa més senzill, sovint a menys resolució. Aquesta tècnica és bastant utilitzada, per exemple, per calcular densitats de població en un territori, o bé, per analitzar si hi ha zones amb mancances de transport públic, abastiment elèctric, etc.

3.6.4 Resums descriptius i geoestadística

Els GIS incorporen tot un conjunt de fórmules, tests i tècniques relacionades amb l'estadística (mitjana, mediana, variància, correlacions, χ^2 , t de Student...) que ens permeten explorar, clarificar i determinar la importància de les relacions en les bases de dades espacials i d'atributs. D'aquesta manera, si la nostra mostra és suficientment àmplia, podrem canalitzar tota aquesta informació i organitzar-la.

D'altra banda, els GIS també presenten tot un conjunt de tècniques anomenades *data mining* relacionades amb la recollida selectiva de dades i amb la detecció de patrons regulars entre aquestes.

3.6.5 Dades generades a partir del DEM

Com ja hem vist, el DEM és una de les bases més importants per poder desenvolupar la nostra recerca en l'àmbit espacial. A banda de l'altura, que ja de per sí pot ser una variable rellevant, podem extreure a partir d'ell nova informació extremadament útil per realitzar l'anàlisi espacial.

Ens concentrarem en les dues més rellevants per a la nostra recerca, tot i que com podem veure a la Taula 3.1 n'hi ha moltes més. La primera d'aquestes és la gradient. És el resultat de calcular, per cada punt donat d'un DEM ràster, quina és la pendent respecte a l'eix d'horitzontalitat. Es tracta d'un factor prou rellevant, ja que és una variable que incideix plenament en el càlcul de rutes de mínim cost i la tria de localitzacions, problemes d'optimalitat que veurem a continuació.

L'altra variable que podem extreure del DEM és l'aspecte. Aquesta ens indica la orientació de la gradient en graus, partint de la base de que varia de 0 a 360 graus, tenint en compte que el 0 és el nord teòric (per tant, 90° correspondrien a l'Est, 180° al Sud i 270 a l'Oest).

Atribut	Definició	Aplicació
Gradient	Màxima inclinació en elevació	Inclinació del terreny; dificultat de moviment; classificació del potencial de terres; erosió i moviment dels artefactes; model predictiu de jaciment
Aspecte i exposició	Orientació de la pendent descendent	Irradiació solar; model de vegetació; moviment; model predictiu de jaciments
Curvatura de perfil	Màxima pendent	Model d'erosió; avaluació dels sòls
Relleu ombrejat	Representació del relleu del terreny mitjançant l'efecte ombra	Anàlisi visual de la variabilitat del terreny
Insolació	Quantitat d'energia solar sobre un segment del paisatge	Model de vegetació; classificacions del potencial de les terres; model predictiu
Visibilitat	Localització de paisatge visible des d'un punt donat	Model predictiu; anàlisi de localització d'assentaments
Conca de drenatge	La zona que drena en un punt definit del paisatge	Anàlisi de localització d'assentaments

Taula 3.1: Models de superfície que podem obtenir a partir del DEM (a partir de (Conolly & Lake, 2006, 147))

A les figures 3.15 i 3.16 podem veure, a tall d'exemple, la gradient i l'aspecte generades a partir del DEM emprat al tercer cas d'estudi.

3.6.6 Rutes òptimes i accessibilitat

L'explicació d'un patró de l'ús humà del sòl requereix, encara que no sempre, conèixer el potencial favorable i desfavorable a través del paisatge. És a dir, requereix que s'intenti establir l'accessibilitat relativa de les diferents

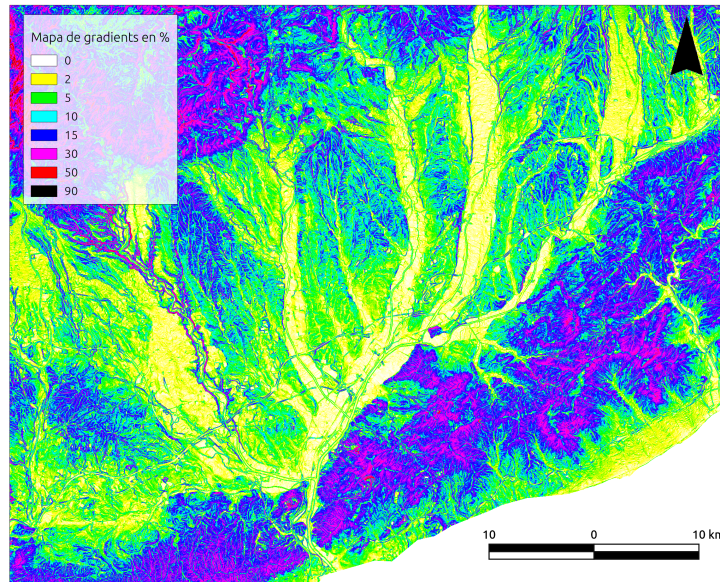


Figura 3.15: Mapa de gradients

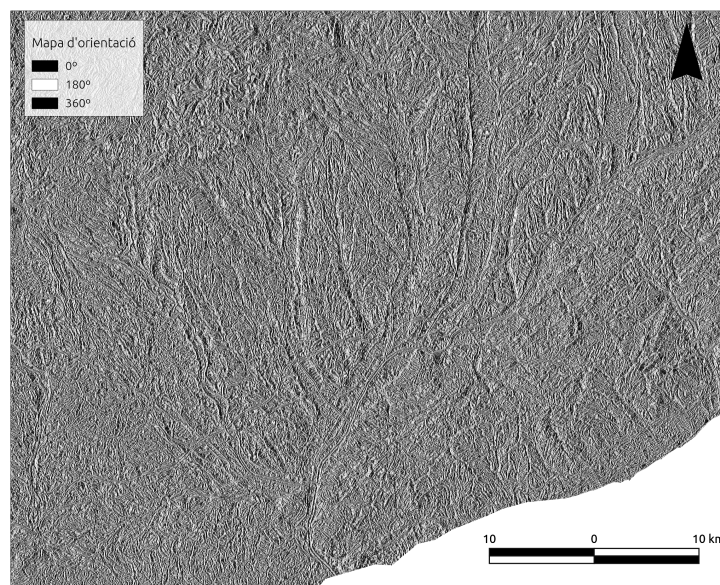


Figura 3.16: Mapa d'orientacions

localitzacions. En aquest sentit, aquest concepte s'ha modelat de maneres diferents, bé analitzant l'accessibilitat com una funció de distància, de la compactació territorial, de consum energètic o de temps (Conolly & Lake, 2006, 281). En principi totes aquestes anàlisis les podem dur a terme amb un GIS. Per exemple, les dues primeres les podem elaborar mitjançant la creació d'àrees d'influència i polígons Thiessen. En canvi, el temps i la despesa energètica es poden representar a partir del càlcul de les rutes òptimes.

Entenem per optimització (i rutes òptimes) el procés pel qual a partir d'unes dades concretes generem noves informacions que impliquin minimitzar el cost de qualsevol acció que representem, tenint en compte el terreny. Cal dir que els algoritmes utilitzats per resoldre aquests tipus de problemes procedeixen de certes branques de la Intel·ligència Artificial, ja que és el mateix GIS qui decideix quina és la millor opció al seu abast seguint una sèrie de regles predeterminades. En aquesta elecció juga un paper molt important el terreny, i les bonificacions o penalitzacions sobre aquest que nosaltres haurem afegit. Per exemple, nosaltres podríem tenir en compte variables històriques a més del propi territori, marcant quines zones són les més adequades per motius culturals i quines altres estan penalitzades. Així doncs, la nostra ruta no només tindria en compte els factors geogràfics, sinó també altres variables de diversa índole que nosaltres haurem determinat.

Les qüestions que ens plantegem poden ser resoltes de maneres diferents, segons si es tracta de dades discretes o contínues. En el primer cas, s'estableixen xarxes, on els nodes estan connectats per diversos enllaços (arestes) que marquen els diferents camins possibles. En el segon cas, on no tenim arestes entres nodes, el desplaçament es realitza de forma contínua. Per tant, es pot triar qualsevol opció. Aquest darrer cas és el més efectiu quan es tracta de modelitzar moviments no marcats per vies de comunicació modernes (Rubio Campillo, 2009; Herzog, 2013, 154).

Així doncs, podem dividir les tècniques i algoritmes d'optimització en dos grans grups, tenint en compte el problema que volem resoldre. El primer, està marcat per l'elecció d'una localització d'un punt òptim donada una casuística concreta. Per exemple, aquest tipus d'anàlisi el faríem servir per situar una antena on donés més cobertura o per plantejar-nos on situaríem una fortificació en un territori, tenint en compte les distàncies o els perills als que s'hauria d'enfrontar.

El segon bloc és el que dona resposta a l'elecció de la ruta més òptima. Si disposem de dades discretes, podem modelitzar-ho com a problemes de xarxes. Per exemple, solucionar quina és la millor ruta de transport (a peu, públic o privat) per anar des d'un punt a un destí determinat. En la nostra vida quotidiana en trobem aquests models de manera habitual, per exemple, en els GPS dels cotxes o en portals com Google Maps, que ens recomanen el

millor camí. Uns dels casos més complexos per calcular són les anomenades rutes de mínim cost²³. En el món de la intel·ligència militar han estat molt explotades i també resulten molt útils per determinar traçats de línies d'alta tensió, repartiments de recursos, etc.

Per calcular-ho, podem fer servir un sistema d'isòcrones. A partir d'un mapa ràster amb els valors de fricció, definim un agent que es desplaçarà tot intentant trobar el millor camí fins a un destí marcat. Un cop definits els valors de fricció, hem de decidir com aquest agent es mourà per les cel·les, tenint en compte que cadascuna té 8 veïns. Tenim diverses possibilitats per a desplaçar-nos per aquesta estructura geomètrica, des del simple moviment de la “torre” (ens podem moure cap a esquerra, dreta, dalt o baix) al de la “dama” (és possible desplaçar-nos també als veïns diagonals) i al més sofisticat del “cavall” (s'expandeixen les diagonals per evitar problemes de distàncies diferents). A priori, el darrer mode és més efectiu i precís, però tenir en compte que els moviments en diagonal són més llargs que no pas la resta requerirà un cost computacional força més elevat, variable que s'ha de tenir present en cas de models complexos.

Quant als valors de fricció, podem fer servir nombroses dades diferents al nostre abast, com l'elevació, la gradient o la paleovegetació (una zona de bosc seria més costosa de travessar que no pas una de cultiu). Un cop donat el valor de fricció de cada cel·la, a partir d'algoritmes podem computar la ruta de mínim cost, ja que es tracta d'un tipus de problema d'un grau de complexitat elevada.

3.6.7 Contrastació d'hipòtesis

El que hem mostrat fins ara en aquest apartat són anàlisis que podem realitzar amb un GIS per generar noves informacions a partir de la mostra inicial. És a dir, es tracta d'un anàlisi en gran part inferencial. Partint d'aquesta premissa, podem treballar amb un GIS en la creació i validació d'hipòtesis de treballs (Rubio Campillo, 2009, 156).

Tot i això, i partint de que la nostra mostra sigui prou representativa²⁴, existeixen problemes greus en aquests tipus d'aproximacions a problemes geogràfics. En primer lloc, cap regió del món es representativa d'una regió més gran. Si triem les regions a priori per a que siguin una mostra representativa, estem caient en l'apriorisme de triar les dades sense aleatorietat i per tant obtindrem un resultat predictable. Així doncs, també hem de pensar que en

²³Per una anàlisi actualitzada sobre l'ús de les rutes de mínim cost en arqueologia, consultar Herzog (2014)

²⁴Si tractem temes d'arqueologia, hem de ser prou conscients de que treballem amb dades parcials.

la superfície de la Terra no hi ha res semblant a la mitjana. En pocs casos un estudi d'una regió concreta ens podrà donar informació sobre una altre molt diferent, ja que els factors geogràfics estan tan relacionats, que serà difícil decidir quins elements tenen en comú i quins no.

Alternatives i solucions als problemes plantejats són l'estudi descriptiu del territori relacionat amb la qüestió a estudiar. En aquest cas podríem emprar tota la potència dels Sistemes d'Informació Geogràfica, sense caure en generalitzacions. Un altre aproximació per aprofundir en el nostre estudi és la detecció de patrons en una mateixa àrea. En aquest cas, aquests patrons poden ser útils per a l'estudi d'altres zones i problemes relacionats amb temes de rutes de mínim cost, àrees de captació de recursos, visibilitats, distàncies amb cursos d'aigua, relacions entre assentaments, etc.

Chapter 4

The Spatiotemporal Model of an 18th-Century City Siege

Aquest capítol és una transcripció exacta dels continguts del següent article (la versió original es pot veure a l'apèndix A):

Rubio-Campillo, X.; Hernández Cardona, F.X.; Yubero-Gómez, M. (2014). "The spatiotemporal model of an eighteenth century city siege", *Social Science Computer Review*, 1-17, doi: 10.1177/0894439314558559.

Abstract The importance of terrain in warfare has often encouraged an intense relation between military conflicts and the use of techniques designed to understand space. This is especially relevant since the modern era, where the engineers who built and assaulted city defenses recorded the events with diverse documentation, including reports, diagrams and maps. A large number of these sources contain spatial and temporal information, but it is difficult to integrate them into a common research framework due to its heterogeneity.

In this context, Geographical Information Science provides the necessary tools to explore an interdisciplinary analysis of these military actions. This paper proposes a new approach to the study of sieges using a spatiotemporal formal model capable of integrating cartography, archaeological and textual primary sources and terrain information. Its main aim is to show how concrete research questions and hypotheses can be explored using a formal model of this type of historical events.

The methodology is applied to a particular case study: the French-Spanish siege of Barcelona occurred in 1714. The protagonists faithfully recorded the development of the action, providing essential information for the model. Besides, different authors depicted the event as the paradigm

of a city siege. For this reason the model is also used to explore why real actions deviated from theoretical guidelines, clearly defined in different manuals. We use this scenario to explore two issues: a) why the attackers chose to assault a particular city sector b) the factors that explain the casualties of the besiegers. We conclude that we need methodological tools capable of integrating heterogeneous information to improve the understanding of siege warfare, that affected not only military conflict, but also the shape of European urban landscapes.

Keywords Spatial analysis, War of the Spanish Sucession, Vauban, Geographical Information Science, military history.

4.1 Introduction

The introduction of Geographical Information Systems in Social Sciences and Humanities has gradually increased during last decades, especially in the fields with stronger spatial dependencies, like Archeology (Longley et al., 2005; Conolly & Lake, 2006). Historical research has also been involved on some of these advances in spatial technologies (Knowles, 2006; Knowles & Hillier, 2008). However these formal models are still not as widely spread as one could expect given the large amount of sources involving spatial information. In particular, it is surprising that the study of military conflicts, the human activity that has generated the largest volume of maps and other spatial information in the past, seldom uses this type of approach (Nolan, 2009).

The seventeenth and eighteenth centuries saw an exponential increase in the documentation generated by military actions and, in particular, city sieges. We claim that the integration of cartography and other sources into a spatiotemporal formal model would increase the understanding of these actions as well as the relation between cultural, geographical and historical variables that could explain its impact on modern era societies.

In particular, the comparison between real actions and treatises provide new insights into the reasons why a besieger deviated from theoretical guidelines. This is specially interesting with the homogenization of siege techniques done by Sébastien Le Prestre, Marquis of Vauban (Barros et al., 2007). The principles listed by Vauban were considered as the basis for besieging any fortress, but as other authors have pointed out the commanders did not always follow them (Ostwald, 2007).

The aim of this work is to present a formal model that captures the spatial and temporal dimensions of data generated by an eighteenth century

siege. We suggest that this quantitative approach could be able to answer particular research questions and test hypotheses, moving from the classical descriptive models of historical research to the exploration of formal models, with all its added benefits (see Epstein 2008 for this discussion).

We show how the design of a formal model of the siege created with GIS improves our understanding of the role of cities in modern era warfare. As an example, we explore different hypotheses formulated for a particular case study: the French-Spanish siege of Barcelona (1713-1714), epilogue of the War of the Spanish Succession, one of the most important conflicts of the century.

The next section explains the context and development of this siege, defining the working hypotheses and the spatiotemporal model developed to test them. This is the starting point for the application of different analysis techniques in the third section. To conclude, results are discussed, and put into context of the wider goal: the development of formal models designed to explore the history of warfare.

4.2 Modeling the siege of a city

A large percentage of European cities and fortresses were besieged during the seventeenth and eighteenth centuries. This constant threat to vital strategic locations forced the states to invest efforts not only on the defenses, but also on the theoretical aspects that controlled this activity. Particularly important was the creation of social structures capable of informing engineers on the design and execution of siege plans. The theory built by these specialists created a unified method to besiege any city of Europe for at least 200 years. Despite the fact that the phases of a siege seemed extremely deterministic, reality was certainly different. The very same engineers did not follow the theoretical guidelines in the field, for complex and varied reasons related to the geographical, cultural and temporal variables of the particular event.

The dynamics of these historical events make them a perfect target for spatiotemporal analysis. First of all, there was a constant evolution of solutions at different scales (from command and control to logistics and technology), so the comparative analysis of sieges from different decades could be extremely interesting. Second, the documentation generated by a siege of the eighteenth century can be used to create a geographical model, where temporal variables can be also introduced (phases of the siege, daily casualties, etc.). Finally, it is possible to create a formal model that can be used to answer particular questions related to the adaptation of the theoretical guidelines to a particular siege.

The relation between geography, time and the decision-making process of the engineers and commanders is too heterogeneous to be understood by using just one type of primary source. A formal model combining spatial and temporal variables is the best choice to integrate all available data into a tool that can be used to explore these complex dynamics. We focus the study on two research questions: a) why a particular zone of the wall was chosen to initiate formal siege? And b) what is the relation between attacker casualties and the phases of a siege?

In order to do that we will define a particular case study, one of the most important (and best documented) sieges of the period.

4.2.1 The historical event

The city of Barcelona, capital of Catalonia (North-Eastern Iberian Peninsula), played a major role during the War of the Spanish Succession. The conflict was initiated with the death without heirs of the Spanish king, Charles II. The throne was given to Philip d'Anjou, nephew of Louis XIVth of France. A Grand Alliance lead y England and Austria opposed the new king. In 1705, the Catalans rebelled against Philip while supporting the allied pretender, Charles of Hapsburg. Barcelona became the key of the allied power in Iberia, suffering two sieges. In 1713 most contenders of the war signed the peace, except for Austria and Spain. Charles (now emperor) was unable to support the Catalans, and a French-Spanish army gradually conquered the rebel zone. At the same time, the Catalan government created a new army from veteran soldiers and based the defense on Barcelona (Hernández & Riart, 2007).

The Bourbon army was unable to initiate a formal siege until the arrival of major French reinforcements commanded by the duke of Berwick, on July 1714. The engineers, commanded by Dupuy-Vauban (nephew of the Marquis of Vauban) and the chief-engineer of Spain, Próspero de Verboom, opened the trench in the next days (Corbalán, 1991). The 62-day siege finished in 11th September with a high cost for the besiegers (at least 8.000 casualties).

The fact that Philip considered the Catalans as rebels is decisive to understand the events. The usual ending of an eighteenth century siege was a negotiated surrender once a bastion was conquered, except for rebel cities that did not deserve mercy. The attackers and defenders knew that surrender was not an option, and for this reason Berwick not only had to conquer a bastion, but assault the whole city two times (Castellví, 1999; Amaury, 1714).

The formal siege followed the theoretical guidelines proposed by Vauban: three parallels, breaching fire combined with ricochet to destroy defenses, and a general infantry assault. However some events forced a change to the plan

attack. The first assault was a complete failure as attackers were repulsed from the breaches. A new tactic was then deployed, based on the systematic destruction of the walls as a prelude to a massive assault. Mines did not play a major role during the siege due to heavy rains, and Berwick was forced to rely on artillery batteries. The final assault, executed in 11th September 1714, was so costly that Berwick had to accept the surrender of the rebel city without sacking it (the standard punishment that Philip V applied against rebel cities, executed at Lleida and Xàtiva).

The capture of Barcelona was extensively studied in different Bourbon military treatises (Ossorio, 1730). Interestingly enough, today the final assault on the city is considered the National Day in Catalonia. This fact shows how a city siege can leave a deep imprint on both sides of the trench (Anguera, 2008; Bruguera, 1871; de la Llave y García, 1903; Sanpere i Miquel, 1905).

4.2.2 The components of the model

The action can be used to explore the complexity of a Vaubanian siege. Different documents, both from besiegers and besieged, form a coherent narrative that is confirmed by archaeological evidence. We will not go into detail because the different sources have already been analyzed in previous works (Hernández & Riart, 2007; Riart et al., 2010; Hernández & Riart, 2014), and this research is based on their results. In any case, existing data can be summarized as follows:

- *Cartography* - A number of archive maps were used for this task, from Cartoteca de Institut Cartogràfic de Catalunya, Gallica Bibliothèque Nationale de France and Catálogo Colectivo de la Red de Bibliotecas de los Archivos Estatales. In particular:
 - Different maps created before and after the siege, useful to recreate city defenses.
 - Maps of the siege drawn by Verboom and Dupuy-Vauban's lieutenant Lozieres d'Astier.
- *Textual sources* - Most descriptions can be found in Corbalán (1991); additional texts on Gallica – Bibliothèque National de France, Biblioteca Nacional de España and Arxiu Històric de la Ciutat de Barcelona:
 - Three diaries of the besiegers, reporting casualties and works:
 - a) *Journal du siège de Barcelone commandé par Monseigneur le Maréchal duc de Berwick, généralissime de l'armée des Deux Couronnes en 1714*, b) *Détail du siège de Barcelonne* and c) *Le Siège de*

Barcelone en 1714 raconté par un arlésien a un arlésien. The first document provided the majority of information, including the list of casualties and the daily works. The second was used to compute the list of officers that were killed or wounded, while the third account was used to confirm diverse data.

- Two descriptions of the city walls: a) *Explication sur la fortification de la ville de Barcelonne* and b) (written by Verboom) *Memoria sobre el estado de las fortificaciones de Barcelona y su descripción detallada*. These extremely detailed descriptions of the defenses were used to build the model, including widths and heights of every wall sector and bastions.
- The gazetteer regularly printed inside the city: *Gazeta de Barcelona – Diario del Sitio de Barcelona*. This source is valuable to compare the activities of the besiegers with the reaction of the defendants of the city.
- A number of historical studies on the siege (Castellví, 1999; Ossorio, 1730; Molas Ribalta, 2007)).
- *Archaeological evidence* – Different works have been published as technical reports by the Servei d’Arqueologia de Barcelona and the Servei d’Arqueologia I Paleontologia de Catalunya:
 - Excavation of a city portal in the zone of the siege (Gea Bullich, 2006).
 - Ammunition (>100 projectiles) and impacts found in the excavation of a XIXth century market (Mercat del Born).
 - Archaeological excavation on a sector of the defensive perimeter of the city (bastion, ditch and counterscarp in the current market of Sant Antoni).

All these materials were used to generate the spatial model, divided in two components: a) the city defensive perimeter and b) siege works. It is important to note that the model is mainly focused on the besieger, as is required for our research questions. The casualties of the besieged have been excluded from the analysis because they are not relevant, and their actions (like sorties and artillery fire) are already included (in terms of casualties and defensive intensity, as we will see). Additionally they have been extensively studied in other works (Hernández & Riart, 2007; Riart et al., 2010).

The city defensive perimeter Barcelona was surrounded in 1714 by a medieval wall, that had been widened and improved with the addition of 10 bastions. The system was obsolete because the curtain was not protected by any external earthworks. Nevertheless the average siege duration of the city for the period is close to 60 days (the city was besieged four times in less than 20 years: 1697, 1705, 1706 and 1714). Some documents discuss the reasons for this length (a usual siege would last around a month), providing different explanations:

- The presence of Montjuïc, a fortress in a steep hill near the city (200 m. of elevation).
- The quality of the materials used to build the walls.
- The possibility to build new entrenchments behind the wall in case of breach.

The georeferencing of the maps generated by different sieges (Figure 4.1 and the descriptions written in 1713 and 1715 were used to define the size and shape of the defensive system (medieval wall, bastions, ditch and covered way). The results can be seen in Figure 4.2.

Existing cartography from eighteenth and nineteenth century was also used to modify the current Digital Elevation Model of the environment, adjusting the coastline to the one existing in 1714.

Siege works The documentation generated by the siege of 1714 was used to define and georeference the different earthworks made by the besieging army. A relational database was created from this data, including these entities:

- *Regiments* – Units participating in the siege.
- *Soldier Casualties* – Daily report of soldiers killed/wounded.
- *Officer Casualties* – Daily report of officers killed/wounded, including rank and regiment.
- *Works* - Spatial table defining the area where every earthwork took place (the three parallels, attacking trenches, batteries, ...).
- *Activities* – Relation of earthworks and the temporal span of its construction.

This database provides a summary of the action, summarized as follows:



Figure 4.1: A sample of the maps used to georeference the city defenses: (a) city map: “*Le Plan de Barcelonne et de ses environs. Tres exactement Levés sur les Lieux en 1706*”, drawn by Nicolas de Fer and (b) “*Plan des attaques de Barcelonne en 1714*”, drawn by the second chief-engineer of the French army, Loziers d’Astier.

- 27 French regiments and 10 Spanish regiments actively participated in siege works, for a total of 70 battalions.
- Around 8.000 soldiers, 400 officers and 17 engineers of the besieger army were killed or wounded.
- The formal siege lasted 62 days (12th July to 11th September, 1714), with an average rate of 135 casualties/day including two major assaults.
- The artillery train consisted of 70 siege guns and 20 mortars.

The temporal sequence of activities is defined in Table 4.1. The temporal phases of the siege can be combined with the spatial dimension of the earth-works. Figure 4.3 shows the location where the activities of the besieging army took place.

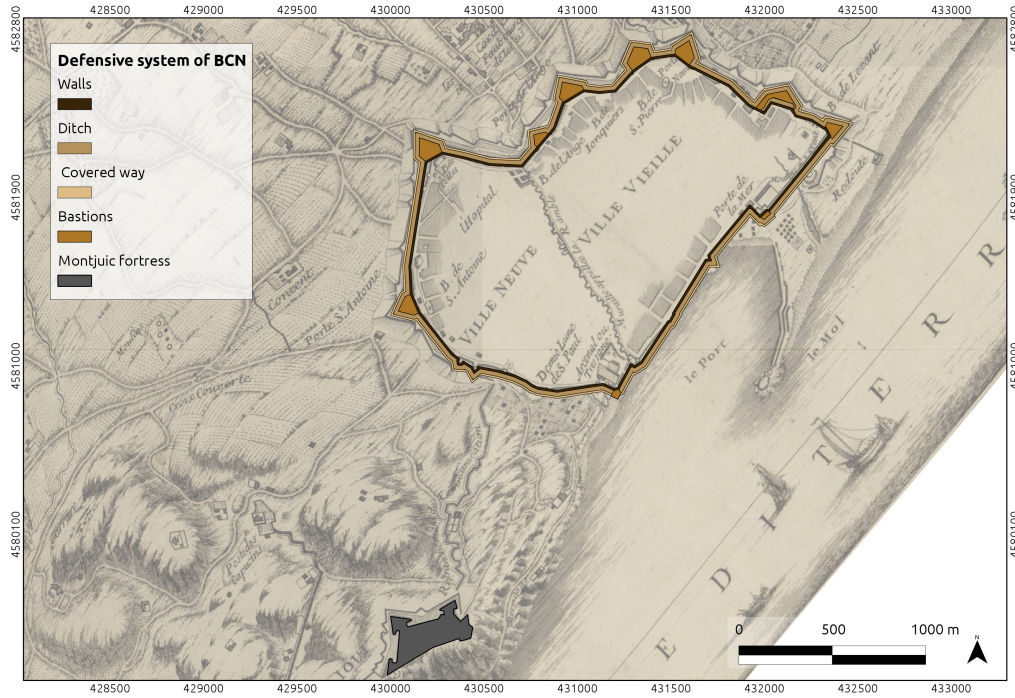


Figure 4.2: Defensive perimeter of Barcelona during the siege of 1713-1714, based on the georeference of different maps and text descriptions. The southern part is controlled by the fortress of Montjuich, built on top of a hill.

4.3 Analyzing the model

The research questions were explored designing three experiments. The first one explored the vulnerability of the different sectors of the wall. The main goal is to understand why the 1714 attack was developed in the Northern zone of the city, an area that was never chosen in previous attempts. The other two experiments are focused on the impact of two variables (distance and type of work) in besieger's daily casualties.

4.3.1 Defensive support

Modern-era fortresses were built to avoid blind spots, where attackers could create and penetrate a wall breach avoiding the fire from the defenders. For this reason the shape of the walls was designed looking for optimal support between bastions and the curtain in any zone of the perimeter (Duffy, 2006). Our hypothesis is that the besieging army chose the particular zone of the attack based on the perception of weak support in the sector. The memories

1	Opening of the trench (First Parallel)
4	Second Parallel
14	The great battery (>60 guns) located in the 2nd parallel begins to breach the city walls
15	Third parallel
19	Capture of the covered way
26	A second battery (>20 guns) in the 3rd parallel begins to fire at close range at the defenses
32	First general assault, focused on the bastions near the largest breach
35	The assault is repulsed
36	A Semi-parallel is built along the Covered Way
37	New batteries are deployed; 2nd and 3rd parallels are extended
46	The third set of batteries begins to fire to create new breaches
62	Final assault to the city

Table 4.1: Siege phases. Each day is shown as an absolute date, starting with 12th July, 1714 (day 1) and ending the 62nd day (11th September, 1714). The activities were usually performed from 19:00 to 05:00 of the next day.

of the besieging commander (the duke of Berwick) said that this is why he chose to attack in this zone, but he did not specify the reasons for this weakness, or why previous sieges decided to assault through other areas. Certainly the ideas about what this weakness means varied over time, as can be observed in theoretical treatises. For this reason different attacks to the same city could choose different zones, depending on who and when besieged the location. To test this hypothesis we created an experiment designed to compute this support for any sector of the defensive perimeter:

1. The heights of the defensive works (walls, bastions, covered way) were added the Digital Elevation Model. The ditch volume was deducted from the outcome, thus creating an elevation map of defenses.
2. The perimeter of walls and bastions was divided in 50m sectors. A new point vector map was created, containing the central location for each sector.
3. The line of sight to each of these points was calculated at half the height of the wall (around 6.5 meters). The elevation was chosen assuming

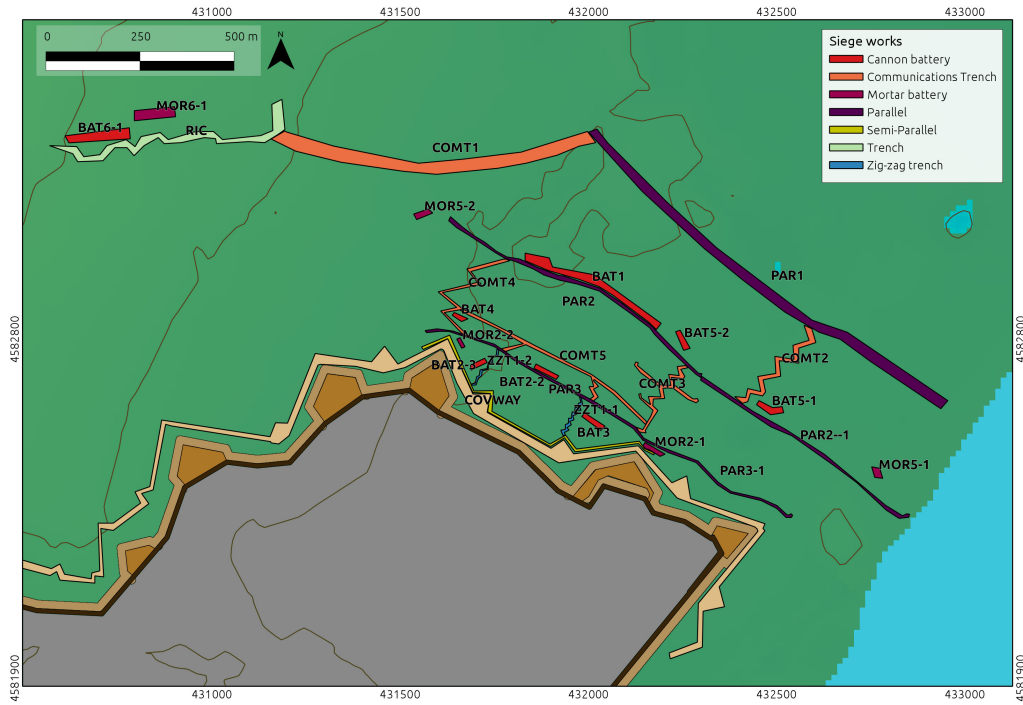


Figure 4.3: Earthworks developed by the besiegers during the siege.

that a potential breach would have approximately this height (as the top of the wall would collapse under artillery fire). This step provides, for every sector of the wall, a map of the geographical spaces from where a defender could fire at soldiers assaulting the breach.

4. Computation of the number of perimeter locations within line of sight to each point, from for two different distances, based on experimental studies (Allsop & Foard, 2007; Miller, 2010; Hughes, 1997):
 - Effective artillery fire (300 m.)
 - Effective musket fire (80 m.)

The execution of this algorithm for each sector of the defenses generated an intensity value for the two different types of defending support.

4.3.2 Relation between casualties and distance to defenses

The second aim of this paper is to understand the relation between the phases of a siege and the casualties of the besiegers. The underlying idea is

that a high rate of casualties could be responsible for the deviation observed between theory and practice. In particular, the French-Spanish engineers chose to extend the second and third parallels in the middle of the 1714 siege, changing the entire shape of the siege works after the first failed assault. A logical hypothesis is that the number of casualties is strongly related to the distance between siege works and defenses. For this reason the following experiment was run:

1. Extraction of the centroid of every siege work. The result is the central location of the area where this activity took place.
2. Computation of the distance between every centroid and the covered way. No work took place in the ditch except for assaults and mines, that are not relevant for this study.
3. A Standard Query Language (SQL) query was executed to get the list of works that were being built every day (Date & Darwen, 1997).
4. Finally, the average daily distance between the besieging works and the covered way was calculated.

4.3.3 Relation between casualties and type of work

A second hypothesis is that casualties are related to the type of work soldiers were executing. In order to explore it, the next algorithm computes the daily average of casualties during the days that a work was undertaken:

1. Extraction of the list of days when a work was built, collected in the database
2. An SQL query was executed to determine the list of casualties for each day.
3. A daily casualty average was computed for every earthwork, combining the information from the previous steps.

4.4 Results and discussion

Results generated by the three experiments served as a basis for re-interpreting known information about the siege.

4.4.1 Defensive structure of the city

Figures 4.4 and 4.5 depicts the intensity of defensive support from the first experiment for (a) Artillery direct fire and (b) Musket fire.

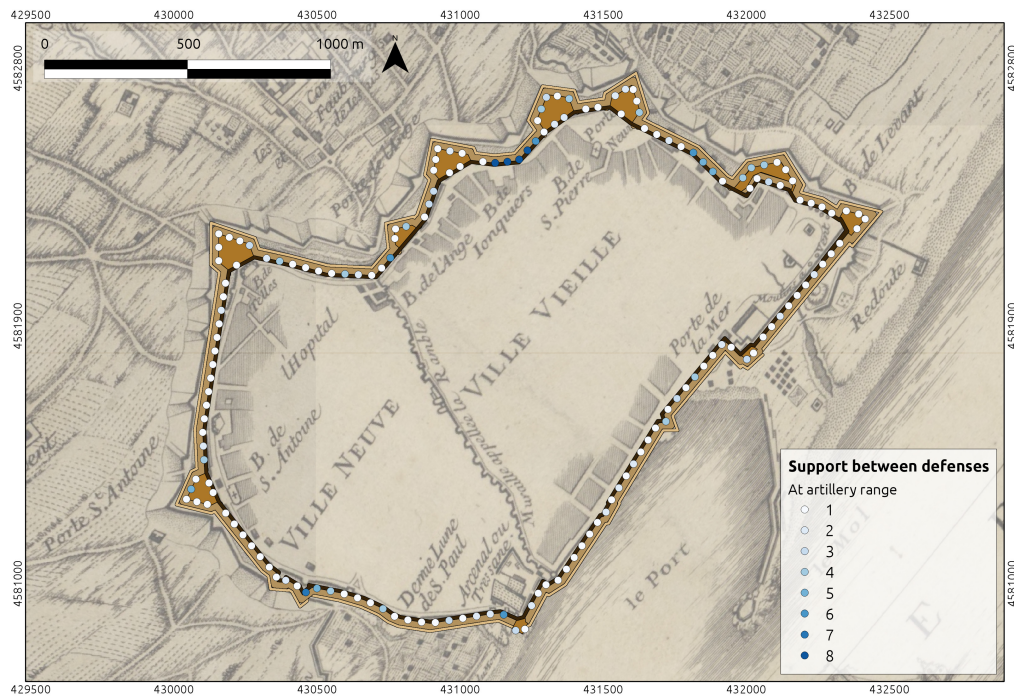


Figure 4.4: Defensive support between city defenses at artillery range (300 m.), in increasing intensity from white to darker grey.

The perimeter was split in four sectors in order to clarify results (see Figure 4.6):

- Castle sector – The zone near the castle of Montjuïc.
- Inland sector – The perimeter facing the mountains that surround the city from the West.
- Coast Sector – Wall facing the sea.
- North Sector – This area comprises the walls and bastions facing the North. This was the zone attacked in 1714.

It is worth noting that the city was besieged four times in a period of 20 years: two times from the Castle Sector (1705 and 1706), one time from the Inland sector (1697) and one from the North sector (1714). It is interesting

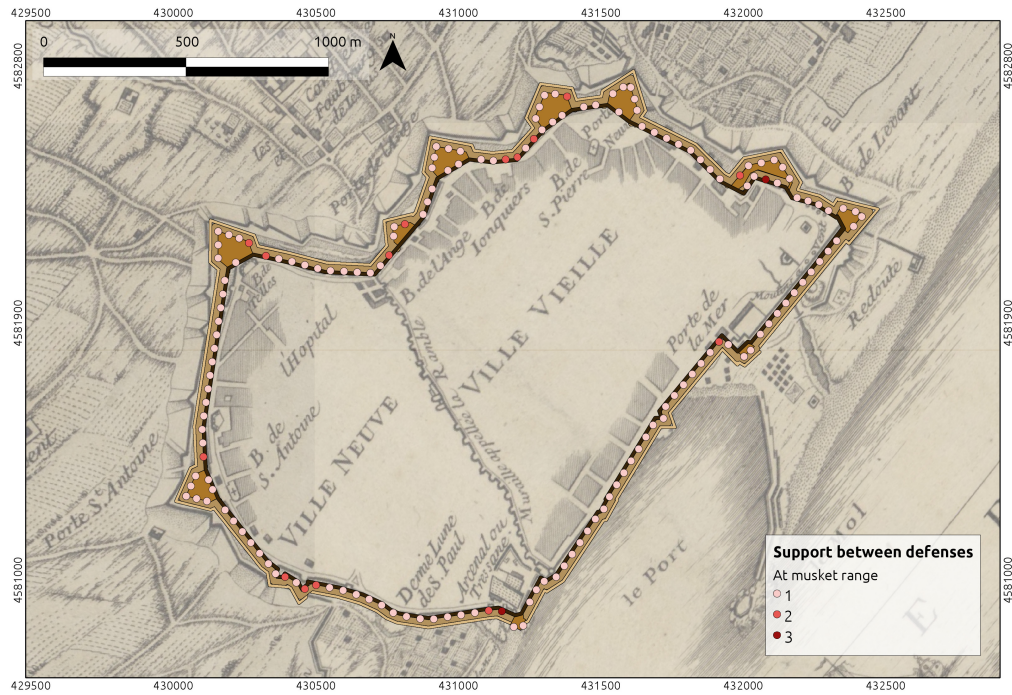


Figure 4.5: Defensive support between city defenses at musket range (80 m.), in increasing intensity from white to darker grey.

to understand the reason of this diverse set of choices, as the French army was the besieger in 3 of these 4 events.

At a first glance the study of artillery range shows that there are long curtain sectors lacking strong support (see Figure 4.4). The Castle sector seems the weakest zone, as only the areas near the bastions are well defended. However, the attacker was forced to control the castle of Montjuïc before assaulting this curtain. This is the reason why the optimal fortification of this side of the perimeter was not especially relevant, Montjuïc being the geographical key to a potential assault in this sector.

The Inland sector had 5 bastions, being the best protected area in terms of defensive support. On the other hand, the terrain in the Coast sector assured that no attacker could dig trenches or deploy batteries, as the sandy soil would easily flood. As a result, both areas were difficult to attack due to the terrain and defenses. Finally, the North sector was also well protected, even though it was the zone that the French-Spanish engineers decided to attack in 1714.

The second analysis shows that musket support is also weak in the entire perimeter (Figure 4.5). The comparison of the two results shows that the

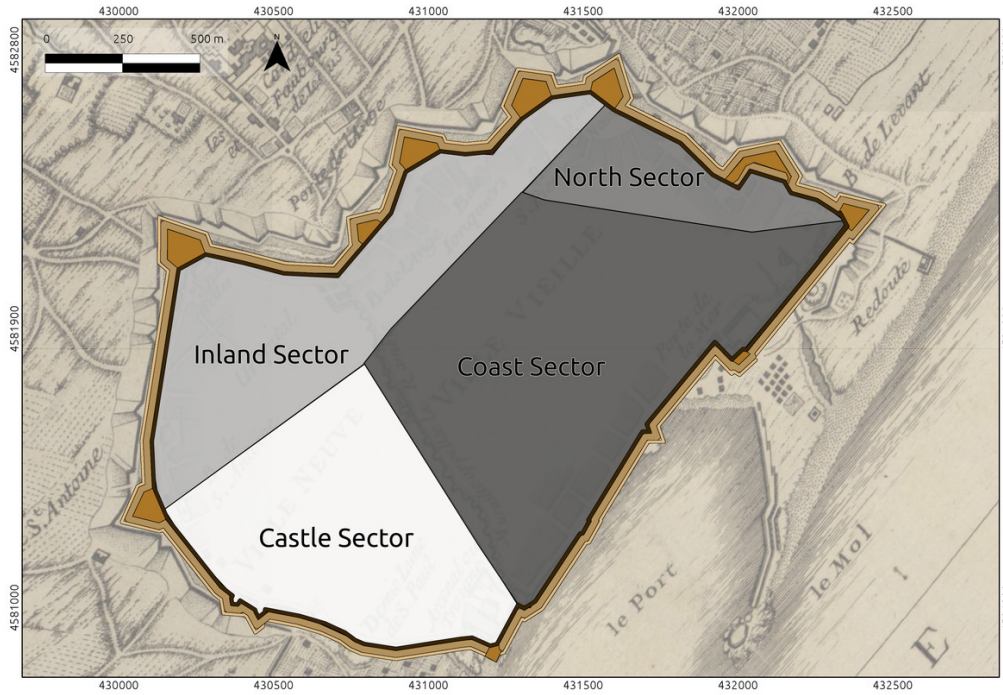


Figure 4.6: Defense perimeter split in 4 sectors. This classification is based on the descriptions of city walls written during sieges undertaken before 1714.

most relevant divergences between artillery and musket support are observed in the North sector. The left and central bastions were able to protect the curtain at artillery range, but soldiers equipped with muskets could not fire over attackers in this zone. This issue is related to the obsolescence of the city defenses, that were built during mid seventeenth century. During these years guns seemed the best option to reject the attackers; in contrast, by the end of this century engineers became aware of the extreme importance of musket fire when defending batteries were destroyed by the besiegers. Experience and technical advances forced a shift on the cultural paradigm used by engineers to choose weak defensive spots. For this reason eighteenth century guidelines suggested that the distance between bastions should not be larger than 80 meters (Duffy, 1998), while the bastions of the North sector were almost 150 meters apart.

The fact that the siege of July, 1714 was the first attempt to attack Barcelona from this sector is interesting, as previous sieges developed in Castle and Inland sectors. The experiment provides new insights into the decision of the engineers; the new plan attack was the consequence of the evolution in attack systems, which left old defenses like the ones in Barcelona

obsolete. As a result, a zone that was well protected for the military culture of 1700s was seen as vulnerable for 1714 engineers, even though no substantial changes were made nor in the attack techniques neither in the city defenses.

4.4.2 The origin of besieger's casualties

Figures 4.7, 4.8 and 4.9 shows the relation between daily casualties, siege phases and the distance from attacking activities to defenses. The information resulting from these three analysis allows for an integrated study of spatiotemporal variables.

The first figure depicts the evolution of the siege, showing how the average working distance to covered way (Y axis) decrease over time (X axis). The second figure links the casualties to the different phases of the siege. In both figures the X axis displays the temporal development of the siege from day 1 (opening of the trench) to day 49, where earthworks were finished and preparations for the final assault began. The final assault has been deliberately left out of the graphics, as the high number of casualties would distort the entire shape, and we are interested on the siege works developed before this attack. Finally the third figure combines this information, relating the casualties (Y axis) to the average distance to defenses (X axis).

The interpretation of this information allows to define four different temporal phases:

1. Creation of the three parallels, when casualties gradually increased.
2. The capture of the covered way did not generate high casualties, even though it was considered as the most dangerous action of any siege (Chandler, 1990) The reason is that the defenders abandoned the covered way because it was in very bad shape since the beginning of the siege.
3. The failed assault of 13th-15th August had a high toll for the attacking forces, concentrating most of the casualties before the final attack.
4. The attackers extended the area of siege works after the failure. The idea was to widen the attack front through the creation of additional breaches. In this way the besieger army could be able to use its numeric superiority assaulting different zones at the same time. This phase was not particularly dangerous because works developed far from the walls.

The third diagram displays an almost lineal relation between distance and casualties from 80 to 500 meters. This limit is extremely interesting, as it is precisely the interval where attackers are only exposed to artillery fire. In contrast, the introduction of effective musket range increase casualties at

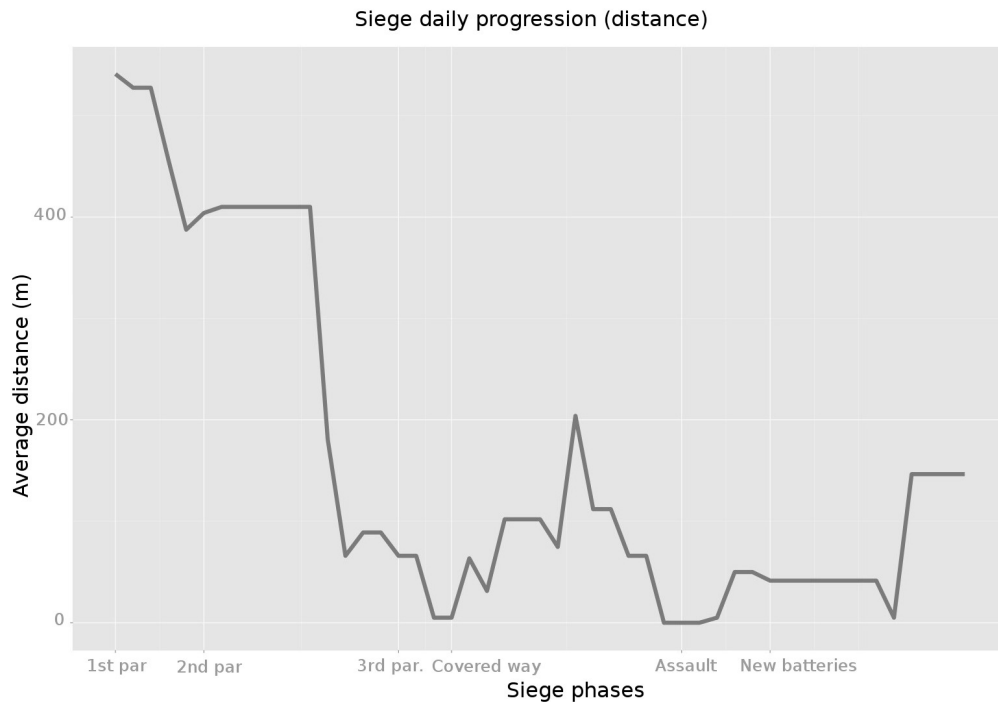


Figure 4.7: Evolution of distance to the covered way. X axis defines the temporal scale of the action, marking the beginning of the activity for the different siege works.

an exponential rate. It is also the distance where artillery gunners switched from solid ball ammunition to cannister fire, but the attacker would have destroyed any defending gun in the zone by the time they could fire this type of ammunition; this was the goal of the artillery battery placed in the 2nd parallel.

The only exception to this exponential increase is the distance where the third parallel was built (70-80 meters). This work would have provided additional protection, so it would seem that distance was not the only significant variable that can explain casualties: can the type of earth work also be important? Figure 4.10 provides additional information:

- The digging of the three parallels and zig-zag attack trenches were not phases especially dangerous for the besieging army.
- The deployment of artillery batteries had a high cost in human lives. This is especially true in the case of the batteries deployed along the third Parallel, that were inside musket range.

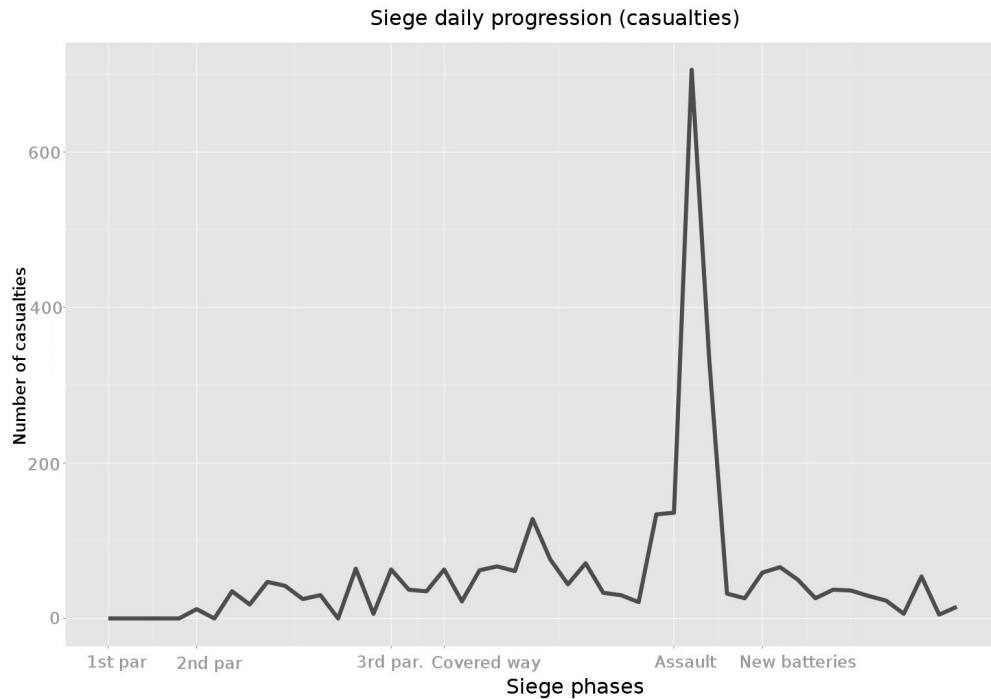


Figure 4.8: Evolution of daily casualties. X axis defines the temporal scale of the action, marking the beginning of the activity for the different siege works.

- The semi-parallel along the covered way was a dangerous area due to its closeness to the defenses.
- The rate of casualties during the construction of the communication trenches between the 2nd and 3rd parallels were extremely high.

It is surprising that the digging of attack trenches was not particularly dangerous. The reason is related to the small number of troops that were exposed to enemy fire. The works were done at night, and just a handful of soldiers were opening the zig-zag trench. Existing data cannot provide the number of soldiers involved in each activity (only the casualties), so unfortunately we cannot know the percentage of working soldiers that were killed or wounded. On the other hand, the parallels were built by a large number of soldiers during a single night, being perfected in forthcoming days, thus avoiding a high level of exposure.

The deployment of artillery batteries generated lots of casualties. This can have different reasons. First of all, the soldiers building the batteries were not inside the parallels, and could be the target of enfiladed fire from bastions.

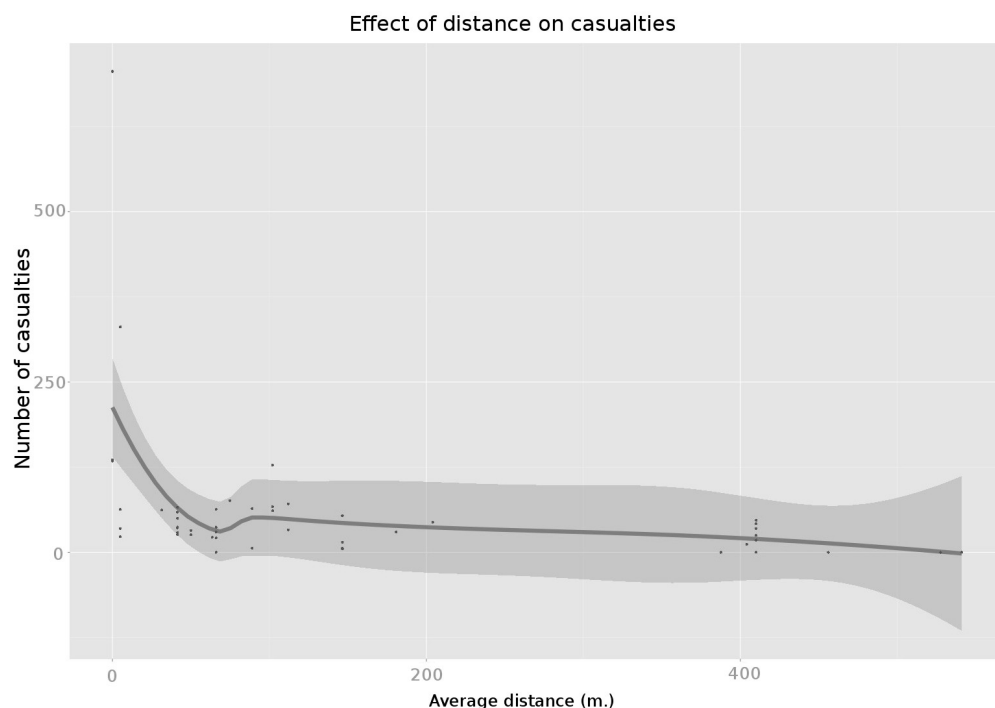


Figure 4.9: Relation between daily casualties and average distance to defenses.

Second, it is probable that the defenders concentrated the fire against the guns, as they were the only weapon capable of creating the breach: without effective artillery batteries the siege was doomed, so a significant defense effort had to be put into their destruction. This idea is reinforced by the deep impression that defending mortar fire focused on these batteries as reflected in the besieger's memory.

Finally, the latest result is counterintuitive: why communication trenches, built after the digging of the 3rd parallel, were dangerous? The most logical interpretation of these results is related to the geographical location of both works. They were located at the flanks of the entire attacking system, and for this reason the two bastions in the sector that were not being attacked could deploy an intense enfiladed fire against them. This provides new insights into the decision of the engineers to extend the trenches after the first failed assault (13/14th August). The new works tried to disable one of these bastions. It removed the threat, as the new flank ended near the coastline.

Moreover the width of the trenches had to be large (15-20 meters), in order to allow the advance of the huge cannons and the animals pulling them. This width could have allowed for effective mortar fire, as shells could



Figure 4.10: Average casualty rate for each type of siege work. The dark tone shows the average casualties for every siege work, from white (less risky) to black (most dangerous areas)

explode inside the trench and wound several soldiers at once. Finally, a large number of soldiers would have concentrated in these zones for the assaults, so intense defending fire could have been executed against this mass of attackers.

The integration of the different analysis portrays a complex scenario, where casualties are not just related to the distance to the enemy. The advantage of this quantitative analysis is that we can compare the importance of this variable to other factors, like the type of earth works undertaken by attackers. To test it a lineal regression model was explored using ANOVA (variance analysis). Results showed how a combination of both factors (distance and type of work) provides a better fit to casualties than any of them by themselves. Nevertheless, distance is by far the most significant variable to understand the development of the siege (and, as a consequence, of the attacker's decisions).

This interpretation provides a better understanding about which zones and phases were dangerous for attackers in any siege. At the same time, its discussion suggest different reasons about the divergences between theoretical guidelines, attack plans and modifications undertaken during the execution

of the works. In this sense, the results are somewhat surprising, as the works with higher rate of casualties are not the ones near the covered way, but all the tasks that were developed to support the siege.

4.5 Concluding remarks

This work shows how formal modeling integrating geoscience techniques improves our understanding of historical conflicts. The computational model created during this research combines spatial, temporal and historical factors to explore hypotheses related to the theory and practice of military activities. This is especially true during modern era, when accurate cartography began to play a crucial role in the battlefield. The integration of different data into a spatiotemporal model helps to explain why sieges deviated from theoretical guidelines. The design was constantly modified to face new issues. In particular, the failed assault in mid-August forced the duke of Berwick to rethink the plan. The engineers widened the parallels and deployed new batteries, often at a high human cost. The set of decisions that the besiegers took is an illustrative example of the adaptive process that armies of any era need to follow in order to defeat their enemies. In particular, innovation was as important as knowledge of standard practices, and the balance between both concepts was decisive for Berwick's victory.

Patterns like the ones explored, involving spatial relations, types of works, daily events and descriptions are difficult to detect due to the number of simultaneous events happening in any military action. The methodology presented in this paper is a proposal on the way formal models can help the historian on exploring these events. The use of these models, explicit by definition (Epstein, 2008) force the researcher to define concrete research questions and hypotheses, and assess their plausibility using quantitative analysis (in this case involving spatiotemporal dimensions). It is the application of this methodology to particular case studies (as the one portrayed here) which can suggest interesting links between all the parameters that were explicitly defined during the modeling step. Finally, some of these patterns are difficult to observe without this spatiotemporal framework; these are obviously the most interesting results from the analysis, as they not only affect the interpretation of a particular event but also the general understanding of historical conflict.

4.6 Acknowledgements

The model was created using Spatialite (Furieri, 2014) for bulding the database, QGIS 2014 for cartography, and R for statistical analysis 2008¹.

The authors would like to express their gratitude to all the researchers who helped us to develop this work, particularly Pau Castell, Francesc Riart, Giancarlo Boeri and all the archaeologists that provided information on the city defenses. We would also thank Douglas D. Scott and an anonymous reviewer for their helpful comments and suggestions.

XRC is part of the SimulPast Project (CSD2010-00034) funded by the CONSOLIDER-INGENIO2010 program of the Ministry of Science and Innovation – Spain.

¹The data used in this paper can be downloaded from <https://github.com/xrubio/models>.

Chapter 5

Mapping changes in late prehistoric landscapes: A case study in the Northeastern Iberian Peninsula

Aquest capítol és una transcripció exacta dels continguts del següent article (la versió original es pot veure a l'apèndix A):

Yubero-Gómez, M.; Rubio-Campillo, X.; López-Cachero, F.J.; Esteve-Gràcia, X. (2015). "Mapping changes in late prehistoric landscapes: A case study in the Northeastern Iberian Peninsula", *Journal of Anthropological Archaeology*, 40, 123-134, doi:10.1016/j.jaa.2015.07.002

Abstract The temporal span of the Late Bronze Age and the Early Iron Age (1300-550) saw the emergence of intense interconnectivity in the Mediterranean sea. The development of colonial trade dramatically increased cultural exchange along its coasts as can be observed in archaeological evidence. These large scale processes had an impact at all scales and territories close to the main trade routes. However, the process was extremely diverse in its forms.

This work presents a case study focused on two adjacent areas in the coast of the NE Iberian Peninsula. Spatial analysis has been carried out to explore the trajectories of settlement location dynamics during the whole period. Basic geographic variables, mobility and distance to trade routes have been explored to identify key differences over periods and areas. Results

indicate that the factors guiding settlements location varied between the two zones. Moreover, one of the areas was radically influenced by trade routes in the Early Iron Age while the other did not seem to be affected by this external factor. The interpretation of these analyses suggests that the rise in connectivity was not homogeneous over the Western Mediterranean, but in the regions where it took place this factor was decisive to explain their historical trajectories.

Keywords Northeastern Iberian Peninsula, Late Bronze Age, Early Iron Age, Geographic Information Systems (GIS), Natural corridors, Spatial analysis, Statistical significance testing, Settlement patterns, Mobility models

5.1 Introduction

From 1200 to 600 BC, the Mediterranean world saw a period of change, which resulted in the breakdown of Bronze Age civilizations, and the rise of Iron Age cultures in many locations. Despite the complexity of the process, the study of this crucial period covering the Late Bronze Age (LBA) and the Early Iron Age (EIA) has been traditionally focused on the Eastern Mediterranean and its grand civilizations.

The western zone did not see the emergence of cultures such as the Minoan and the Greco-Roman societies, which dominated the work of archaeologists for a long time due to its abundant material culture. However, fieldwork carried out in the last decades has extended our knowledge to include other islands and coastal areas of the Mediterranean Sea, thus balancing this view. The diversity of these studies has increased our knowledge of processes such as the ones that created the Maltese temples, nuraghi, taulas and talayots (Knapp & Blake, 2005; Lake & Ortega, 2013; Berrocal et al., 2013; Babbi et al., 2015)).

This wider perspective on the LBA-EIA Mediterranean is dominated by the concepts of mobility and connectivity. These linked processes of change were promoted by the intensive cultural and commercial interaction rising between the peoples all over the Mediterranean, from the Levant in the East, to the North African and the Iberian coasts in the West (Babbi et al., 2015, p.6).

5.1.1 Late Bronze Age and Early Iron Age in the NE Iberian coast

This is the research context of the present work. The aim of this paper is to explore and compare under to what extent variables connected to mobility and connectivity influenced settlement locations over the period LBA-EIA. To explore this question we have chosen to focus at a local scale in the North-Eastern coast of the Iberian Peninsula. Our case study includes two neighbouring areas divided by a river (Llobregat): Vallès, located at left bank, and Penedès, located at the right bank (see Figure 5.1).

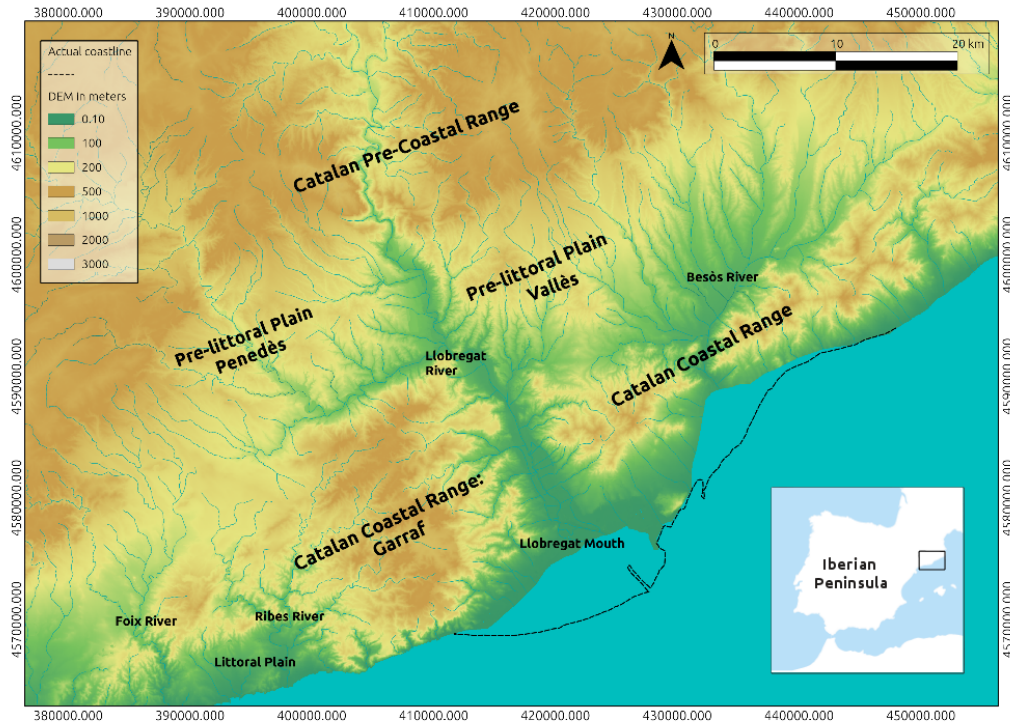


Figure 5.1: Current geographical map and features of the case study: the current Catalan coast.

The election of this area has been based on the continued and intense occupation of the territory that the archaeological evidence suggests. In addition, the archaeological record we are dealing with shows a great variety that allows us to link these settlements dynamics to the Mediterranean processes along this period.

During the Late Bronze Age (1300-750/700 BC), the material basis of these societies underwent a profound renewal. New metal typologies ap-

peared during LBA showing an increase of interregional connectivity and trade products, as certain kind of metallic items or pottery decoration (López Cachero & Rovira, 2012). The record also shows channeled pottery, which we find widely represented across the entire Northeastern Iberian Peninsula. Several new influences can be found on associated material culture, such as the first cremation necropolises by first millennium BC and the appearance of imported pottery in the Early Iron Age (750/700-550 BC). This pattern is strongly linked to the eruption of Phoenician trade near the Ebro River and the colony founded by the Phocaeans that would be known as Emporion (580 BC) (Aquilué et al., 2000; Santos Retolaza, 2003). These settlements are located south (Phoenicians) and north (Greeks) of the studied area (for a general overview see López Cachero, 2007; López-Cachero, 2011; López Cachero & Pons Brun, 2007; Sanmartí Grego et al., 2009; Asensio i Vilaró, 2005; Garcia i Rubert & Gracia Alonso, 2011; Pons Brun, 2014).

For a long period of time, the weight of historical and cultural tradition put the focus of debate on the arrival of new human groups traditionally known as Urnfields culture and on the colonial factor as the key agents behind the changes taking place. Today, however, these stances have become much more moderate. The accent is now on local dynamics and special regional features as the differentiating facts of the territory. Further theoretical insights connected to local scale societies and postcolonial archeologies have also been presented in recent works for this context (Garcia i Rubert & Gracia Alonso, 2011; López Cachero, 2007; Fatás Fernández et al., 2012).

Previous works on the examined areas identified a general path of cultural continuity. This is particularly evident for the period between approximately 1800 BCE and the end of the LBA in the two largest excavated sites in these areas: Mas d'en Boixos located in the right bank and Can Roqueta located in the left bank (Bouso García et al., 2004). The only exception is the Penedès (right bank area) precoastal lowlands, where there are only a few documented sites from the Late Bronze Age onwards. This scarcity has been analyzed before, and other authors have noted that it cannot be attributed to a lack of research in the area (Mestres, 2008). The alternate hypothesis is that occupation of certain caves and the use of high-elevation pastures provided an alternative to the low-level agricultural exploitation of the most fertile plains which did not developed here except for some coastal regions. The EIA would present a shift between these subsistence strategies, as can be seen from the evidence of numerous storage pits documented from that time. Evidences suggest a complementary exploitation model that took extensive advantage of lands more favorable for agriculture, with the possible rapid planting of grapevines (López, 2004). These activities would be complemented by herding, as shown by the appearance of walled enclosures (pens) at higher alti-

tudes of the landscape such as Serra de la Font del Cuscó (Cebrià i Escuer et al., 2003) or Sant Miquel d'Olèrdola (Mestres et al., 2009). Coincidentally some of these sites such as Turó Font de la Canya (Asensio i Vilaró et al., 2005), Font del Cuscó (Cebrià i Escuer et al., 2003) and Olèrdola (Mestres et al., 2009) among others, have yielded evidence for intensive trade in the form of Phoenician amphorae and other containers. “Phoenician” pottery imitations, metal items such as sympula and iron spits also link this shift to Mediterranean influences (Asensio i Vilaró et al., 2005).

From the beginning of the sixth century BC evidence suggests a new major shift in the right bank area. We find the pens disappearing and new coastal enclaves being established, such as the citadel at Alorda Park. However, this transition to the Iberian world has not yet been fully and satisfactorily explained (Asensio et al., 2006).

The scenario described above contrasts with the dynamic described for the Vallès located in the left bank area. Thanks to data from sites such as Can Roqueta (Carlús i Martín, López Cachero, Terrats Jiménez, et al., 2007), we know that LBA settlements were mainly located on the plain or on the rolling hills near the floodplains of the Besòs river. They followed a pattern of small semi-excavated farmhouses or huts built from wood and mud and scattered among the fields of crops. These farms were located very close to storage pits and at a certain distance from the cremation necropolises that functioned as the true centers around the landscape seems to have been organized (Carlús i Martín, López Cachero, Terrats Jiménez, et al., 2007). The special features of this archaeological context, which is characterized by negative structures and often affected by strong erosive processes as a consequence of agricultural work over the centuries (Terrats Jiménez, 2010, 141-155), make it very difficult to determine the existence of denser clusters of huts in the form of small villages. Regarding the EIA sites in the area, some Phoenician items such as amphorae, vessels and hand made pottery “imitating” Phoenician shapes and askos has been found in the necropolis as well as in some of the “houses” (Carlús i Martín, López Cachero, Terrats Jiménez, et al., 2007). However, the number of sites with this type of materials is lower than in the Penedès region (Yubero Gómez et al., 2014).

This model remained constant in the left bank area until the end of the sixth century BC, when widespread settlements in elevation using stone appeared across the coastal and precoastal mountain ranges. At the same time, abandonment of cremation necropolises suggests a profound restructuring of settlement that should be linked to the formation of the Iberian world (López Cachero & Rovira, 2012).

5.1.2 Mesoscalar analysis of settlement location

It is clear that these dynamics conform a complex and heterogeneous situation with several research challenges. This work focuses on understanding change in settlement patterns during the transition from the LBA to the EIA based on two main questions:

1. *Do site location preferences depend on the chronology?* Our hypothesis is that the relevance of different geographical factors was not constant over time. If there were differences in the patterns of each period we should detect them by means of spatial analysis.
2. *Were communication networks affected by external influences?* The theoretical rise in exogenous contacts from the LBA to the EIA should be reflected in the site distribution over communication networks.

The area of study has been extensively excavated during the last quarter of the XXth century due to urban development (Petit i Mendizábal, 1986; Bouso García et al., 2004; Carlús i Martín, López Cachero, Oliva, et al., 2007; Yubero Gómez & Rubio Campillo, 2010; Yubero Gómez et al., 2014; Yubero-Gómez, Rubio-Campillo, & López-Cachero, 2015; Mestres & Esteve Gràcia, 2015). This situation has generated a large body of data which need to be integrated before any analysis can be undertaken. This is the reason why we have chosen a Geographic Information System (GIS) as a working framework. In addition to showing geographical information, GIS is also a highly flexible tool for integrating data from different sources and in different formats. This greatly facilitates the task of comparing and analyzing heterogeneous data and extracting knowledge from them. In addition, GIS can be used for more than a descriptive definition of the case study.

This paper presents a mesoscalar study of the Catalan central coast to explore changes in settlement location patterns during the period LBA-EIA. Next section describes the data used to build a geographical model of the area. The third section defines the various methods of spatial and statistical analysis applied to the dataset. Next, we discuss results comparing the patterns generated by the LBA and the EIA communities and assessing the impact of Phoenician colonizing agents. We conclude discussing the implications of our results in the general context of this transition.

5.2 The case study

The dataset of the analysis has been created from two components: a) geographical features relevant to settlement dynamics and b) archaeological

information.

First, the study area presents several biogeographical units with their own characteristics. From the coast inland, we find coastal plains (currently massively modified by substantial urban development), the coastal mountain range (parallel to the coast, highly compartmentalized by rivers and a small number of peaks at 500-700 m.) the precoastal depression (a natural open route that runs approximately 200 km from northeast to southwest), and lastly, the precoastal mountain range (where the headwaters of the main rivers emerge from peaks exceeding 1700 m above sea level).

We used a 15m. x 15m. Digital Elevation Model of the area where some features were corrected. In particular, the current coastline is significantly different from the one present during the chronologies under study. Broadly speaking, the coastal plain appears to have smaller than the present area, and it contained areas of marshland, particularly in the plains of the Llobregat river. Previous works in the Llobregat delta (Gámez Torrent, 2007) have been used to recreate the coastline.

Second, the archaeological interventions carried out in the past decades have been used to create a spatial database which can be seen in Figure 5.2.

The dataset has one challenge that needs to be considered; the archaeological context documented is negative in the vast majority of cases. The lack of positive structures inhibits the formation of a stratigraphy that would certainly be helpful in capturing the dynamics of construction, use and abandonment of the documented structures, as well as their diachronic or synchronic interrelationship in the space. It is not possible to go beyond the establishment of approximate chronologies, as we are unable to determine whether all of the structures belonging to a period are the result of a narrow temporal span or, conversely, the result of continuous settlement of a single space over two, three, four or more centuries. As a consequence, we need to treat all the sites of one period as part of the same group, while keeping in mind this aggregation in the interpretation; it is not the same to consider 200 storage pits belonging to the same moment as 200 storage pits over the course of 300 years.

The created spatial database integrates information from the set of settlements, combining geographical features with additional data such as chronologies, the typologies of structures and the current state of the site. As for the dataset studied, the working sample contains 87 sites for the LBA and 67 for the EIA. The sites include dwellings, storage structures, necropolises and occupied caves. From a spatial perspective, we have divided each chronology into two sub-datasets according to whether the sites are located on the right or left bank of the Llobregat (see Figure 5.3). Traditionally, this division has been used by most authors when dealing with the archaeological

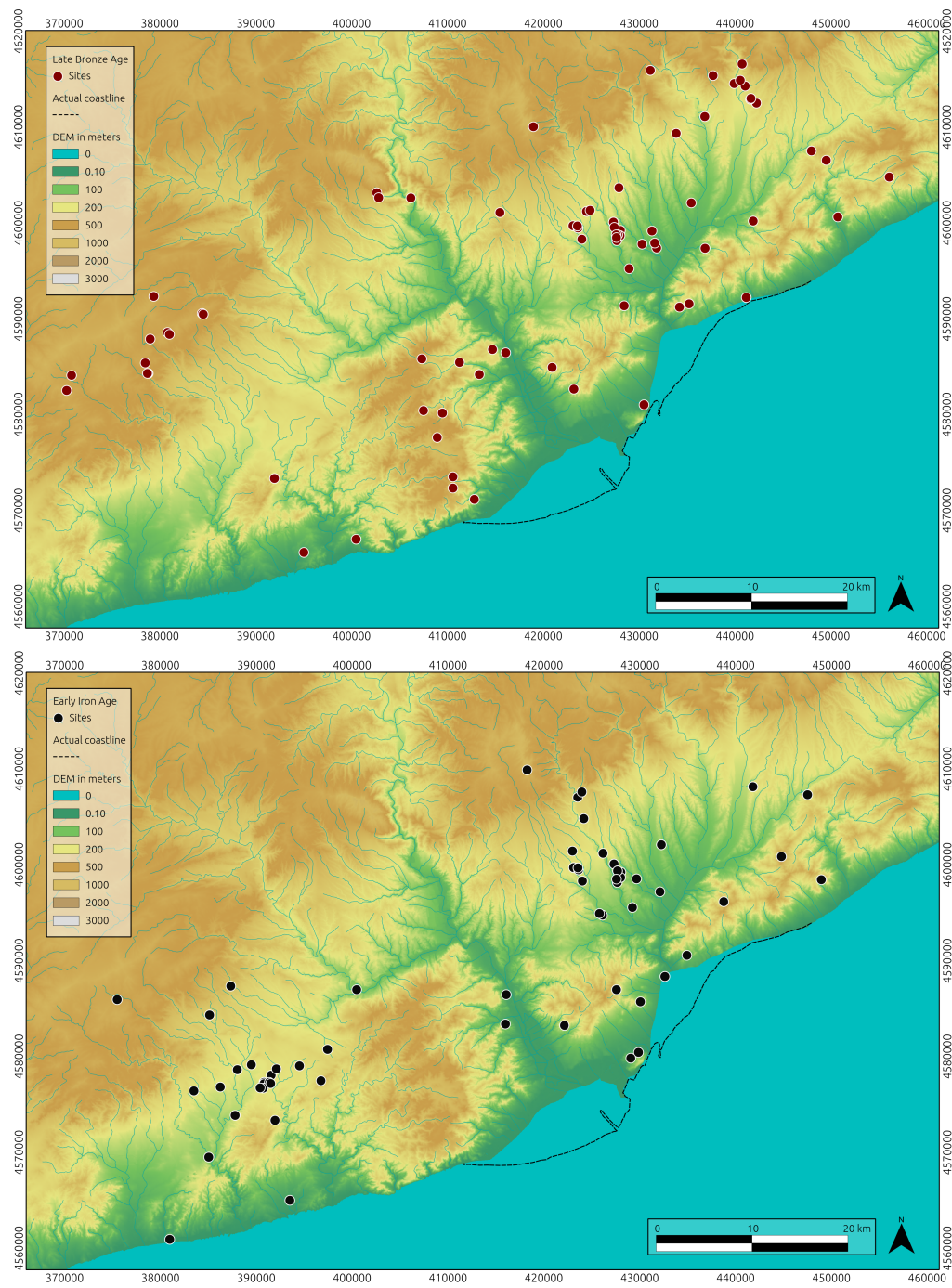


Figure 5.2: Distribution of sites by period: top) LBA and down) EIA.

data (Esteve, 2006; Asensio et al., 2006; López Cachero, 2007, 2012) because

the archaeological record on both banks seem to show significant differences as we mentioned in section 5.1.

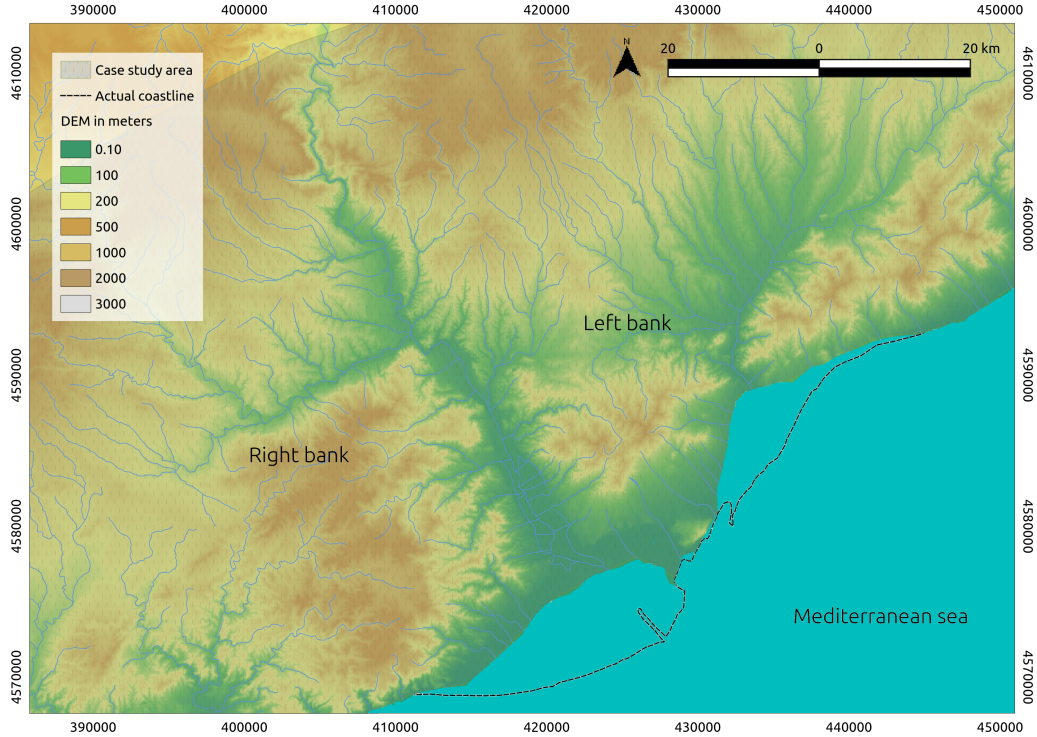


Figure 5.3: The Besòs river has been traditionally identified as a boundary between areas with different dynamics. We have chosen these areas (left and right bank) as our spatial units of analysis.

5.3 Methodology

We have designed a set of spatial analyses to answer our two research questions with this dataset, including a) basic spatial variables (height, slope and aspect), b) visibility and accessibility and c) distance to natural corridors. Exploratory Data Analysis has been performed for each of the six variables in the form of empirical density estimates for the two periods (the LBA and the EIA) and both areas (left and right bank). These density functions measure the probability of finding a site for a given value of the analyzed parameter. This approach is useful to perform cross-comparison analysis of different datasets. To achieve this second step, we have performed Kolmogorov-Smirnov tests (KS tests) between the four datasets (the

LBA left bank, the LBA right bank, the EIA left bank and the EIA right bank). This non-parametric test evaluates the probability that two given empirical distributions were generated by the same process. If the computed p-value is smaller than a threshold level (in our case $p < 0.05$) the samples were generated from different distributions, thus identifying significant differences between the compared datasets with a confidence interval of 95%.

First, we characterized the first-order spatial variation to identify diachronic and synchronic changes over the two periods. We studied the location of the sites within their surroundings, while calculating their geographical attributes, taking account of their altitude (in metres) and their aspect and slope (both in degrees).

Second, visibility (Llobera et al., 2011; Gillings & Wheatley, 2001; Lake & Ortega, 2013; Eve & Crema, 2014) and accessibility (Llobera et al., 2011; Llobera, 2000, 2001; De Reu et al., 2011) provided new information on the changes in settlement patterns and their relationships (corresponding to second-order spatial variations). For each site, the observed area has been calculated within a radius of 10 km (see Figure 5.4).

Third, accessibility enables us to quantify the favourable potential of a specific point in relation to the surrounding landscape. This concept can be modelled in several ways, with accessibility analysed as a function of distance, territorial compactness, energy consumption or time (Conolly & Lake 2006, 234; Llobera et al. 2011). We have used the method applied in archaeology by Marcos Llobera (2000; 2011), see Figure 5.5. The accessibility value for the sites has been calculated based on the topographical cost of gaining access to each site from its surrounding area. The procedure involved the generation of a regular 25-point grid to cover the area surrounding each site to a radius of 1000 m. After this operation, the least-cost path was traced from each point of the grid to each of the sites. Then, we calculated the average accumulated cost of all the paths to each site, finally inverting the value to have large values for high accessibility.

To identify natural corridors related to human mobility and trade routes (Bevan & Wilson, 2013; Murrieta-Flores, 2012) we defined a perimeter of points distributed every 10 km. They were located at 25 km from the study area to avoid any border effect. Then, we calculated the least-cost paths from each point on the perimeter to all the other points while quantifying how many of the routes passed through each cell of the original raster map. The most dense areas (i.e. first quantile) define the natural corridors, according to the geography of the area. By computing the distance from each site to these natural corridors we can get a summary statistic of the relevance of strategic route networks as a factor to explain site location (see an example of this analysis in Figure 5.6).

A follow-up question to the results is to examine what properties differentiate the sites of both banks for a given period. Understanding these differences would allow us to better identify what type of settlement properties characterize each area under study. This final topic was examined with a multivariate analysis of the factors defining the sites of each temporal span. It was independently applied to the sites of the LBA and the EIA. For each period we performed an analysis of variance (ANOVA) using a logistic multivariate regression model. The dependent variable was defined as the bank of the river (right or bank), while the independent variables were the 6 factors collected for each site (height, slope, aspect, visibility, accessibility and distance to natural routes) .

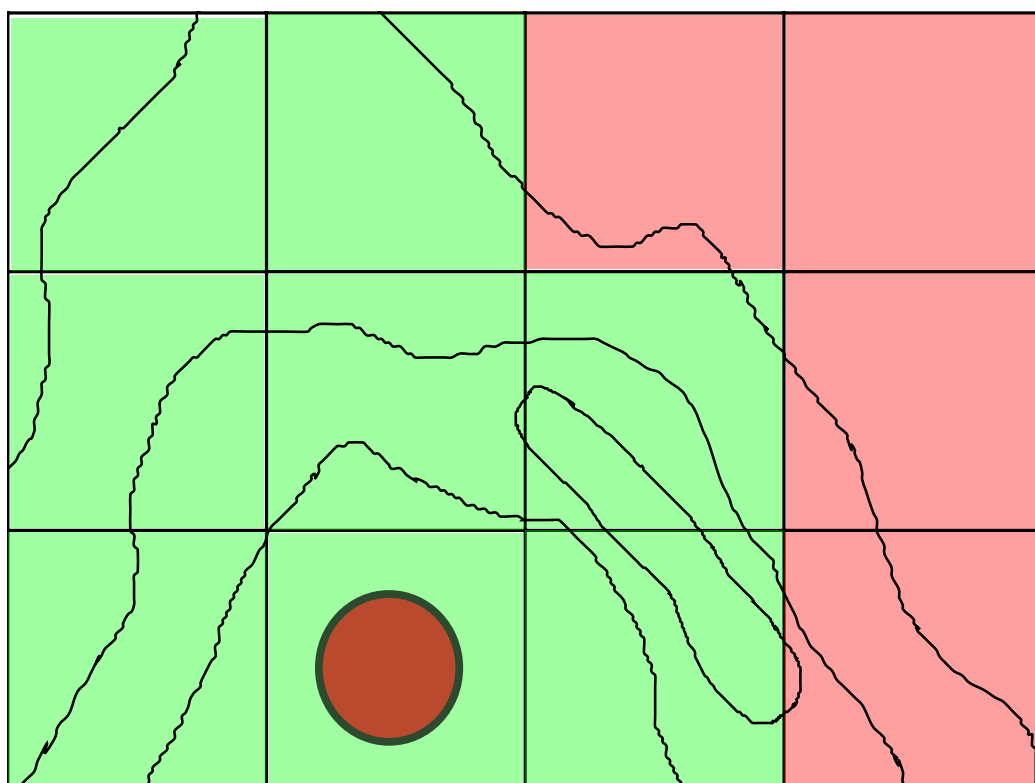


Figure 5.4: Example of the visibility algorithm. For each site the total amount of visible area (green color-coded) up to 10 km. is quantified.

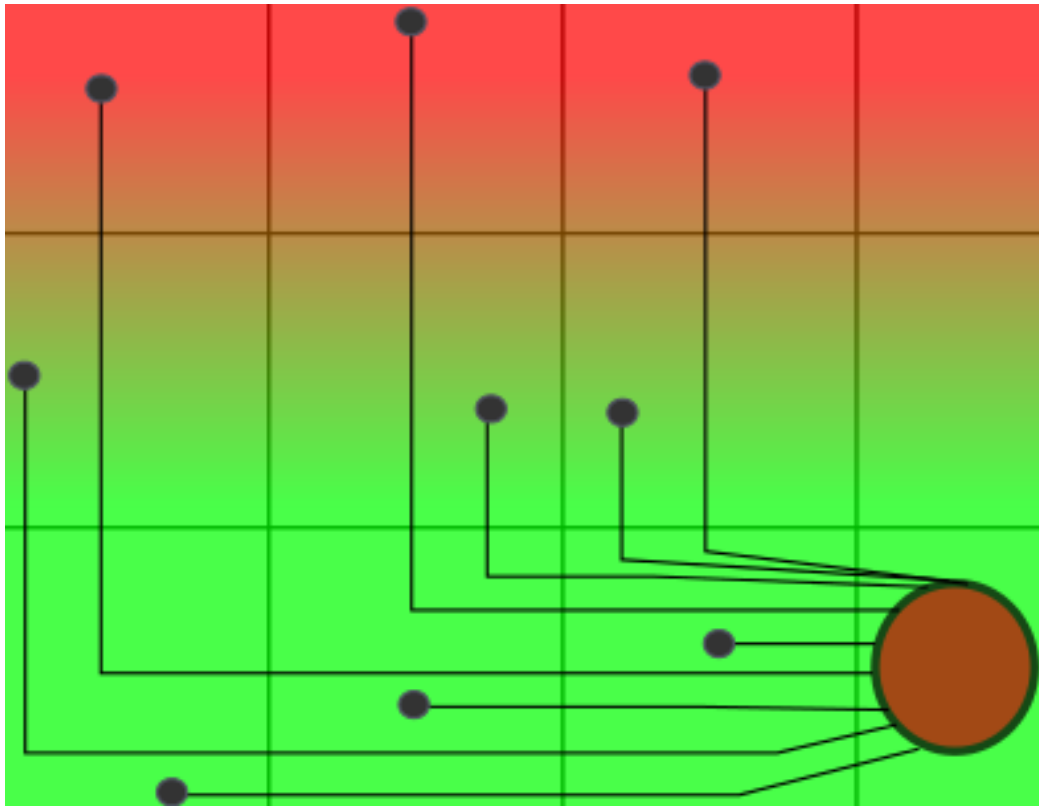


Figure 5.5: Example of the accessibility analysis. The least-cost path of each cell within a 1km radius to the site is computed. It is based on the slope cost of the cells (red to green gradient). A final value for site is quantified averaging the cost in accumulated degrees of slope.

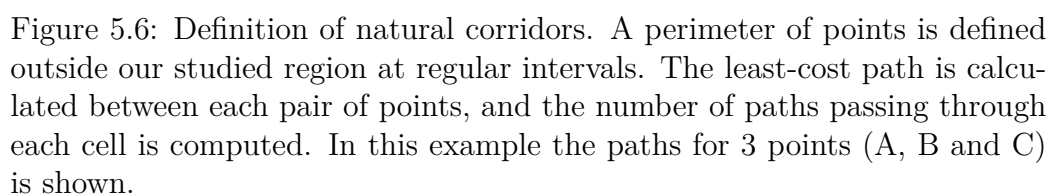
5.4 Results

5.4.1 Geographical variables

First, our study of the basic geographical variables (altitude, aspect and slope) clearly indicate differentiated settlement dynamics within LBA. In this respect, Figure 5.7 shows the density estimates of altitude based on the settlements of the different periods and territories.

At first glance, we can see how the distribution on the left bank of the Llobregat is quite continuous except for the creation of some highly elevated sites during the EIA. By contrast, the typology of settlements on the right bank changes radically, shifting from elevated settlements to a distribution that is similar to the distribution observed on the left bank in the EIA.

This tendency is confirmed if we examine the slope values (see Figure 5.8),



because the probability of finding sites in low-slope areas on the right bank of the Llobregat in the LBA is quite low. In any event, it suggests a tendency similar to the evaluation of altitudes: while the LBA sees very high values (related to the situation of the caves), in the EIA the values level out because of the creation of settlements in low-lying areas. On the left bank, by contrast, the distribution of probabilities is quite homogeneous in both

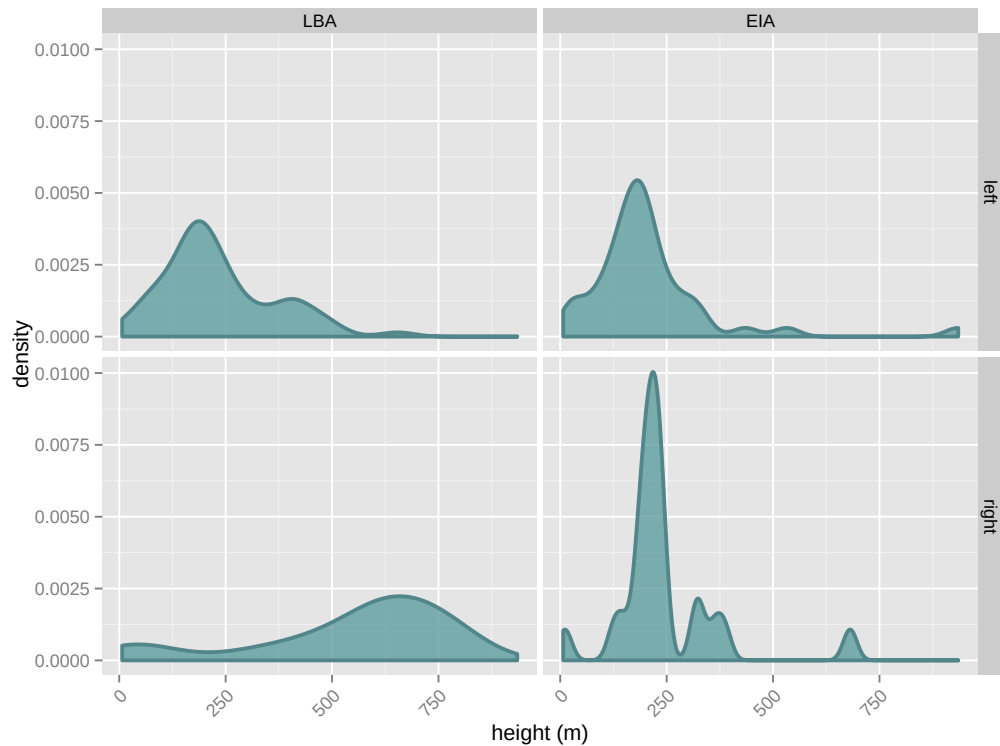


Figure 5.7: Density estimates of settlement altitude for the various combinations of areas and chronologies.

periods even if the presence of sites in low slope slightly increases over time.

Tables 5.1 and 5.2 shows the significance levels of the pairwise KS tests. They confirm the previous results, as in both factors the right bank sees a higher level of change while the EIA periods are more homogeneous than the LBA.

Our examination of aspect (Figure 5.9) provides no additional information as the distribution is almost homogeneous over the 4 datasets. The only relevant pattern is the situation of the settlements on the left bank toward the south-southwest (200-270 degrees). This tendency is intriguing, as it may be related to solar exposure (Lapen & Martz 1993; Church et al. 2000, 153; Esteve Gràcia 2004, 10) or the direction of river courses. However, Table 5.3 shows that the difference is not significant.

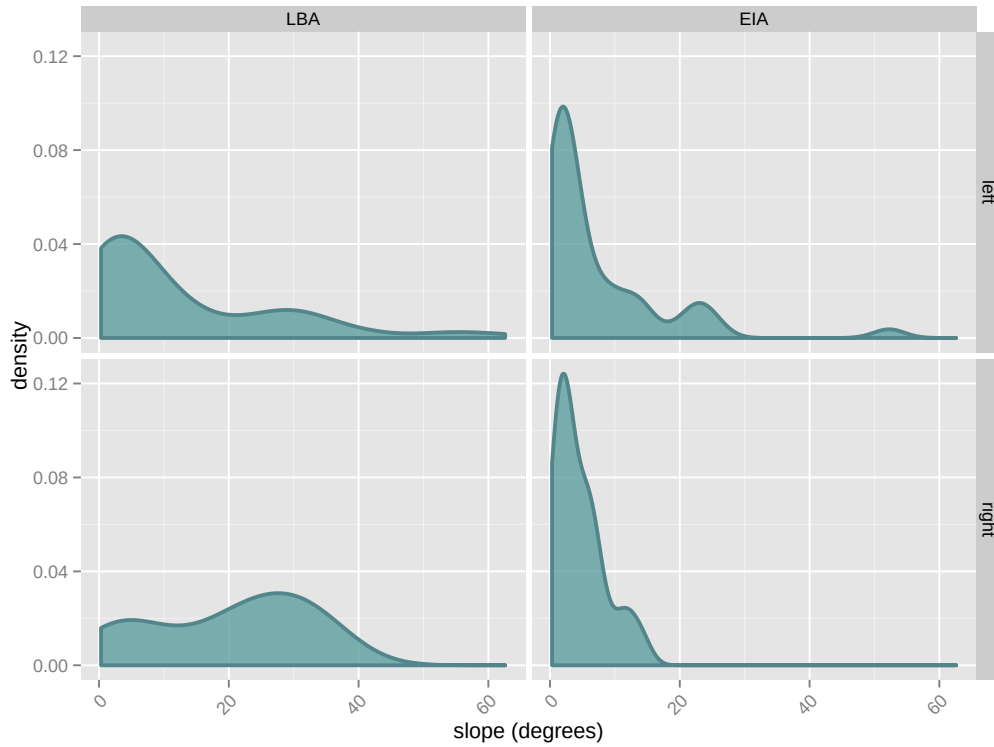


Figure 5.8: Density estimates of settlement slope (measured in degrees).

5.4.2 Visibility analysis and accessibility

Accessibility and visibility indices helps us to assess other differences among the studied territories. First, visibility does not seem specially relevant for the LBA sites (see Figure 5.10) while it gains importance in the EIA. There are some exceptions, notably Olèrdola, a site located in a strategic enclave with visual control over the surrounding territory. The patterns is quite similar across both banks, with an increase in visibility from the LBA to the EIA. Table 5.4 confirms that there is a major shift in the relevance of visibility for site location during the change from the LBA to the EIA.

Second, it can be observed that accessibility is similarly shaped for the four datasets, even if the right bank sees a higher peak around the value of 170 (see Figure 5.11). However, the KS tests (see Table 5.5) suggest that the distributions are almost identical for each bank over the two periods, thus portraying non significant changes from the LBA to the EIA.

	LBA-left	LBA-right	EIA-left	EIA-right
LBA-left	1.000			
LBA-right	<0.001	1.000		
EIA-left	0.457	<0.001	1.000	
EIA-right	0.163	<0.001	0.024	1.000

Table 5.1: Pairwise KS tests for height. Blue values are significant with p-value<0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process

	LBA-left	LBA-right	EIA-left	EIA-right
LBA-left	1.000			
LBA-right	0.026	1.000		
EIA-left	0.231	0.003	1.000	
EIA-right	0.089	<0.001	0.703	1.000

Table 5.2: Pairwise KS tests for slope. Blue values are significant with p-value<0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.

5.4.3 Natural corridors

Figure 5.12 portrays the computed network of natural corridors. The density estimates (Figure 5.13) suggest that a close distance to these strategic routes was not a significant factor in settlement dynamics in the Llobregat left bank for both chronologies. This is an interesting result, specially compared to the basic geographic factors (i.e. altitude and slope). As a consequence, local features seem much more important than geographically broader contexts. In fact, the supposedly relevant impact of the Phoenician arrival during the EIA is not confirmed by these results. Otherwise, we would see a rise in the number of settlements located on the natural corridors over which trade unfolded.

Studying this relationship by chronology and area enables us to see the extent to which this variable is similar for the archaeological contexts of the LBA and the EIA (see Table 5.6).

The KS test shows how the left bank of the Llobregat did not see a clear pattern of change. The only exception is a number of sites at very large distances during the LBA, which stems from the limited percentage of land with these characteristics. In the right sector, by contrast, a substantial change can be perceived between the two chronological periods, with the

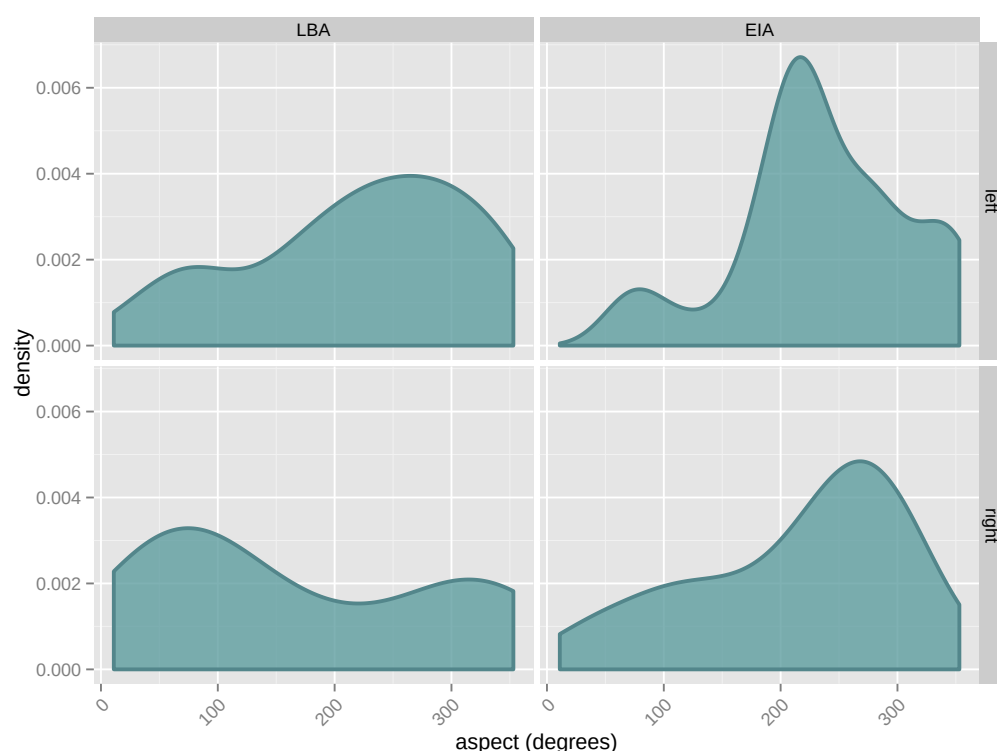


Figure 5.9: Density estimates of settlement aspect (measured in degrees).

largest probability of finding a site at 7000-8000 m of a corridor diminishing to 1000-2000 m during the EIA. Therefore, we can say that the distance from a natural corridor is highly important in the right sector of the Llobregat, but that it is not an essential factor in the left sector. In the latter case, the occupations continuing from the LBA to the EIA that are documented in quite a few of the sites may have had a decisive impact on this factor.

5.4.4 Multivariate analysis

Results of the ANOVA analysis show that accessibility and height are the most important parameters that distinguish the properties of sites on the right and left bank during the LBA (c.f. Table 5.7).

These results suggest that settlements at the right bank of the river were preoccupied by the defensive value of the region where they were located. This would explain why elevated, difficult to reach zones were predominant here in contrast with the left bank. The same method was applied to the EIA sites, with significant different results (see Table 5.8).

	LBA-left	LBA-right	EIA-left	EIA-right
LBA-left	1.000			
LBA-right	0.079	1.000		
EIA-left	0.331	0.009	1.000	
EIA-right	0.497	0.105	0.621	1.000

Table 5.3: Pairwise KS tests for aspect. Blue values are significant with $p\text{-value} < 0.05$ implying that the compared distributions were not generated by the same process.

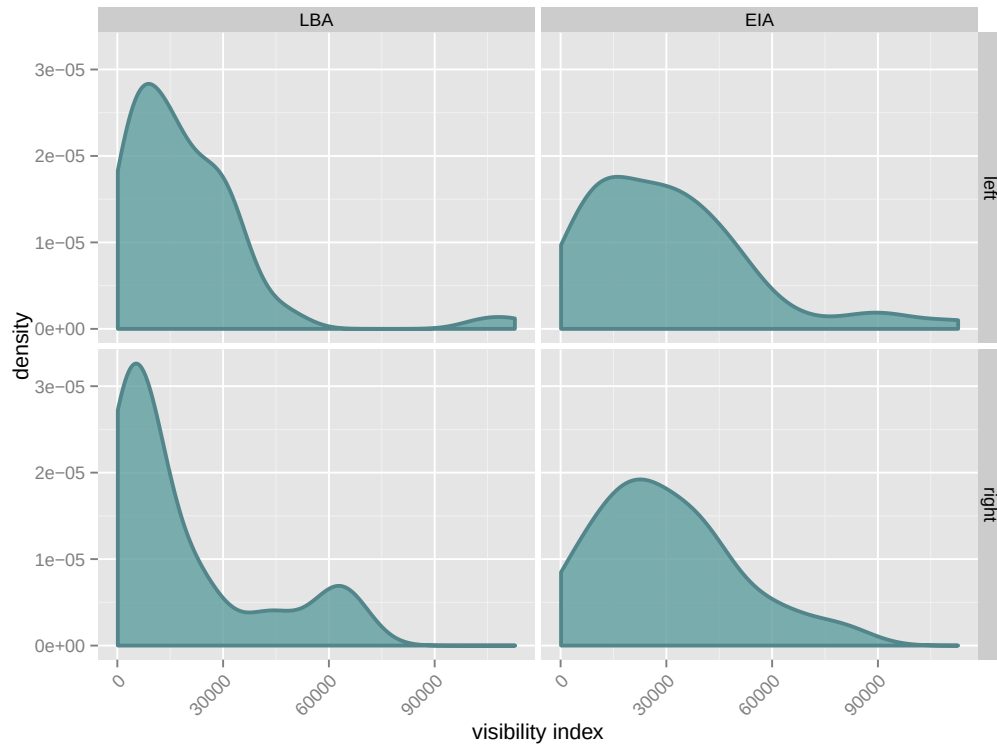


Figure 5.10: Density estimates of settlement visibility.

Distance to natural routes is by far the most important factor that difference both banks, followed by slope and accessibility. This result confirms the trend that was already seen in previous figures, as the relevance of natural corridors is much more relevant in the right than in the left bank.

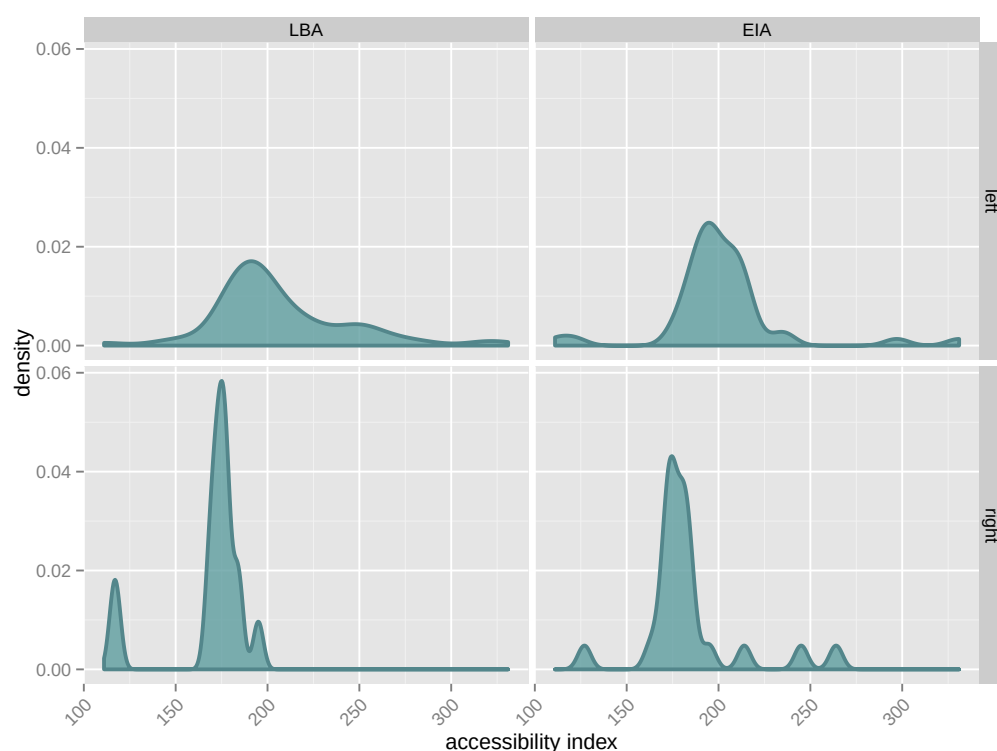


Figure 5.11: Density estimates of settlement accessibility.

5.5 Discussion

The aggregation of these results depicts a radical shift of dynamics over the LBA to the EIA in the right bank, while the left bank portrays less evidence of change. Distance to natural corridors is the determinant factor to explain these dynamics: during the LBA the sites were located at large distances from travel routes. The situation changed in the EIA: a majority of settlements were located on a natural corridor in the right back area. This enables us to confirm the shift in the tendency that occurred in this territory and may indicate a settlement model closely bound up with commercial exchanges during the EIA. However, we continue to find a portion of the population that appears to have avoided these routes, remaining instead in easily defensible, but isolated locations.

Other authors have also documented a search for soil with greater agricultural potential during the EIA (Asensio i Vilaró et al., 2005) in the right bank area. This tendency is confirmed by the appearance of arrays of storage pits with occasional associated huts (e.g., Mas d'en Boixos (Bouso et

	LBA-left	LBA-right	EIA-left	EIA-right
LBA-left	1.000			
LBA-right	0.232	1.000		
EIA-left	0.026	0.023	1.000	
EIA-right	0.071	0.024	0.930	1.000

Table 5.4: Pairwise KS tests for visibility. Blue values are significant with $p\text{-value} < 0.05$ implying that the compared distributions were not generated by the same process.

	LBA-left	LBA-right	EIA-left	EIA-right
LBA-left	1.000			
LBA-right	<0.001	1.000		
EIA-left	0.321	<0.001	1.000	
EIA-right	<0.001	0.483	<0.001	1.000

Table 5.5: Pairwise KS tests for accessibility. Blue values are significant with $p\text{-value} < 0.05$ implying that the compared distributions were not generated by the same process.

alii, L'Hort d'en Grimau (Esteve Gràcia, 2004) and el Turó de la Font de la Canya (López, 2004). These sites have been interpreted as surplus accumulation centers (Asensio i Vilaró et al., 2005) which would present a new scenario of genuine agricultural colonization. The number of storage pits and their enormous capacities suggest a significant change in the economic dynamics of resource exploitation in the area, which would from this point onward promote surplus grain production intended for trade.

This change, however, did not involve the abandonment of the higher-elevation, high-slope settlements. In this respect, what is detected is the occupation of various strategic points in the landscape, which have a high degree of visibility in relation to the surrounding landscape. Good examples are provided by the sites of Olèrdola and la Font del Cuscó, which feature the main element of a pen or wall built of stone enclosing a sizable area (Cebrià i Escuer et al., 2003; Mestres et al., 2009). Few dwellings associated with these pens have been discovered, but everything seems to indicate that there were no more than a few slightly built huts, a fact that stands in stark contrast to the significant size of the occupied areas and the magnitude of the encircling walls. This has led some authors (Cebrià i Escuer et al., 2003; Asensio et al., 2006) to maintain that the final function of these settlements may

	LBA-left	LBA-right	EIA-left	EIA-right
LBA-left	1.000			
LBA-right	0.486	1.000		
EIA-left	0.119	0.869	1.000	
EIA-right	0.008	0.004	<0.001	1.000

Table 5.6: Pairwise KS tests for distance to natural corridors. Blue values are significant with $p\text{-value} < 0.05$ implying that the compared distributions were not generated by the same process.

Variable	Pr
Height	0.011
Slope	0.084
Aspect	0.998
Visibility	0.401
Accessibility	0.013
Distance	0.751

Table 5.7: ANOVA test for a logistic multivariate regression model for bank location of the LBA sites. Height and accessibility are the most important factors to explain the differences between the river bank where sites are located

have been linked to a communal use of the space, more specifically to the amassing and management of livestock, and to signal wealth. Paradoxically, the occupation of caves, which was so common in the prior period, now ceases to be important after this shift. This site specialization is also confirmed by the diversity of visibility indices during the EIA.

On the left bank of the Llobregat we do not observe this shift. Particularly interesting is the lack of relevance of the distance to natural corridors, considering the presence of Phoenician materials and metallic objects. Despite this moderate evidence, objects are similar to materials found in close zones where trade was much more intense (e.g. the Empordà and south-eastern France, López Cachero & Rovira 2012). Nonetheless, the situation is not static as there are some changes in the settlement location dynamics. There seems to be a higher interest on plains which could be related to more intensive agricultural practices (confirmed by a greater number of excavated storage pits).

The aggregation of these results suggest that there were relevant differ-

Variable	Pr
Height	0.008
Slope	0.183
Aspect	0.973
Visibility	0.834
Accessibility	0.006
Distance	<0.001

Table 5.8: ANOVA test for a logistic multivariate regression model for bank location of the EIA sites. Distance, accessibility and height are the significant variables that explain the differences between the river bank where sites are located.

ences between the studied areas and periods. Of particular interest is the sharp distinction between the territories regarding the LBA, which we have been able to interpret correctly in relation to the materials and types of structures documented in the excavations.

To conclude, the interpretation of these results suggest that natural corridors play a key role to better understand settlement dynamics during the LBA and the EIA. However, both areas present a different evolution. While left bank sites seem to follow a similar dynamic during the LBA and the EIA, dynamics in the opposite bank present a very different panorama. The right bank of the river saw during the EIA a transformation of the landscape that could be related to a more strategic view of the territory. The shift that we can observe in the location of sites during the EIA was intended to establish the sites close to natural travel routes and to achieve better control over the territory. This changed coincided with an increase in commercial activity as a result of the integration of the Northeastern Iberian Peninsula in Mediterranean-wide trading networks.

Even at this local scale spatial analysis was able to identify sensible differences between neighboring territories. This diversity of dynamics perfectly illustrates the complexity of processes that affected the Mediterranean Sea over these two periods.

5.6 Acknowledgments

We would like to thank the two anonymous reviewers for their helpful comments and suggestions. The spatial analysis was performed using Quantum GIS 1.8 and GRASS 6.4.3. The geostatistical analyses have been carried

out with the R 2.15.2 statistical system, specifically the spatstat package (R Development Core Team, 2008). The code was developed in Python language executing GRASS GIS, and it is published under a General Public License https://github.com/xrubio/models/tree/master/changesLBA_EIA

MYG and JLC are part of the consolidated research group Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques (2014SGR-108). MYG was funded by AGAUR (PhD grant 2010FI_B 00641). XRC is funded by the SimulPast project CSD2010-00034 under the CONSOLIDER-INGENIO2010 program of the Spanish Ministry of Science and Innovation. FJLC is funded by the project HAR2013-48010-P of the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness.

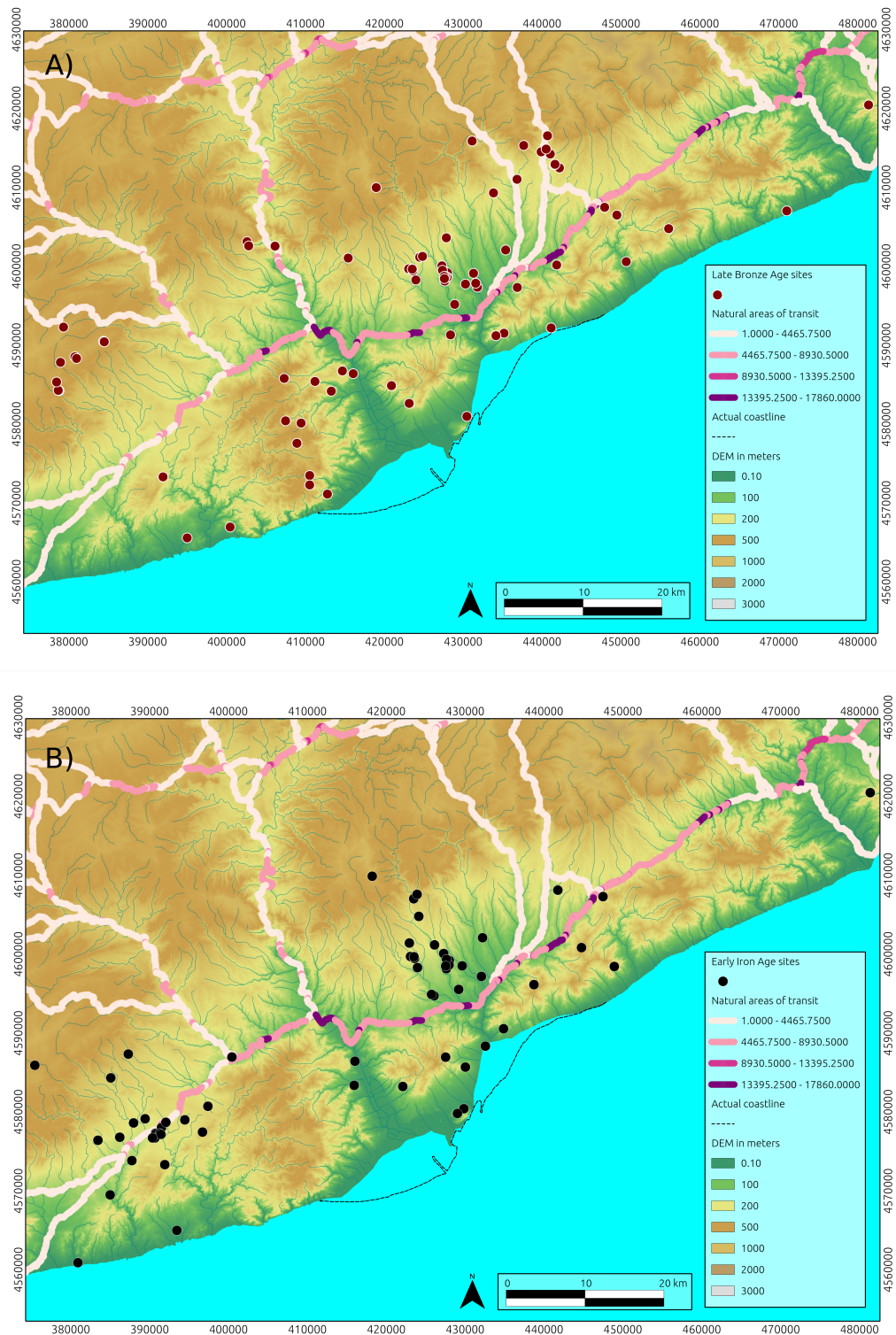


Figure 5.12: Natural corridors in relation to the sites for a) the LBA and b) the EIA. The analysis makes use of all least-cost routes from each point on the perimeter to all other points, with the colour of each segment of the network identifying the number of routes that pass through it.

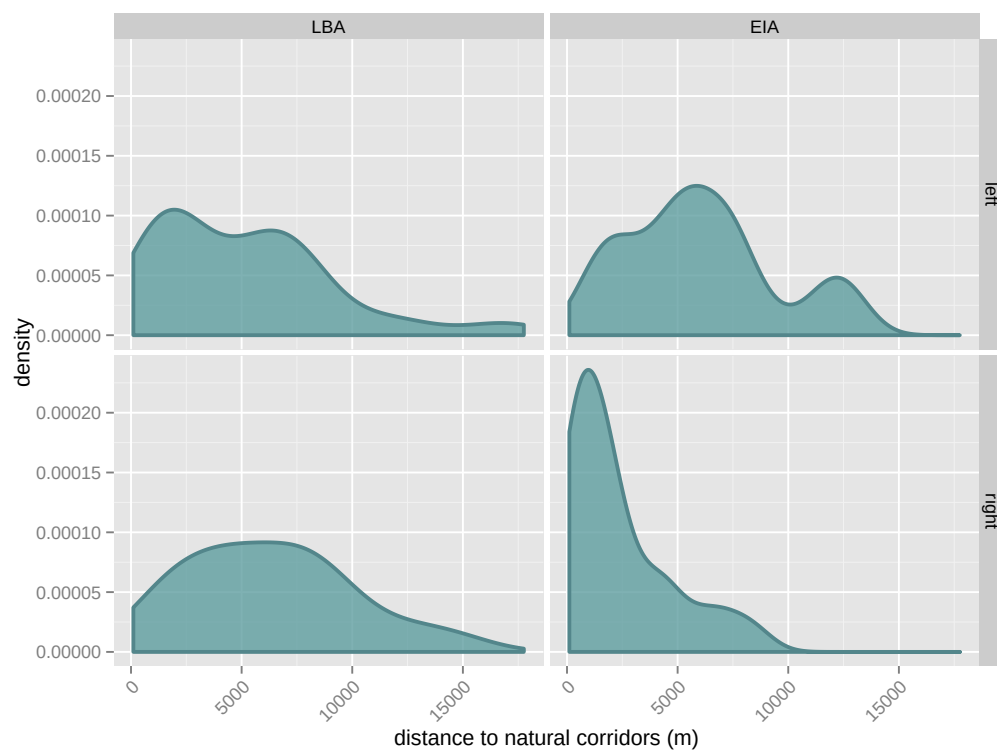


Figure 5.13: Density estimates of settlement distance to natural corridors

Chapter 6

The study of spatiotemporal patterns integrating temporal uncertainty in late prehistoric settlements in northeastern Spain

Aquest capítol és una transcripció exacta dels continguts del següent article (la versió original es pot veure a l'apèndix A):

Yubero-Gómez, M.; Rubio-Campillo, X.; López-Cachero, F.J. (2015). "The study of spatiotemporal patterns integrating temporal uncertainty in late prehistoric settlements in northeastern Spain", *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1-14, doi:10.1007/s12520-015-0231-x

Abstract This paper explores the integration of two variables that are typically difficult to use in spatial analysis: time and uncertainty. A framework is constructed to analyse mid- and long-term variation in settlement dynamics during late prehistory in northeastern Spain.

Following previous proposals, an aoristic model is built with ceramic dating to feed a Monte Carlo simulation that explores the case study using a discrete time-step approach. At the same time, available radiometric dating is used to validate the accuracy of the simulation results. Departing from the static analysis of spatial variables, the model proposes a new approach by which researchers can address temporal uncertainty.

The results show that patterns detected by classical spatial analysis can be produced by artefacts derived from the division of time in chronological units instead of discrete time periods. The model is also used to compare a priori identical variations whose rate of change, when analysed with this approach, is revealed to be completely different.

Keywords Spatial temporal analysis, Geographical information systems, Late prehistory in NE Iberian Peninsula

6.1 Introduction

In archaeological research, medium- to large-scale spatiotemporal data are most typically represented by geographical models using spatial databases (see Fairén-Jiménez, 2004; Pinhasi et al., 2005; Ruestes, 2008; García-Sanjúan et al., 2009; García, 2013), but while these models have been effective in answering various research questions, they encounter two important obstacles with regard to the concepts of time and uncertainty.

6.1.1 The study of temporally explicit patterns

Geographical information systems are not designed for working with scenarios depicting temporal and spatial variability. Even though the issue has been previously discussed (Mlekuž, 2010; Bailey, 2007; Curry, 1998), GIS-based tools remain an inadequate means of integrating temporal coordinates in spatial models. They cannot provide a common framework for detecting spatiotemporal patterns, despite the importance of these dynamics in archaeological research. Amongst the approaches explored to remedy this, the most common solution is to apply spatial analysis to different datasets corresponding to the chronologies and to compare their results at the end of the study. This can be combined with an alternative approach that collapses the spatial variable and analyses the different periods statistically to identify temporal patterns.

Both approaches are useful, especially when the study combines their results in one interpretation, but they do not solve the problem entirely.

Take two imaginary chronological units of an uneven time span ($Ca = 1000$ years and $Cb = 100$ years) as depicted in Fig. 6.1 and analyse geographical patterns of site settlements. During Ca , human populations gradually move from a mountain to an adjacent plain (fieldwork has located a total of 10 locations that can be analysed).

During the second phase (dataset of four sites), the population moves back to the mountains. A spatial analysis (Fig. 6.2 does not show the pattern (the movement from mountain to plain in *Ca* and from plain to mountain in *Cb*) because it is impossible to split chronologies in smaller parts. Time series visualization (Fig. 6.3) is also inadequate because it makes no provision for the site distribution. Although certain hypotheses can be tested using additional techniques (e.g. boxplots, variance in slope), it is impossible to link the statistical approach with additional explicit spatial data (distance between sites, level of clustering); therefore, it is impossible to detect complex spatial patterns that change over time because spatial and temporal changes are not analysed by the same tool.

Another problem is the difference in time spans. The decrease in height values during *Ca* could be produced over a time span of 1000 years, 10 times more slowly than in *Cb*. The identification of different rates of change determines how clearly we can distinguish between gradual and sudden settlement dynamic variation, but cannot be detected with standard GIS-based tools. Archaeological research is therefore unable to apply the entire potential of spatial analysis and geostatistics to its data, because the analysis is typically conducted using separate models of spatial and temporal variability. And the time spans are homogenized.

6.1.2 Uncertainty

The second issue raised in this paper is a long-standing question in archaeological research: how reliable is the data we work with?

First, that data has often been generated by different researchers using varying datasets and degrees of quality. This is particularly true of medium-scale studies, which use reports on sites that have been excavated over time periods of as long as 30 or 40 years and by teams supported by differing budgets. This can even have direct repercussions on the temporal coordinates of sites, specially when and where the quantity and quality of radiometric analysis is concentrated in a small number of sites.

Furthermore, uncertainty remains present in every type of data; however, thoroughly, a site has been researched. Even radiocarbon dates contain uncertainty and for this reason the real chronology of a site is expressed by a probabilistic model that is usually simplified or even discarded as data is progressively integrated from different sites. This has traditionally been applied when researchers work only with the average value, or with the average value plus the standard deviation. Finally, it is also common practice for researchers to discard radiometric datings with large error margins even though they are eliminating data that would be useful if this uncertainty was

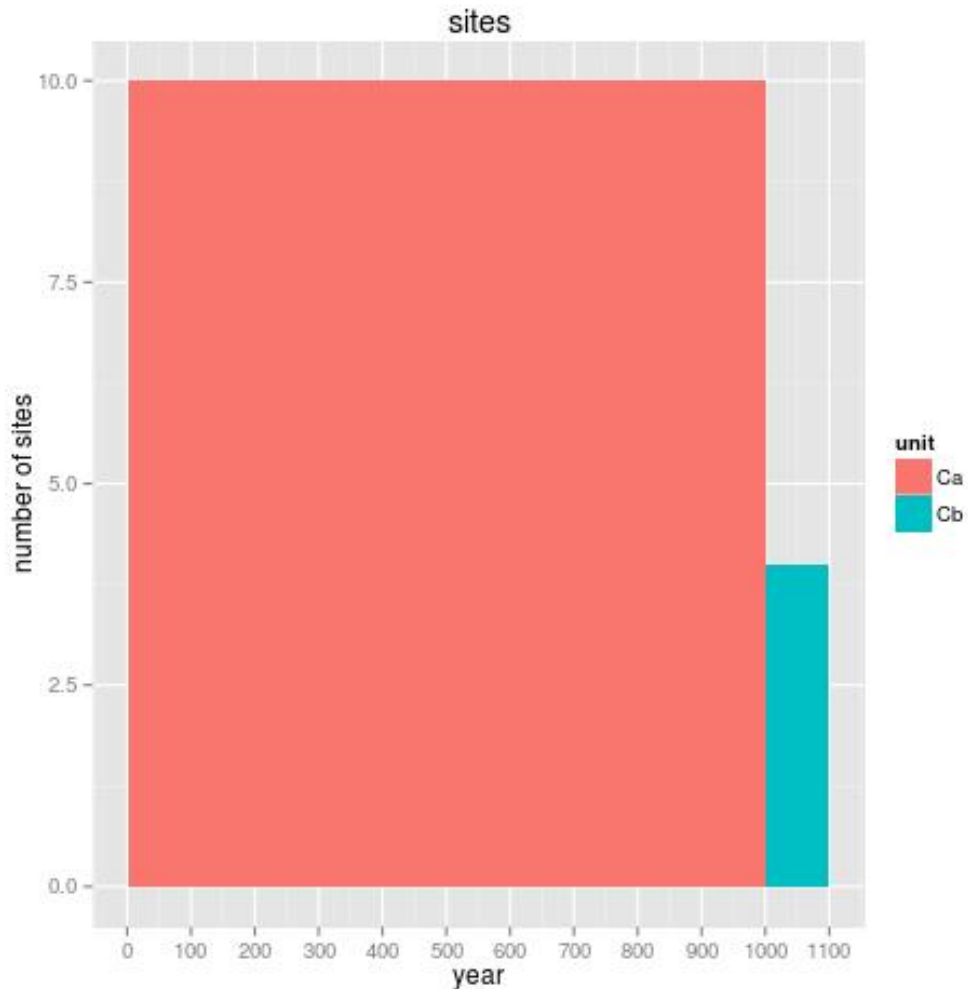


Figure 6.1: Spatial analysis of an archaeological dataset comprising two imaginary chronological units: number of sites

integrated in the model.

Three major consequences can be expected from this: first, imprecision and uncertainty in the measurements will be inherited in the model, even if they are not made explicit; second, the model will thus be imperfect; and third it will require revisions, which will alter our degree of understanding and our conclusions. These factors will inevitably lead to uncertainties in our evaluation of temporal data, but whether the magnitude of this uncertainty is acceptable will depend on our primary research questions (Crema et al., 2010).

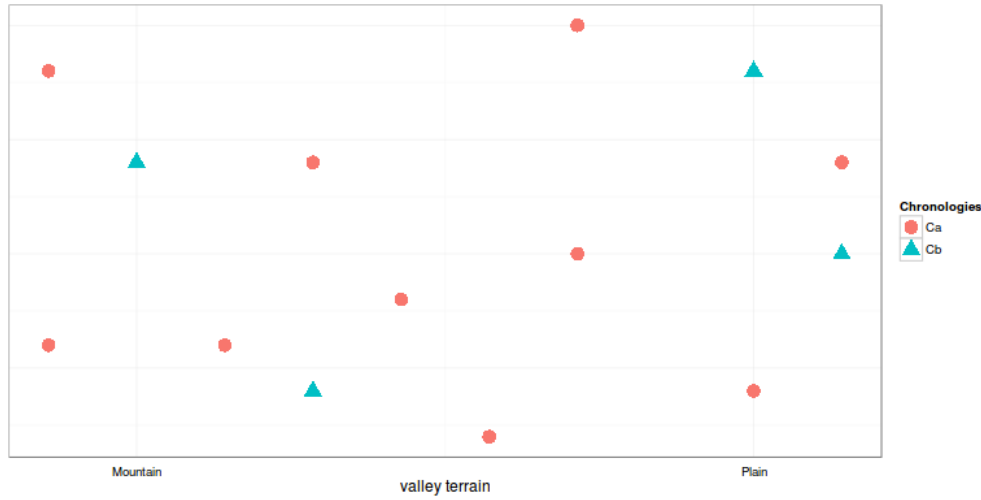


Figure 6.2: Spatial analysis of an archaeological dataset comprising two imaginary chronological units: spatial distribution

In recent years, there has been some interest in addressing these issues, which are clearly linked because any formal geographical model that successfully deals with them will need to correctly model both time and uncertainty. This paper uses a spatiotemporal model integrating uncertainty to answer various questions about the uses of classical spatial analysis, and the remainder of the paper is organized as follows: section 6.2 section describes the case study and reviews the research questions raised by previous spatial analysis. Section 6.3 section specifies the concepts that need to be integrated into the model; section 6.4 section describes the procedures used to build the model; and section 6.5 interprets the results and evaluates the model's effectiveness in analysing spatiotemporal patterns.

6.2 The case study: the late prehistoric settlements of the Besòs river valley

Our study area was located in the Besòs river valley, in the northeast of the Iberian Peninsula (see Fig. 6.4). During recent prehistory, the geographical, physical and environmental characteristics of this river valley made it an ideal territory for the survival of human groups and its archaeological sites show chronologies from the Palaeolithic period to the present day (Carlús i Martín & Terrats Jiménez, 2003).

Located in the Catalan pre-coastal depression, the study area is a natural

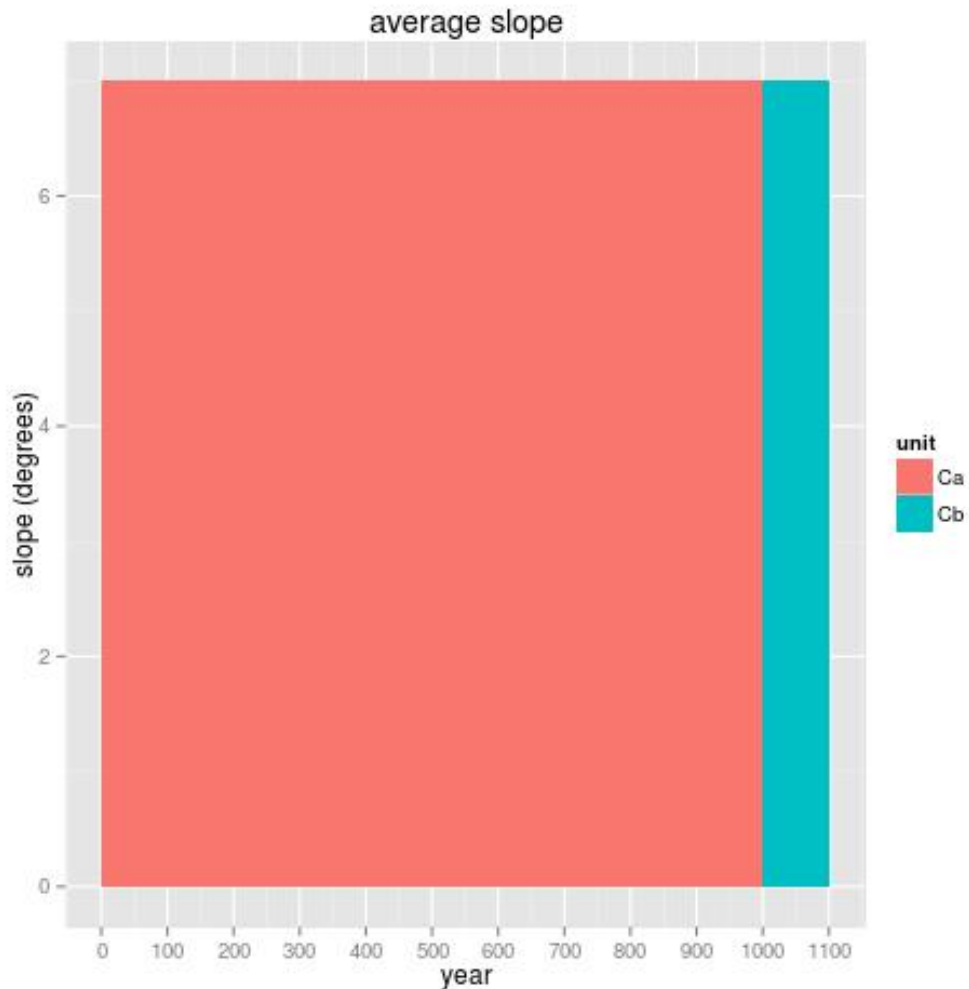


Figure 6.3: Spatial analysis of an archaeological dataset comprising two imaginary chronological units: time series

corridor approximately 200-km long and bears numerous traces of human occupation including evidence of houses, mills, canals, orchards, water wells, ice wells, roads, industries in nineteenth- and twentieth-century buildings, water supplies and archaeological and paleontological features (Carlús i Martín & Terrats Jiménez, 2003; López Cachero, 2005, 2007).

The area's highly varied geography comprises a number of hills and mountains, a river basin and plain territories. On the one hand, this variety becomes valuable to researchers because they can study the human uses of each type of geography during different chronological units, from the Neolithic

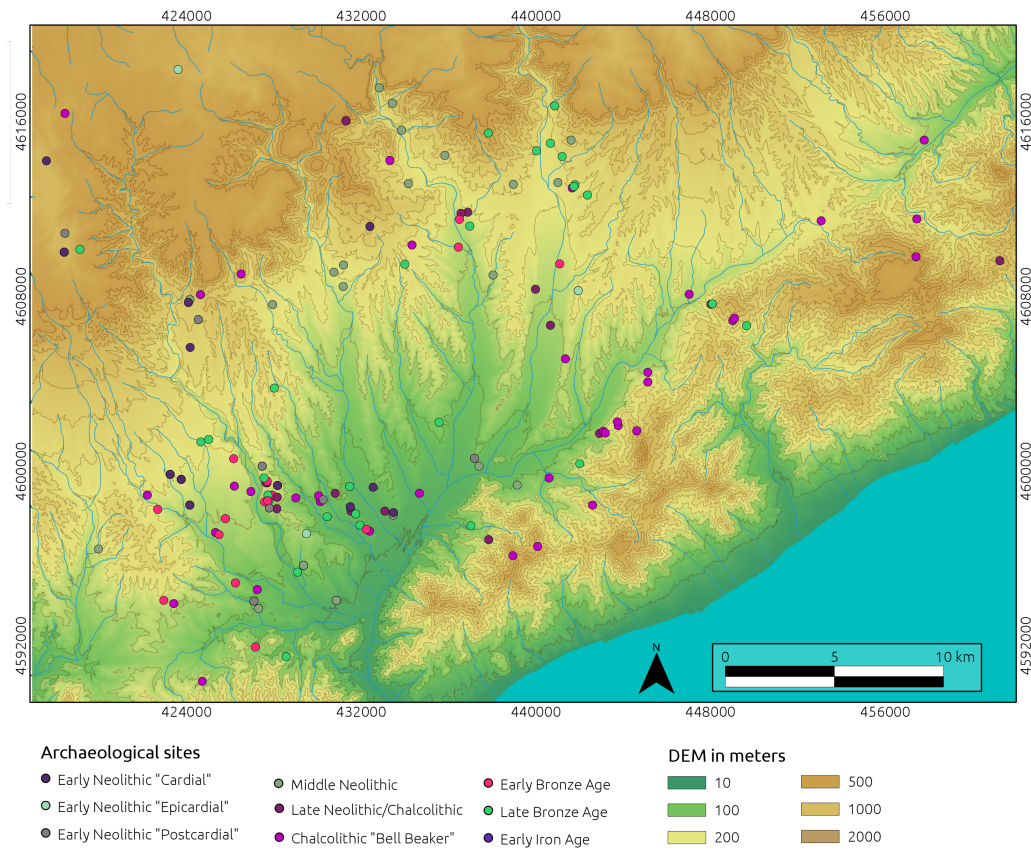


Figure 6.4: Late prehistoric archaeological sites located in the study area, depicted over a Digital Elevation Model raster map

period to the Early Iron Age, and because a large number of sites straddle ancient prehistory and the modern age; on the other hand, the fact that their particular location has attracted successive periods of human occupation in different eras (Coll et al., 1993) has also made it more difficult to efficiently detect and analyse settlement patterns or to detect real occupation phases of sites.

Extensive research has been conducted on late prehistoric settlements (Bouso García et al., 2004; Francés Farre, 2005; Martín Cóllica, 2009; Yubero Gómez & Rubio Campillo, 2010; López Cachero, 2012), but these studies have focused on specific periods or sites (Can Roqueta, Pla de la Bruguera, Camí de Can Grau) and have addressed questions at a local rather than global scale. For this reason, it is still difficult for us to compare and understand the spatiotemporal dynamics of the zone during the entire period of late prehistory. Moreover, in recent decades, the area has undergone large-scale urban devel-

opment and most sites have been excavated, documented and subsequently destroyed. Researchers therefore have plenty of material evidence at their disposal, but the unequal nature of the fieldwork completed to date has created a high degree of uncertainty. The result, then, is that the set of late prehistoric sites that define the area constitutes an extremely fragmented aggregate, and the area as a whole has not been thoroughly studied.

Despite such issues, the area does offer a valuable starting point for exploring scenarios where formal spatiotemporal models integrating uncertainty are needed. First of all, recent years have seen the development of a new research project on landscape reconstruction and spatial analysis (Yubero Gómez & Rubio Campillo, 2010; López Cachero, 2012) and the creation of a geographical model to be used as the basic framework for exploring this kind of archaeological record from a mesoscale late prehistoric perspective.

In this context, although geographical information systems have been powerful enough to organize and analyse all these data and although their capabilities have been used in previous studies, we must now acknowledge their inadequacy for integrating time in our analyses and consider that additional research techniques will be required if we wish to extend our studies to understand changing spatial patterns over time. Basically, our model needs to address the concept of data uncertainty. Previous works such as Crema et al. (2010), Bevan & Wilson (2013) and Bevan et al. (2012) integrating archaeological spatial and temporal data have been reference works in this field. Table 6.1 describes the time span we are dealing with. The relative and radiometric datings have provided an interesting but challenging scenario for various papers (Barceló, 2007a; Barceló et al., 2013).

Chronological unit	Absolute dates (approx.)
Early Neolithic <i>cardial</i>	5500–5000 BCE
Early Neolithic <i>epicardial</i>	5000–4400 BCE
Early Neolithic <i>postcardial</i>	4400–4000 BCE
Middle Neolithic	4000–3300 BCE
Late Neolithic/Chalcolithic	3300–2300 BCE
Chalcolithic <i>Bell Beaker</i>	2800–2200 BCE
Early Bronze Age	2300–1300 BCE
Late Bronze Age	1300–750 BCE
Early Iron Age	750–550 BCE

Table 6.1: Chronological span for each chronological unit of late prehistory in the northeastern Iberian Peninsula, after Barceló (2007b)

As explained above, our case study analysed not only short-term settle-

ment dynamics but also mid- and long-term issues. In particular, we considered the validity of three patterns proposed by previous studies (Yubero Gómez & Rubio Campillo, 2010; Yubero-Gómez, Rubio-Campillo, López-Cachero, & Esteve-Gràcia, 2015) but inadequately served by standard GIS-based models.

- *Pattern 1: the number of sites decreases from the Late Bronze Age to the Early Iron Age* - This pattern required further examination before it could be properly validated or identified as an artefact deriving from the comparison of different time spans.
- *Pattern 2: Middle Neolithic sites depict different geographical traits to Early and Late Neolithic sites* - The substantial variation in the variable slope suggests that during 4000–3300 BCE, the population was concentrated on the plains.
- *Pattern 3: In all the periods of late prehistory except the Chalcolithic period and the Early Iron Age, the distance from sites to natural routes slowly decreased* - If this pattern was validated, it would confirm that human populations constantly moved to strategic locations, but that there was a noteworthy variation on this trend in the case of the two periods described. Classical hypotheses propose that Chalcolithic populations are defined by small sites far away from the plains, and this is validated by spatial analysis (Yubero Gómez & Rubio Campillo, 2010); on the other hand, the same study contradicts the long-standing hypothesis that the emergence of trade during the First Iron Age prompted populations to seek strategically located settlements, arguing that only a small number of sites offer the geographical data to corroborate this.

It was clear that an exclusively geographical approach would be an inadequate means of testing the validity of these three patterns, and that new paradigms were needed to create a spatiotemporal model that could integrate explicit uncertainty variables (Bevan & Wilson, 2013; Bevan et al., 2012).

Finally, a further reason for adopting a spatiotemporal framework was that this could help us detect whether differences in the rate of change were more or less sudden or gradual. The three variables (number of archaeological sites, slope, distance from natural corridors) were thus analysed within a long-term perspective.

6.3 Model concepts

This section examines the concepts that played an important role in our model: settlement location and chronologies, and geographical and temporal

data.

6.3.1 Spatial site database

In previous research, our spatial database was specifically designed for the needs of the case study and was based on an entity-relation model that could integrate existing data from different sources and be extended for further testing of the validity of the three patterns described above in section 6.2. The design allowed us to store, search and execute queries as needed. Moreover, it was flexible enough to accept changes without our having to modify the entire design and structure of the database (Yubero Gómez & Rubio Campillo, 2010).

The database had 237 entries and contained all the relevant information about the sites in the study area, including a georeferenced location, a list of chronological units of use and radiometric datings.

6.3.2 Geographical variables

A geographical model of the study area was needed to test the validity of the three patterns. The basic information is collected in previous or forthcoming papers, especially in (Yubero-Gómez, Rubio-Campillo, López-Cachero, & Esteve-Gràcia, 2015; Yubero Gómez & Rubio Campillo, 2010; Yubero Gómez et al., 2014), where changes in Late Bronze-Early Iron Age mobility patterns are analysed. The third study defines two variables used again in the new spatiotemporal model: slope and distance to natural corridors.

Slope is the degree of inclination of a given location in relation to its neighbouring space (defined using Moore neighbourhood). The study of this variable helps to detect changes in settlement locations, from mountains to plains, and was particularly useful in the case of our study area, where there appears to be a direct link between the pattern of sites with high slope values and periods of high conflictivity. In these cases, steep slopes usually define locations with high control of the surrounding area combined with low accessibility.

On the other hand, the variable distance from archaeological sites to natural corridors is a powerful marker of the importance of good communication at mesoscale levels (Murrieta-Flores, 2012). In order to calculate this, we defined a perimeter of points at a distance of 25 km from the study area at a resolution of 10 km. Then, we calculated the least-cost routes from each point on the perimeter to all the other points, while quantifying how many of the routes pass through each cell of the original raster map. The routes with the highest value (for example, taking the quartile with the highest

number of routes) define the natural corridors according to the geography of the area. Studying this relationship by chronology and area enables us to see the extent to which this variable is significant and place it in relation to the archaeological contexts. Sites closer to the natural corridors of an area offer clear advantages for external trading and control of the territory, while settlements located further away from these routes are easier to defend in times of conflict because of their remote and inaccessible position.

6.3.3 Temporal uncertainty

Different approaches have been used to integrate the role of temporal uncertainty in archaeology (Lock & Harris, 1997; Lock & Molyneaux, 2006). In our case study, we applied the framework proposed by Crema et al. (2010; 2012), which uses a probabilistic model to quantify time when high levels of uncertainty hinder spatiotemporal analysis: the aoristic model (Ratcliffe, 2000; Johnson, 2003). This framework provides the researcher with a probabilistic model that can be combined with a Monte Carlo approach to explore potential spatial trajectories over time. Moreover, different techniques can be applied to the dataset generated by the simulations, testing a pattern or hypothesis against each run or performing risk analysis techniques in results (Bevan et al., 2012).

6.4 Methodology

We applied the described spatiotemporal framework to our data. Our intentions were to solve the problems in our geographical model and, as explained above, to quantify uncertainty in order to improve our understanding of mid-term settlement dynamics like those detected in the three patterns described above.

In order to explore the validity of the patterns described above in section 6.2, the following steps were applied to the data of our case study.

6.4.1 Aoristic model

An aoristic model defines for each event a probability distribution of absence over discrete time steps. This probability is 0 outside the span comprised between by the absolute beginning (*terminus post quem*) and absolute ending (*terminus ante quem*) of the event, and equal probability of presence for all the time steps between these dates (this value is defined as aoristic weight).

Each event of our case study is the creation or reoccupation of a settlement through a chronological unit, and *t.p.q.* and *t.a.q.* are defined as the chronological units proposed in Table 6.1. The sum of the aoristic weights for a site in a given chronological unit is always 1, but there is no consensus about duration and number of occupations of each site within a given chronological unit. For this reason, the time step of the aoristic model has been defined at 50 years, as resolution adjusts to the quality of the information we have in this case study and the spans of the temporal units. Finally, each settlement can exist multiple time steps during each chronological unit.

The aoristic weight W of a settlement S for a given time step T_N is defined as:

$$W_{S,T_N} = \frac{\Delta T}{\beta_S - \alpha_S}$$

being ΔT the duration of a time step, β_S the *terminus post quem* of the chronological unit, and α_S its *terminus ante quem*.

Figure 6.5 shows the sum of aoristic weights for the case study. If we compare the global trends of the figure with the sum of sites per pottery phase (defined in Fig. 6.6), the value of the aoristic model becomes clear in that it allows us to question pattern 1 and to identify the supposed decrease in the number of sites during the transition from Late Bronze Age to Early Iron Age as an artefact produced by the differences in time span between the two periods (550 to 200 years). The simple move from a model based on pottery to an aoristic model shows how the number of sites actually increased.

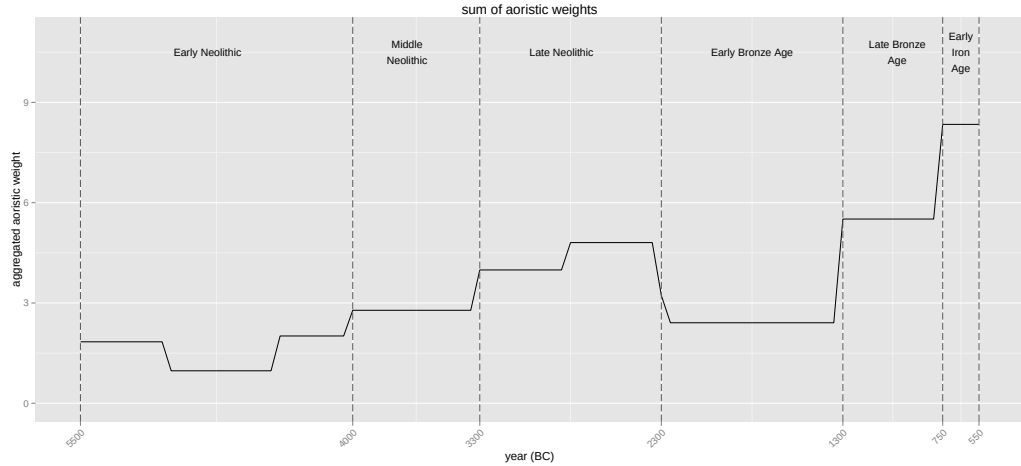


Figure 6.5: The sum of aoristic weights for the archaeological sites of the Besòs valley in relation to time steps.

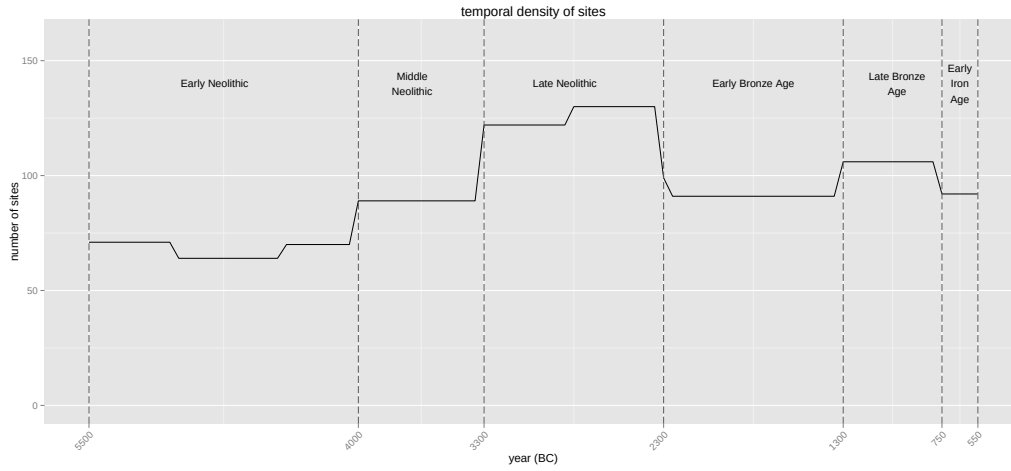


Figure 6.6: Number of sites per time step based on relative dating of pottery phases

Although this comparison is valuable, the aoristic model alone cannot be used to test hypotheses on the subject of spatiotemporal patterns because the model's probabilistic basis is difficult to translate to spatial coordinates, even though certain proposals have been made (Crema, 2011). For this reason, to gather information related to spatial change over time, we designed an experiment based on Monte Carlo simulations.

6.4.2 Monte Carlo simulations

The approach we used is proposed by Crema et al. (2010; 2012). The idea was to use the probabilities of site existence defined in the aoristic model as an input for a Monte Carlo simulation. This technique is suited for exploring stochastic models where the number of probabilistic combinations is too high to be explored in the standard manner (by studying all the possible combinations of settlement occupation/abandonment for each time step). We simulated different historical trajectories using the aoristic weight of a site for a given time step as the probability of existence of a Bernoulli distribution. Each run computes, for each site and time step, absence/presence based on the aoristic weights for each chronological unit. Considering the high level of reoccupations, presence of a site during time step is independent, and each site can be abandoned and reoccupied several times during one chronological unit.

This created different trajectories for each run where we can identify settlement patterns. As an example, Table 6.2 describes the result for one of

these runs.

The number of executions performed during the simulation was large because the uneven quality of the dataset generated a high level of variation. To use an appropriate (and at the same time minimum) number of runs a convergence test was designed. Figure 6.7 shows the density plots of standard deviations during time step for different number of runs (100, 1000 and 10,000). A Kolmogorov-Smirnov test was performed, considering that the density plot showed nonparametric shapes for the different sample sizes (results: (a) KS test between 100 and 1 k produced a *p-value* of 0.36 and (b) the test between 1 and 10 k produced a *p-value* of 0.96). Considering that the 1 and 10 k distributions were indistinguishable, we therefore chose 1 k as the sample size of the different analysis.

Simulation	Time step of 50 years											
Archaeological Site	...	1050	1000	950	900	850	800	750	700	650	600	...
Can Piteu-Can Roqueta	...	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	...
Can Gambús-1	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	...
Pla de la Bruguera	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Table 6.2: A single Monte Carlo execution of our case study recording the existence (1) or nonexistence (0) of different sites for the period 1050–600 BCE

The spatiotemporal model could thus be studied through the testing of hypotheses (examining the validity of patterns) in each of these 1000 trajectories, which provides the researcher with a global approach to the data where temporal uncertainty has already been taken into account. Results for each variable are shown in Fig. 6.8 (number of sites), 6.9 (slope) and 6.10 (distance from natural routes).

6.4.3 Cross-validation of the aoristic model with radiocarbon dates

The framework combines the aoristic approach to temporal uncertainty with Monte Carlo simulations for integrating archaeological and spatial data. Unfortunately, it is difficult to use multiple data sources without breaking the coherence of the probabilistic model.

This is extremely important where radiometric datings are available for some of the sites. This data should be combined with the general temporal information provided by pottery dating but the aoristic model cannot integrate different time spans for the same event. Lock and Harris suggest an alternative approach in which each dating technique has an associated

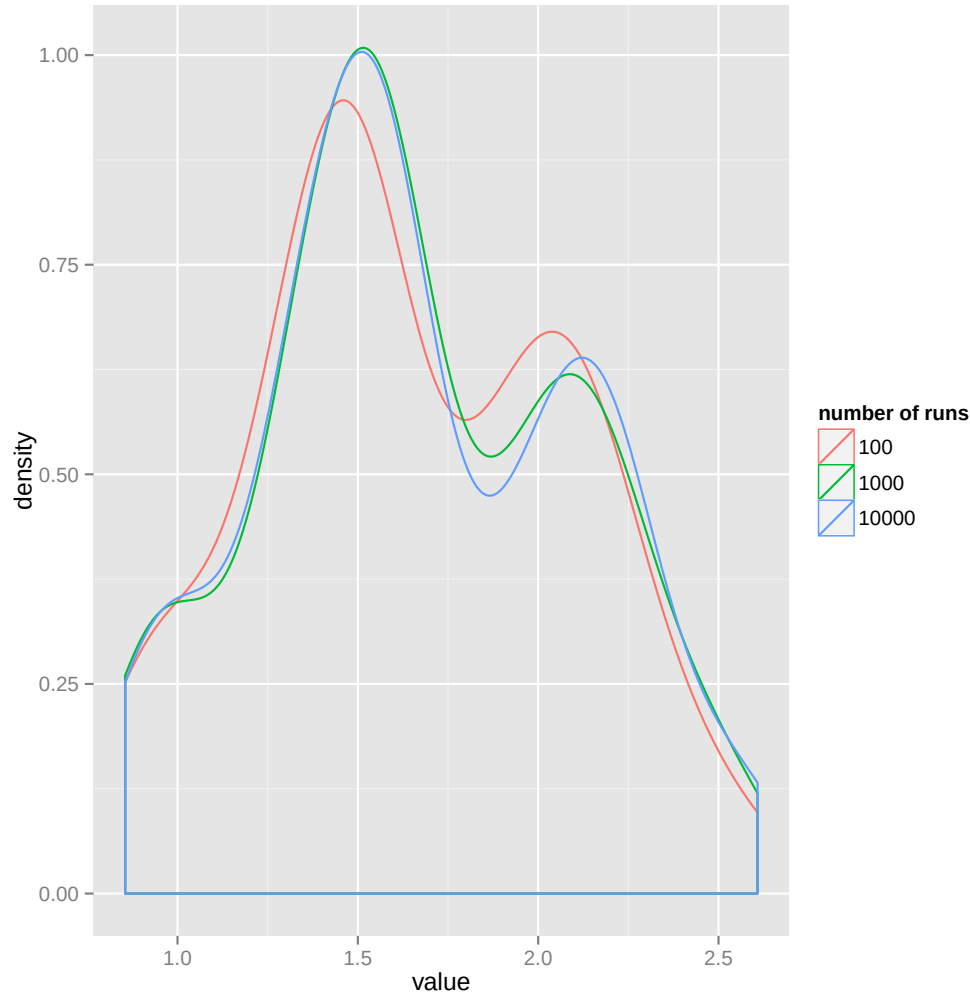


Figure 6.7: Density plots for standard deviations of 100, 1 and 10 k sample sizes of the Monte Carlo distributions

weight and the final value of each site is computed as the sum of the different values for each time step and site (Lock & Harris, 1997). This approach is incompatible with Monte Carlo simulations because weights are chosen by the researcher and the final value cannot be used as a probability between 0 and 1.

In addition, in our case study, radiocarbon dates were concentrated in a small number of sites (e.g. Bòbila Madurell, Cova del Frare and Can Roqueta) and were either scarce or nonexistent in the majority. For this reason, any integration of radiocarbon datings into the aoristic model would distort the results and introduce a clear bias towards the most documented sites.

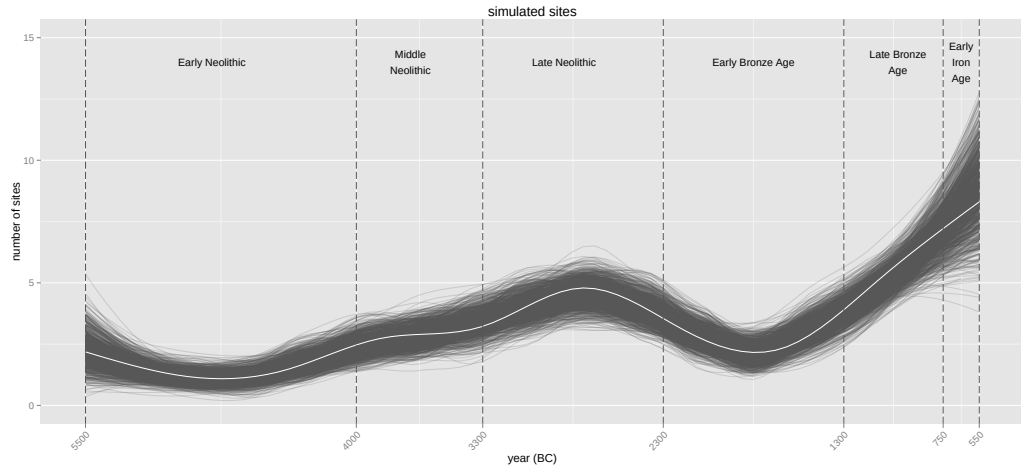


Figure 6.8: Number of sites generated by Monte Carlo simulations. Each *grey line* shows the results for a different run, and the *white shape* is the average trajectory.

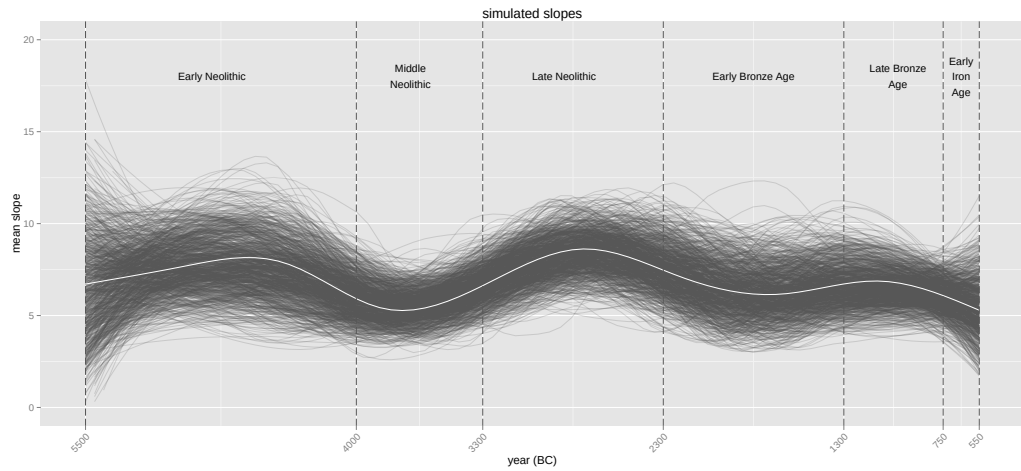


Figure 6.9: Slope of existing sites, generated by Monte Carlo simulations. Each *grey line* shows the results for a different run, and the *white shape* is the average trajectory.

We propose an alternative method for radiometric dating in spatiotemporal models which we believe can be useful when researchers have a low number of datings, as we did in this case study. The method consists in validating the model for the most well-represented time steps instead of integrating radiocarbon datings into the model. The comparison of the average

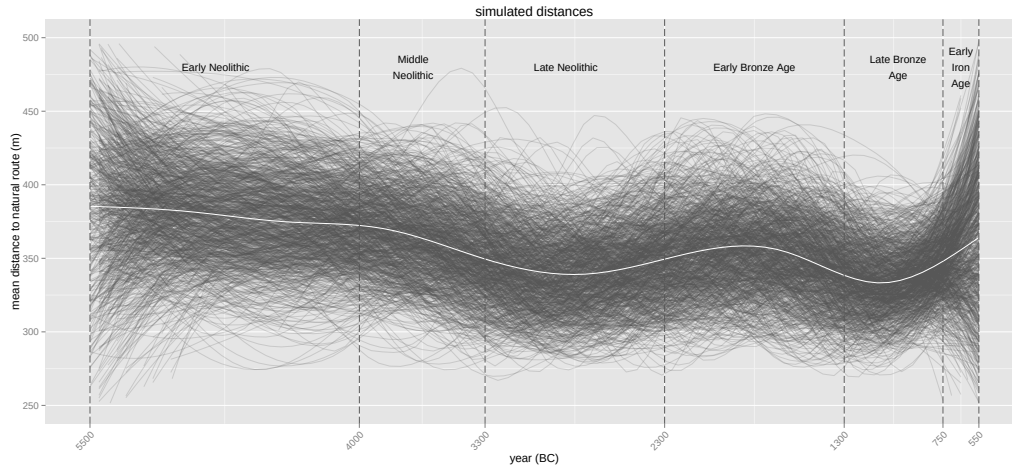


Figure 6.10: Distance of existing sites from natural routes, generated by Monte Carlo simulations. Each *grey line* shows the results for a different run, and the *white shape* is the average trajectory

geographical values should provide insight about the degree of correctness of our aoristic model built from pottery datings.

This cross-validation is shown for slope and for distance from natural routes in Fig. 6.8, 6.9 over three different time steps: 4250, 1900 and 650 BCE.

In our case study, these were the sites that offered the highest number of radiocarbon dates, so the information provided by this average was the most reliable information we could retrieve from the data available. Additional research and analysis could improve the picture, but even with such scarce data, we could confirm that the patterns detected using the aoristic model were reproduced using just the sites dated during these time steps with radiometry.

Given the sample of sites with radiocarbon dates (5–10), validation remained difficult. However, the comparison of tendencies could still provide us with information about the spatiotemporal patterns: in all cases, we observed a constant decrease of the mean value for slope (Fig. 6.11), while in the case of the variable distance from natural sites, the values decreased from 4250 to 1900 BCE and increased slightly from 1900 to 650 BCE (Fig. 6.12).

To sum up, in the cases where radiometric datings are available in small numbers, we suggest using these datings to cross-validate the model. The comparison of the spatial trends detected in the Monte Carlo simulations against the sites with radiometric datings for a particular time step can be used to test whether detected patterns are consistent. Naturally, the

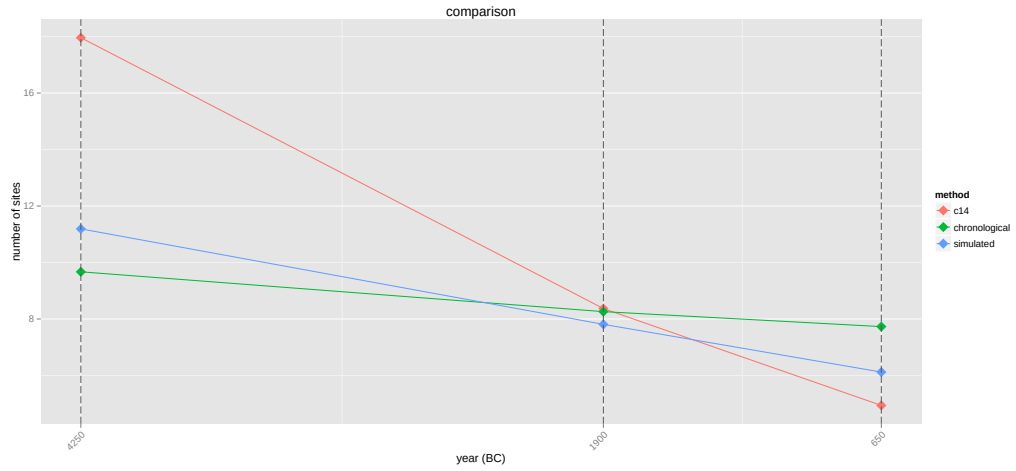


Figure 6.11: The average for the variable slope described for the different models at time steps 4250, 1900 and 650 BCE. The value was computed from the collection of sites existing in these time steps. C14 values are taken from the mean value of the probabilistic distribution.

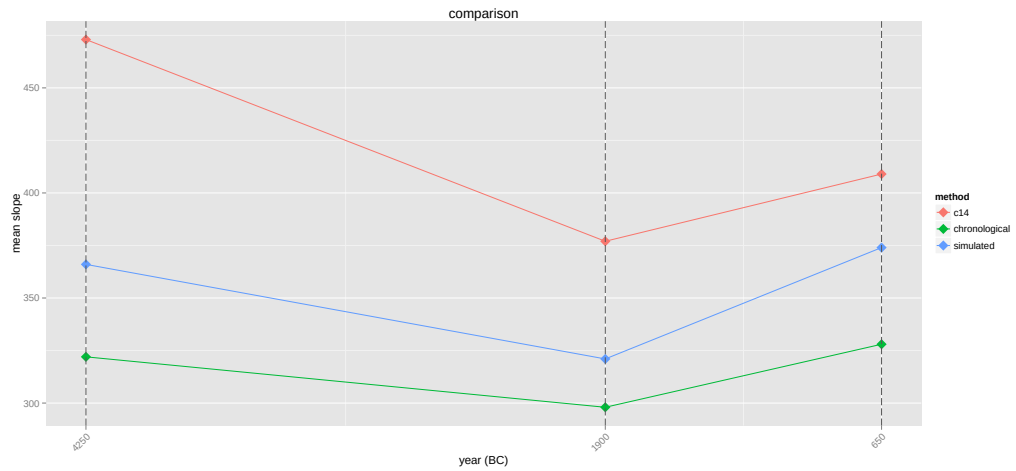


Figure 6.12: The average for the variable distance from natural routes described for the different models at time steps 4250, 1900 and 650 BCE. The value was computed from the collection of sites existing in these time steps. C14 values are taken from the mean value of the probabilistic distribution.

only drawback is that this technique cannot be used to examine the variable number of sites.

6.4.4 Calculation of spatial values

The next step was a computation of the variables needed to test the validity of the three patterns described above in section 6.2. In our case study, we wanted to understand the temporal differences in the changes in settlement dynamics detected with classical spatial analysis.

In order to do this the pace of change must be calculated for every time step as follows.

1. For each settlement, extract the value of the variables (in our case, slope and distance from natural routes).
2. For each time step and simulated trajectory, calculate the average value of (a) above (i.e. compute the average for the set of sites that exist during each time step).
3. Apply a temporal kernel of 150 years (3 time steps) to result above, under the following formula:

$$WT_n = \frac{\sum_{i=n-1}^{n+1} \overline{WT_i}}{3}$$

, being WT_n the value of the time step T_n at a given trajectory. The temporal kernel algorithm is applied to avoid distortions provoked by outliers at particular time steps. The technique smooths the variation, while the relatively narrow width of the kernel prevents it from removing the underlying pattern.

6.4.5 Detection of variation

The rate of variation is also a relevant variable while analysing settlement dynamics. In order to explore this concept, relative variation was computed from absolute values provided by Monte Carlo simulation. For each time step, the rate of variation was computed as an angle, using the Pythagorean theorem.

The sign of the variation shows whether the change is an increase or a decrease, while its value provides the rate of change (0 being the value when consecutive time steps have identical absolute values). The results can be seen in Figs. 6.13, 6.14 and 6.15.

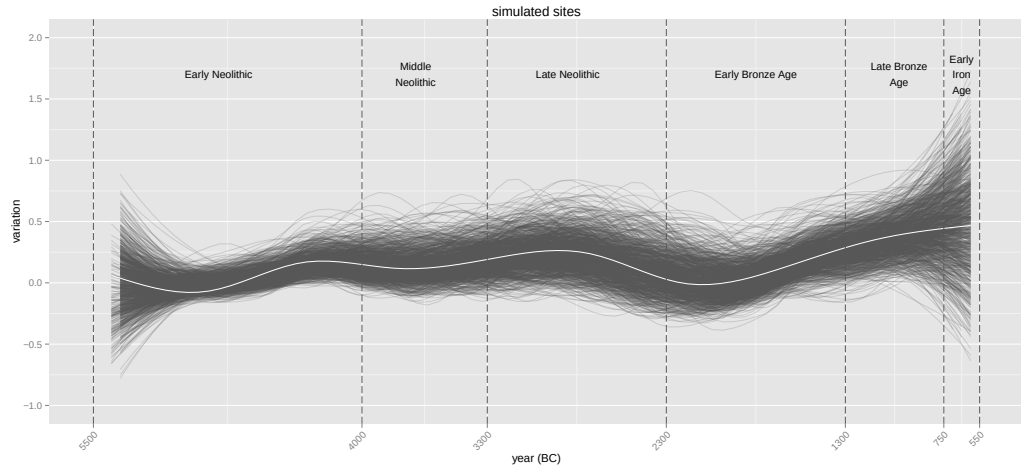


Figure 6.13: Variation in number of sites for the chronological model

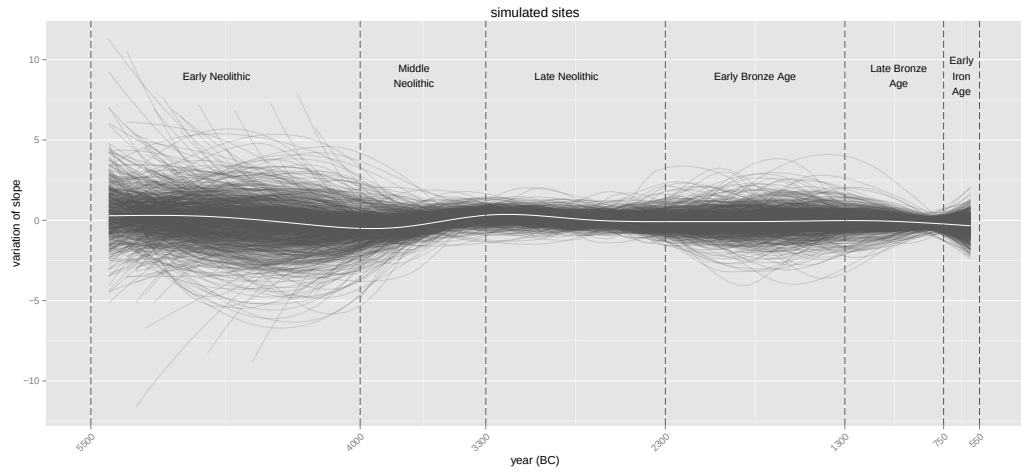


Figure 6.14: Variation in slope for the chronological model.

6.5 Discussion

The results generated by this model were used to test the validity of the three patterns described above in section 6.2. In particular, our intention was to examine whether a pattern that had been observed by classical spatial analysis could still be detected when the temporal variable was incorporated. Our results were as follows:

- *Pattern 1* (the number of sites decreases from the Late Bronze Age to the Early Iron Age) - Figure 6.6 shows that the absolute number of

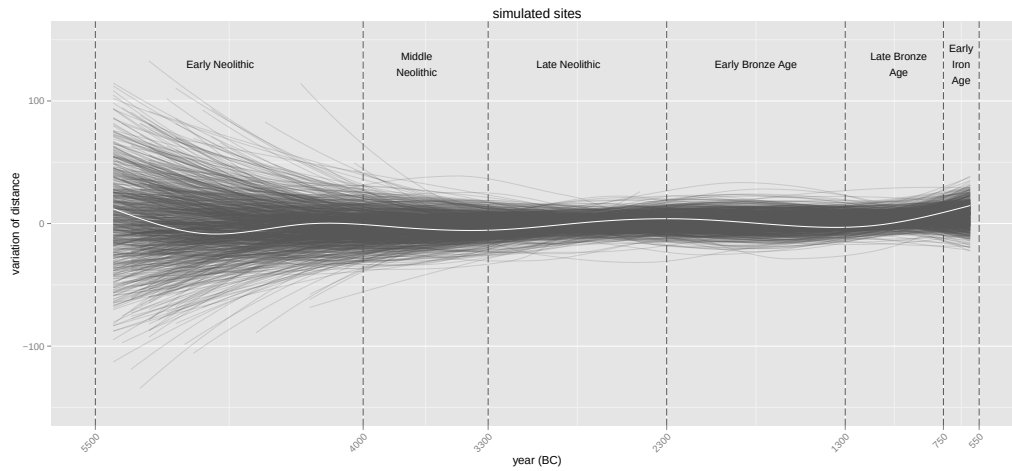


Figure 6.15: Variation in distance from natural routes for the chronological model

sites decreases in this transition. In contrast, the aoristic model shown in Fig. 6.5 proves that the probability of a new site actually increases. For this reason, this pattern can be discarded as an artefact derived from comparing chronological units with different time spans.

- *Pattern 2* (Middle Neolithic sites depict different geographical traits to Early and Late Neolithic sites) - Figures 6.8 and 6.10 suggest that the geographical traits of Middle Neolithic settlement dynamics are no different to those of other Neolithic chronological units. In the evolution of both variables (number of sites and distance from natural routes), the Middle Neolithic continues the trend of Early Neolithic and Late Neolithic: an increase in the number of sites, and a decrease in the distance from natural routes.

On the other hand, a different pattern was notable for the variable slope. In the aoristic model (Fig. 6.9), this trend is confirmed and Middle Neolithic behaviour appears closer to later periods such as the Bronze Age or First Iron Age than it is to the Neolithic. The explanation may be that during the Middle Neolithic human populations emigrated from other areas to the area of our study. The settlers' priorities would have differed to the priorities of previous occupants of the area, so that the niche they occupied (plains without great strategic value) was not previously used. This possibility is supported by the rate of variation (Fig. 6.14), where the decrease in slope is sudden and is only detected at the beginning of the chronological unit (in con-

trast to variations like the increase produced at the end of the Middle Neolithic).

- *Pattern 3* (in all the periods of late prehistory except the Chalcolithic period and the Early Iron Age, the distance from sites to natural routes slowly decreased). This pattern is validated in most of the chronological units studied, with two important exceptions.

The first exception is that Early Neolithic epicardial sites do not follow the pattern, as Fig. 6.10 clearly shows (the pattern of previous and subsequent chronological units is completely different). This difference (almost half the distance from natural routes than in the other periods) can be understood as an artefact generated by a low sample. In fact, this is the period with a lowest number of sites, so the results will have to be considered inconclusive until new data can validate this pattern.

The second exception is the Chalcolithic and Early Iron Age. These chronological units show a slight increase in the distance of sites from natural routes, as observed above. Nevertheless, closer inspection of the rate of variation (Fig. 6.15) reveals that this perspective is distorted: in both cases, the trend is not a sudden change but a gradual increase that was already present during previous chronological units. We can therefore conclude that the supposed pattern of gradual movement from heights towards natural routes is not real, and that during long periods of time, there was movement in the opposite direction.

To summarize, first of all, this paper has described how a probabilistic spatiotemporal model can validate the existence of changes in settlement dynamics observed with classical spatial analysis. In particular, the trends are verified when periods have similar time spans and highly unlikely when this is not the case (as repeatedly shown with Late Bronze Age and Early Iron Age data).

Second, our study has integrated radiometric dating to the point where it can be useful but does not create a strong bias of the results towards the most well-known sites. In other words, our work suggests that the synchronic comparison of variables can validate the diachronic approach of the aoristic model whenever this is allowed by the number of radiometric datings for a particular time. This is useful when the dataset is uneven (as in our study). However, in case studies where a large amount of available radiometric datings, it would be desirable to create the aoristic model exclusively based on this highquality datasets.

Third, we have proposed that the study of the rate of variation is extremely useful for exploring long-term settlement dynamics. Once we move

from a comparison between chronologies and a more continuous study, temporal differences between changes must be studied, and this paper has offered a simple algorithm capable of dealing with this variable on top of the aoristic model.

Finally, we propose that any comparison of geographical variables for different chronologies should address temporal uncertainty. Temporal uncertainty plays a crucial role in our understanding of the relationship between archaeological sites and their environment, and if we are to fully understand spatiotemporal change, then archaeological research must begin to consider this issue.

6.6 Acknowledgments

We would like to thank an anonymous reviewer for helpful comments and suggestions on earlier versions of the document.

This paper was written as part of the research undertaken by the consolidated research group SGR2009 1145 Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques and received funding from the Catalan government's Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (Agency for the Administration of University and Research Grants, AGAUR) and from the projects HAR2011-26193 and HAR2013-48010-P from the Spanish Ministry of Science and Innovation.

We would also like to thank AGAUR for providing Maria Yubero with the pre-doctoral grant 2010FI_B 00641 and BE2012 BE100563.

The work of Xavier Rubio-Campillo is part of the SimulPast project CSD2010-00034, funded by the CONSOLIDER-INGENIO2010 programme of the Spanish Ministry of Science and Innovation.

Capítol 7

Discussió

Un cop presentats els treballs, a continuació realitzem una discussió en el context dels objectius del nostre projecte de tesi doctoral. Per portar-ho a terme, hem dividit la discussió en dues parts: per una banda, presentem una discussió per cada cas d'estudi, per l'altra banda, una discussió general dels resultats. La discussió relativa als casos d'estudi l'hem classificat segons l'escala temporal dels esdeveniments: Esdeveniment de curta durada, durada mitjana i de llarga trajectòria.

7.1 Esdeveniment de curta durada

En comparació amb els dos casos d'estudis posteriors, l'estudi d'una acció militar com aquest setge ens proporciona una excel·lent mostra de què pot aconseguir l'anàlisi espacial en el context d'un període limitat de temps (en aquest cas una seixantena de dies). Com hem pogut estudiar, les dinàmiques d'aquests tipus de fenòmens històrics fan que siguin objectius perfectes per integrar en el mateix anàlisi variables temporals i espacials.

El treball presentat mostra com els models formals poden integrar tècniques com l'anàlisi espacial, i juntament amb les fonts històriques i arqueològiques ens poden ajudar a comprendre molt millor els conflictes històrics. El model computacional creat durant la nostra recerca combina dades arqueològiques, històriques i espacials amb la intenció d'avaluar hipòtesis relacionades amb la teoria i pràctiques militars. Aquest fet és especialment rellevant en la època moderna, ja que en aquest moment la cartografia extremadament detallada juga un paper molt important en els combats i en els camps de batalla. Per aquest motiu, la nostra recerca, tot i que només analitza un cas d'estudi, permet contrastar el que deia la teoria (a través de manuals i obres d'instrucció diverses) en contraposició amb el que succeïa al camp de batalla.

Hem pogut determinar que la planificació d'aquest setge era constantment modificada per ajustar-se a noves dificultats. Un exemple clar és l'assalt fallit a Barcelona a mitjans d'agost de 1714 portà al duc de Berwick a redissenyar la seva estratègia. Els enginyers van ampliar les paral·leles i van desplegar noves bateries. Aquesta decisió va anar acompanyada d'un alt cost humà, cosa que també s'evidencia en l'anàlisi efectuat.

El conjunt de decisions que els assetjats van prendre és un bon exemple del procés adaptatiu que feien tots els exèrcits per poder vèncer els seus enemics. En particular, la innovació era tant important com el coneixement de les pràctiques establertes. Bàsicament, va ser el balanç entre aquests dos conceptes que va ser decisiu per la victòria del duc de Berwick.

Els patrons generats per un esdeveniment de curta durada com els que hem explorat en el treball presentat generen evidències a diversos graus i escales, incloent relacions espacials, dades arqueològiques, diferents tipus de textos, diaris i descripcions. Per aquest motiu són difícils de detectar degut al nombre d'esdeveniments successius que ocorren en qualsevol acció militar. La metodologia presentada en aquest article és una proposta de com els models formals poden ajudar a arqueòlegs i historiadors a explorar i analitzar aquest tipus d'esdeveniments. La utilització de models, que són explícits per definició (Epstein, 2008), obliga als investigadors a definir preguntes de recerca i hipòtesis concretes, i a testear-les amb mètodes quantitius i d'anàlisi espacial. Aquestes metodologies poden comprovar la plausibilitat de les hipòtesis d'una manera mesurable.

L'aplicació de la metodologia desenvolupada a casos d'estudi particulars pots suggerir interessants enllaços entre tots els paràmetres definits en aquest model.

Per últim i tal com hem remarcat al text, alguns dels patrons treballats són difícils d'observar sense un marc d'estudi espaciotemporal. Òbviament, són els resultats més interessants a explorar de totes les anàlisis realitzades, ja que no només afecten a la interpretació d'un cas d'estudi particular, sinó també al coneixement general d'un conflicte històric. En aquest cas es trenca radicalment la visió clàssica segons la qual els exèrcits d'època moderna eren rígids i seguien al peu de la lletra els manuals, doncs es veu clarament com els enginyers borbònics van improvisar constantment tot responenent a les diverses casuístiques de cada moment. Així, les interpretacions històriques clàssiques dels diversos setges succeïts que no tinguin en compte tota l'evidència (incloent l'arqueològica) i la integrin en una veritable visió espaciotemporal corren el risc de donar massa rellevància als manuals teòrics, assumint que eren una narració exacte de l'acció militar.

7.2 Esdeveniment de mitja durada

L'anàlisi comparatiu de dues cronologies successives suposa una aproximació metodològica diferent a la dels cas d'estudi anterior.

El conjunt de resultats obtinguts il·lustren un canvi abrupte entre el període del bronze final i primera edat del ferro a la zona de la riba dreta del riu Llobregat, mentre que la riba esquerra les evidències de canvi són més lleus. La distància als corredors naturals és un factor determinants per explicar aquestes dinàmiques. Durant el bronze final els jaciments de la riba dreta estaven situats a llargues distàncies de les rutes de pas. Mentre que a la primera edat del ferro, aquesta dinàmica canvia, la majoria dels assentaments localitzats en aquesta riba dreta es troben ubicats en un dels principals corredors naturals de la zona.

Aquest patró ens permet parlar d'un canvi en el model d'assentament d'aquesta zona, possiblement influenciat per l'augment dels intercanvis comercials durant la primera edat del ferro. No obstant, no tota la zona estudiada presenta aquest model. Part dels assentaments es troben lluny d'aquestes rutes de pas, en llocs més inaccessibles, isolats i clarament més defensables.

Altres autors, en canvi, emfatitzen que aquest canvi del patró d'assentaments a la riba dreta del Llobregat estaria explicat per una cerca de nous territoris amb gran potencial agrícola durant la primera edat del ferro (Asensio i Vilaró, 2005). Aquesta tendència es veu confirmada per l'aparició de grans concentracions de sitges (com per exemple, els jaciments de Mas d'En Boixos (Bouso García et al., 2004), l'Hort d'en Grimau (Mestres et al., 1990) i el Turó de la Font de la Canya (López et al., 2015). Aquests jaciments han estat interpretats com centres d'acumulació d'excedent de gra (Asensio i Vilaró, 2005) hipòtesi que podria explicar aquest nou model. Aquesta dinàmica promouria la ocupació de noves terres per conrear. Així doncs, el nombre de sitges i les seva enorme capacitat suggereixen un canvi en l'estratègia de subsistència de les comunitats.

Aquest canvi en les dinàmiques es combina amb l'existència de jaciments situats en alçada, en zones escarpades. En aquest aspecte, el que hem pogut detectar és que aquests assentaments estan situats en zona amb una alta visibilitat en relació al paisatge circumdant. Bon exemples d'això, són Olèrdola i la Font del Cuscó, els quals són el màxim exponent d'aquest tipus de jaciment (Mestres et al., 2009; Cebrià i Escuer et al., 2003). Es tracta de jaciments que presenten un mur o muralla de tancament de pedra i que ocupen una àrea considerable. Hi ha poques intervencions arqueològiques associades a aquest tipus de jaciments, però tot sembla indicar que es tractaria de jaciments especialitzat.

A la riba esquerra del riu Llobregat no s'observa aquesta variació. És

particularment interessant la poca rellevància que sembla tenir la distància als corredors naturals, tenint en compte que també trobem materials d'origen fenici en aquesta zona. Tenint en compte que no apareixen amb tanta freqüència, els materials són similars als trobats en altres zones on el comerç va ser molt més intens (per exemple, l'Empordà o el sud de França (López Cachero & Rovira, 2012)). Tot i això, podem considerar que la situació no és estable i que hi ha canvis en les dinàmiques d'assentament. Durant la primera edat del ferro sembla haver-hi un especial interès per les zones planes. Aquest podria estar lligat a pràctiques agrícoles més intensives i es podria confirmar per l'aparició d'un major nombre de sitges i estructures d'emmagatzematge (Carlús i Martín, López Cachero, Oliva, et al., 2007). L'agregació d'aquests resultats suggereix que van haver importants diferències entre les dues zones estudiades i les dues cronologies.

Finalment, la interpretació d'aquests resultats posa de manifest que els corredors naturals van jugar un paper molt rellevant durant les cronologies estudiades i són un factor clau a tenir en compte per entendre les dinàmiques de poblament a la zona. Queda clar que les dues àrees mostren una evolució diferent en les dues cronologies, essent la situació a la riba esquerra força més estable que la dreta. És aquesta riba dreta del riu Llobregat la zona d'estudi més interessant; presenta una transformació en el paisatge durant la primera edat del ferro que pot estar relacionada amb una visió més estratègica del territori. El canvi que podem observar en la tria de localitzacions dels jaciments durant aquesta cronologia està clarament enfocada a estar més a prop de les vies naturals de pas i en tenir un millor control sobre el paisatge circumdant. Aquest canvi coincideix amb una documentació de l'increment de l'activitat comercial del NE de la Península Ibèrica en les xarxes de comerç del Mediterrani.

Per últim, aquest anàlisi de durada mitjana ens permet entendre una dinàmica de canvi, ja que més enllà de la situació dels jaciments durant el bronze final i a la primera edat del ferro, ens aporta nou coneixement pel que fa al procés de canvi entre aquestes dues cronologies.

7.3 Esdeveniment de llarga trajectòria

Els resultats generats per aquest model van ser emprats per testejar la validesa dels següents patrons:

1. Patró 1: El nombre de jaciments decreix entre el bronze final i la primera edat del ferro
2. Patró 2: Els jaciments pertanyents al neolític mig presenten una dis-

tribució espacial diferenciada dels jaciments del neolític antic i neolític final

3. Patró 3: En tots els períodes de la prehistòria recent, excepte en el calcolític i la primera edat del ferro, la distància als corredors naturals decreix

En particular, la nostra intenció era examinar si un patró analitzat mitjançant anàlisi espacial i una visió estàtica de les diferents cronologia podia ser igualment detectat quan la incertesa temporal era també incorporada (per tant millorant el tractament de la variable temporal).

Patró 1 El número absolut de jaciments decreix en aquest interval de temps. Contràriament, el model aorístic mostra que la probabilitat d'un nou jaciment s'incrementa. Per aquest motiu, aquest patró pot ser descartat com a conseqüència derivada de comparar unitats cronològiques amb diferents mesures temporals. Es constata, doncs, que un anàlisi espacial tradicional a on cada cronologia és tractada de forma aïllada pot generar seriosos errors d'interpretació quan les duracions de les fases són diferents.

Patró 2 Les figures 6.8 i 6.10 (pàgines 150 i 151) suggereixen que el tret geogràfic dels assentaments del neolític mitjà no són diferents dels d'altres unitats cronològiques. En l'evolució dels dos patrons (nombre de jaciments i distància als corredors naturals), el neolític mig continua el patró vist a les etapes anterior i posterior: un augment en el nombre de jaciments i una disminució en la distància a corredors naturals.

D'altra banda, vam poder detectar un patró diferent pel que fa a la pendent com a variable analitzada. En el model aorístic (figura 6.9, pàgina 150) aquesta diferència està confirmada i en el neolític mitjà aquest comportament és similar al de les cronologies de l'edat del bronze i primera edat del ferro, i no pas a la mitjana dels períodes relatius al neolític. Una plausible explicació pot ser que durant el neolític mig les comunitats existents es traslladessin a altres àrees fora de la nostra àrea d'estudi. Les preferències per establir-se i ocupar l'espai difereixen de les del previs ocupants de l'àrea. El nínxol triat (planes sense massa valor estratègic) corresponia doncs a zones que no havien estat ocupades amb anterioritat. Aquesta possibilitat es veu validada per l'índex de variació (observar figura 6.14, pàgina 154), on el decreixement de la pendent és sobtat i només es detecta a l'inici de la unitat cronològica, en contrast de les variacions com les de l'increment produït al final del neolític mitjà.

Patró 3 Aquest patró és validat en la majoria de períodes estudiats, però es presenten dues excepcions. La primera d'elles és el període del neolític antic epicardial, a on els jaciments no segueixen la tendència com es pot veure clarament a la figura 6.10 (p. 151). Cal destacar que aquest patró en la unitat cronològica anterior i posterior és totalment diferent. Bàsicament, aquests jaciments presenten gairebé la meitat de distància als corredors naturals que la resta de períodes. Una baixa mostra de jaciments d'aquest període pot explicar aquesta dinàmica. De fet, aquest és el període amb un menor nombre de jaciments, així doncs, aquests resultats han de considerar-se inconclusos fins que noves dades puguin validar o rebutjar aquest patró.

La segona excepció la presenta el calcolític i la primera edat del ferro. Aquestes unitats cronològiques mostren un augment en la distància dels jaciments als corredors naturals, com es pot observar a la figura 6.15 (p. 155). Malgrat tot, un anàlisi més exhaustiu de l'índex de variació ens revela que aquesta perspectiva està esbiaixada. En ambdós casos, la tendència no és un canvi sobtat, sinó una augment gradual que ja està present en les unitats cronològiques anteriors. Així doncs, aquests resultat demostren que no és possible confirmar un suposat patró d'assentaments en alçada i un gradual desplaçament cap a les zones més properes als corredors naturals.

A mode de recapitulació d'aquesta secció, volem remarcar que aquest capítol ha descrit com un model espaciotemporal probabilístic pot validar l'existència de canvis en els patrons d'assentament que prèviament s'havien tractat des d'una perspectiva de l'anàlisi espacial clàssic. En particular, aquestes tendències es poden verificar quan els períodes tenen durades similars i és altament improbable fer-ho quan no és dona el cas. Un exemple a mostrar seria el cas de les dades referents als assentaments del bronze final i la primera edat del ferro.

En segon lloc, el nostre estudi ha integrat datacions radiocarbòniques en el punt que poden ser útils, però alhora no crea un biaix en el resultats que afecten als jaciments més ben coneguts. Bàsicament, la nostra aportació suggereix que una comparació sincrònica de variables pot validar una aproximació diacrònica del model aorístic quan aquest és permès pel nombre de datacions radiocarbòniques per a moments específics. No obstant, en casos d'estudi amb amplis datasets de datacions radiocarbòniques seria recomanable crear models aorístics basats només en aquestes dades d'alta resolució.

En tercer lloc, proposem que l'estudi de l'índex de variació es extremadament útil per explorar patrons de poblaments en escales de llarga durada. Quan ampliem l'escala temporal, més enllà de la comparació entre dos períodes, necessitem eines capaces d'analitzar els canvis temporals. Per això, algorismes estocàstics simples, com la simulació de Monte Carlo proposada, poden ser molt eficaços quan es basen en un model aorístic que permeti in-

tegrar la incertesa temporal en una distribució estadística generada en base al coneixement existent.

7.4 Reflexions generals

Els tres casos d'estudis anteriorment descrits presenten problemàtiques similars. Tot i presentar escales temporals diferents, en els tres casos la integració de la dimensió temporal és un eix comú, juntament amb la importància de la dimensió espacial. Com hem pogut comprovar, els mètodes tradicionals en Història i Arqueologia presenten mancances alhora de poder integrar aquestes dues variables.

Les metodologies presentades suposen una millora substancial alhora d'analitzar les dades procedents d'esdeveniments històrics i arqueològics. D'aquesta manera, poden donar una resposta més informada a les preguntes de recerca formulades. L'ús de la modelització espaciotemporal com a eina de treball en els tres casos ens ha permès assolir objectius que d'una altra manera no haguessin estat possibles. De fet, en els tres casos d'estudi la modelització temporal ha esdevingut clau per respondre les preguntes de recerca.

És per aquest motiu, que creiem que una de les propostes de futur més interessants per les disciplines arqueològica i històrica passa per normalitzar l'ús quotidià de sistemes d'integració de fonts diverses de dades, incloent la seva incertesa. D'aquesta manera es podrien crear marcs de treball formals en els que sigui possible avaluar hipòtesis de treball tot contrastant-les amb l'evidència empírica.

Capítol 8

Conclusions

Al llarg d'aquest treball hem aplicat als nostres casos d'estudi una col·lecció de metodologies d'anàlisi espaciotemporal que al nostre parer milloren substancialment l'ús de Sistemes d'Informació Geogràfica en contextos arqueològics. Aquest fet és especialment rellevant en quant als escenaris explorats, ja que no havien estat analitzats prèviament amb aproximacions de tipus quantitatiu. Així doncs, els resultats han estat altament positius. La utilització d'un marc de treball basat en la modelització espaciotemporal ens ha permès aconseguir els objectius plantejats i respondre a les preguntes concretes de treball.

8.1 Resultats dels casos d'estudi

A continuació farem una presentació de les conclusions per cada cas d'estudi. En tots ells hem emprat metodologies pròpies de l'anàlisi espacial, però adaptades a cadascuna de les escales, preguntes i casuística de recerca de cada escenari.

8.1.1 Cas d'estudi 1: Esdeveniment de curta durada

En el cas de la modelització del setge de la ciutat de Barcelona a l'estiu de l'any 1714, l'aplicació d'un model per integrar els diferents tipus de variables ha aportat molt bons resultats. Podem afirmar de manera general que la metodologia emprada ha estat útil per respondre a les dues preguntes d'investigació que fèiem al principi de la recerca.

Els resultats ens han aportat un millor coneixement sobre quines zones i fases d'un setge eren més perilloses pels atacants d'una ciutat d'època moderna. Al mateix temps, també hem pogut analitzar per què trobem divergències

entre els manuals de l'època, els plans d'atac, i les modificacions efectuades durant l'execució dels treballs. En aquest sentit, els resultats han aportant llum sobre la relació entre l'elevat número de baixes i la localització espacial d'aquestes. Tradicionalment les zones més perilloses s'havien associat a l'atac al camí cobert, però l'estudi demostra que la majoria de baixes es produeixen durant tots els treballs que es desenvolupen per donar suport al setge (establiment de bateries, eixamplament de trinxeres, etc.). És clar que sense tenir en compte simultàniament la dimensió temporal i espacial de les dades aquesta informació patró hagués estat impossible d'identificar.

D'altra banda és remarcable la importància d'aquest tipus de metodologies en casos d'estudi històrics i arqueològics. La possibilitat d'analitzar quantitativament esdeveniments simultanis millora qualitativament la interpretació dels resultats, sobre tot en casos com el que hem presentat. Molt sovint en disciplines com la història o l'arqueologia, es tendeix a presentar el conjunt de les dades i a interpretar-les sense un marc de treball basat en models formals ni una plataforma capaç d'integrar dades dels dos tipus (històriques i arqueològiques). La metodologia proposada pot ajudar a realitzar interpretacions més informades i més integradores tot donant resposta a ambdós problemes.

8.1.2 Cas d'estudi 2: Esdeveniment de durada mitjana

Pel que fa a l'anàlisi comparatiu entre les dues ribes del Llobregat durant el bronze final i la primera edat del ferro, l'anàlisi espacial ens ha permès entendre millor els canvis entre els models de poblament de dos cronologies concretes en zones adjacents. Hem analitzat quantitativament les variables geogràfiques, tot tenint en compte la recerca realitzada a la zona i el context històric.

L'anàlisi dels corredors naturals ha estat un element bàsic per a la caracterització dels patrons de poblaments. Aquest tipus d'anàlisi ha estat realitzat en altres casos d'estudi (Murrieta-Flores, 2012) amb resultats positius per explicar els patrons de mobilitat i poblament.

En aquest cas la identificació de corredors naturals ha estat un puntal clau de la nostra recerca. Juntament amb l'anàlisi del registre arqueològic, ha estat possible donar context als nostres resultats i situar en un marc molt més ampli els patrons detectats. Les dinàmiques de comerç mediterrani que es donen a partir de la primera edat del ferro, es veuen reflectides en els localització dels assentaments i, al mateix temps ha estat possible entendre millor els processos que van portar les dues regions a tenir una dinàmica similar tot i partir de d'escenaris inicials radicalment diferents.

8.1.3 Cas d'estudi 3: Esdeveniment de llarga trajectòria

En el nostre tercer cas d'estudi la pregunta de recerca estava encaminada a entendre com es pot estudiar l'evolució dels patrons de poblament en una zona determinada al llarg de gairebé cinc mil·lennis. A diferència del primer cas d'estudi, no comptàvem amb fonts escrites, ni tampoc amb un gran número de datacions de c14 com en altres estudis similars. Per contra, ens havíem de recolzar en dades fragmentades que només ens van permetre definir datacions relatives basades en la cultural material existent als diferents jaciments. En aquest sentit podríem dir que el cas d'estudi presentava similituds amb el primer escenari relatiu al setge de Barcelona, doncs un requeriment d'aquesta recerca era respondre al repte de la integració de dades d'origen divers.

En aquest context d'anàlisi d'un esdeveniment de llarga durada, un model aorístic ha estat la millor solució per donar resposta a la problemàtica inicial i per incloure la incertesa de les dades. El model aorístic defineix per cada esdeveniment una distribució de probabilitats en absència de passos de temps de caràcter discret.

Bàsicament, gràcies a aquest model probabilístic espaciotemporal hem pogut analitzar i detectar els canvis en els patrons de poblament prehistòric. Aquesta aproximació ha demostrat la seva vàlua en casos com el que hem examinat, a on la variable durada dels diferents períodes feia discutible un anàlisi monolític de tots els jaciments pertanyents a una mateixa duració cronològica.

Així, en aquest cas el model geogràfic va ser el primer pas cap a una anàlisi més completa. El model formal, que per definició ens permetia testejar hipòtesis i idees suggerides prèviament per altres treballs, va ser complementat amb un tractament probabilístic de la variable temporal. Donada l'escala temporal i el tipus de dades a integrar, la millor solució per respondre la nostra pregunta va ser la creació d'un model aorístic.

8.2 Assoliment d'objectius

Tal i com hem presentat en el capítol 2, aquesta tesi presentava els següents objectius a aconseguir:

- Adaptar la metodologia existent a les peculiaritats dels casos d'estudi i de les seves variables espacials i temporals. És a dir, tenint en compte el nostre registre volíem desenvolupar una metodologia que permetés aproximar-nos simultàniament als patrons espacials i temporals.

- Aportar una millora a les tècniques d'anàlisi espacial incloent la incertesa com eix de les anàlisis. D'aquesta manera, volíem fer un pas més enllà i incloure les variables temporals en el model d'estudi. Aquest objectiu era de vital importància, ja que permetria aportar una dimensió temporal. El principal problema que presenten els SIG és que la seva capacitat d'anàlisi serveix per estudiar una imatge estàtica, no un esdeveniment continuu.

Per tot allò exposat anteriorment, creiem que els hem assolit àmpliament. Pel que fa al primer dels objectius, tant en el primer, segon i tercer cas d'estudi hem treballat amb fonts de diferent procedència (fonts escrites, arqueologia, coordenades espacials i datacions de c14) que han hagut d'estar integrades dins un entorn de treball comú per tal de realitzar els anàlisis necessaris. Per tant, ha quedat palesa la importància d'integrar correctament totes les fonts disponibles, per tal d'aconseguir uns resultats el més informats possibles.

Pel que fa al segon objectiu, la incertesa ha estat integrada en el primer i tercer cas d'estudi. Tot i la diferència en l'escala temporal, en tots dos casos s'ha inclòs en el model geogràfic. Cal remarcar, que en el tercer dels casos vam desenvolupar un model aorístic incloent les datacions de c14 a mode de calibració del model.

Finalment, voldríem remarcar de cara a futurs treballs la importància de comptar amb un aparell estadístic on incloure la incertesa de les dades. Normalment aquest factor no es planteja en la majoria d'interpretacions ni anàlisis. Considerar-la una variable explícita, milloraria de manera considerable els resultats de la recerca.

8.3 Propostes de recerca futures

Després d'haver exposat les conclusions tant a nivell metodològic com a nivell dels diferents casos d'estudis volem fer un breu esbós sobre les possibles futures direccions de recerca generades per aquest projecte de tesi. Creiem haver demostrat que sovint l'ús d'anàlisi espacial en l'estudi del passat requereix la integració de la incertesa temporal inherent al registre arqueològic, sigui quina sigui l'escala d'anàlisi. Més enllà dels Sistemes d'Informació Geogràfica, aquesta integració de la incertesa de les dades en el propi anàlisi pot donar molt bons resultats de cara a la generació de resultats i a la millora de la interpretació dels diversos casos d'estudi.

Poques vegades en publicacions relacionades amb casos d'estudi històrics i arqueològics trobem les dades que contenen incertesa presentant-la de manera

explícita. En els darrers anys s'han presentat propostes interessants (Earl et al., 2013; Kolář et al., 2015; Crema et al., 2010) que proposen integrar aquesta variable dins de les anàlisis i resultats a presentar. Aquesta corrent s'emmarca en la cada vegada més important presència de metodologies quantitatives en l'estudi del passat. Aquest increment es manifesta a través de l'existència de grans projectes de recerca a escala europea que exploren precisament aquesta arqueologia basada en models formals, com podrien ser SimulPast, Euroevol, EPNet o Spatial Humanities: text, GIS & places¹.

En aquesta línia, i per millorar les metodologies existents, un altres pas en aquesta direcció seria considerar l'ús de Simulacions Basades en Agents. Aquestes permeten crear models a partir d'unes variables per veure la seva evolució amb el pas del temps. És un següent pas lògic després d'haver explorat un cas d'estudi mitjançant l'anàlisi espacial.

Línies interessants a explorar de cara a treballar amb dades fragmentades, com són les que ens ocupen, són les xarxes i la visualització de dades. En ambdós casos, aquestes dues disciplines procedents de les ciències dures, poden aportar molta qualitat a la interpretació de les dades.

Per últim, i pel que fa l'aplicació de les metodologies desenvolupades en els treballs presentats, una extensió interessant seria l'estudi a petita escala dels patrons espaciotemporals observats en un jaciment arqueològic concret. Això permetria enllaçar els diferents usos observats amb les diferents fases. En un futur esperem poder treballar en aquesta línia tot fent servir com a laboratori de proves les dades procedents de la necròpolis del bronze final i primera edat del ferro de Can Piteu Can Roqueta.

¹per a més informació consultar <http://simulpast.es>, www.roman-ep.net, <https://www.ucl.ac.uk/euroevol> i <http://www.lancaster.ac.uk/fass/projects/spatialhum.wordpress/>.

Apèndix A

Còpia d'articles publicats

A.1 The Spatiotemporal Model of an 18th-Century City Siege (capítol 4)

The Spatiotemporal Model of an 18th-Century City Siege

Social Science Computer Review

1-17

© The Author(s) 2014

Reprints and permission:

sagepub.com/journalsPermissions.nav

DOI: 10.1177/0894439314558559

ssc.sagepub.com



Xavier Rubio-Campillo¹,
Francesc Xavier Hernández Cardona²,
and Maria Yubero-Gómez³

Abstract

The importance of terrain in warfare has often encouraged an intense relation between military conflicts and the use of techniques designed to understand space. This is especially relevant since the modern era, where the engineers who built and assaulted city defenses recorded the events with diverse documentation, including reports, diagrams, and maps. A large number of these sources contain spatial and temporal information, but it is difficult to integrate them into a common research framework due to its heterogeneity. In this context, geographical information science provides the necessary tools to explore an interdisciplinary analysis of these military actions. This article proposes a new approach to the study of sieges using a spatiotemporal formal model capable of integrating cartography, archaeological, and textual primary sources and terrain information. Its main aim is to show how concrete research questions and hypotheses can be explored using a formal model of this type of historical events. The methodology is applied to a particular case study: the French–Spanish siege of Barcelona that occurred in 1714. The protagonists faithfully recorded the development of the action, providing essential information for the model. Besides, different authors depicted the event as the paradigm of a city siege. For this reason, the model is also used to explore why real actions deviated from theoretical guidelines, clearly defined in different manuals. We use this scenario to explore two issues: (a) why the attackers chose to assault a particular city sector and (b) the factors that explain the casualties of the besiegers. We conclude that we need methodological tools capable of integrating heterogeneous information to improve the understanding of siege warfare that affected not only military conflict but also the shape of European urban landscapes.

Keywords

spatial analysis, War of the Spanish Succession, Vauban, geographical information science, military history

¹ Barcelona Supercomputing Center, Computer Applications for Science & Engineering, Barcelona, Spain

² Universitat de Barcelona—DIDPATRI, Barcelona, Spain

³ Universitat de Barcelona—SERP, Barcelona, Spain

Corresponding Author:

Xavier Rubio-Campillo, Barcelona Supercomputing Center—Computer Applications for Science & Engineering, C/ Gran Capita, 2-4, Nexus I, Room 202, Barcelona 08034, Spain.

Email: xavier.rubio@bsc.es

Introduction

The introduction of geographical information systems (GIS) in social sciences and humanities has gradually increased during last decades, especially in the fields with stronger spatial dependencies, like archaeology (Conolly & Lake, 2006; Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2010). Historical research has also been involved in some of these advances in spatial technologies (Knowles, 2006; Knowles & Hiller, 2008). However, these formal models are still not as widely spread as one could expect, given the large amount of sources involving spatial information. In particular, it is surprising that the study of military conflicts, the human activity that has generated the largest volume of maps and other spatial information in the past, seldom uses this type of approach (Nolan, 2009).

The 17th and 18th centuries saw an exponential increase in the documentation generated by military actions and, in particular, city sieges. We claim that the integration of cartography and other sources into a spatiotemporal formal model would increase the understanding of these actions as well as the relation between cultural, geographical, and historical variables that could explain its impact on modern era societies.

In particular, the comparison between real actions and treatises provide new insights into the reasons why a besieger deviated from theoretical guidelines. This is specially interesting with the homogenization of siege techniques done by Sébastien Le Prestre, Marquis of Vauban (Barros, Salat, & Sarmant, 2007). The principles listed by Vauban were considered as the basis for besieging any fortress, but as other authors have pointed out the commanders did not always follow them (Ostwald, 2007).

The aim of this work is to present a formal model that captures the spatial and temporal dimensions of data generated by an 18th-century siege. We suggest that this quantitative approach could be able to answer particular research questions and test hypotheses, moving from the classical descriptive models of historical research to the exploration of formal models, with all its added benefits (see Epstein, 2008, for this discussion).

We show how the design of a formal model of the siege created with GIS improves our understanding of the role of cities in modern era warfare. As an example, we explore different hypotheses formulated for a particular case study: the French–Spanish siege of Barcelona (1713–1714), epilogue of the War of the Spanish Succession, one of the most important conflicts of the century.

The next section explains the context and development of this siege, defining the working hypotheses and the spatiotemporal model developed to test them. This is the starting point for the application of different analysis techniques in the third section. To conclude, results are discussed and put into context of the wider goal: the development of formal models designed to explore the history of warfare.

Modeling the Siege of a City

A large percentage of European cities and fortresses were besieged during the 17th and 18th centuries. This constant threat to vital strategic locations forced the states to invest efforts not only on the defenses but also on the theoretical aspects that controlled this activity. Particularly important was the creation of social structures capable of informing engineers on the design and execution of siege plans. The theory built by these specialists created a unified method to besiege any city of Europe for at least 200 years. Despite the fact that the phases of a siege seemed extremely deterministic, reality was certainly different. The very same engineers did not follow the theoretical guidelines in the field for complex and varied reasons related to the geographical, cultural, and temporal variables of the particular event.

The dynamics of these historical events make them a perfect target for spatiotemporal analysis. First of all, there was a constant evolution of solutions at different scales (from command and

control to logistics and technology), so the comparative analysis of sieges from different decades could be extremely interesting. Second, the documentation generated by a siege of the 18th century can be used to create a geographical model, where temporal variables can be also introduced (phases of the siege, daily casualties, etc.). Finally, it is possible to create a formal model that can be used to answer particular questions related to the adaptation of the theoretical guidelines to a particular siege.

The relation between geography, time, and the decision-making process of the engineers and commanders is too heterogeneous to be understood by using just one type of primary source. A formal model combining spatial and temporal variables is the best choice to integrate all available data into a tool that can be used to explore these complex dynamics. We focus the study on two research questions: (a) why a particular zone of the wall was chosen to initiate formal siege? and (b) what is the relation between attacker casualties and the phases of a siege? In order to do that we will define a particular case study, one of the most important (and best documented) sieges of the period.

The Historical Event

The city of Barcelona, capital of Catalonia (Northeastern Iberian Peninsula), played a major role during the War of the Spanish Succession. The conflict was initiated with the death without heirs of the Spanish king, Charles II. The throne was given to Philip d'Anjou, nephew of Louis XIV of France. A Grand Alliance lead by England and Austria opposed the new king.

In 1705, the Catalans rebelled against Philip while supporting the allied pretender, Charles of Hapsburg. Barcelona became the key of the allied power in Iberia, suffering two sieges. In 1713, most contenders of the war signed the peace, except for Austria and Spain. Charles (now emperor) was unable to support the Catalans, and a French–Spanish army gradually conquered the rebel zone. At the same time, the Catalan government created a new army from veteran soldiers and based the defense on Barcelona (Hernández & Riart, 2007).

The Bourbon army was unable to initiate a formal siege until the arrival of major French reinforcements commanded by the duke of Berwick, on July 1714. The engineers, commanded by Dupuy-Vauban (nephew of the Marquis of Vauban) and the chief engineer of Spain, Próspero de Verboom, opened the trench in the next days (Corbalan, 1991). The 62-day siege finished on September 11 with a high cost for the besiegers (at least 8,000 casualties).

The fact that Philip considered the Catalans as rebels is decisive to understand the events. The usual ending of an 18th-century siege was a negotiated surrender once a bastion was conquered, except for rebel cities that did not deserve mercy. The attackers and defenders knew that surrender was not an option, and for this reason Berwick not only had to conquer a bastion but assault the whole city 2 times (de Amaury, 1714; de Castellví, 1999).

The formal siege followed the theoretical guidelines proposed by Vauban: three parallels, breaching fire combined with ricochet to destroy defenses, and a general infantry assault. However, some events forced a change to the plan attack. The first assault was a complete failure, as attackers were repulsed from the breaches. A new tactic was then deployed, based on the systematic destruction of the walls as a prelude to a massive assault. Mines did not play a major role during the siege due to heavy rains, and Berwick was forced to rely on artillery batteries. The final assault, executed on September 11, 1714, was so costly that Berwick had to accept the surrender of the rebel city without sacking it (the standard punishment that Philip V applied against rebel cities, executed at Lleida and Xàtiva).

The capture of Barcelona was extensively studied in different Bourbon military treatises (Ossorio, 1730). Interestingly enough, today the final assault on the city is considered the National Day in Catalonia. This fact shows how a city siege can leave a deep imprint on both sides of the trench (Anguera, 2008; Bruguera, 1871; de la Llave y García, 1903; Sanpere y Miquel, 1905).

The Components of the Model

The action can be used to explore the complexity of a Vaubanian siege. Different documents, both from besiegers and besieged, form a coherent narrative that is confirmed by archaeological evidence. We will not go into detail because the different sources have already been analyzed in previous works (Hernández & Riart, 2007; Hernández & Riart, 2014; Riart, Hernández, & Rubio-Campillo, 2010), and this research is based on their results. In any case, existing data can be summarized as follows:

- Cartography—A number of archive maps were used for this task, from Cartoteca de Institut Cartogràfic de Catalunya, Gallica Bibliothèque Nationale de France, and Catálogo Colectivo de la Red de Bibliotecas de los Archivos Estatales. In particular:
 - Different maps created before and after the siege, useful to recreate city defenses.
 - Maps of the siege drawn by Verboom and Dupuy-Vauban's lieutenant Lozieres d'Astier.
- Textual sources—Most descriptions can be found in Corbalan (1991); additional texts on Gallica-Bibliothèque Nationale de France, Biblioteca Nacional de España, and Arxiu Històric de la Ciutat de Barcelona:
 - Three diaries of the besiegers, reporting casualties and works: (a) Journal du siège de Barcelone commandé par Monseigneur le Maréchal duc de Berwick, généralissime de l'armée des Deux Couronnes en 1714, (b) Détail du siège de Barcelonne, and (c) Le Siège de Barcelone en 1714 raconté par un arlésien a un arlésien. The first document provided the majority of information, including the list of casualties and the daily works. The second was used to compute the list of officers who were killed or wounded, while the third account was used to confirm diverse data.
 - Two descriptions of the city walls: (a) Explication sur la fortification de la ville de Barcelonne and (b) (written by Verboom) Memoria sobre el estado de las fortificaciones de Barcelona y su descripción detallada. These extremely detailed descriptions of the defenses were used to build the model, including widths and heights of every wall sector and bastions.
 - The gazetteer regularly printed inside the city: *Gazeta de Barcelona—Diario del Sitio de Barcelona*. This source is valuable to compare the activities of the besiegers with the reaction of the defendants of the city.
 - A number of historical studies on the siege (de Castellví, 1999; Molas, 2007; Ossorio, 1730).
- Archaeological evidence—Different works have been published as technical reports by the Servei d'Arqueologia de Barcelona and the Servei d'Arqueologia i Paleontologia de Catalunya:
 - Excavation of a city portal in the zone of the siege (Gea Bullich, 2006).
 - Ammunition (>100 projectiles) and impacts found in the excavation of a 19th-century market (Mercat del Born).
 - Archaeological excavation on a sector of the defensive perimeter of the city (bastion, ditch, and counterscarp in the current market of Sant Antoni).

All these materials were used to generate the spatial model, divided into two components: (a) the city defensive perimeter and (b) siege works. It is important to note that the model is mainly focused on the besieger as is required for our research questions. The casualties of the besieged have been excluded from the analysis because they are not relevant, and their actions (like sorties and artillery fire) are already included (in terms of casualties and defensive intensity, as we will see). Additionally, they have been extensively studied in other works (Hernández & Riart, 2007; Riart et al., 2010).



Figure 1. A sample of the maps used to georeference the city defenses: (a) city map: “Le Plan de Barcelonne et de ses environs. Tres exactement Levés sur les Lieux en 1706,” drawn by Nicolas de Fer (<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8492417t>) and (b) “Plan des attaques de Barcelonne en 1714,” drawn by the second chief engineer of the French army, Lozieres d'Astier (<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b7100421p>).

The City Defensive Perimeter

Barcelona was surrounded in 1714 by a medieval wall that had been widened and improved with the addition of 10 bastions. The system was obsolete because the curtain was not protected by any external earthworks. Nevertheless, the average siege duration of the city for the period is close to 60 days (the city was besieged 4 times in less than 20 years: 1697, 1705, 1706, and 1714). Some documents discuss the reasons for this length (a usual siege would last around a month), providing different explanations:

- the presence of Montjuïc, a fortress in a steep hill near the city (200 m of elevation);
- the quality of the materials used to build the walls; and
- the possibility to build new entrenchments behind the wall in case of breach.

The georeferencing of the maps generated by different sieges (Figure 1) and the descriptions written in 1713 and 1715 were used to define the size and shape of the defensive system (medieval wall, bastions, ditch, and covered way). The results can be seen in Figure 2. Existing cartography from 18th and 19th century was also used to modify the current digital elevation model of the environment, adjusting the coastline to the one existing in 1714.

Siege Works

The documentation generated by the siege of 1714 was used to define and georeference the different earthworks made by the besieging army. A relational database was created from these data, including these entities:

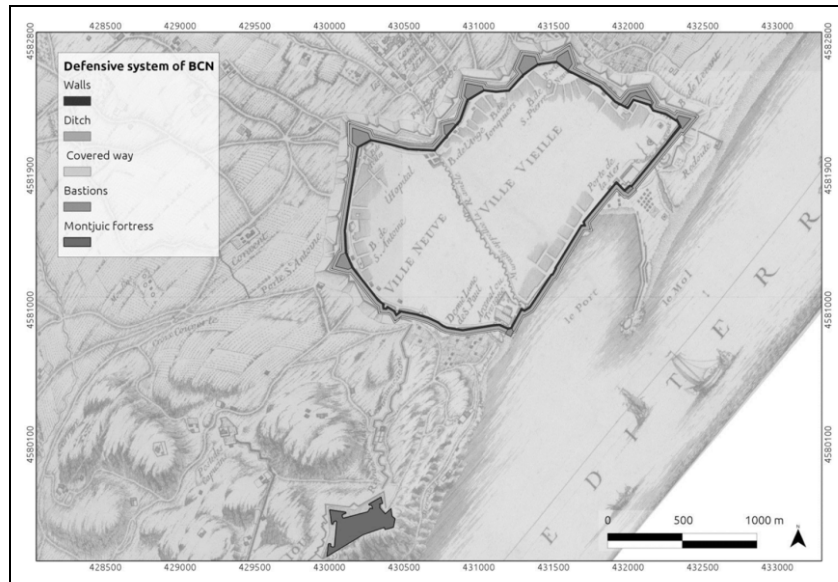


Figure 2. Defensive perimeter of Barcelona during the siege of 1713–1714, based on the georeference of different maps and text descriptions. The southern part is controlled by the fortress of Montjuich, built on top of a hill.

- Regiments—units participating in the siege;
- Soldier Casualties—daily report of soldiers killed/wounded;
- Officer Casualties—daily report of officers killed/wounded, including rank and regiment;
- Works—spatial table defining the area where every earthwork took place (the three parallels, attacking trenches, batteries, etc.); and
- Activities—relation of earthworks and the temporal span of its construction.

This database provides a summary of the action as follows:

- In all, 27 French regiments and 10 Spanish regiments actively participated in siege works, for a total of 70 battalions.
- Around 8,000 soldiers, 400 officers, and 17 engineers of the besieger army were killed or wounded.
- The formal siege lasted 62 days (July 12–September 11, 1714), with an average rate of 135 casualties/day including two major assaults.
- The artillery train consisted of 70 siege guns and 20 mortars.

The temporal sequence of activities is defined in Table 1. The temporal phases of the siege can be combined with the spatial dimension of the earthworks. Figure 3 shows the location where the activities of the besieging army took place.

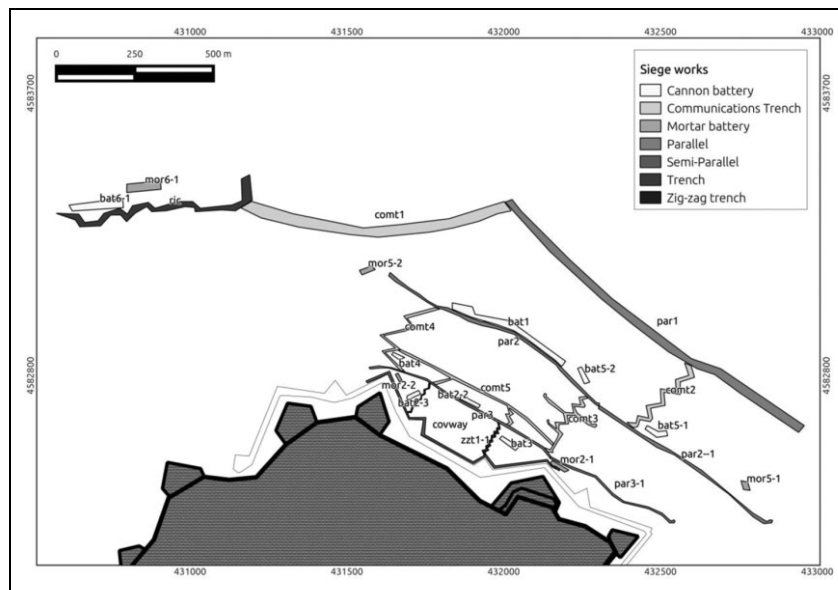
Analyzing the Model

The research questions were explored designing three experiments. The first one explored the vulnerability of the different sectors of the wall. The main goal is to understand why the 1714 attack was developed in the Northern zone of the city, an area that was never chosen in previous attempts. The

Table 1. Siege Phases.

Day	Activity
1	Opening of the trench (first parallel)
4	Second parallel
14	The great battery (>60 guns) located in the second parallel begins to breach the city walls
15	Third parallel
19	Capture of the covered way
26	A second battery (>20 guns) in the third parallel begins to fire at close range at the defenses
32	First general assault, focused on the bastions near the largest breach
35	The assault is repulsed
36	A semiparallel is built along the covered way
37	New batteries are deployed; second and third parallels are extended
46	The third set of batteries begins to fire to create new breaches
62	Final assault to the city

Note. Each day is shown as an absolute date, starting with July 12, 1714 (day 1) and ending the 62nd day (September 11, 1714). The activities were usually performed from 19:00 to 05:00 of the next day.

**Figure 3.** Earthworks developed by the besiegers during the siege.

other two experiments are focused on the impact of two variables (distance and type of work) in besieger's daily casualties.

Defensive Support

Modern-era fortresses were built to avoid blind spots, where attackers could create and penetrate a wall breach avoiding the fire from the defenders. For this reason, the shape of the walls was designed looking for optimal support between bastions and the curtain in any zone of the perimeter (Duffy,

2006). Our hypothesis is that the besieging army chose the particular zone of the attack based on the perception of weak support in the sector. The memories of the besieging commander (the duke of Berwick) said that this is why he chose to attack in this zone, but he did not specify the reasons for this weakness, or why previous sieges decided to assault through other areas. Certainly, the ideas about what this weakness means varied over time, as can be observed in theoretical treatises. For this reason, different attacks to the same city could choose different zones, depending on who and when besieged the location.

To test this hypothesis, we created an experiment designed to compute this support for any sector of the defensive perimeter:

1. The heights of the defensive works (walls, bastions, and covered way) were added to the digital elevation model. The ditch volume was deducted from the outcome, thus creating an elevation map of defenses.
2. The perimeter of walls and bastions was divided into 50-m sectors. A new point vector map was created, containing the central location for each sector.
3. The line of sight to each of these points was calculated at half the height of the wall (around 6.5 m). The elevation was chosen assuming that a potential breach would have approximately this height (as the top of the wall would collapse under artillery fire). This step provides, for every sector of the wall, a map of the geographical spaces from where a defender could fire at soldiers assaulting the breach.
4. Computation of the number of perimeter locations within line of sight to each point, from for two different distances, based on experimental studies (Allsop & Foard, 2007; Hughes, 1997; Miller, 2010):
 - effective artillery fire (300 m) and
 - effective musket fire (80 m).

The execution of this algorithm for each sector of the defenses generated an intensity value for the two different types of defending support.

Relation Between Casualties and Distance to Defenses

The second aim of this article is to understand the relation between the phases of a siege and the casualties of the besiegers. The underlying idea is that a high rate of casualties could be responsible for the deviation observed between theory and practice. In particular, the French–Spanish engineers chose to extend the second and third parallels in the middle of the 1714 siege, changing the entire shape of the siege works after the first failed assault.

A logical hypothesis is that the number of casualties is strongly related to the distance between siege works and defenses. For this reason, the following experiment was run:

1. Extraction of the centroid of every siege work. The result is the central location of the area where this activity took place.
2. Computation of the distance between every centroid and the covered way. No work took place in the ditch except for assaults and mines that are not relevant for this study.
3. A Standard Query Language (SQL) query was executed to get the list of works that were being built every day (Date & Darwen, 1996).
4. Finally, the average daily distance between the besieging works and the covered way was calculated.

Relation Between Casualties and Type of Work

A second hypothesis is that casualties are related to the type of work soldiers were executing. In order to explore it, the next algorithm computes the daily average of casualties during the days that a work was undertaken:

1. Extraction of the list of days when a work was built and collected in the database.
2. An SQL query was executed to determine the list of casualties for each day.
3. A daily casualty average was computed for every earthwork, combining the information from the previous steps.

Results and Discussion

Results generated by the three experiments served as a basis for reinterpreting known information about the siege.

Defensive Structure of the City

Figure 4a and b depicts the intensity of defensive support from the first experiment for (a) Artillery direct fire and (b) Musket fire.

The perimeter was split into the following four sectors in order to clarify results (see Figure 5):

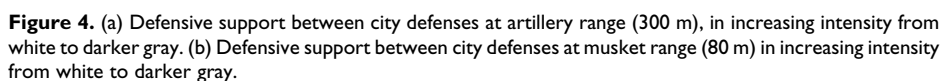
- Castle sector—The zone near the castle of Montjuïc.
- Inland sector—The perimeter facing the mountains that surround the city from the West.
- Coast Sector—Wall facing the sea.
- North Sector—This area comprises the walls and bastions facing the North. This was the zone attacked in 1714.

It is worth noting that the city was besieged 4 times in a period of 20 years: 2 times from the Castle Sector (1705 and 1706), 1 time from the Inland sector (1697), and 1 time from the North sector (1714). It is interesting to understand the reason for this diverse set of choices, as the French army was the besieger in three of these four events.

At a first glance, the study of artillery range shows that there are long curtain sectors lacking strong support (see Figure 4a). The Castle sector seems the weakest zone, as only the areas near the bastions are well defended. However, the attacker was forced to control the castle of Montjuïc before assaulting this curtain. This is the reason why the optimal fortification of this side of the perimeter was not especially relevant, Montjuïc being the geographical key to a potential assault in this sector.

The Inland sector had five bastions, being the best protected area in terms of defensive support. On the other hand, the terrain in the Coast sector assured that no attacker could dig trenches or deploy batteries as the sandy soil would easily flood. As a result, both areas were difficult to attack due to the terrain and defenses. Finally, the North sector was also well protected, although it was the zone that the French–Spanish engineers decided to attack in 1714.

The second analysis shows that musket support is also weak in the entire perimeter (Figure 4b). The comparison of the two results shows that the most relevant divergences between artillery and musket support are observed in the North sector. The left and central bastions were able to protect the curtain at artillery range, but soldiers equipped with muskets could not fire over attackers in this zone. This issue is related to the obsolescence of the city defenses that were built during mid-17th century. During these years, guns seemed the best option to reject the attackers; in contrast, by the end of this century, engineers became aware of the extreme importance of musket fire when



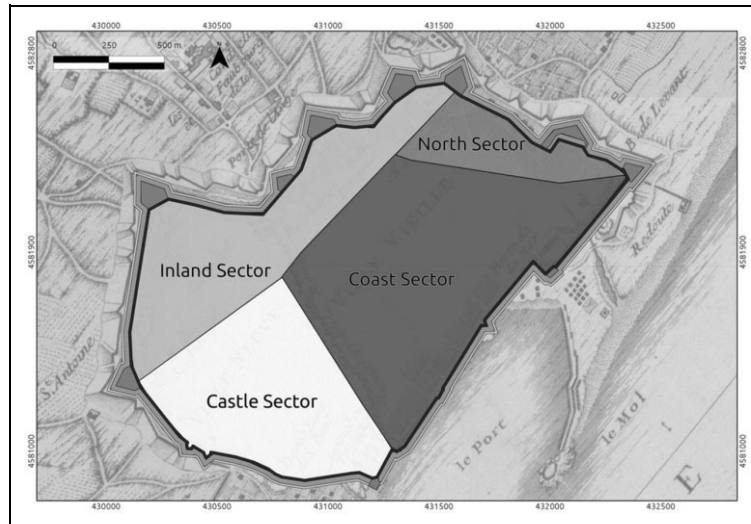


Figure 5. Defense perimeter split in four sectors. This classification is based on the descriptions of city walls written during sieges undertaken before 1714.

defending batteries were destroyed by the besiegers. Experience and technical advances forced a shift on the cultural paradigm used by engineers to choose weak defensive spots. For this reason, 18th-century guidelines suggested that the distance between bastions should not be larger than 80 m (Duffy, 2006, p. 45), while the bastions of the North sector were almost 150 m apart.

The fact that the siege of July 1714 was the first attempt to attack Barcelona from this sector is interesting, as previous sieges developed in Castle and Inland sectors. The experiment provides new insights into the decision of the engineers; the new plan attack was the consequence of the evolution in attack systems, which left old defenses like the ones in Barcelona obsolete. As a result, a zone that was well protected for the military culture of 1700s was seen as vulnerable for 1714 engineers, although no substantial changes were made neither in the attack techniques nor in the city defenses.

The Origin of Besieger's Casualties

Figure 6a–c shows the relation between daily casualties, siege phases, and the distance from attacking activities to defenses. The information resulting from these three analysis allows for an integrated study of spatiotemporal variables.

The first figure depicts the evolution of the siege, showing how the average working distance to covered way (y-axis) decreases over time (x-axis). The second figure links the casualties to the different phases of the siege. In both figures, the x-axis displays the temporal development of the siege from Day 1 (opening of the trench) to Day 49, where earthworks were finished and preparations for the final assault began. The final assault has been deliberately left out of the graphics, as the high number of casualties would distort the entire shape, and we are interested on the siege works developed before this attack.

Finally, the third figure combines this information, relating the casualties (y-axis) to the average distance to defenses (x-axis).

The interpretation of this information allows to define four different temporal phases:

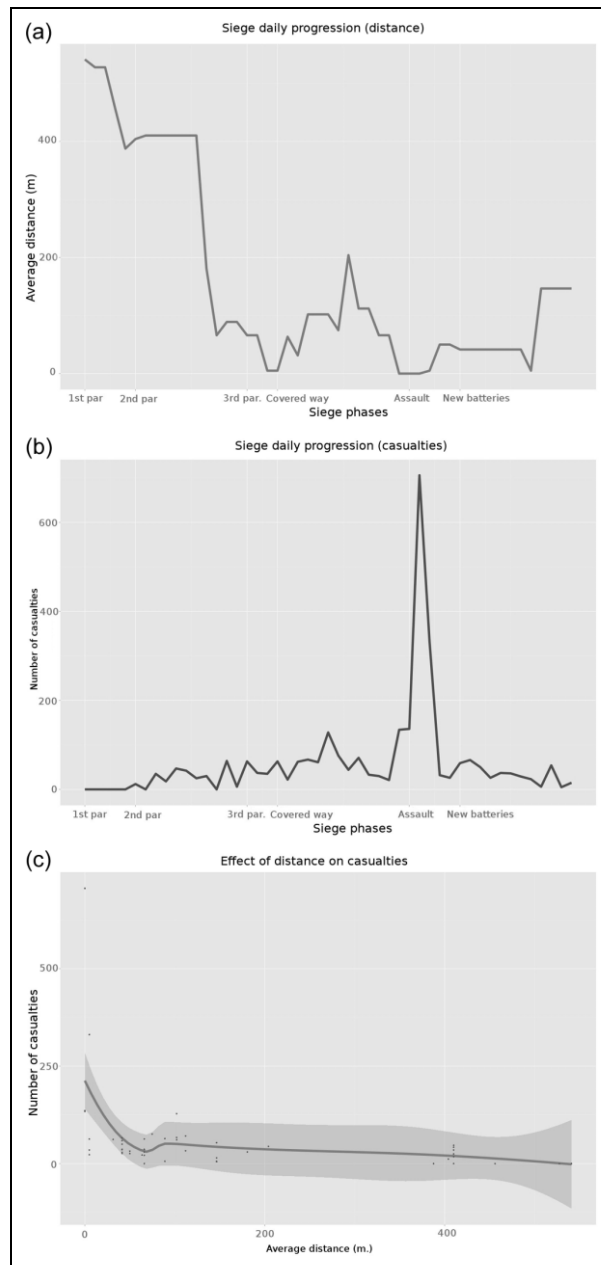


Figure 6. (a) Evolution of distance to the covered way; x-axis defines the temporal scale of the action, marking the beginning of the activity for the different siege works. (b) Evolution of daily casualties; x-axis defines the temporal scale of the action, marking the beginning of the activity for the different siege works. (c) Relation between daily casualties and average distance to defenses.

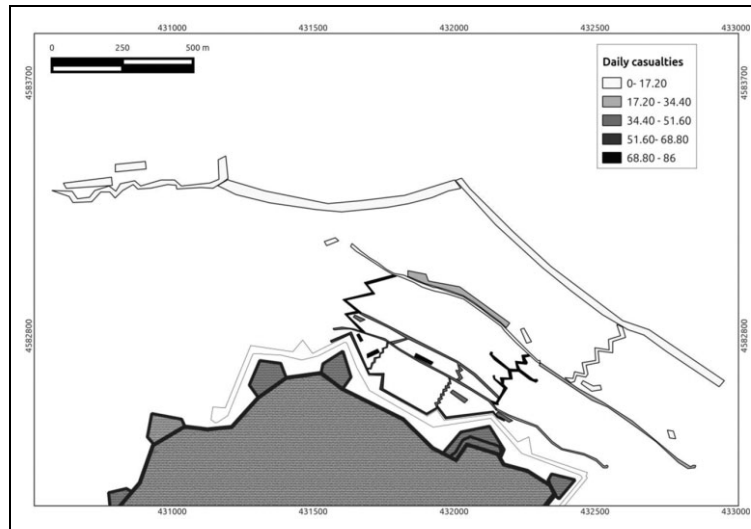


Figure 7. Average casualty rate for each type of siege work. The dark tone shows the average casualties for every siege work, from White (less risky) to Black (most dangerous areas).

1. Creation of the three parallels, when casualties gradually increased.
2. The capture of the covered way did not generate high casualties, although it was considered as the most dangerous action of any siege (Chandler, 1990). The reason is that the defenders abandoned the covered way because it was in very bad shape since the beginning of the siege.
3. The failed assault of August 13–15 had a high toll for the attacking forces, concentrating most of the casualties before the final attack.
4. The attackers extended the area of siege works after the failure. The idea was to widen the attack front through the creation of additional breaches. In this way, the besieger army could be able to use its numeric superiority assaulting different zones at the same time. This phase was not particularly dangerous because works developed far from the walls.

The third diagram displays an almost lineal relation between distance and casualties from 80 to 500 m. This limit is extremely interesting, as it is precisely the interval where attackers are only exposed to artillery fire. In contrast, the introduction of effective musket range increases casualties at an exponential rate. It is also the distance where artillery gunners switched from solid ball ammunition to cannister fire, but the attacker would have destroyed any defending gun in the zone by the time they could fire this type of ammunition; this was the goal of the artillery battery placed in the second parallel.

The only exception to this exponential increase is the distance where the third parallel was built (70–80 m). This work would have provided additional protection, so it would seem that distance was not the only significant variable that can explain casualties: Can the type of earthwork also be important? Figure 7 provides additional information:

- The digging of the three parallels and zigzag attack trenches were not phases especially dangerous for the besieging army.

- The deployment of artillery batteries had a high cost in human lives. This is especially true in the case of the batteries deployed along the third parallel, which were inside musket range.
- The semiparallel along the covered way was a dangerous area due to its closeness to the defenses.
- The rate of casualties during the construction of the communication trenches between the second and third parallels was extremely high.

It is surprising that the digging of attack trenches was not particularly dangerous. The reason is related to the small number of troops that were exposed to enemy fire. The works were done at night, and just a handful of soldiers were opening the zigzag trench. Existing data cannot provide the number of soldiers involved in each activity (only the casualties), so unfortunately we cannot know the percentage of working soldiers who were killed or wounded. On the other hand, the parallels were built by a large number of soldiers during a single night, being perfected in forthcoming days, thus avoiding a high level of exposure.

The deployment of artillery batteries generated lots of casualties. This can have different reasons. First of all, the soldiers building the batteries were not inside the parallels and could be the target of enfiladed fire from bastions. Second, it is probable that the defenders concentrated the fire against the guns, as they were the only weapon capable of creating the breach: Without effective artillery batteries, the siege was doomed, so a significant defense effort had to be put into their destruction. This idea is reinforced by the deep impression that defending mortar fire focused on these batteries as reflected in the besieger's memory.

Finally, the latest result is counterintuitive: Why communication trenches, built after the digging of the third parallel, were dangerous? The most logical interpretation of these results is related to the geographical location of both works. They were located at the flanks of the entire attacking system, and for this reason the two bastions in the sector that were not being attacked could deploy an intense enfiladed fire against them. This provides new insights into the decision of the engineers to extend the trenches after the first failed assault (August 13/14). The new works tried to disable one of these bastions. It removed the threat, as the new flank ended near the coastline.

Moreover, the width of the trenches had to be large (15–20 m) in order to allow the advance of the huge cannons and the animals pulling them. This width could have allowed for effective mortar fire, as shells could explode inside the trench and wound several soldiers at once. Finally, a large number of soldiers would have concentrated in these zones for the assaults, so intense defending fire could have been executed against this mass of attackers.

The integration of the different analysis portrays a complex scenario, where casualties are not just related to the distance to the enemy. The advantage of this quantitative analysis is that we can compare the importance of this variable to other factors, like the type of earthworks undertaken by attackers. To test it, a lineal regression model was explored using analysis of variance. Results showed how a combination of both factors (distance and type of work) provides a better fit to casualties than any of them by themselves. Nevertheless, distance is by far the most significant variable to understand the development of the siege (and, as a consequence, of the attacker's decisions).

This interpretation provides a better understanding about which zones and phases were dangerous for attackers in any siege. At the same time, its discussion suggests different reasons about the divergences between theoretical guidelines, attack plans, and modifications undertaken during the execution of the works. In this sense, the results are somewhat surprising, as the works with higher rate of casualties are not the ones near the covered way, but all the tasks that were developed to support the siege.

Concluding Remarks

This work shows how formal modeling integrating geoscience techniques improves our understanding of historical conflicts. The computational model created during this research combines spatial, temporal, and historical factors to explore hypotheses related to the theory and practice of military activities. This is especially true during modern era, when accurate cartography began to play a crucial role in the battlefield. The integration of different data into a spatiotemporal model helps to explain why sieges deviated from theoretical guidelines. The design was constantly modified to face new issues. In particular, the failed assault in mid-August forced the duke of Berwick to rethink the plan. The engineers widened the parallels and deployed new batteries, often at a high human cost. The set of decisions that the besiegers took is an illustrative example of the adaptive process that armies of any era need to follow in order to defeat their enemies. In particular, innovation was as important as knowledge of standard practices, and the balance between both concepts was decisive for Berwick's victory.

Patterns like the ones explored, involving spatial relations, types of works, daily events, and descriptions are difficult to detect due to the number of simultaneous events happening in any military action. The methodology presented in this article is a proposal on the way formal models can help the historian on exploring these events. The use of these models, explicit by definition (Epstein, 2008), forces the researcher to define concrete research questions and hypotheses and assess their plausibility using quantitative analysis (in this case involving spatiotemporal dimensions). It is the application of this methodology to particular case studies (as the one portrayed here) which can suggest interesting links between all the parameters that were explicitly defined during the modeling step.

Finally, some of these patterns are difficult to observe without this spatiotemporal framework; these are obviously the most interesting results from the analysis, as they affect not only the interpretation of a particular event but also the general understanding of historical conflict.

Authors' Note

The authors would like to express their gratitude to all the researchers who helped us to develop this work, particularly Pau Castell, Francesc Riart, Giancarlo Boeri, and all the archaeologists who provided information on the city defenses. We would also like to thank Douglas D. Scott and an anonymous reviewer for their helpful comments and suggestions.

The model was created using Spatialite (Furieri, 2014) for building the database, Quantum GIS Development Team (2014) for cartography, and R for statistical analysis (2008). The data used in this article can be downloaded from <https://github.com/xrubio/models>.

Declaration of Conflicting Interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The author(s) disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship and/or publication of this article: XRC is part of the SimulPast Project (CSD2010-00034) funded by the CONSOLIDER-INGENIO2010 program of the Ministry of Science and Innovation – Spain.

References

- Allsop, D., & Foard, G. (2007). Case shot: An interim report on experimental firing and analysis to interpret early modern battlefield assemblages. *Journal of Conflict Archaeology*, 3, 111–146.
- Anguera, P. (2008). *L'Onze de Setembre, Història de la diada (1886–1938)*. Barcelona, Spain: Publicacions de l'Abadia de Montserrat.

- Barros, M., Salat, N., & Sarmant, T. (2007). *Vauban. L'intelligence du territoire*. Paris, France: Service historique de la Défense.
- Bruguera, M. (1871). *Historia del memorable sitio y bloqueo de Barcelona y heroica defensa de los fueros y privilegios de Cataluña en 1713 y 1714*. Barcelona, Spain: Lluís Figol.
- Chandler, D. (1990). *The art of warfare in the age of Marlborough*. New York, NY: Sarpedon.
- Conolly, J., & Lake, M. (2006). *Geographical information systems in archaeology*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Corbalan, J. M. (1991). *La labor profesional de los ingenieros militares "borbónicos" de Flandes a España (1691–1718). Formación y desarrollo de una nueva arquitectura moderna en Cataluña*. Barcelona, Spain: Universitat de Barcelona.
- Date, C. J., & Darwen, H. (1996). *A guide to SQL standard* (4 ed.). Boston, MA: Addison Wesley.
- de Amaury, T. (1714). *Histoire de la dernière révolte des Catalans et du siège de Barcelonne*. Paris, France: T. Amaury.
- de Castellvi, F. (1999). *Narraciones Históricas* (Vol. 4). Madrid, Spain: Fundación Elías de Tejada.
- de la Llave y García, J. (1903). *El sitio de Barcelona 1713–1714*. Madrid, Spain: Memorial de Ingenieros.
- Duffy, C. (2006). *Fire & stone. The science of fortress warfare 1660–1860*. Memphis, TN: Castle Books.
- Epstein, J. M. (2008). Why Model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11, 12. Retrieved from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html>
- Furieri, A. (2014). *Spatialite spatial DBMS*. Retrieved from <https://www.gaia-gis.it/fossil/libspatialite/wiki?name=Spatialite>
- Gea Bullich, M. (2006). Memòria científica de la Intervenció arqueològica al Portal de Sant Daniel. Actium arqueologia I patrimoni. Retrieved from http://cartaarqueologica.bcn.cat/Docs/419/2010_12_03_18_05_42_Mem%C3%B2ria%20029-06.pdf
- Hernández, F. X., & Riart, F. (2007). *Els exèrcits de Catalunya (1713–1714). Uniformes, equipament, organització*. Barcelona, Spain: Dalmau Editors.
- Hernández, F. X., & Riart, F. (2014). *Barcelona 1714. Jacques Rigaud, crònica de tinta i pólvora*. Barcelona, Spain: Libbooks.
- Hughes, B. P. (1997). *Firepower: Weapons Effectiveness on the Battlefield 1630–1750*. New York, NY: Sarpedon.
- Knowles, A. K. (Ed.). (2006). *Past time, past place: GIS for history*. Ann Arbor, MI: ESRI.
- Knowles, A. K., & Hillier, A. (Eds.). (2008). *Placing history: How maps, spatial data, and GIS are changing historical scholarship*. Redlands, CA: ESRI.
- Longley, P. A., Goodchild, M., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2010). *Geographic information systems and science* (3 ed.). New York, NY: John Wiley.
- Miller, D. (2010). *Ballistic of 17th century muskets* (Unpublished MSc Thesis). Cranfield University, Bedfordshire, England. Retrieved from <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/460>
- Molas, P. (Ed.). (2007). *Memorias del duque de Berwick*. Alicante, Spain: Universidad de Alicante.
- Nolan, T. (2009). Geographic information science as a method of integrating history and archaeology for battlefield interpretation. *Journal of Conflict Archaeology*, 5, 81–104.
- Ossorio, S. N. (1730). *Reflexiones militares*. Paris, France: Simon Langlois.
- Ostwald, J. (2007). *Vauban under siege. Engineering efficiency and Martial Vigor in the War of the Spanish Succession*. The Netherlands: Brill Academic.
- Quantum GIS Development Team. (2014). *Quantum GIS geographic information system*. Open Source Geospatial Foundation Project. Retrieved from <http://qgis.osgeo.org>
- R Development Core Team. (2008). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.R-project.org>
- Riart, F., Hernández, F. X., & Rubio-Campillo, X. (2010). *La coronela de Barcelona 1705–1714*. Barcelona, Spain: Dalmau Editors.
- Sanpere y Miquel, S. (1905). *Fin de la nación catalana*. Barcelona, Spain: Tipografia L'avenc.

Author Biographies

Xavier Rubio-Campillo (xavier.rubio@bsc.es) interests are focused on the development of new methodologies capable of exploring the complex relations between time, space, and human behavior. Simulation, spatial analysis, and geostatistics are some of the techniques that he applies to different research questions, from the relation between environment and culture to the evolution of warfare.

Francesc Xavier Hernández (fhernandez@ub.edu) studies the impact of warfare in society. The research is not only related to the historical events but also on the way military conflicts has shaped the landscape through human history.

Maria Yubero-Gómez (mariayubero@gmail.com) is interested in the application of Geographic Information Systems to study the spatiotemporal patterns of material culture. This includes the way a society perceives its own environment as well as the formation of the archaeological record and the techniques a researcher can use to deal with the uncertainty associated to this type of information.

A.2 Mapping changes in late prehistoric landscapes: A case study in the Northeastern Iberian Peninsula (capítol 5)



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Anthropological Archaeology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jaa



Mapping changes in late prehistoric landscapes: A case study in the Northeastern Iberian Peninsula

Maria Yubero-Gómez^{a,*}, Xavier Rubio-Campillo^b, F. Javier López-Cachero^a, Xavier Esteve-Gràcia^{a,c}

^a Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques (SERP), Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia, Universitat de Barcelona, C/Montalegre 6/8, 08001 Barcelona, Spain

^b Computer Applications in Science & Engineering (CASE), Barcelona Supercomputing Center, C/Jordi Girona 29, Nexus II, 3A, Barcelona, Spain

^c Triade Serveis Culturals, Carrer del Dr. Pasteur, 15, 1-1 08720 Vilafranca del Penedès, Barcelona, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 5 March 2013
Revision received 13 July 2015

Keywords:
Northeastern Iberian Peninsula
Late Bronze Age
Early Iron Age
Geographic Information Systems (GIS)
Natural corridors
Spatial analysis
Statistical significance testing
Settlement patterns
Mobility models

ABSTRACT

The temporal span of the Late Bronze Age and the Early Iron Age (1300–550) saw the emergence of intense interconnectivity in the Mediterranean sea. The development of colonial trade dramatically increased cultural exchange along its coasts as can be observed in archaeological evidence. These large scale processes had an impact at all scales and territories close to the main trade routes. However, the process was extremely diverse in its forms.

This work presents a case study focused on two adjacent areas in the coast of the NE Iberian Peninsula. Spatial analysis has been carried out to explore the trajectories of settlement location dynamics during the whole period. Basic geographic variables, mobility and distance to trade routes have been explored to identify key differences over periods and areas. Results indicate that the factors guiding settlements location varied between the two zones. Moreover, one of the areas was radically influenced by trade routes in the Early Iron Age while the other did not seem to be affected by this external factor. The interpretation of these analyses suggests that the rise in connectivity was not homogeneous over the Western Mediterranean, but in the regions where it took place this factor was decisive to explain their historical trajectories.

© 2015 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

From 1200 to 600 BC, the Mediterranean world saw a period of change, which resulted in the breakdown of Bronze Age civilizations, and the rise of Iron Age cultures in many locations. Despite the complexity of the process, the study of this crucial period covering the Late Bronze Age (LBA) and the Early Iron Age (EIA) has been traditionally focused on the Eastern Mediterranean and its grand civilizations.

The western zone did not see the emergence of cultures such as the Minoan and the Greco-Roman societies, which dominated the work of archaeologists for a long time due to its abundant material culture. However, fieldwork carried out in the last decades has extended our knowledge to include other islands and coastal areas of the Mediterranean Sea, thus balancing this view. The diversity of these studies has increased our knowledge of processes such as the ones that created the Maltese temples, *nuraghi*, *taulas* and *talayots*

(Knapp and Blake, 2005; Bevan, 2013; Berrocal et al., 2013; Babbi et al., 2015).

This wider perspective on the LBA–EIA Mediterranean is dominated by the concepts of mobility and connectivity. These linked processes of change were promoted by the intensive cultural and commercial interaction rising between the peoples all over the Mediterranean, from the Levant in the East, to the North African and the Iberian coasts in the West (Babbi et al., 2015: 6).

1.1. Late Bronze Age and Early Iron Age in the NE Iberian coast

This is the research context of the present work. The aim of this paper is to explore and compare under to what extent variables connected to mobility and connectivity influenced settlement locations over the period LBA–EIA. To explore this question we have chosen to focus at a local scale in the North-Eastern coast of the Iberian Peninsula. Our case study includes two neighbouring areas divided by a river (Llobregat): Vallès, located at left bank, and Penedès, located at the right bank (see Fig. 1).

The election of this area has been based on the continued and intense occupation of the territory that the archaeological evidence suggests. In addition, the archaeological record we are dealing with

* Corresponding author.

E-mail addresses: mariayubero@ub.edu (M. Yubero-Gómez), xavier.rubio@bsc.es (X. Rubio-Campillo), xavierlopez@ub.edu (F.J. López-Cachero), xesteveg@gmail.com (X. Esteve-Gràcia).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaa.2015.07.002>
0278-4165/© 2015 Elsevier Inc. All rights reserved.

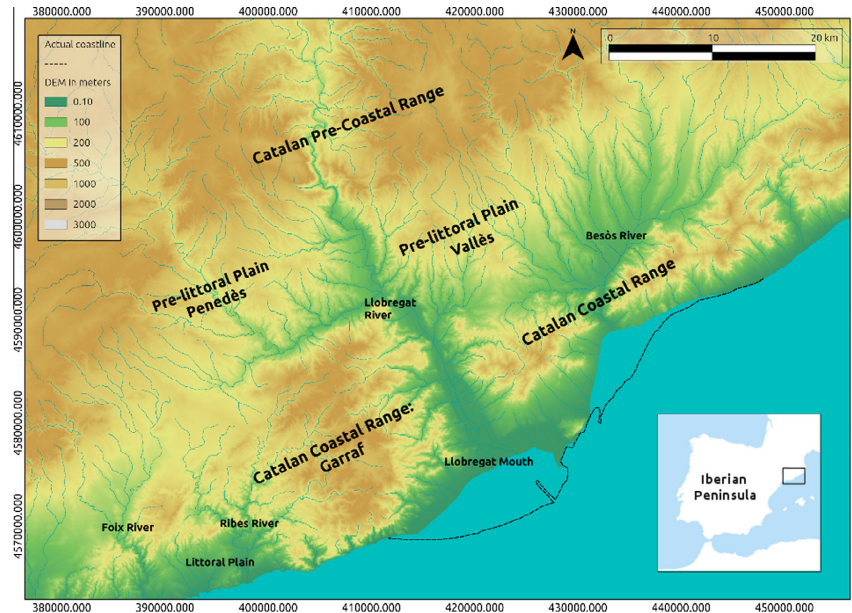


Fig. 1. Current geographical map and features of the case study: the current Catalan coast.

shows a great variety that allows us to link these settlements dynamics to the Mediterranean processes along this period.

During the Late Bronze Age (1300–750/700 BC), the material basis of these societies underwent a profound renewal. New metal typologies appeared during LBA showing an increase of inter-regional connectivity and trade products, as certain kind of metallic items or pottery decoration (López-Cachero and Rovira, 2012). The record also shows channelled pottery, which we find widely represented across the entire Northeastern Iberian Peninsula. Several new influences can be found on associated material culture, such as the first cremation necropolises by first millennium BC and the appearance of imported pottery in the Early Iron Age (750/700–550 BC). This pattern is strongly linked to the eruption of Phoenician trade near the Ebro River and the colony founded by the Phocaeans that would be known as *Emporion* (580 BC) (Aquilué et al., 2000; Santos Retolaza, 2003). These settlements are located south (Phoenicians) and north (Greeks) of the studied area (for a general overview see López-Cachero, 2007, 2011; López-Cachero and Pons Brun, 2007; Sanmartí Grego et al., 2009; Asensio i Vilaró, 2005; García i Rubert and Gracia Alonso, 2011; Pons Brun, 2014).

For a long period of time, the weight of historical and cultural tradition put the focus of debate on the arrival of new human groups traditionally known as Urnfields culture and on the colonial factor as the key agents behind the changes taking place. Today, however, these stances have become much more moderate. The accent is now on local dynamics and special regional features as the differentiating facts of the territory. Further theoretical insights connected to local scale societies and postcolonial archaeologies have also been presented in recent works for this context (García i Rubert and Gracia Alonso, 2011; López-Cachero, 2007; Fatás Fernández et al., 2012).

Previous works on the examined areas identified a general path of cultural continuity. This is particularly evident for the period between approximately 1800 BCE and the end of the LBA in the

two largest excavated sites in these areas: Mas d'en Boixos located in the right bank and Can Roqueta located in the left bank (Bouso et al., 2004). The only exception is the Penedès (right bank area) pre-coastal lowlands, where there are only a few documented sites from the Late Bronze Age onwards. This scarcity has been analysed before, and other authors have noted that it cannot be attributed to a lack of research in the area (Mestres, 2008). The alternate hypothesis is that occupation of certain caves and the use of high-elevation pastures provided an alternative to the low-level agricultural exploitation of the most fertile plains which did not developed here except for some coastal regions. The EIA would present a shift between these subsistence strategies, as can be seen from the evidence of numerous storage pits documented from that time. Evidences suggest a complementary exploitation model that took extensive advantage of lands more favourable for agriculture, with the possible rapid planting of grapevines (López, 2004). These activities would be complemented by herding, as shown by the appearance of walled enclosures (pens) at higher altitudes of the landscape such as Serra de la Font del Cuscó (Cebrià et al., 2003) or Sant Miquel d'Olèrdola (Mestres et al., 2009). Coincidentally some of these sites such as Turó Font de la Canya (Asensio et al., 2005), Font del Cuscó (Cebrià et al., 2003) and Olèrdola (Mestres et al., 2009) among others, have yielded evidence for intensive trade in the form of Phoenician amphorae and other containers. "Phoenician" pottery imitations, metal items such as sympyla and iron spits also link this shift to Mediterranean influences (Asensio et al., 2005).

From the beginning of the sixth century BC evidence suggests a new major shift in the right bank area. We find the pens disappearing and new coastal enclaves being established, such as the citadel at Alorda Park. However, this transition to the Iberian world has not yet been fully and satisfactorily explained (Asensio et al., 2006).

The scenario described above contrasts with the dynamic described for the Vallès located in the left bank area. Thanks to

data from sites such as Can Roqueta (Carlús et al., 2007), we know that LBA settlements were mainly located on the plain or on the rolling hills near the floodplains of the Besòs river. They followed a pattern of small semi-excavated farmhouses or huts built from wood and mud and scattered among the fields of crops. These farms were located very close to storage pits and at a certain distance from the cremation necropolises that functioned as the true centres around the landscape seems to have been organised (Carlús et al., 2007). The special features of this archaeological context, which is characterised by negative structures and often affected by strong erosive processes as a consequence of agricultural work over the centuries (Terrats Jiménez, 2010: 141–155), make it very difficult to determine the existence of denser clusters of huts in the form of small villages. Regarding the EIA sites in the area, some Phoenician items such as amphorae, vessels and hand made pottery “imitating” Phoenician shapes and askos has been found in the necropolis as well as in some of the “houses” (Carlús et al., 2007). However, the number of sites with this type of materials is lower than in the Penedés region (Yubero-Gómez et al., 2014).

This model remained constant in the left bank area until the end of the sixth century BC, when widespread settlements in elevation using stone appeared across the coastal and pre-coastal mountain ranges. At the same time, abandonment of cremation necropolises suggests a profound restructuring of settlement that should be linked to the formation of the Iberian world (López-Cachero and Rovira, 2012).

1.2. Mesoscalar analysis of settlement location

It is clear that these dynamics conform a complex and heterogeneous situation with several research challenges. This work focuses on understanding change in settlement patterns during the transition from the LBA to the EIA based on two main questions:

1. *Do site location preferences depend on the chronology?* Our hypothesis is that the relevance of different geographical factors was not constant over time. If there were differences in the patterns of each period we should detect them by means of spatial analysis.
2. *Were communication networks affected by external influences?* The theoretical rise in exogenous contacts from the LBA to the EIA should be reflected in the site distribution over communication networks.

The area of study has been extensively excavated during the last quarter of the XXth century due to urban development (Petit, 1986; Bouso et al., 2004; Carlús et al., 2007; Yubero-Gómez and Rubio-Campillo, 2010; Yubero-Gómez et al., 2014, 2015; Mestres and Esteve, 2015). This situation has generated a large body of data which need to be integrated before any analysis can be undertaken. This is the reason why we have chosen a Geographic Information System (GIS) as a working framework. In addition to showing geographical information, GIS is also a highly flexible tool for integrating data from different sources and in different formats. This greatly facilitates the task of comparing and analysing heterogeneous data and extracting knowledge from them. In addition, GIS can be used for more than a descriptive definition of the case study.

This paper presents a mesoscalar study of the Catalan central coast to explore changes in settlement location patterns during the period LBA–EIA. Next section describes the data used to build a geographical model of the area. The third section defines the various methods of spatial and statistical analysis applied to the dataset. Next, we discuss results comparing the patterns generated by the LBA and the EIA communities and assessing the impact of

Phoenician colonising agents. We conclude discussing the implications of our results in the general context of this transition.

2. The case study

The dataset of the analysis has been created from two components: (a) geographical features relevant to settlement dynamics and (b) archaeological information.

First, the study area presents several biogeographical units with their own characteristics. From the coast inland, we find coastal plains (currently massively modified by substantial urban development), the coastal mountain range (parallel to the coast, highly compartmentalised by rivers and a small number of peaks at 500–700 m.) the pre-coastal depression (a natural open route that runs approximately 200 km from northeast to southwest), and lastly, the pre-coastal mountain range (where the headwaters of the main rivers emerge from peaks exceeding 1700 m above sea level).

We used a 15 m × 15 m Digital Elevation Model of the area where some features were corrected. In particular, the current coastline is significantly different from the one present during the chronologies under study. Broadly speaking, the coastal plain appears to have smaller than the present area, and it contained areas of marshland, particularly in the plains of the Llobregat river. Previous works in the Llobregat delta (Gámez Torrent, 2007) have been used to recreate the coastline.

Second, the archaeological interventions carried out in the past decades have been used to create a spatial database which can be seen in Fig. 2.

The dataset has one challenge that needs to be considered; the archaeological context documented is negative in the vast majority of cases. The lack of positive structures inhibits the formation of a stratigraphy that would certainly be helpful in capturing the dynamics of construction, use and abandonment of the documented structures, as well as their diachronic or synchronic inter-relationship in the space. It is not possible to go beyond the establishment of approximate chronologies, as we are unable to determine whether all of the structures belonging to a period are the result of a narrow temporal span or, conversely, the result of continuous settlement of a single space over two, three, four or more centuries. As a consequence, we need to treat all the sites of one period as part of the same group, while keeping in mind this aggregation in the interpretation; it is not the same to consider 200 storage pits belonging to the same moment as 200 storage pits over the course of 300 years.

The created spatial database integrates information from the set of settlements, combining geographical features with additional data such as chronologies, the typologies of structures and the current state of the site. As for the dataset studied, the working sample contains 87 sites for the LBA and 67 for the EIA. The sites include dwellings, storage structures, necropolises and occupied caves. From a spatial perspective, we have divided each chronology into two sub-datasets according to whether the sites are located on the right or left bank of the Llobregat (see Fig. 3). Traditionally, this division has been used by most authors when dealing with the archaeological data (Esteve, 2006; Asensio et al., 2006; López-Cachero, 2007, 2012) because the archaeological record on both banks seem to show significant differences as we mentioned in Section 1.

3. Methodology

We have designed a set of spatial analyses to answer our two research questions with this dataset, including (a) basic spatial variables (height, slope and aspect), (b) visibility and accessibility

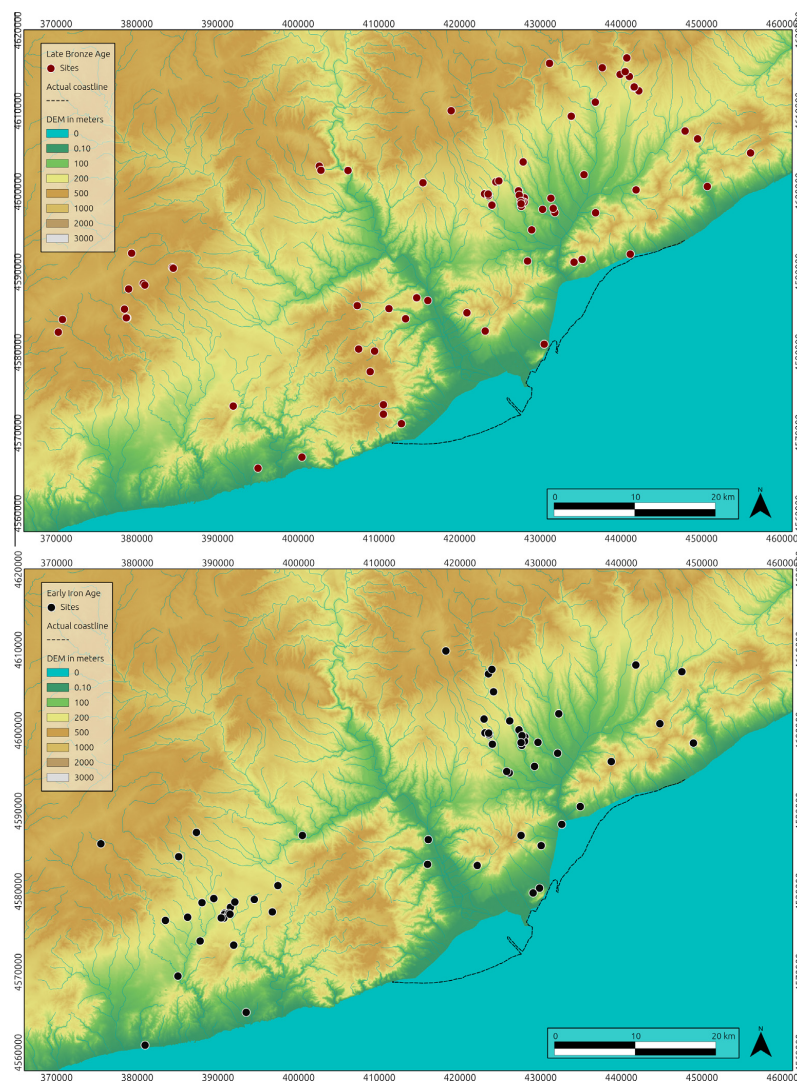


Fig. 2. Distribution of sites by period: (a) LBA and (a) EIA.

and (c) distance to natural corridors. Exploratory Data Analysis has been performed for each of the six variables in the form of empirical density estimates for the two periods (the LBA and the EIA) and both areas (left and right bank). These density functions measure the probability of finding a site for a given value of the analysed parameter. This approach is useful to perform cross-comparison analysis of different datasets. To achieve this second step, we have performed Kolmogorov–Smirnov tests (KS tests) between the four datasets (the LBA left bank, the LBA right bank, the EIA left bank and the EIA right bank). This non-parametric test evaluates the probability that two given empirical distributions were generated by the same process. If the computed p -value is smaller than a threshold level (in our case $p < 0.05$) the samples were generated from different distributions, thus identifying significant differences between the compared datasets with a confidence interval of 95%.

First, we characterised the first-order spatial variation to identify diachronic and synchronic changes over the two periods. We studied the location of the sites within their surroundings, while calculating their geographical attributes, taking account of their altitude (in metres) and their aspect and slope (both in degrees).

Second, visibility (Llobera et al., 2011; Gillings and Wheatley, 2001; Lake and Ortega, 2013; Eve and Crema, 2014) and accessibility (Llobera et al., 2011; Llobera, 2001, 2000; De Reu et al., 2011) provided new information on the changes in settlement patterns and their relationships (corresponding to second-order spatial variations). For each site, the observed area has been calculated within a radius of 10 km (see Fig. 4a).

Third, accessibility enables us to quantify the favourable potential of a specific point in relation to the surrounding landscape. This concept can be modelled in several ways, with accessibility

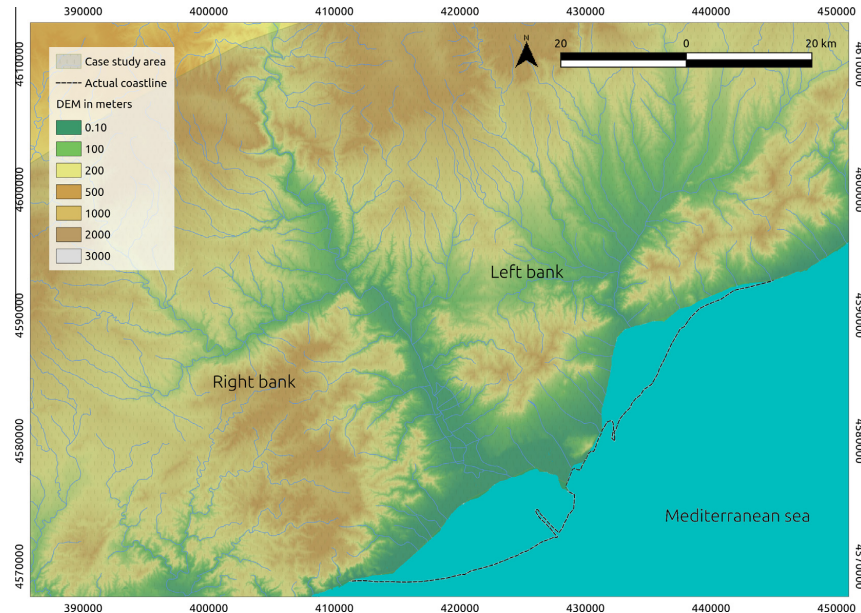


Fig. 3. The Besòs river has been traditionally identified as a boundary between areas with different dynamics. We have chosen these areas (left and right bank) as our spatial units of analysis.

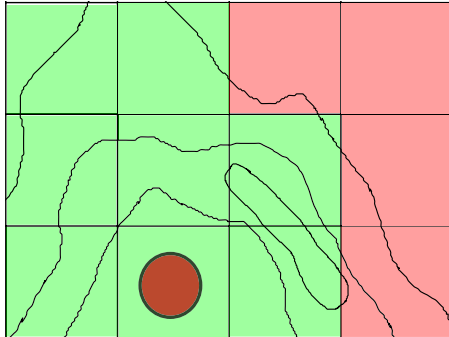


Fig. 4a. Example of the visibility algorithm. For each site the total amount of visible area (green colour-coded) up to 10 km is quantified. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

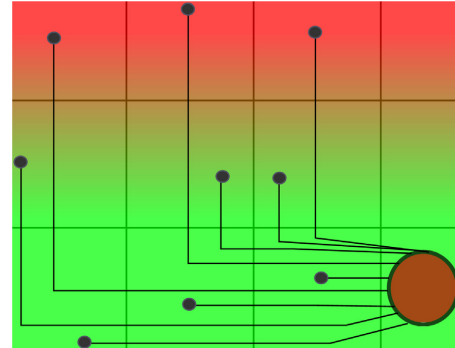


Fig. 4b. Example of the accessibility analysis. The least-cost path of each cell within a 1 km radius to the site is computed. It is based on the slope cost of the cells (red to green gradient). A final value for site is quantified averaging the cost in accumulated degrees of slope. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

analysed as a function of distance, territorial compactness, energy consumption or time (Conolly and Lake, 2006: 243; Llobera et al., 2011). We have used the method applied in archaeology by Llobera (2000), Llobera et al. (2011), see Fig. 4b. The accessibility value for the sites has been calculated based on the topographical cost of gaining access to each site from its surrounding area. The procedure involved the generation of a regular 25-point grid to cover the area surrounding each site to a radius of 1000 m. After this operation, the least-cost path was traced from each point of the grid to each of the sites. Then, we calculated the average accumulated cost of all the paths to each site, finally inverting the value to have large values for high accessibility.

To identify natural corridors related to human mobility and trade routes (Bevan and Wilson, 2013; Murrieta-Flores, 2012) we defined a perimeter of points distributed every 10 km. They were located at 25 km from the study area to avoid any border effect. Then, we calculated the least-cost paths from each point on the perimeter to all the other points while quantifying how many of the routes passed through each cell of the original raster map. The most dense areas (i.e. first quantile) define the natural corridors, according to the geography of the area. By computing the distance from each site to these natural corridors we can get a summary statistic of the relevance of strategic route networks as

a factor to explain site location (see an example of this analysis in Fig. 4c).

A follow-up question to the results is to examine what properties differentiate the sites of both banks for a given period. Understanding these differences would allow us to better identify what type of settlement properties characterise each area under study. This final topic was examined with a multivariate analysis of the factors defining the sites of each temporal span. It was independently applied to the sites of the LBA and the EIA. For each period we performed an analysis of variance test (ANOVA) using a logistic multivariate regression model. The dependent variable was defined as the bank of the river (right or bank), while the independent variables were the 6 factors collected for each site (height, slope, aspect, visibility, accessibility and distance to natural routes).

4. Results

4.1. Geographical variables

First, our study of the basic geographical variables (altitude, aspect and slope) clearly indicate differentiated settlement dynamics within LBA. In this respect, Fig. 5 shows the density estimates of altitude based on the settlements of the different periods and territories.

At first glance, we can see how the distribution on the left bank of the Llobregat is quite continuous except for the creation of some highly elevated sites during the EIA. By contrast, the typology of settlements on the right bank changes radically, shifting from elevated settlements to a distribution that is similar to the distribution observed on the left bank in the EIA.

This tendency is confirmed if we examine the slope values (see Fig. 6), because the probability of finding sites in low-slope areas on the right bank of the Llobregat in the LBA is quite low. In any event, it suggests a tendency similar to the evaluation of altitudes: while the LBA sees very high values (related to the situation of the caves), in the EIA the values level out because of the creation of settlements in low-lying areas. On the left bank, by contrast, the distribution of probabilities is quite homogeneous in both periods even if the presence of sites in low slope slightly increases over time.

Tables 1 and 2 shows the significance levels of the pairwise KS tests. They confirm the previous results, as in both factors the right

bank sees a higher level of change while the EIA periods are more homogeneous than the LBA.

Our examination of aspect (Fig. 7) provides no additional information as the distribution is almost homogeneous over the 4 datasets. The only relevant pattern is the situation of the settlements on the left bank towards the south-southwest (200° – 270°). This tendency is intriguing, as it may be related to solar exposure (Lapen and Martz, 1993; Church et al., 2000: 153; Esteve, 2004: 10) or the direction of river courses. However, Table 3 shows that the difference is not significant.

4.2. Visibility analysis and accessibility

Accessibility and visibility indices helps us to assess other differences among the studied territories. First, visibility does not seem specially relevant for the LBA sites (see Fig. 8) while it gains importance in the EIA. There are some exceptions, notably Olèrdola, a site located in a strategic enclave with visual control over the surrounding territory. The patterns is quite similar across both banks, with an increase in visibility from the LBA to the EIA. Table 4 confirms that there is a major shift in the relevance of visibility for site location during the change from the LBA to the EIA.

Second, it can be observed that accessibility is similarly shaped for the four datasets, even if the right bank sees a higher peak around the value of 170 (see Fig. 9). However, the KS tests (see Table 5) suggest that the distributions are almost identical for each bank over the two periods, thus portraying non significant changes from the LBA to the EIA.

4.3. Natural corridors

Fig. 10 portrays the computed network of natural corridors. The density estimates (Fig. 11) suggest that a close distance to these strategic routes was not a significant factor in settlement dynamics in the Llobregat left bank for both chronologies. This is an interesting result, specially compared to the basic geographic factors (i.e. altitude and slope). As a consequence, local features seem much more important than geographically broader contexts. In fact, the supposedly relevant impact of the Phoenician arrival during the EIA is not confirmed by these results. Otherwise, we would see a rise in the number of settlements located on the natural corridors over which trade unfolded.

Studying this relationship by chronology and area enables us to see the extent to which this variable is similar for the archaeological contexts of the LBA and the EIA (see Table 6).

The KS test shows how the left bank of the Llobregat did not see a clear pattern of change. The only exception is a number of sites at very large distances during the LBA, which stems from the limited percentage of land with these characteristics. In the right sector, by contrast, a substantial change can be perceived between the two chronological periods, with the largest probability of finding a site at 7000–8000 m of a corridor diminishing to 1000–2000 m during the EIA. Therefore, we can say that the distance from a natural corridor is highly important in the right sector of the Llobregat, but that it is not an essential factor in the left sector. In the latter case, the occupations continuing from the LBA to the EIA that are documented in quite a few of the sites may have had a decisive impact on this factor.

4.4. Multivariate analysis

Results of the ANOVA analysis show that accessibility and height are the most important parameters that distinguish the properties of sites on the right and left bank during the LBA (c.f. Table 7).

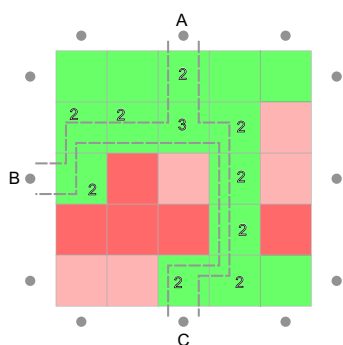


Fig. 4c. Definition of natural corridors. A perimeter of points is defined outside our studied region at regular intervals. The least cost path is calculated between each pair of points, and the number of paths passing through each cell is computed. In this example the paths for 3 points (A, B and C) is shown.

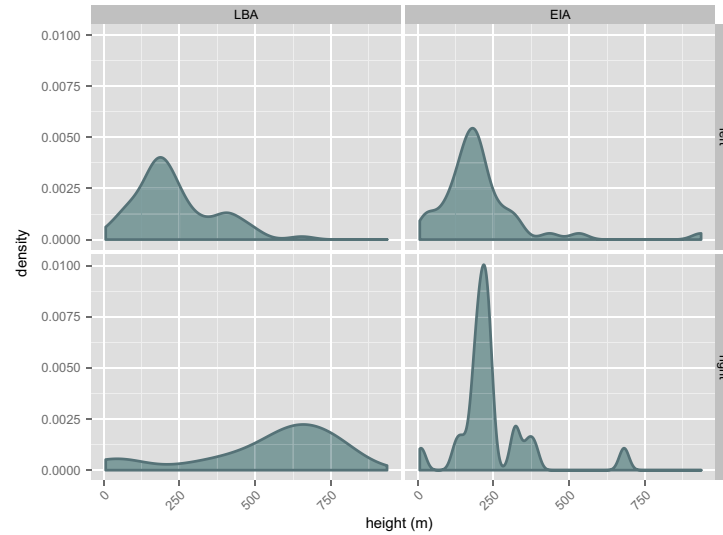


Fig. 5. Density estimates of settlement altitude for the various combinations of areas and chronologies.

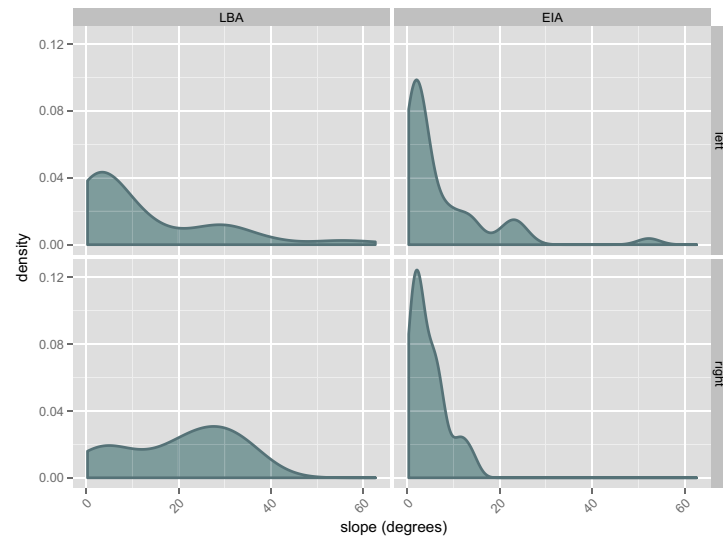


Fig. 6. Density estimates of settlement slope (measured in degrees).

Table 1

Pairwise KS tests for height. Blue values are significant with p -value < 0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.

	LBA – left	LBA – right	EIA – left	EIA – right
LBA – left	1.000			
LBA – right	<0.001	1.000		
EIA – left	0.457	<0.001	1.000	
EIA – right	0.163	<0.001	0.024	1.000

Table 2

Pairwise KS tests for slope. Blue values are significant with p -value < 0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.

	LBA – left	LBA – right	EIA – left	EIA – right
LBA – left	1.000			
LBA – right	0.026	1.000		
EIA – left	0.231	0.003	1.000	
EIA – right	0.089	<0.001	0.703	1.000

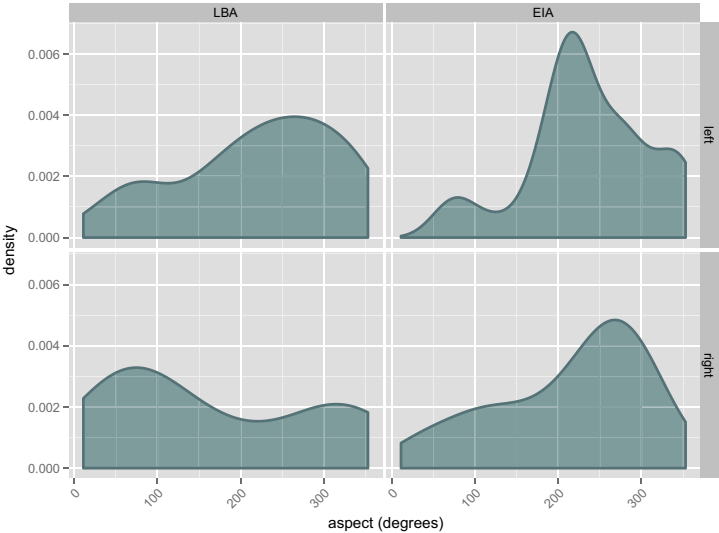


Fig. 7. Density estimates of settlement aspect (measured in degrees).

Table 3
Pairwise KS tests for aspect. Blue values are significant with p -value < 0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.

	LBA – left	LBA – right	EIA – left	EIA – right
LBA – left	1.000			
LBA – right	0.079	1.000		
EIA – left	0.331	0.009	1.000	
EIA – right	0.497	0.105	0.621	1.000

These results suggest that settlements at the right bank of the river were preoccupied by the defensive value of the region where they were located. This would explain why elevated, difficult to reach zones were predominant here in contrast with the left bank. The same method was applied to the EIA sites, with significant different results (see Table 8).

Distance to natural routes is by far the most important factor that difference both banks, followed by slope and accessibility. This result confirms the trend that was already seen in previous

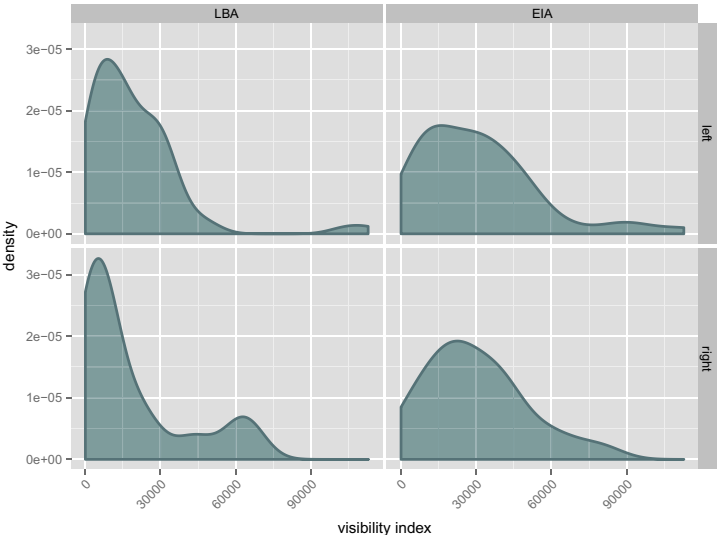


Fig. 8. Density estimates of settlement visibility.

Table 4

Pairwise KS tests for visibility. Blue values are significant with p -value < 0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.

	LBA – left	LBA – right	EIA – left	EIA – right
LBA – left	1.000			
LBA – right	0.232	1.000		
EIA – left	0.026	0.023	1.000	
EIA – right	0.071	0.024	0.930	1.000

figures, as the relevance of natural corridors is much more relevant in the right than in the left bank.

5. Discussion

The aggregation of these results depicts a radical shift of dynamics over the LBA to the EIA in the right bank, while the left bank portrays less evidence of change. Distance to natural corridors is the determinant factor to explain these dynamics: during the LBA the sites were located at large distances from travel routes. The situation changed in the EIA: a majority of settlements were located on a natural corridor in the right back area. This enables us to confirm the shift in the tendency that occurred in this territory and may indicate a settlement model closely bound up with commercial exchanges during the EIA. However, we continue to find a portion of the population that appears to have avoided these routes, remaining instead in easily defensible, but isolated locations.

Other authors have also documented a search for soil with greater agricultural potential during the EIA (Asensio et al., 2005) in the right bank area. This tendency is confirmed by the appearance of arrays of storage pits with occasional associated huts (e.g., Mas d'en Boixos (Bouso et al., L'Hort d'en Grimau (Esteve, 2004) and el Turó de la Font de la Canya (López, 2004)). These sites have been interpreted as surplus accumulation centres (Asensio et al., 2005) which would present a new scenario of genuine agricultural colonisation. The number of storage pits and their

enormous capacities suggest a significant change in the economic dynamics of resource exploitation in the area, which would from this point onward promote surplus grain production intended for trade.

This change, however, did not involve the abandonment of the higher-elevation, high-slope settlements. In this respect, what is detected is the occupation of various strategic points in the landscape, which have a high degree of visibility in relation to the surrounding landscape. Good examples are provided by the sites of Olèrdola and la Font del Cuscó, which feature the main element of a pen or wall built of stone enclosing a sizable area (Cebrià et al., 2003; Mestres et al., 2009). Few dwellings associated with these pens have been discovered, but everything seems to indicate that there were no more than a few slightly built huts, a fact that stands in stark contrast to the significant size of the occupied areas and the magnitude of the encircling walls. This has led some authors (Cebrià et al., 2003; Asensio et al., 2006) to maintain that the final function of these settlements may have been linked to a communal use of the space, more specifically to the amassing and management of livestock, and to signal wealth. Paradoxically, the occupation of caves, which was so common in the prior period, now ceases to be important after this shift. This site specialisation is also confirmed by the diversity of visibility indices during the EIA.

On the left bank of the Llobregat we do not observe this shift. Particularly interesting is the lack of relevance of the distance to natural corridors, considering the presence of Phoenician materials and metallic objects. Despite this moderate evidence, objects are similar to materials found in close zones where trade was much more intense (e.g. the Empordà and southeastern France, López-Cachero and Rovira, 2012). Nonetheless, the situation is not static as there are some changes in the settlement location dynamics. There seems to be a higher interest on plains which could be related to more intensive agricultural practices (confirmed by a greater number of excavated storage pits).

The aggregation of these results suggest that there were relevant differences between the studied areas and periods. Of

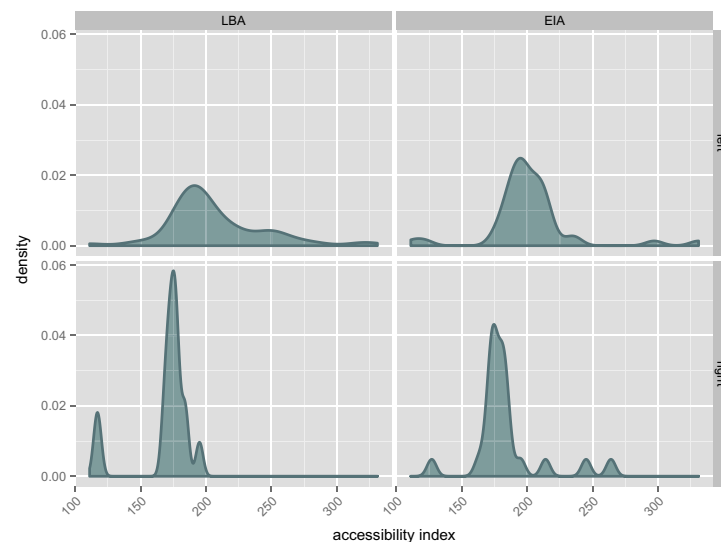


Fig. 9. Density estimates of settlement accessibility.

Table 5

Pairwise KS tests for accessibility. Blue values are significant with p -value < 0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.

	LBA – left	LBA – right	EIA – left	EIA – right
LBA – left	1.000			
LBA – right	<0.001	1.000		
EIA – left	0.321	<0.001	1.000	
EIA – right	<0.001	0.483	<0.001	1.000

particular interest is the sharp distinction between the territories regarding the LBA, which we have been able to interpret correctly

in relation to the materials and types of structures documented in the excavations.

To conclude, the interpretation of these results suggest that natural corridors play a key role to better understand settlement dynamics during the LBA and the EIA. However, both areas present a different evolution. While left bank sites seem to follow a similar dynamic during the LBA and the EIA, dynamics in the opposite bank present a very different panorama. The right bank of the river saw during the EIA a transformation of the landscape that could be related to a more strategic view of the territory. The shift that we can observe in the location of sites during the EIA was intended to establish the sites close to natural travel routes and to achieve

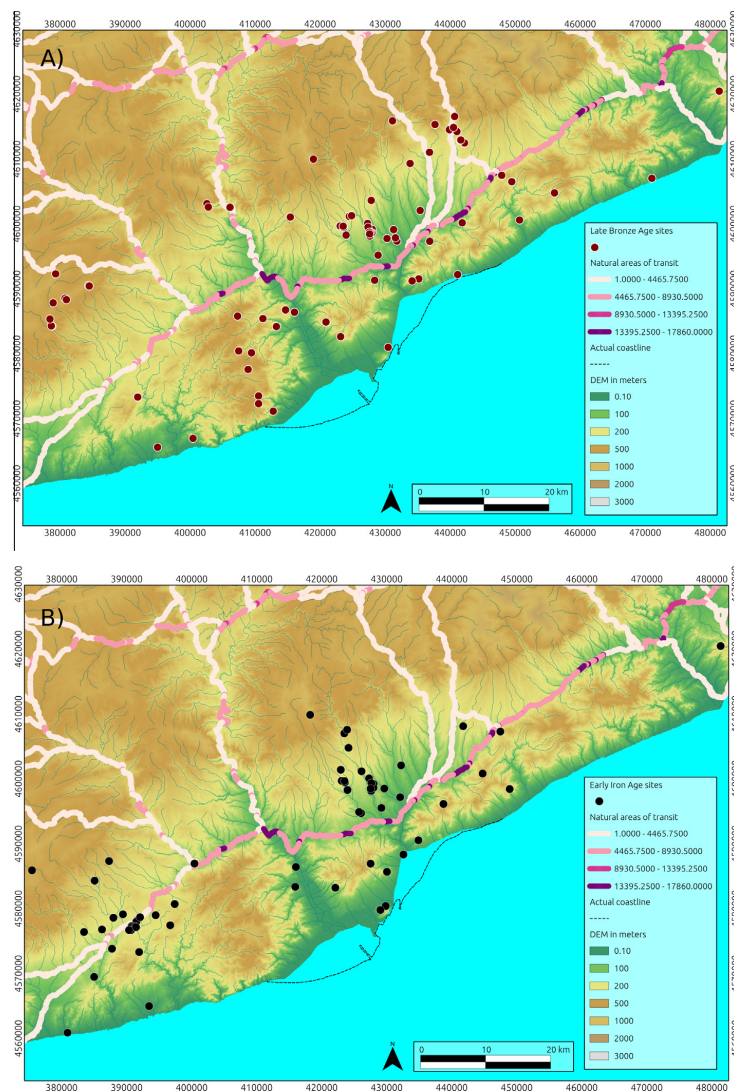


Fig. 10. Natural corridors in relation to the sites for (a) the LBA and (b) the EIA. The analysis makes use of all least-cost routes from each point on the perimeter to all other points, with the colour of each segment of the network identifying the number of routes that pass through it. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

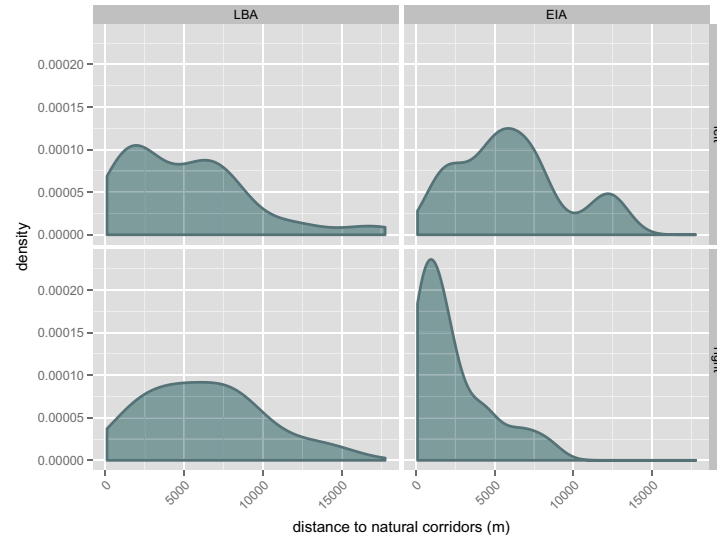


Fig. 11. Density estimates of settlement distance to natural corridors.

Table 6

Pairwise KS tests for distance to natural corridors. Blue values are significant with p -value < 0.05 implying that the compared distributions were not generated by the same process.

	LBA – left	LBA – right	EIA – left	EIA – right
LBA – left	1.000			
LBA – right	0.486	1.000		
EIA – left	0.119	0.869	1.000	
EIA – right	0.008	0.004	<0.001	1.000

Table 7

ANOVA test for a logistic multivariate regression model for bank location of the LBA sites. Height and accessibility are the most important factors to explain the differences between the river bank where sites are located.

Variable	Pr
Height	0.011
Slope	0.084
Aspect	0.998
Visibility	0.401
Accessibility	0.013
Distance	0.751

Table 8

ANOVA test for a logistic multivariate regression model for bank location of the EIA sites. Distance, accessibility and height are the significant variables that explain the differences between the river bank where sites are located.

Variable	Pr
Height	0.008
Slope	0.183
Aspect	0.973
Visibility	0.834
Accessibility	0.006
Distance	<0.001

better control over the territory. This changed coincided with an increase in commercial activity as a result of the integration of the Northeastern Iberian Peninsula in Mediterranean-wide trading networks.

Even at this local scale spatial analysis was able to identify sensible differences between neighbouring territories. This diversity of dynamics perfectly illustrates the complexity of processes that affected the Mediterranean Sea over these two periods.

Acknowledgments

We would like to thank the two anonymous reviewers for their helpful comments and suggestions. The spatial analysis was performed using Quantum GIS 1.8 and GRASS 6.4.3. The geostatistical analyses have been carried out with the R 2.15.2 statistical system, specifically the spatstat package (R Development Core Team, 2008). The code was developed in Python language executing GRASS GIS, and it is published under a General Public License (https://github.com/xrubio/models/changesLBA_EIA).

MYG and JLC are part of the consolidated research group Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques (2014SGR-108). MYG was funded by AGAUR (Catalan Agency for Management of University and Research Grants) (PhD Grant 2010FI_B 00641). XRC is funded by the SimulPast project CSD2010-00034 under the CONSOLIDER-INGENIO2010 program of the Spanish Ministry of Science and Innovation. FJLC is funded by the project HAR2013-48010-P of the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness.

References

- Aquilué, X., Burés, L., Castanyer, P., Esteba, Q., Pons, E., Santos, M., Tremoleda, Q., 2000. Els assentaments indígenes i l'ocupació grega arcaica de Sant Martí d'Empúries (l'Escala, Alt Empordà). Resultats del projecte d'intervencions arqueològiques de 1994 i 1995. Girona, Sèrie Monogràfica 19, 19–32.
- Asensio i Vilaró, D., 2005. La incidencia fenicia entre las comunidades indígenas de la costa catalana (siglos VII–VI aC): ¿un fenómeno orientalizante? In: El Periodo Orientalizante: Actas Del III Simposio Internacional de Arqueología de Mérida, Protohistoria Del Mediterráneo Occidental. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, pp. 551–564.
- Asensio, D., Cela, X., Morer, J., 2005. El jaciment protohistòric del Turó de la Font de la Canya (Avinyonet del Penedès, Alt Penedès): un nucli d'acumulació d'excedents agrícoles a la Cossetània (Segles VII–III aC). *Fonaments* 12, 177–195.
- Asensio, D., López, D., Mestres, J., Molist, N., Ros, A., Senabre, M.R., 2006. De la primera edat del ferro a l'ibèric antic: la formació de les societats complexes a la zona del Penedès. In: Belarte, C., Sanmartí, J., (Eds.), De les comunitats locals als

- estats arcaics: la formació de les societats complexes a la costa del Mediterrani occidental. III Reunió Internacional d'Arqueologia de Calafell. *Arqueomediterrània* 12, Calafell, pp. 289–307.
- Babbi, A., Bubenheimer-Ehrhart, F., Marín-Aguilera, B., Muehl, S., 2015. The Mediterranean Mirror: Cultural Contacts in the Mediterranean Sea between 1200 and 750 BC. Schnell Und Steiner, Regensburg.
- Berrocal, M.C., Sanjuán, L.G., Gilman, A., 2013. The Prehistory of Iberia: Debating Early Social Stratification and the State. Routledge.
- Bevan, A., 2013. Mediterranean Islands, Fragile Communities and Persistent Landscapes: antikythera in Long-term Perspective, 1st ed. Cambridge University Press, New York.
- Bevan, A., Wilson, A., 2013. Models of settlement hierarchy based on partial evidence. *J. Archaeological Sci.* 40, 2415–2427.
- Bousou, M., Esteve, X., Farré, J., Feliu, J., Mestres, J., Palomo, A., Rodríguez, A., Senabre, Mr., 2004. Anàlisi comparatiu de dos assentaments del bronze inicial a la depressió prelitoral catalana: Can Roqueta II (Sabadell, Vallès Occidental) i Mas d'en Boixos-1 (Pacs de Penedès, Alt Penedès). *Cypselà* 15, 73–101.
- Carliús, X., López-Cachero, F.J., Oliva, M., Palomo, A., Rodríguez, A., Terrats, N., Lara, C., Villena, N., 2007. Cabanes, sitges i tombes. El paratge de Can Roqueta (Sabadell, Vallès Occidental) del 1300 al 500 ANE. *Quaderns d'Arqueologia* 4, Sabadell.
- Cebrià, A., Esteve, X., Mestres, J., 2003. Enclosures a la serra del Garraf des de la Protohistòria a la Baixa Antiguitat. Recintes d'establació vinculats a camins ramaders. In: Guitart, J., Palet, J.M., Prevosti, M. (Eds.) *Territoris antics a la Mediterrània i a la Cossetània oriental. Actes del Simposi Internacional d'Arqueologia del Baix Penedès*. Departament de Cultura de la Generalitat de Catalunya, Barcelona, pp. 313–316.
- Church, T., Brandon, R.J., Burget, R.G., 2000. GIS applications in archaeology: method in search of theory. In: Konnie, L., Wescott, R., Brandon, J. (Eds.), *Practical Applications of GIS for Archaeologists: A Predictive Modeling Kit*. Taylor & Francis, New York, pp. 144–160.
- Conolly, J., Lake, M., 2006. *Geographical Information Systems in Archaeology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- De Reu, J., Bourgeois, J., De Smedt, P., Zwertvaegher, A., Antrop, M., Bats, M., De Maeyer, P., Finke, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J., Crombé, P., 2011. Measuring the relative topographic position of archaeological sites in the landscape, a case study on the Bronze Age barrows in northwest Belgium. *J. Archaeological Sci.* 38, 3435–3446.
- Esteve, X., 2004. Proposta metodològica per a la caracterització i anàlisi dels jaciments arqueològics a l'aire lliure mitjançant un SIG: el bronze final i la primera edat del ferro al Penedès. Universitat Politècnica de Catalunya. Unpublished MSc dissertation. <http://www.academia.edu/2104023/Proposta_metodologica_per_a_la_caracteritzacio_i_analisi_dels_jaciments_arqueologics_a_laire_lliuere_mitjançant_un_SIG_el_bronze_final_i_la_primera_edat_del_ferro_al_Penedes_-_Tesina> (accessed 14.10.14).
- Esteve, X., 2006. El paisatge penedesenc i la seva antropització durant la Prehistòria recent. In: *Premis Llabor de Lletres de Creació i Recerca. Convocatòria 2005* (Vilafranca del Penedès, Penedès Edicions, SL), pp. 127–149.
- Eve, S.J., Crema, E.R., 2014. A house with a view? Multi-model inference, visibility fields, and point process analysis of a Bronze Age settlement on Leskernick Hill (Cornwall, UK). *J. Archaeol. Sci.* 43, 267–277.
- Fatás Fernández, L., Graells i Fabregat, R., Sardà Seuma, S., 2012. Los intercambios y los inicios de la complejidad socioeconómica (siglos VII–VI a.C.). Estado de la cuestión. In: Belarte, M.C., Benavente Serrano, J.A., Fatás Fernández, L., Diloli Fons, J., Moret, P., Noguera, J. (Eds.), *Presented at the Iberos del Ebro: actas del II congreso internacional* (Alcañiz-Tivissa, 16–19 de noviembre de 2011), pp. 71–86.
- Gámez Torrent, D., 2007. Sequence Stratigraphy as a Tool for Water Resources Management in Alluvial Coastal Aquifers: Application to the Llobregat Delta (Barcelona, Spain). Universitat Politècnica de Catalunya. Unpublished Ph.D. dissertation. <<http://www.tdx.cat/handle/10803/6255>> (accessed 15.10.12).
- García i Rubert, D., Gracia Alonso, F., 2011. Phoenician trade in the north-east of the iberian peninsula: a historiographical problem. *Oxford J. Archaeol.* 30, 33–56.
- Gillings, M., Wheatley, D., 2001. Seeing is not believing: unresolved issues in archaeological visibility analysis. In: Slapšak, B. (Ed.), *On the Good Use of Geographical Information Systems in Archaeological Landscape Studies. Proceedings of the COST G2 Working Group 2 Round Table*. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, pp. 25–36.
- Knapp, A.B., Blake, E., 2005. Prehistory in the mediterranean: the connecting and corrupting sea. In: Blake, E., Knapp, A.B. (Eds.), *The Archaeology of Mediterranean Prehistory*. Blackwell Publishing Ltd, pp. 1–23.
- Lake, M.W., Ortega, D., 2013. Compute-intensive GIS visibility analysis of the settings of prehistoric stone circles. In: Bevan, A., Lake, M. (Eds.), *Computational Approaches to Archaeological Spaces*. Left Coast Press, London, pp. 213–242.
- Lapen, D.R., Martz, L.W., 1993. The measurement of two simple topographic indices of wind sheltering-exposure from raster digital elevation models. *Comput. Geosci.* 19 (6), 769–779.
- Llobera, M., 2000. Understanding movement: a pilot model towards the sociology of movement. In: Lock, G. (Ed.), *Beyond the Map: Archaeology and Spatial Technologies*. IOS Press, Amsterdam, pp. 65–84.
- Llobera, M., 2001. Building past landscape perception with GIS: understanding topographic prominence. *J. Archaeol. Sci.* 28, 1005–1014.
- Llobera, M., Fàbrega-Álvarez, P., Parcero-Oubiña, C., 2011. Order in movement: a GIS approach to accessibility. *J. Archaeol. Sci.* 38, 843–851.
- López, D., 2004. Primers resultats de l'estudi arqueobotànic (llavors i fruits) al jaciment protohistòric del Turó de la Font de la Canya (Avinyonet del Penedès, Alt Penedès, Barcelona) segles VII – III a.n.e. *Revista d'Arqueologia de Ponent* 14, 149–177.
- López-Cachero, F.J., 2007. Sociedad y economía durante el Bronce Final y la primera Edad del Hierro en el Noreste Peninsular: una aproximación a partir de las evidencias arqueológicas. *Trabajos de Prehistoria* 64 (1), 99–120.
- López-Cachero, F.J., 2011. Cremation cemeteries in the Northeastern Iberian Peninsula: funeral diversity and social transformation during the late bronze and Early Iron Ages. *Eur. J. Archaeol.* 14 (1–2), 116–132.
- López-Cachero, F.J., 2012. La dinámica de las ocupaciones humanas del Bronce Final al Ibérico Antiguo entre los ríos Tordera y Llobregat. In: Ropiot, V., Puig, C., Maziere, F. (Eds.), *Les plaines littorales en Méditerranée nord-occidentale. Regards croisés d'histoire, d'archéologie et de géographie, de la Protohistoire au Moyen Age*. Archéologie du Paysage 1, Montagnac, pp. 93–110.
- López-Cachero, F.J., Pons Brun, E., 2007. La periodització del bronze final al ferro inicial a Catalunya. *Cypselà: revista de prehistòria i protohistòria*, 51–64.
- López-Cachero, F.J., Rovira, M.C., 2012. El món funerari a la depressió prelitoral catalana entre el bronze final i la primera edat del ferro: ritual i dinamisme social a partir del registre arqueològic. In: Rovira, M.C., López-Cachero, F.J., Maziere, F. (Eds.), *Les necròpolis d'incineració entre l'Ebre i el Tiber (segles IX–VI a.C.)*. Monografies del Museu d'Arqueologia de Catalunya-Barcelona 14, Barcelona, pp. 37–55.
- Mestres, J., 2008. Vilafranca abans de la història. In: Arnabat, R., Vidal, J. (Eds.), *Història de Vilafranca del Penedès*. Vilafranca del Penedès, Ed. Andana, pp. 1–43.
- Mestres, J., Esteve, X., 2015. Sitges, cenotafis i sepulcres. 20 anys d'intervencions arqueològiques al Penedès. In: Esteve, X., Miró, C., Molist, N., Sabaté, G. (Eds.), *Jornades d'Arqueologia del Penedès 2011*. Institut d'Estudis Penedesencs, Vilafranca del Penedès, pp. 37–76.
- Mestres, J., Farré, J., Molist, N., Senabre, M.R., 2009. Espais i estructures arqueològiques. Bronze final i inici de l'edat del ferro. In: Molist, N. (Ed.), *La intervenció al sector 01 del conjunt històric d'Olerdola. De la prehistòria a l'etapa romana* (Campanyes 1995–2006), Barcelona, Monografies d'Olerdola 2, Barceloma, pp. 61–105.
- Murrieta-Flores, P., 2012. Travelling in a prehistoric landscape: exploring the influences that shaped human movement. *Trabajos de Prehistoria* 69 (1), 103–122.
- Petit, M.A., 1986. Contribución al estudio de la Edad del Bronce en Cataluña (comarcas del Moianès, Vallès oriental, Vallès Occidental, Maresme, Barcelonès y Baix Llobregat). Unpublished Ph.D. dissertation. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Pons Brun, E., 2014. Estudi comparatiu de les dinàmiques de poblament durant el bronze final i la primera edat del ferro a la Depressió Prelitoral Catalana. In: *La Transició de l'edat del Bronze Final a l'edat de Ferro*. Presented at the Col·loqui Internacional d'Arqueologia de Puigcerdà. Congrés Internacional de Catalunya., Institut d'Estudis Ceretans, Puigcerdà, Catalunya.
- R Development Core Team, 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. URL [HYPERLINK <http://www.R-project.org/>](http://www.R-project.org/) <<http://www.R-project.org/>>.
- Sanmartí Grego, J., Asensio i Vilaró, D., Belarte, M.C., Noguera, J., 2009. Comerç colonial, comensalitat i canvi social a la protohistòria de Catalunya. *Citerior: arqueologia i ciències de l'antiguitat*, 219–238.
- Santos Retolaza, M., 2003. Fenicios y griegos en el extremo NE peninsular durante la época arcaica y los orígenes del enclave poceo de "Emporion". *Treballs del Museu Arqueològic d'Eivissa e Formentera=Trabajos del Museo Arqueológico de Ibiza y Formentera*, 87–132.
- Terrats Jiménez, N., 2010. L'hàbitat a l'aire lliure en el litoral o prelitoral català durant el bronze inicial: anàlisi teòrica-metodològica aplicada a l'assentament de Can Roqueta (Sabadell-Barberà del Vallès, Vallès Occidental). *Cypselà* 18, 141–155.
- Yubero-Gómez, M., Rubio-Campillo, X., 2010. Models geogràfics, GIS i arqueologia. El cas d'estudi del poblament prehistòric a la conca del riu Ripoll (Vallès, 5500–550 a.n.e.). *Societat Catalana d'Arqueologia*, Barcelona.
- Yubero-Gómez, M., Esteve, X., Rubio-Campillo, X., 2014. Anàlisi espacial i estudi comparatiu de les dinàmiques de poblament durant el bronze final i la primera edat del ferro a la Depressió Prelitoral Catalana. In: Mercadal, O. (Ed.), *XV Col·loqui Internacional d'Arqueologia de Puigcerdà* (Puigcerdà), pp. 225–240.
- Yubero-Gómez, M., Rubio-Campillo, X., López-Cachero, J., 2015. The study of spatiotemporal patterns integrating temporal uncertainty in late prehistoric settlements in northeastern Spain. *Archaeol. Anthropol. Sci.*, 1–14.

A.3 The study of spatiotemporal patterns integrating temporal uncertainty in late prehistoric settlements in northeastern Spain (capítol 6)

The study of spatiotemporal patterns integrating temporal uncertainty in late prehistoric settlements in northeastern Spain

Maria Yubero-Gómez · Xavier Rubio-Campillo ·
Javier López-Cachero

Received: 2 February 2014 / Accepted: 23 January 2015
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Abstract This paper explores the integration of two variables that are typically difficult to use in spatial analysis: time and uncertainty. A framework is constructed to analyse mid- and long-term variation in settlement dynamics during late prehistory in northeastern Spain. Following previous proposals, an aoristic model is built with ceramic dating to feed a Monte Carlo simulation that explores the case study using a discrete time-step approach. At the same time, available radiometric dating is used to validate the accuracy of the simulation results. Departing from the static analysis of spatial variables, the model proposes a new approach by which researchers can address temporal uncertainty. The results show that patterns detected by classical spatial analysis can be produced by artefacts derived from the division of time in chronological units instead of discrete time periods. The model is also used to compare a priori identical variations whose rate of change, when analysed with this approach, is revealed to be completely different.

Keywords Spatial temporal analysis · Geographical information systems · Late prehistory in NE Iberian Peninsula

M. Yubero-Gómez (✉) · J. López-Cachero
Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques (SERP), Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia, University of Barcelona, C/Montalegre 6/8, 08001 Barcelona, Spain
e-mail: mariayubero@ub.edu

J. López-Cachero
e-mail: xavierlopez@ub.edu

X. Rubio-Campillo
Computer Applications in Science and Engineering (CASE), Barcelona Supercomputing Center, C/Gran Capità 2-4, Nexus I, despatx 105, Barcelona, Spain
e-mail: xavier.rubio@bsc.es

Introduction

In archaeological research, medium- to large-scale spatiotemporal data are most typically represented by geographical models using spatial databases (see (Fairén-Jiménez 2004; Pinhasi et al. 2005; Ruestes 2008; García-Sanjúan et al. 2009; Garcia 2013), but while these models have been effective in answering various research questions, they encounter two important obstacles with regard to the concepts of time and uncertainty.

The study of temporally explicit patterns

Geographical information systems are not designed for working with scenarios depicting temporal and spatial variability. Even though the issue has been previously discussed (Mlekuž 2010; Bailey 2007; Curry 1998), GIS-based tools remain an inadequate means of integrating temporal coordinates in spatial models. They cannot provide a common framework for detecting spatiotemporal patterns, despite the importance of these dynamics in archaeological research. Amongst the approaches explored to remedy this, the most common solution is to apply spatial analysis to different datasets corresponding to the chronologies and to compare their results at the end of the study. This can be combined with an alternative approach that collapses the spatial variable and analyses the different periods statistically to identify temporal patterns.

Both approaches are useful, especially when the study combines their results in one interpretation, but they do not solve the problem entirely.

Take two imaginary chronological units of an uneven time span ($C_a=1000$ years and $C_b=100$ years) as depicted in Fig. 1a and analyse geographical patterns of site settlements. During C_a , human populations gradually move

from a mountain to an adjacent plain (fieldwork has located a total of 10 locations that can be analysed). During the second phase (dataset of four sites), the population moves back to the mountains. A spatial analysis (Fig. 1b) does not show the pattern (the movement from mountain to plain in Ca and from plain to mountain in Cb) because it is impossible to split chronologies in smaller parts. Time series visualization (Fig. 1c) is also inadequate because it makes no provision for the site distribution. Although certain hypotheses can be tested using additional techniques (e.g. boxplots, variance in slope), it is impossible to link the statistical approach with additional explicit spatial data (distance between

sites, level of clustering); therefore, it is impossible to detect complex spatial patterns that change over time because spatial and temporal changes are not analysed by the same tool.

Another problem is the difference in time spans. The decrease in height values during Ca could be produced over a time span of 1000 years, 10 times more slowly than in Cb. The identification of different rates of change determines how clearly we can distinguish between gradual and sudden settlement dynamic variation, but cannot be detected with standard GIS-based tools. Archaeological research is therefore unable to apply the entire potential of spatial analysis and geostatistics to its

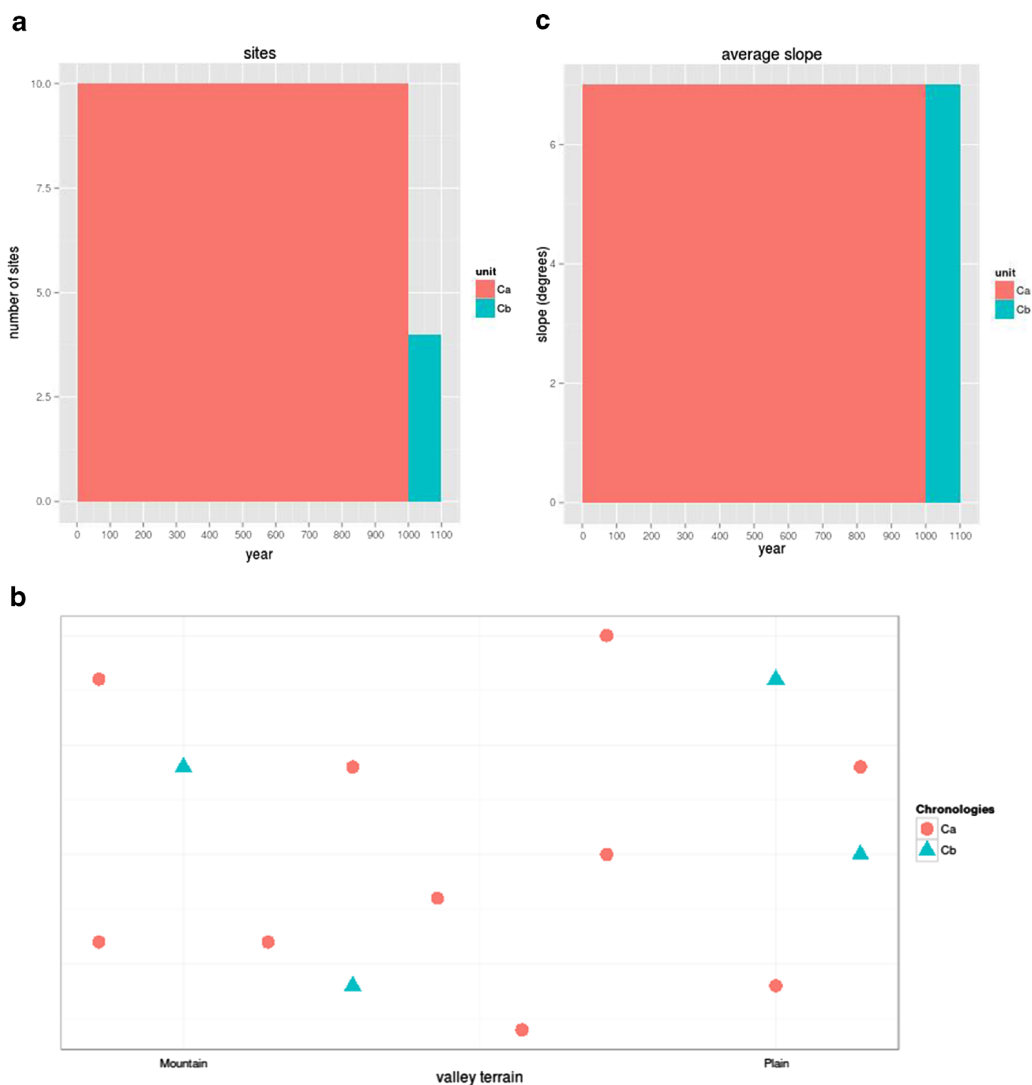


Fig. 1 Spatial analysis of an archaeological dataset comprising two imaginary chronological units: **a** number of sites, **b** spatial distribution and **c** time series

data, because the analysis is typically conducted using separate models of spatial and temporal variability. And the time spans are homogenized.

Uncertainty

The second issue raised in this paper is a long-standing question in archaeological research: how reliable is the data we work with?

First, that data has often been generated by different researchers using varying datasets and degrees of quality. This is particularly true of medium-scale studies, which use reports on sites that have been excavated over time periods of as long as 30 or 40 years and by teams supported by differing budgets. This can even have direct repercussions on the temporal coordinates of sites, specially when and where the quantity and quality of radiometric analysis is concentrated in a small number of sites.

Furthermore, uncertainty remains present in every type of data; however, thoroughly, a site has been researched. Even radiocarbon dates contain uncertainty and for this reason the real chronology of a site is expressed by a probabilistic model that is usually simplified or even discarded as data is progressively integrated from different sites. This has traditionally been applied when researchers work only with the average value, or with the average value plus the standard deviation. Finally, it is also common practice for researchers to discard radiometric datings with large error margins even though they are eliminating data that would be useful if this uncertainty was integrated in the model.

Three major consequences can be expected from this: first, imprecision and uncertainty in the measurements will be inherited in the model, even if they are not made explicit; second, the model will thus be imperfect; and third it will require revisions, which will alter our degree of understanding and our conclusions. These factors will inevitably lead to uncertainties in our evaluation of temporal data, but whether the magnitude of this uncertainty is acceptable will depend on our primary research questions (Crema et al. 2010).

In recent years, there has been some interest in addressing these issues, which are clearly linked because any formal geographical model that successfully deals with them will need to correctly model both time and uncertainty. This paper uses a spatiotemporal model integrating uncertainty to answer various questions about the uses of classical spatial analysis, and the remainder of the paper is organized as follows: “[Case study](#)” section describes the case study and reviews the research questions raised by previous spatial analysis. “[Model concepts](#)” section specifies the concepts that need to be integrated into the model; “[Methodology](#)” section describes the procedures used to build the model; and “[Discussion](#)” section interprets the results and evaluates the model’s effectiveness in analysing spatiotemporal patterns.

The case study: the late prehistoric settlements of the Besòs river valley

Our study area was located in the Besòs river valley, in the northeast of the Iberian Peninsula (see Fig. 2). During recent prehistory, the geographical, physical and environmental characteristics of this river valley made it an ideal territory for the survival of human groups and its archaeological sites show chronologies from the Palaeolithic period to the present day (Carlús i Martín and Terrats Jiménez 2003).

Located in the Catalan pre-coastal depression, the study area is a natural corridor approximately 200-km long and bears numerous traces of human occupation including evidence of houses, mills, canals, orchards, water wells, ice wells, roads, industries in nineteenth- and twentieth-century buildings, water supplies and archaeological and paleontological features (Carlús i Martín and Terrats Jiménez 2003; López Cachero 2005, 2007).

The area’s highly varied geography comprises a number of hills and mountains, a river basin and plain territories. On the one hand, this variety becomes valuable to researchers because they can study the human uses of each type of geography during different chronological units, from the Neolithic period to the Early Iron Age, and because a large number of sites straddle ancient prehistory and the modern age; on the other hand, the fact that their particular location has attracted successive periods of human occupation in different eras (Coll et al. 1993) has also made it more difficult to efficiently detect and analyse settlement patterns or to detect real occupation phases of sites.

Extensive research has been conducted on late prehistoric settlements (Esteve et al. 2004; Francés Farre 2005; Martín Còlliga 2009; Yubero Gómez and Rubio Campillo 2010; López Cachero 2012), but these studies have focused on specific periods or sites (Can Roqueta, Pla de la Bruguera, Camí de Can Grau) and have addressed questions at a local rather than global scale. For this reason, it is still difficult for us to compare and understand the spatiotemporal dynamics of the zone during the entire period of late prehistory. Moreover, in recent decades, the area has undergone large-scale urban development and most sites have been excavated, documented and subsequently destroyed. Researchers therefore have plenty of material evidence at their disposal, but the unequal nature of the fieldwork completed to date has created a high degree of uncertainty. The result, then, is that the set of late prehistoric sites that define the area constitutes an extremely fragmented aggregate, and the area as a whole has not been thoroughly studied.

Despite such issues, the area does offer a valuable starting point for exploring scenarios where formal spatiotemporal models integrating uncertainty are needed. First of all, recent

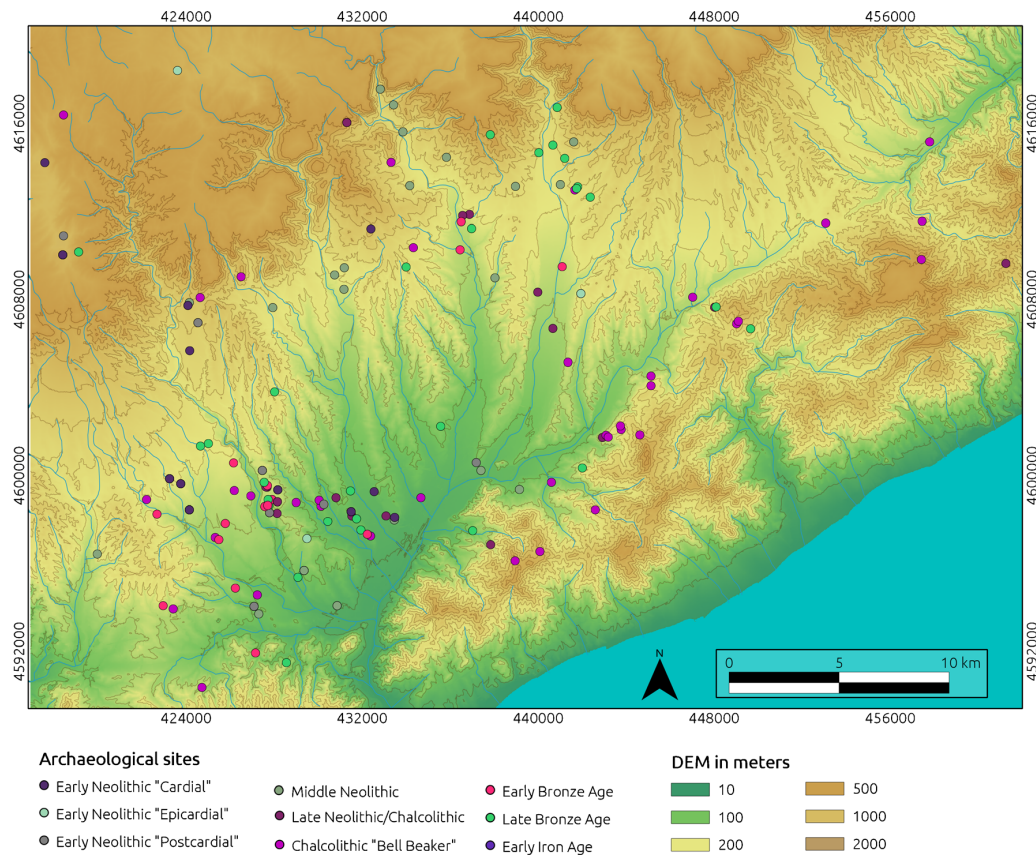


Fig. 2 Late prehistoric archaeological sites located in the study area, depicted over a Digital Elevation Model raster map

years have seen the development of a new research project on landscape reconstruction and spatial analysis (Yubero Gómez and Rubio Campillo 2010; López Cachero 2012) and the creation of a geographical model to be used as the basic framework for exploring this kind of archaeological record from a mesoscale late prehistoric perspective. In this context, although geographical information systems have been powerful enough to organize and analyse all these data and although their capabilities have been used in previous studies, we must now acknowledge their inadequacy for integrating time in our analyses and consider that additional research techniques will be required if we wish to extend our studies to understand changing spatial patterns over time. Basically, our model needs to address the concept of data uncertainty. Previous works such as Crema et al. (2010), Bevan and Wilson (2013) and Bevan et al. (2012) integrating archaeological spatial and temporal data have been reference works in this field.

Table 1 describes the time span we are dealing with. The relative and radiometric datings have provided an interesting but challenging scenario for various papers (Barceló 2007a; Barceló et al. 2013).

As explained above, our case study analysed not only short-term settlement dynamics but also mid- and long-term issues. In particular, we considered the validity of three patterns proposed by previous studies (Yubero Gómez and Rubio Campillo 2010; Yubero et al. Forthcoming) but inadequately served by standard GIS-based models.

Table 1 Chronological span for each chronological unit of late prehistory in the northeastern Iberian Peninsula, after Barceló (2007b)

Chronological unit	Absolute dates (approx.)
Early Neolithic <i>cardial</i>	5500–5000 BCE
Early Neolithic <i>epicardial</i>	5000–4400 BCE
Early Neolithic <i>postcardial</i>	4400–4000 BCE
Middle Neolithic	4000–3300 BCE
Late Neolithic/Chalcolithic	3300–2300 BCE
Chalcolithic “Bell Beaker”	2800–2200 BCE
Early Bronze Age	2300–1300 BCE
Late Bronze Age	1300–750 BCE
Early Iron Age	750–550 BCE

Pattern 1: the number of sites decreases from the Late Bronze Age to the Early Iron Age This pattern required further examination before it could be properly validated or identified as an artefact deriving from the comparison of different time spans.

Pattern 2: Middle Neolithic sites depict different geographical traits to Early and Late Neolithic sites The substantial variation in the variable slope suggests that during 4000–3300 BCE, the population was concentrated on the plains.

Pattern 3: In all the periods of late prehistory except the Chalcolithic period and the Early Iron Age, the distance from sites to natural routes slowly decreased If this pattern was validated, it would confirm that human populations constantly moved to strategic locations, but that there was a noteworthy variation on this trend in the case of the two periods described. Classical hypotheses propose that Chalcolithic populations are defined by small sites far away from the plains, and this is validated by spatial analysis (Yubero Gómez and Rubio Campillo 2010); on the other hand, the same study contradicts the long-standing hypothesis that the emergence of trade during the First Iron Age prompted populations to seek strategically located settlements, arguing that only a small number of sites offer the geographical data to corroborate this.

It was clear that an exclusively geographical approach would be an inadequate means of testing the validity of these three patterns, and that new paradigms were needed to create a spatiotemporal model that could integrate explicit uncertainty variables (Bevan and Wilson 2013; Bevan et al. 2012).

Finally, a further reason for adopting a spatiotemporal framework was that this could help us detect whether differences in the rate of change were more or less sudden or gradual. The three variables (number of archaeological sites, slope, distance from natural corridors) were thus analysed within a long-term perspective.

Model concepts

This section examines the concepts that played an important role in our model: settlement location and chronologies, and geographical and temporal data.

Spatial site database

In previous research, our spatial database was specifically designed for the needs of the case study and was based on an entity-relation model that could integrate existing data from different sources and be extended for further testing of the validity of the three patterns described above in “[Model](#)

[concepts](#)” section. The design allowed us to store, search and execute queries as needed. Moreover, it was flexible enough to accept changes without our having to modify the entire design and structure of the database (Yubero Gómez and Rubio Campillo 2010).

The database had 237 entries and contained all the relevant information about the sites in the study area, including a geo-referenced location, a list of chronological units of use and radiometric datings.

Geographical variables

A geographical model of the study area was needed to test the validity of the three patterns. The basic information is collected in previous or forthcoming papers, especially in (Yubero Gómez et al. [In press](#); Yubero Gómez et al. [Forthcoming](#); Yubero Gómez and Rubio Campillo 2010), where changes in Late Bronze-Early Iron Age mobility patterns are analysed. The third study defines two variables used again in the new spatiotemporal model: slope and distance to natural corridors.

Slope is the degree of inclination of a given location in relation to its neighbouring space (defined using Moore neighbourhood). The study of this variable helps to detect changes in settlement locations, from mountains to plains, and was particularly useful in the case of our study area, where there appears to be a direct link between the pattern of sites with high slope values and periods of high conflictivity. In these cases, steep slopes usually define locations with high control of the surrounding area combined with low accessibility.

On the other hand, the variable distance from archaeological sites to natural corridors is a powerful marker of the importance of good communication at mesoscale levels (Murrieta-Flores 2012). In order to calculate this, we defined a perimeter of points at a distance of 25 km from the study area at a resolution of 10 km. Then, we calculated the least-cost routes from each point on the perimeter to all the other points, while quantifying how many of the routes pass through each cell of the original raster map. The routes with the highest value (for example, taking the quartile with the highest number of routes) define the natural corridors according to the geography of the area. Studying this relationship by chronology and area enables us to see the extent to which this variable is significant and place it in relation to the archaeological contexts. Sites closer to the natural corridors of an area offer clear advantages for external trading and control of the territory, while settlements located further away from these routes are easier to defend in times of conflict because of their remote and inaccessible position.

Temporal uncertainty

Different approaches have been used to integrate the role of temporal uncertainty in archaeology (Lock and Harris 1997;

Lock and Molyneaux 2006). In our case study, we applied the framework proposed by Crema et al. (2010; Crema 2012), which uses a probabilistic model to quantify time when high levels of uncertainty hinder spatiotemporal analysis: the aoristic model (Ratcliffe 2000; Johnson 2003). This framework provides the researcher with a probabilistic model that can be combined with a Monte Carlo approach to explore potential spatial trajectories over time. Moreover, different techniques can be applied to the dataset generated by the simulations, testing a pattern or hypothesis against each run or performing risk analysis techniques in results (Bevan et al. 2012).

Methodology

We applied the described spatiotemporal framework to our data. Our intentions were to solve the problems in our geographical model and, as explained above, to quantify uncertainty in order to improve our understanding of mid-term settlement dynamics like those detected in the three patterns described above.

In order to explore the validity of the patterns described above in “Model concepts” section, the following steps were applied to the data of our case study.

Aoristic model

An aoristic model defines for each event a probability distribution of absence over discrete time steps. This probability is 0 outside the span comprised between by the absolute beginning (*terminus post quem*) and absolute ending (*terminus ante quem*) of the event, and equal probability of presence for all the time steps between these dates (this value is defined as *aoristic weight*).

Each event of our case study is the creation or reoccupation of a settlement through a chronological unit, and *t.p.q.* and *t.a.q.* are defined as the chronological units proposed in Table 1. The sum of the aoristic weights for a site in a given chronological unit is always 1, but there is no consensus about duration and number of occupations of each site within a given chronological unit. For this reason, the time step of the aoristic model has been defined at 50 years, as resolution adjusts to the quality of the information we have in this case study and the spans of the temporal units. Finally, each settlement can exist multiple time steps during each chronological unit.

The aoristic weight W of a settlement S for a given time step T_N is defined as

$W_{S,T_N} = \frac{\Delta T}{\beta_S - \alpha_S}$, being ΔT the duration of a time step, β_S the *terminus post quem* of the chronological unit, and α_S its *terminus ante quem*.

Figure 3a shows the sum of aoristic weights for the case study. If we compare the global trends of the figure with the sum of sites per pottery phase (defined in Fig. 3b), the value of the aoristic model becomes clear in that it allows us to question pattern 1 and to identify the supposed decrease in the number of sites during the transition from Late Bronze Age to Early Iron Age as an artefact produced by the differences in time span between the two periods (550 to 200 years). The simple move from a model based on pottery to an aoristic model shows how the number of sites actually increased.

Although this comparison is valuable, the aoristic model alone cannot be used to test hypotheses on the subject of spatiotemporal patterns because the model's probabilistic basis is difficult to translate to spatial coordinates, even though certain proposals have been made (Crema 2011). For this reason, to gather information related to spatial change over time, we designed an experiment based on Monte Carlo simulations.

Monte Carlo simulations

The approach we used is proposed by Crema et al. (Crema 2012; Crema et al. 2010). The idea was to use the probabilities of site existence defined in the aoristic model as an input for a Monte Carlo simulation. This technique is suited for exploring stochastic models where the number of probabilistic combinations is too high to be explored in the standard manner (by studying all the possible combinations of settlement occupation/abandonment for each time step). We simulated different historical trajectories using the aoristic weight of a site for a given time step as the probability of existence of a Bernoulli distribution. Each run computes, for each site and time step, absence/presence based on the aoristic weights for each chronological unit. Considering the high level of reoccupations, presence of a site during time step is independent, and each site can be abandoned and reoccupied several times during one chronological unit.

This created different trajectories for each run where we can identify settlement patterns. As an example, Table 2 describes the result for one of these runs.

The number of executions performed during the simulation was large because the uneven quality of the dataset generated a high level of variation. To use an appropriate (and at the same time minimum) number of runs a convergence test was designed. Figure 4 shows the density plots of standard deviations during time step for different number of runs (100, 1000 and 10,000). A Kolmogorov-Smirnov test was performed, considering that the density plot showed nonparametric shapes for the different sample sizes (results: (a) KS test between 100 and 1 k produced a p value of 0.36 and (b) the test between 1 and 10 k produced a p value of 0.96). Considering that the 1 and 10 k distributions were indistinguishable, we therefore chose 1 k as the sample size of the different analysis.

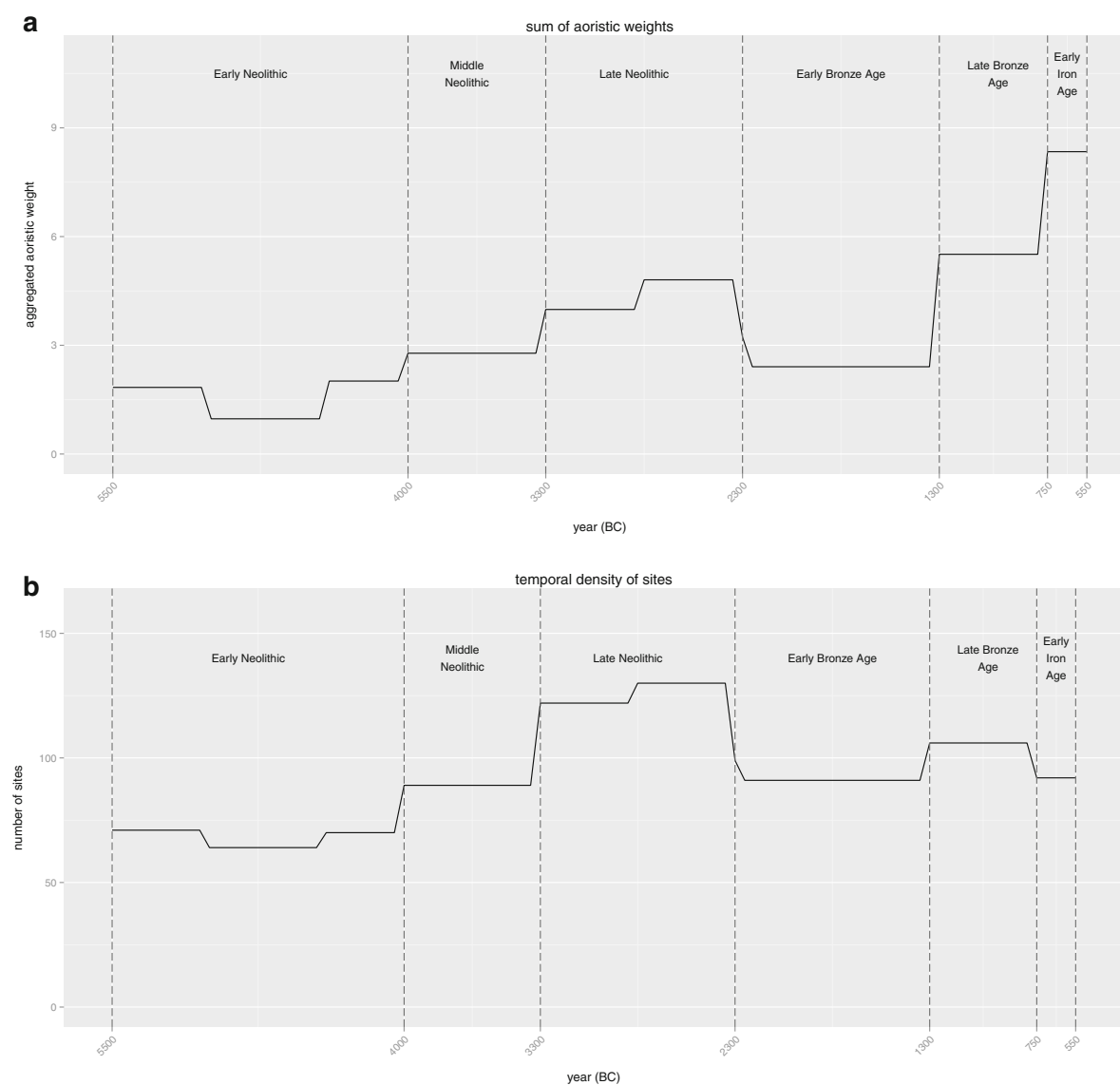
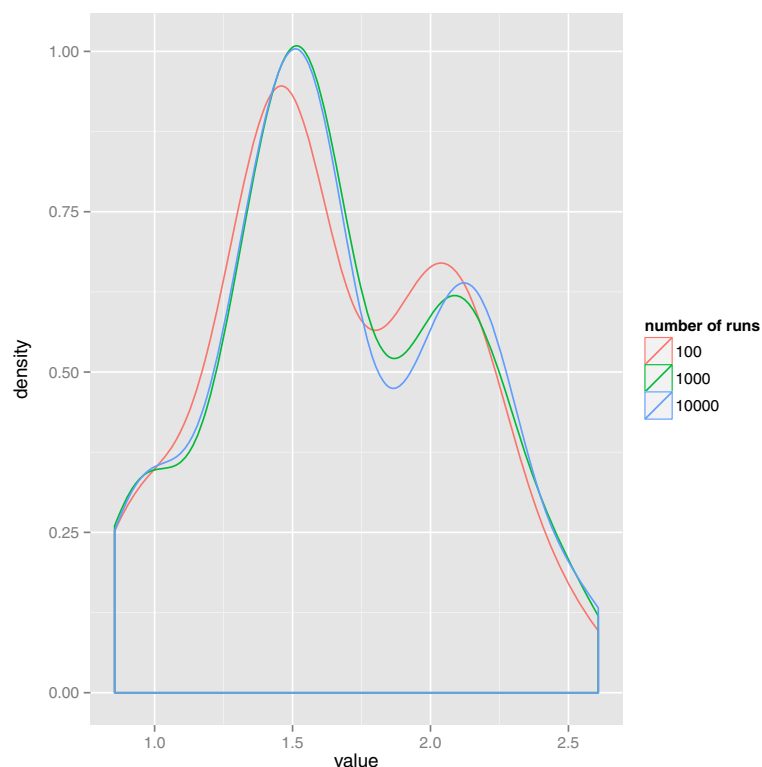


Fig. 3 **a** The sum of aoristic weights for the archaeological sites of the Besòs valley in relation to time steps. **b** Number of sites per time step based on relative dating of pottery phases

Table 2 A single Monte Carlo execution of our case study recording the existence (1) or nonexistence (0) of different sites for the period 1050–600 BCE

Simulation	Time steps of 50 years											
Archaeological site	...	1050	1000	950	900	850	800	750	700	650	600	...
Can Piteu-Can Roqueta	...	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	...
Can Gambús-1	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	...
Pla de la Bruguera	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Fig. 4 Density plots for standard deviations of 100, 1 and 10 k sample sizes of the Monte Carlo distributions



The spatiotemporal model could thus be studied through the testing of hypotheses (examining the validity of patterns) in each of these 1000 trajectories, which provides the researcher with a global approach to the data where temporal uncertainty has already been taken into account. Results for each variable are shown in Fig. 5a (number of sites), 5b (slope) and 5c (distance from natural routes).

Cross-validation of the aoristic model with radiocarbon dates

The framework combines the aoristic approach to temporal uncertainty with Monte Carlo simulations for integrating archaeological and spatial data. Unfortunately, it is difficult to use multiple data sources without breaking the coherence of the probabilistic model.

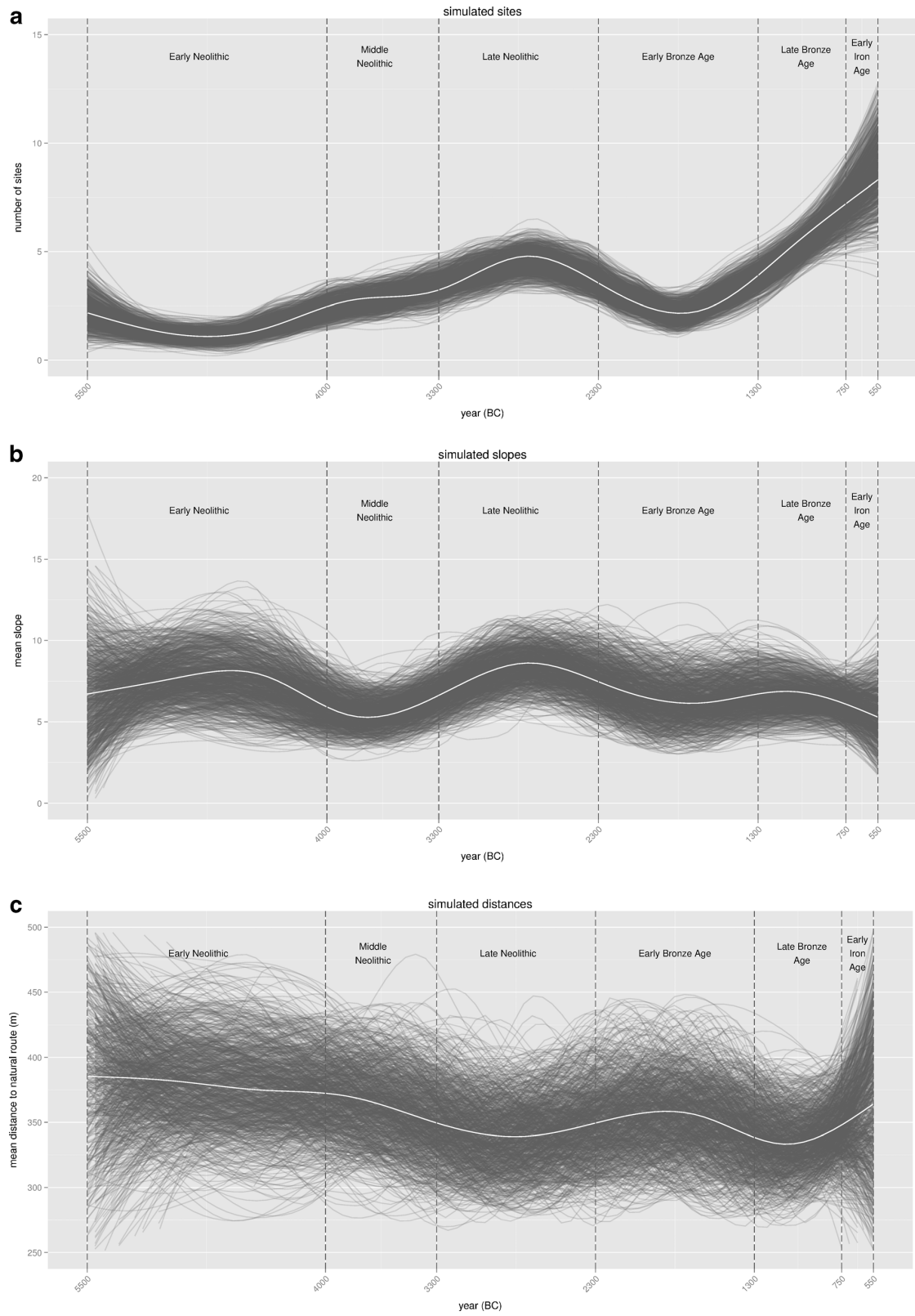
This is extremely important where radiometric datings are available for some of the sites. This data should be combined with the general temporal information provided by pottery dating but the aoristic model cannot integrate different time spans for the same event. Lock and Harris suggest an alternative approach in which each dating technique has an associated weight and the final value of each site is computed as the sum of the different values for each time step and site (Lock and Harris 1997). This approach is incompatible with Monte Carlo simulations because weights are chosen by the

researcher and the final value cannot be used as a probability between 0 and 1.

In addition, in our case study, radiocarbon dates were concentrated in a small number of sites (e.g. Bòbila Madurell, Cova del Frare and Can Roqueta) and were either scarce or nonexistent in the majority. For this reason, any integration of radiocarbon datings into the aoristic model would distort the results and introduce a clear bias towards the most documented sites.

We propose an alternative method for radiometric dating in spatiotemporal models which we believe can be useful when researchers have a low number of datings, as we did in this case study. The method consists in validating the model for the most well-represented time steps instead of integrating radiocarbon datings into the model. The comparison of the average geographical values should provide insight about the degree of correctness of our aoristic model built from pottery datings.

Fig. 5 **a** Number of sites generated by Monte Carlo simulations. Each grey line shows the results for a different run, and the white shape is the average trajectory. **b** Slope of existing sites, generated by Monte Carlo simulations. Each grey line shows the results for a different run, and the white shape is the average trajectory. **c** Distance of existing sites from natural routes, generated by Monte Carlo simulations. Each grey line shows the results for a different run, and the white shape is the average trajectory



This cross-validation is shown for slope and for distance from natural routes in Fig. 5a, b over three different time steps: 4250, 1900 and 650 BCE.

In our case study, these were the sites that offered the highest number of radiocarbon dates, so the information provided by this average was the most reliable information we could retrieve from the data available. Additional research and analysis could improve the picture, but even with such scarce data, we could confirm that the patterns detected using the aoristic model were

reproduced using just the sites dated during these time steps with radiometry.

Given the sample of sites with radiocarbon dates (5–10), validation remained difficult. However, the comparison of tendencies could still provide us with information about the spatiotemporal patterns: in all cases, we observed a constant decrease of the mean value for slope (Fig. 6a), while in the case of the variable distance from natural sites, the values decreased from 4250 to 1900 BCE and increased slightly from 1900 to 650 BCE (Fig. 6b).

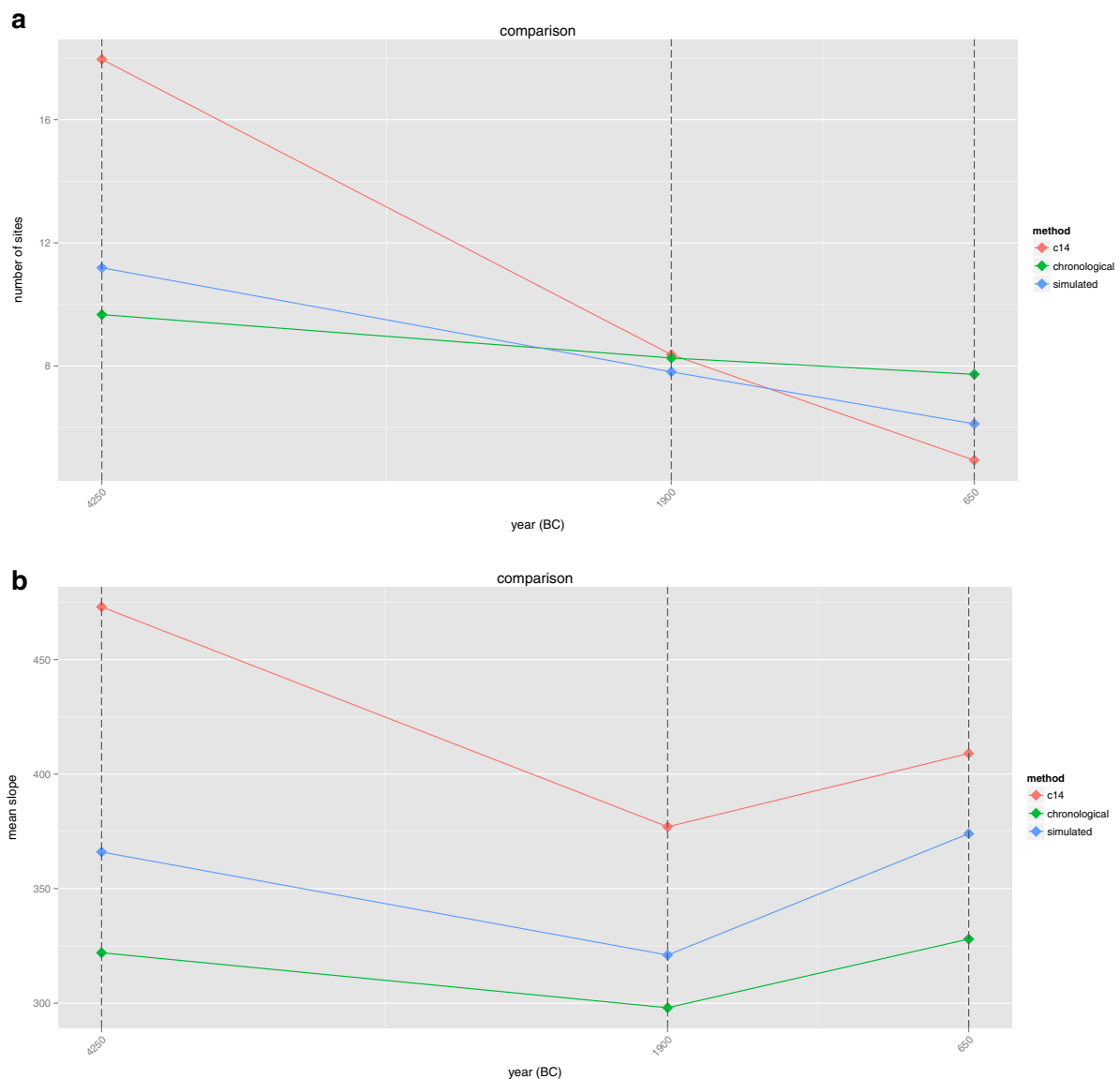


Fig. 6 **a** The average for the variable slope described for the different models at time steps 4250, 1900 and 650 BCE. The value was computed from the collection of sites existing in these time steps. C14 values are taken from the mean value of the probabilistic distribution. **b** The average

for the variable distance from natural routes described for the different models at time steps 4250, 1900 and 650 BCE. The value was computed from the collection of sites existing in these time steps. C14 values are taken from the mean value of the probabilistic distribution.

To sum up, in the cases where radiometric datings are available in small numbers, we suggest using these datings to cross-validate the model. The comparison of the spatial trends detected in the Monte Carlo simulations against the sites with radiometric datings for a particular time step can be used to test whether detected patterns are consistent. Naturally, the only drawback is that this technique cannot be used to examine the variable number of sites.

Calculation of spatial values

The next step was a computation of the variables needed to test the validity of the three patterns described above in “[Model concepts](#)” section. In our case study, we wanted to understand the temporal differences in the changes in settlement dynamics detected with classical spatial analysis.

In order to do this the pace of change must be calculated for every time step as follows.

- For each settlement, extract the value of the variables (in our case, slope and distance from natural routes).
- For each time step and simulated trajectory, calculate the average value of (a) above (i.e. compute the average for the set of sites that exist during each time step).
- Apply a temporal kernel of 150 years (3 time steps) to (b) above, under the following formula:

$$WT_n = \frac{\sum_{i=n-1}^{n+1} \overline{WT_i}}{3},$$

being WT_n the value of the time step T_n at a given trajectory. The temporal kernel algorithm is applied to avoid distortions provoked by outliers at particular time steps. The technique smooths the variation, while the relatively narrow width of the kernel prevents it from removing the underlying pattern.

Detection of variation

The rate of variation is also a relevant variable while analysing settlement dynamics. In order to explore this concept, relative variation was computed from absolute values provided by Monte Carlo simulation. For each time step, the rate of variation was computed as an angle, using the Pythagorean theorem.

The sign of the variation shows whether the change is an increase or a decrease, while its value provides the rate of change (0 being the value when consecutive time steps have identical absolute values). The results can be seen in Fig. 7a–c.

Discussion

The results generated by this model were used to test the validity of the three patterns described above in “[Model concepts](#)” section. In particular, our intention was to examine whether a pattern that had been observed by classical spatial analysis could still be detected when the temporal variable was incorporated. Our results were as follows:

Pattern 1 (the number of sites decreases from the Late Bronze Age to the Early Iron Age)

Figure 3b shows that the absolute number of sites decreases in this transition. In contrast, the aoristic model shown in Fig. 3a proves that the probability of a new site actually increases. For this reason, this pattern can be discarded as an artefact derived from comparing chronological units with different time spans.

Pattern 2 (Middle Neolithic sites depict different geographical traits to Early and Late Neolithic sites)

Figure 5a, c suggests that the geographical traits of Middle Neolithic settlement dynamics are no different to those of other Neolithic chronological units. In the evolution of both variables (number of sites and distance from natural routes), the Middle Neolithic continues the trend of Early Neolithic and Late Neolithic: an increase in the number of sites, and a decrease in the distance from natural routes.

On the other hand, a different pattern was notable for the variable slope. In the aoristic model (Fig. 5b), this trend is confirmed and Middle Neolithic behaviour appears closer to later periods such as the Bronze Age or First Iron Age than it is to the Neolithic. The explanation may be that during the Middle Neolithic human populations emigrated from other areas to the area of our study. The settlers’ priorities would have differed to the priorities of previous occupants of the area, so that the niche they occupied (plains without great strategic value) was not previously used. This possibility is supported by the rate of variation (Fig. 7b), where the decrease in slope is sudden and is only detected at the beginning of the chronological unit (in contrast to variations like the increase produced at the end of the Middle Neolithic).

Pattern 3 (in all the periods of late prehistory except the Chalcolithic period and the Early Iron Age, the distance from sites to natural routes slowly decreased)

This pattern is validated in most of the chronological units studied, with two important exceptions.

The first exception is that Early Neolithic epicardial sites do not follow the pattern, as Fig. 5c clearly shows (the pattern of previous and subsequent chronological units is completely different). This difference (almost half the distance from natural routes than in the other periods) can be understood as an artefact generated by a low sample. In fact, this is the period with a lowest number of sites, so the results will have to be considered inconclusive until new data can validate this pattern.

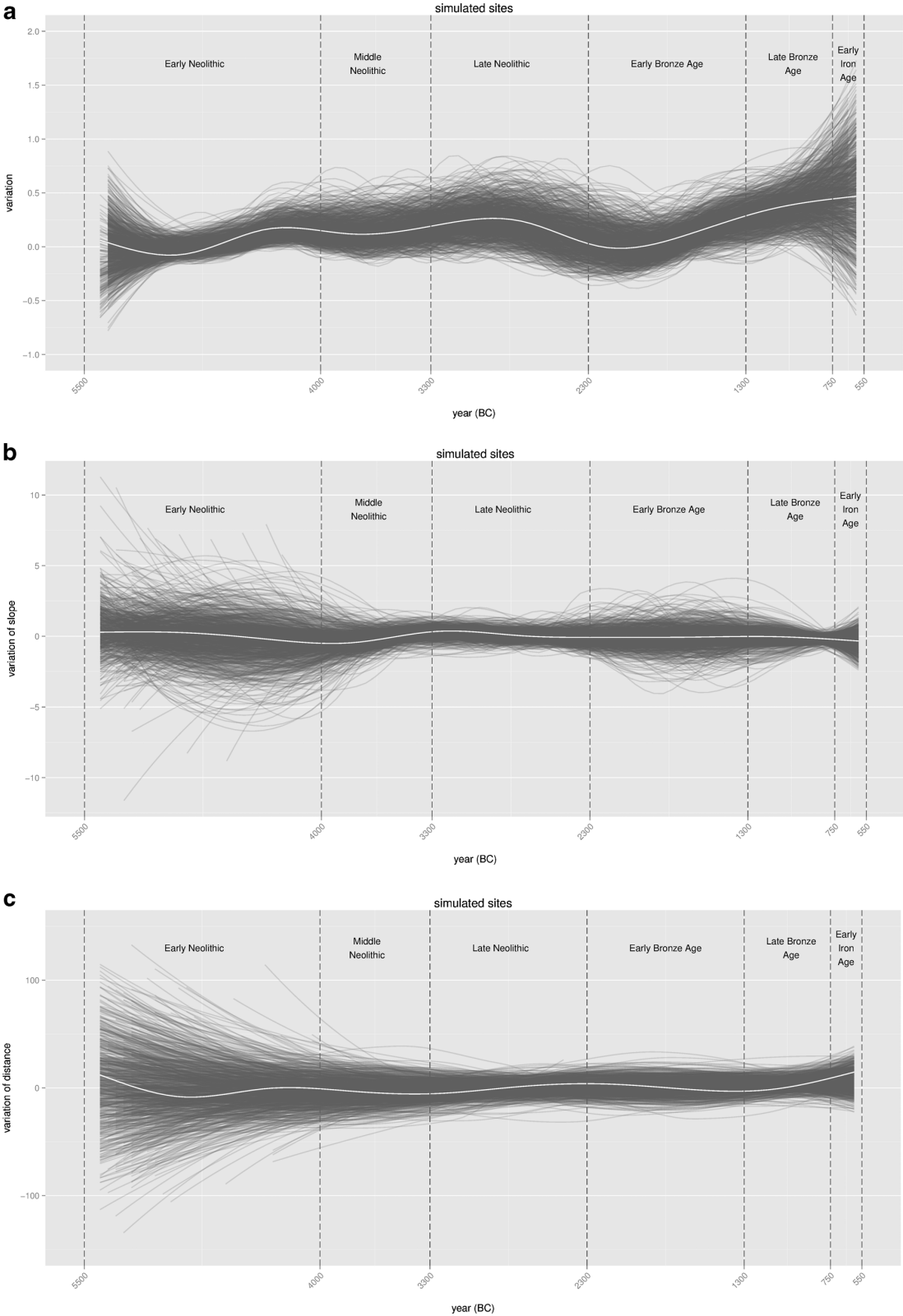


Fig. 7 **a** Variation in number of sites for the chronological model. **b** Variation in slope for the chronological model. **c** Variation in distance from natural routes for the chronological model

The second exception is the Chalcolithic and Early Iron Age. These chronological units show a slight increase in the distance of sites from natural routes, as observed above. Nevertheless, closer inspection of the rate of variation (Fig. 7c) reveals that this perspective is distorted: in both cases, the trend is not a sudden change but a gradual increase that was already present during previous chronological units. We can therefore conclude that the supposed pattern of gradual movement from heights towards natural routes is not real, and that during long periods of time, there was movement in the opposite direction.

To summarize, first of all, this paper has described how a probabilistic spatiotemporal model can validate the existence of changes in settlement dynamics observed with classical spatial analysis. In particular, the trends are verified when periods have similar time spans and highly unlikely when this is not the case (as repeatedly shown with Late Bronze Age and Early Iron Age data).

Second, our study has integrated radiometric dating to the point where it can be useful but does not create a strong bias of the results towards the most well-known sites. In other words, our work suggests that the synchronic comparison of variables can validate the diachronic approach of the aoristic model whenever this is allowed by the number of radiometric datings for a particular time. This is useful when the dataset is uneven (as in our study). However, in case studies where a large amount of available radiometric datings, it would be desirable to create the aoristic model exclusively based on this high-quality datasets.

Third, we have proposed that the study of the rate of variation is extremely useful for exploring long-term settlement dynamics. Once we move from a comparison between chronologies and a more continuous study, temporal differences between changes must be studied, and this paper has offered a simple algorithm capable of dealing with this variable on top of the aoristic model.

Finally, we propose that any comparison of geographical variables for different chronologies should address temporal uncertainty. Temporal uncertainty plays a crucial role in our understanding of the relationship between archaeological sites and their environment, and if we are to fully understand spatiotemporal change, then archaeological research must begin to consider this issue.

Acknowledgments We would like to thank an anonymous reviewer for helpful comments and suggestions on earlier versions of the document. This paper was written as part of the research undertaken by the consolidated research group SGR2009 1145 Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques and received funding from the Catalan government's Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (Agency for the

Administration of University and Research Grants, AGAUR) and from the projects HAR2011-26193 and HAR2013-48010-P from the Spanish Ministry of Science and Innovation. We would also like to thank AGAUR for providing Maria Yubero with the pre-doctoral grant 2010FI_B 00641 and BE2012 BE100563. The work of Xavier Rubio-Campillo is part of the SimulPast project CSD2010-00034, funded by the CONSOLIDER-INGENIO2010 programme of the Spanish Ministry of Science and Innovation.

References

- Bailey G (2007) Time perspectives, palimpsests and the archaeology of time. *J Anthr Archaeol* 26:198–223. doi:10.1016/j.jaa.2006.08.002
- Barceló JA (2007a) La incertesa de les cronologies absolutes en arqueologia. Probabilitat i estadística. *Cypsela Rev Prehistòria Protohistòria* 23–33
- Barceló JA (2007b) La seqüència crono-cultural de la prehistòria catalana. Anàlisi estadística de les datacions radiomètriques de l'inici de l'holocè a l'edat del ferro. *Cypsela Rev Prehistòria Protohistòria* 65–88
- Barceló JA, Capuzzo G, Bogdanovic I (2013) New developments in database technology. The example of radiocarbon data. In: Castillo A (ed) *Actas del primer Congreso Internacional de Buenas Prácticas en Patrimonio Mundial: Arqueología*. Editorial Complutense, Mahó, Menorca (Spain), pp 733–749
- Bevan A, Wilson A (2013) Models of settlement hierarchy based on partial evidence. *J Archaeol Sci* 40:2415–2427. doi:10.1016/j.jas.2012.12.025
- Bevan A, Conolly J, Henning C, et al. (2012) Measuring chronological uncertainty in intensive survey finds: a case study from Antikythera, Greece. *Archaeometry* 1–17. doi:10.1111/j.1475-4754.2012.00674.x
- Carlús i Martín X, Terrats Jiménez N (2003) El poblament prehistòric i antic a la conca mitjana del riu Ripoll: dels caçadors-recol·lectors a l'antiguitat tardana. *Arxaona Rev Història* 26–45
- Coll J-M, Molina JA, Roig J (1993) El poblament protohistòric de la conca alta del riu Ripoll: de l'edat del ferro a la fi del món ibèric: primeres dades. *Limes Rev Arqueol* 41–52
- Crema ER (2011) Aoristic approaches and voxel models for spatial analysis. In: Erzsebet J, Ferenc R, Vajk S (eds) *CAA2008 Road Reconstr. Proc. 36th Annu. Conf. Comput. Appl Quant Methods Archaeol Bp. 2-6 April 2008*. Archaeolingua, Budapest, pp 179–186
- Crema ER (2012) Modelling temporal uncertainty in archaeological analysis. *J Archaeol Method Theor* 19:440–461. doi:10.1007/s10816-011-9122-3
- Crema ER, Bevan A, Lake MW (2010) A probabilistic framework for assessing spatio-temporal point patterns in the archaeological record. *J Archaeol Sci* 37:1118–1130. doi:10.1016/j.jas.2009.12.012
- Curry MR (1998) *Digital places: living with geographic information technologies*. Taylor & Francis Group
- Esteve X, Feliu JM, Mestres J, et al. (2004) Anàlisi comparatiu de dos assentaments del bronze inicial a la depressió prelitoral catalana: can Roqueta II (Sabadell, Vallès occidental) i Mas d'en Boixos-1 (Pacs del Penedès, Alt Penedès). *Cypsela* 73–101
- Fairén-Jiménez S (2004) ¿Se hace camino al andar? Influencia de las variables medioambientales y culturales en el cálculo de caminos óptimos mediante SIG. *Trab Prehist* 61:25–40
- Francés Farre J (2005) Evolució de les formes d'hàbitat a la franja central de la costa catalana durant el primer mil·lenni a.n.e. *Rev Arqueol Ponent* 59–78
- García A (2013) GIS-based methodology for Palaeolithic site location preferences analysis. A case study from Late Palaeolithic Cantabria (Northern Iberian Peninsula). *J Archaeol Sci* 40:217–226. doi:10.1016/j.jas.2012.08.023

- García-Sanjúan L, Wheatley D, Murrieta-Flores P, Márquez-Pérez J (2009) Los SIG y el análisis espacial en Arqueología. Aplicaciones en la Prehistoria Reciente del Sur de España. In: Nieto Prieto FX, Cau Ontiveros MÁ (eds) *Arqueol. Nàutica Mediterrànea*, Girona, pp 163–180
- Johnson I (2003) Aoristic analysis: seeds of a new approach to mapping archaeological distributions through time. *Aoristic Anal Seeds New Approach Mapp Archaeol Distrib Time*
- Lock GR, Harris TM (1997) Analyzing change through time within a cultural landscape: conceptual and functional limitations of a GIS approach. *Anal Change Time Cult Landsc Concept Funct Limitations GIS Approach*
- Lock G, Molyneux B (2006) *confronting scale in archaeology: issues of theory and practice*. Springer
- López Cachero FJ (2005) La Necrópolis de Can Piteu-Can Roqueta (Sabadell) en el contexto del Bronce Final y Primera Edad del Hierro en el Vallès. info:eu-repo/semantics/doctoralThesis, Universitat de Barcelona
- López Cachero FJ (2007) Society and economy in the Late Bronze Age and the early Iron Age in the Northeast of the Iberian Peninsula: an approach from the archaeological sources. *Trab Prehist*. doi:10.3989/tp.2007.v64.i1.96
- López Cachero FJ (2012) La dinámica de las ocupaciones humanas del Bronce Final al Ibérico Antiguo entre los ríos Tordera i Llobregat. In: Ropiot V, Puig C, Maziere F (eds) *Plaines Littorales En Méditerranée Nord-Occident. Croisés Hist. Archéologie Géographie Protohist. Au Moyen Age*. Éditions Monique Mergoïl, Montagnac, pp 93–110
- Martin Colliga A (2009) Les sociétés du Néolithique moyen en Catalogne et leur gestion du funéraire. In: Guilaine J (ed) *Sépultures Sociétés Néolithique À L'Histoire*. Éditions Errance, Paris, pp 45–67
- Mlekuž D (2010) Time geography, GIS and archaeology. *Time Geogr. GIS Archaeol*
- Murrieta-Flores P (2012) Entendiendo la movilidad humana mediante tecnologías espaciales: el papel de las áreas naturales de tránsito en el Suroeste de la Península Ibérica durante la Prehistoria Reciente. *Trab Prehist* 69(1):103–122
- Pinhasi R, Fort J, Ammerman AJ (2005) Tracing the origin and spread of agriculture in Europe. *PLoS Biol* 3:e410. doi:10.1371/journal.pbio.0030410
- Ratcliffe JH (2000) Aoristic analysis: the spatial interpretation of unspecific temporal events. *Int J Geogr Inf Sci* 14:669–679. doi:10.1080/136588100424963
- Ruestes C (2008) Social organization and human space in North-Eastern Iberia during the third century BC. *Oxf J Archaeol* 27:359–386. doi:10.1111/j.1468-0092.2008.00314.x
- Yubero Gómez M, Rubio Campillo X (2010) Models geogràfics, GIS i arqueologia: el cas d'estudi del poblament prehistòric a la conca del riu Ripoll (Vallès, 5500-550 ane). *Societat Catalana d'Arqueologia, Barcelona*
- Yubero Gómez M, Esteve Gràcia X, Rubio Campillo X (Forthcoming) Estudi comparatiu de les dinàmiques de poblament durant el bronze final i la primera edat del ferro a la Depressió Prelitoral Catalana. *Transició L'edat Bronze Final L'edat Ferro, XV Col·loqui Internacional d'Arqueologia de Puigcerdà. Congrés Internacional de Catalunya*
- Yubero Gómez M, Rubio Campillo X, Esteve Gràcia X, López Cachero FJ (Forthcoming) Mapping changes in late prehistoric landscapes: a case study in the Northeastern Iberian Peninsula. *J Anthr Archaeol*

Bibliografia

- Allsop, D., & Foard, G. (2007). Case Shot: An Interim Report on Experimental firing and Analysis to Interpret Early Modern Battlefield Assemblages. *Journal of Conflict Archaeology*, 3(1), 111–146. Retrieved 2014-09-15, from <http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1163/157407807X257403> doi: 10.1163/157407807X257403
- Anguera, P. (2008). *L'onze de setembre: història de la Diada (1886-1938)* (Vol. 1). L'Abadia de Montserrat.
- Aquilué, X., Burés, L., Castanyer, P., Esteba, Q., Pons, E., Santos, M., & Tremoleda, Q. (2000). Els assentaments indígenes i l'ocupació grega arcaica de Sant Martí d'Empúries (l'Escala, Alt Empordà), Resultats del projecte d'intervencions arqueològiques de 1994 i 1995. *Girona, Sèrie Monogràfica*, 19, 19–32.
- Asensio, D., López, D., Mestres, J., Molist, M., Ros, A., & Senabre, M. (2006). De la primera edat del ferro a l'ibèric antic: la formació de les societats complexes a la zona del Penedès. In *Tercera reunió d'arqueologia de calafell* (pp. 289–307).
- Asensio i Vilaró, D. (2005). La incidencia fenicia entre las comunidades indígenas de la costa catalana (siglos VII-VI aC): ¿un fenómeno orientalizante? In *El periodo orientalizante: Actas del III Simposio Internacional de Arqueología de Mérida, Protohistoria del Mediterráneo Occidental* (pp. 551–564). Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC.
- Asensio i Vilaró, D., Cella Espin, X., & Morer de Llorens, J. (2005). El jaciment protohistòric del Turó de la Font de la Canya (Avinyonet del Penedès, Alt Penedès) : un nucli d'acumulació d'excedents agrícoles a la Cossetània (segle VII-III aC). *Fonaments*, 12, 177–195.
- Babbi, A., Bubenheimer-Erhart, F., Marín-Aguilera, B., & Muehl, S. (2015). *The Mediterranean Mirror: Cultural Contacts in the Mediterranean Sea between 1200 and 750 BC*. Regensburg: Schnell Und Steiner.

- Bailey, G. (2007). Time perspectives, palimpsests and the archaeology of time. *Journal of Anthropological Archaeology*, 26(2), 198–223. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278416506000481> doi: 10.1016/j.jaa.2006.08.002
- Barceló, J. A. (2007a). La incertesa de les cronologies absolutes en arqueologia. Probabilitat i estadística. *Cypsela: revista de prehistòria i protohistòria*, 17, 23–33. Retrieved 2013-01-24, from <http://www.raco.cat/index.php/Cypsela/article/view/250392>
- Barceló, J. A. (2007b). La seqüència crono-cultural de la prehistòria catalana. Anàlisi estadística de les datacions radiomètriques de l'inici de l'holocè a l'edat del ferro. *Cypsela: revista de prehistòria i protohistòria*, 17, 65–88. Retrieved 2013-01-24, from <http://www.raco.cat/index.php/Cypsela/article/view/250395>
- Barceló, J. A., Capuzzo, G., & Bogdanovic, I. (2013). New developments in database technology. The exemple of radiocarbon data. In A. Castillo (Ed.), *Actas del primer congreso internacional de buenas prácticas en patrimonio mundial: Arqueología* (pp. 733–749). Mahó, Menorca (Spain): Editorial Complutense.
- Barceló, J. A., & Maximiliano Castillejo, A. (2006). La multidimensionalidad del espacio arqueológico: teoría, matemáticas y visualización. In I. Grau Mira & O. Vicente Campos (Eds.), *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje* (pp. 29–40). Alacant: Lucentum.Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Retrieved 2013-01-27, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2365072>
- Barros, M., Salat, N., & Sarmant, T. (2007). *Vauban: l'intelligence du territoire*. Chaudun.
- Bermúdez Sánchez, J., Mayoral Herrera, V., & Chapa Brunet, M. T. (2006). Aplicación de SIG al estudio de modelos de ocupación en la prehistoria reciente del Bajo Jarama, Madrid. In I. Grau Mira (Ed.), *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje* (pp. 201–210). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Retrieved 2013-01-27, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2365268>
- Berrocal, M. C., Sanjuán, L. G., & Gilman, A. (2013). *The Prehistory of Iberia: Debating Early Social Stratification and the State*. Routledge.

- Bevan, A., & Conolly, J. (2004). GIS, Archaeological Survey, and Landscape Archaeology on the Island of Kythera, Greece. *Journal of Field Archaeology*, 29(1/2), 123. Retrieved 2013-01-27, from https://iris.ucl.ac.uk/research/browse/show-publication?pub_id=13338&source_id=1 doi: 10.2307/3181488
- Bevan, A., & Conolly, J. (2013). *Mediterranean islands, fragile communities and persistent landscapes: Antikythera in long-term perspective*. Cambridge University Press.
- Bevan, A., Conolly, J., Henning, C., Jonsthorpe, A., Quercia, A., Spencer, L., & Vroom, J. (2012). Measuring chronological uncertainty in intensive survey finds: a case study from Antikythera, Greece. *Archaeometry*, 55(2), 312–328. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-4754.2012.00674.x> doi: 10.1111/j.1475-4754.2012.00674.x
- Bevan, A., & Wilson, A. (2013). Models of settlement hierarchy based on partial evidence. *Journal of Archaeological Science*, 40(5), 2415–2427. Retrieved 2013-10-03, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030544031200550X> doi: 10.1016/j.jas.2012.12.025
- Bouso García, M., Esteve, X., Feliu, J. M., Mestres, J., Rodríguez, A., Palomo, A., ... Senabre Juncosa, M. R. (2004). Anàlisi comparatiu de dos assentaments del bronze inicial a la depressió prelitoral catalana: Can Roqueta II (Sabadell, Vallès occidental) i Mas d'en Boixos-1 (Pacs del Penedès, Alt Penedès). *Cypsela*, 15, 73–101. Retrieved 2013-01-24, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1171319>
- Bruguera, M. (1871). *Historia del memorable sitio y bloqueo de Barcelona y heroica defensa de los fueros y privilegios de Cataluña en 1713 y 1714*. L. Fiol y Gros.
- Carlús i Martín, X., López Cachero, F. J., Oliva, M., Palomo, A., Rodríguez, A., Terrats Jiménez, N., ... Villena, N. (2007). *Cabanes, sitges i tombes : el paratge de Can Roqueta, Sabadell, Vallès Occidental, del 1300 al 500 AC* (No. 4). Sabadell: Museu d'història de Sabadell.
- Carlús i Martín, X., López Cachero, F. J., Terrats Jiménez, N., Oliva, M., Palomo, A., & Rodríguez, A. (2007). Diacronia durant la prehistòria recent a can Roqueta (Sabadell-Barberè del Vallès, Vallès occidental) entre el VI y el I mil.lenni cal ane. *Cypsela*, 17, 115–142. Retrieved 2013-01-22, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2988868>

- Carlús i Martín, X., & Terrats Jiménez, N. (2003). El poblament prehistòric i antic a la conca mitjana del riu Ripoll: dels caçadors-recol·lectors a l'antiguitat tardana. *Arraona: revista d'història*, 27, 26–45.
- Castellví, F. D., Francesc de. (1999). *Narraciones Históricas*. Fundación Francisco Elías de Tejada.
- Cebrià i Escuer, A., Esteve, X., & Mestres, J. (2003). Enclosures a la serra del Garraf des de la Protohistòria a la Baixa Antiguitat: recintes d'estabulació vinculats a camins ramaders. In *Simposi internacional d'arqueologia del baix penedès* (pp. 313–316). Generalitat de Catalunya. Retrieved 2015-11-03, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=837115>
- Chandler, D. G. (1990). *The art of Warfare in the Age of Marlborough*. Sarpedon Publishing.
- Church, T., Brandon, R., & Burgett, G. R. (2000). *GIS applications in archaeology: method in search of theory*. Taylor and Francis: London.
- Coll, J.-M., Molina, J. A., & Roig, J. (1993). El poblament protohistòric de la conca alta del riu Ripoll: de l'edat del ferro a la fi del món ibèric: primeres dades. *Limes: Revista de arqueología*, 3, 41–52. Retrieved 2013-01-22, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2419929>
- Collar, A., Coward, F., Brughmans, T., & Mills, B. (2015). Networks in archaeology: Phenomena, abstraction, representation. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 22(1), 1-32. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/s10816-014-9235-6> doi: 10.1007/s10816-014-9235-6
- Conolly, J., & Lake, M. (2006). *Geographical Information Systems In Archaeology*. Cambridge University Press. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=fMCqf-YSRtsC>
- Corbalán, J. M. M. (1991). *La labor profesional de los ingenieros militares "borbónicos" de Flandes a España (1691-1718): formación y desarrollo de una nueva arquitectura moderna en Cataluña*. Universitat de Barcelona.
- Crema, E. R. (2011). Aoristic Approaches and Voxel Models for Spatial Analysis. In J. Erzsebet, R. Ferenc, & S. Vajk (Eds.), *CAA2008. On the Road to Reconstructing the Past. Proceedings of the 36th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Budapest, 2-6 April 2008* (pp. 179–186). Budapest: Archaeolingua.

- Crema, E. R. (2012). Modelling Temporal Uncertainty in Archaeological Analysis. *J Archaeol Method Theory*, 19(3), 440–461. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/s10816-011-9122-3> doi: 10.1007/s10816-011-9122-3
- Crema, E. R., Bevan, A., & Lake, M. W. (2010). A probabilistic framework for assessing spatio-temporal point patterns in the archaeological record. *Journal of Archaeological Science*, 37(5), 1118–1130. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440309004622> doi: 10.1016/j.jas.2009.12.012
- Curry, M. (1998). *Digital Places: Living With Geographic Information Technologies*. Taylor & Francis Group. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=AK500pj9gnoC>
- Date, C. J., & Darwen, H. (1997). *A Guide To Sql Standard* (Vol. 3). Addison-Wesley Reading.
- de la Llave y García, J. (1903). *El Sitio de Barcelona: 1713-1714*. Madrid: Imprenta del Memorial de Ingenieros del Ejército.
- DeMers, M. N. (2003). *Fundamentals of Geographic Information Systems* (2nd ed. updated with integrated lab exercises ed.). John Wiley & Sons.
- De Reu, J., Bourgeois, J., De Smedt, P., Zwertvaegher, A., Antrop, M., Bats, M., ... Crombé, P. (2011). Measuring the relative topographic position of archaeological sites in the landscape, a case study on the Bronze Age barrows in northwest Belgium. *Journal of Archaeological Science*, 38(12), 3435–3446. Retrieved 2013-10-02, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440311002755> doi: 10.1016/j.jas.2011.08.005
- Duffy, C. (1998). *The Military Experience in the Age of Reason*. Wordsworth Editions Limited, Hertfordshire.
- Duffy, C. (2006). *Fire and Stone: the science of fortress warfare, 1660-1860*. Castle Books.
- Earl, G., et al. (Eds.). (2013). *Archaeology in the Digital Era. Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Southampton, 26-29 March 2012*. Amsterdam University Press. Retrieved 2015-11-10, from <http://dare.uva.nl/aup/nl/record/468863>

- Epstein, J. M. (2008). Why model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(4), 12. Retrieved 2014-09-15, from <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html>
- Esteve, X. (2006). El recorrido acumulado: una propuesta metodológica para el análisis del caudal potencial de las redes fluviales y su aplicación en la prehistoria reciente del Penedès (Catalunya). In I. Grau Mira (Ed.), *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje* (pp. 99–108). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Retrieved 2013-01-27, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2365072>
- Esteve Gràcia, X. (2004). *Proposta metodològica per a la caracterització i anàlisi dels jaciments arqueològics a l'aire lliure mitjançant un SIG: el bronze final i la primera edat del ferro al Penedès* (Unpublished MSc dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya). Retrieved from www.academia.edu/2104023/Proposta_metodologica_per_a_la_caracteritzacio_i_analisi_dels_jaciments_arqueologics_a_laire_llibre_mitjancant_un_SIG_el_bronze_final_i_la_primera_edat_del_ferro_al_Penedes_-_Tesina
- Eve, S. J., & Crema, E. R. (2014). A house with a view? Multi-model inference, visibility fields, and point process analysis of a Bronze Age settlement on Leskernick Hill (Cornwall, UK). *Journal of Archaeological Science*, 43, 267–277. Retrieved 2014-08-19, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440314000028> doi: 10.1016/j.jas.2013.12.019
- Fairén-Jiménez, S. (2004). ¿Se hace camino al andar? Influencia de las variables medioambientales y culturales en el cálculo de caminos óptimos mediante SIG. *Trabajos de Prehistoria*, 61(2), 25–40.
- Fatás Fernández, L., Graells i Fabregat, R., & Sardà Seuma, S. (2012). Los intercambios y los inicios de la complejidad socioeconómica (siglos VII–VI a.C.). Estado de la cuestión. In M. C. Belarte, J. A. Benavente Serrano, L. Fatás Fernández, J. Diloli Fons, P. Moret, & J. Noguera (Eds.), *Actas del ii congreso internacional iberos del ebro* (pp. 71–86). Institut Català d'Arqueologia. Retrieved 2015-06-04, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4524380>
- Flannery, K. (1973). Archaeology with a Capital 'S'. In C. Redman (Ed.), *Research and theory in current archeology* (pp. 47–53). New York: Wiley. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=ShlmAAAAAAAJ>

- Francés Farre, J. (2005). Evolució de les formes d'hàbitat a la franja central de la costa catalana durant el primer mil·lenni a.n.e. *Revista d'arqueologia de Ponent*, 15, 59–78. Retrieved 2013-01-24, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2207374>
- Furieri, A. (2014). *Spatialite Cookbook*. Retrieved from <http://www.gaia-gis.it/spatialite-2.4.0-4/spatialite-cookbook>
- Garcia, A. (2013). GIS-based methodology for Palaeolithic site location preferences analysis. A case study from Late Palaeolithic Cantabria (Northern Iberian Peninsula). *Journal of Archaeological Science*, 40(1), 217–226. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440312003743> doi: 10.1016/j.jas.2012.08.023
- Garcia i Rubert, D., & Gracia Alonso, F. (2011). Phoenician Trade in the North-East of the Iberian Peninsula: A Historiographical Problem. *Oxford Journal of Archaeology*, 30(1), 33–56. Retrieved 2015-06-03, from <http://onlinelibrary.wiley.com.sire.ub.edu/doi/10.1111/j.1468-0092.2010.00358.x/abstract> doi: 10.1111/j.1468-0092.2010.00358.x
- García-Sanjúan, L., Metcalfe-Wood, S., Rivera Jiménez, T., & Wheatley, D. W. (2006). Análisis de pautas de visibilidad en la distribución de monumentos megalíticos de Sierra Morena Occidental. In I. Grau Mira (Ed.), *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje* (pp. 181–200). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Retrieved 2013-01-27, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2365255>
- García-Sanjúan, L., Wheatley, D., Murrieta-Flores, P., & Márquez-Pérez, J. (2009). Los SIG y el análisis espacial en Arqueología. Aplicaciones en la Prehistoria Reciente del Sur de España. In F. X. Nieto Prieto & M. A. Cau Ontiveros (Eds.), *Arqueología Nàutica Mediterrànea* (pp. 163–180). Girona: Museu d'Arqueologia de Catalunya.
- Gea Bullich, M. (2006). *Memòria científica de la Intervenció arqueològica al Portal de Sant Daniel*. (Tech. Rep.). Actium arqueologia I patrimoni. Retrieved from http://cartaarqueologica.bcn.cat/Docs/419/2010_12_03_18_05_42_Mem%C3%B2ria%20029-06.pdf
- Gilbert, N. (2008). *Agent-Based Models*. London: SAGE.
- Gillings, M., & Wheatley, D. (2001). Seeing is not believing: unresolved issues in archaeological visibility analysis. In B. Slapšak (Ed.), *On the good*

- use of geographical information systems in archaeological landscape studies. Proceedings of the COST G2 Working Group 2 round table Luxembourg*, (pp. 25–36). Office for Official Publications of the European Communities,. Retrieved 2013-01-27, from <http://eprints.soton.ac.uk/28803/>
- GRASS Development Team. (2015). Geographic resources analysis support system (grass gis) software [Computer software manual]. Retrieved from <http://grass.osgeo.org>
- Grau i Mira, I. (2006). Transformaciones culturales y modelos espaciales. Aproximaciones SIG a los paisajes de la romanización. In I. Grau Mira (Ed.), *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Retrieved 2013-01-27, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=272563>
- Gámez Torrent, D. (2007). *Sequence Stratigraphy as a tool for water resources management in alluvial coastal aquifers: application to the Llobregat delta (Barcelona, Spain)* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)). Retrieved from <http://www.tdx.cat/handle/10803/6255>
- Hernàndez, F. X., & Riart, F. (2007). *Els exèrcits de Catalunya (1713-1714)*. Rafael Dalmau Ed.
- Hernàndez, F. X., & Riart, F. (2014). *Barcelona 1714. Jacques Rigaud, crònica de tinta i pòlvora*. Rafael Dalmau Ed.
- Herzog, I. (2013). Medieval mining sites, trade routes, and least-cost paths in the Bergisches Land, Germany. In P. Anreiter et al. (Eds.), *Proceedings for the 2nd mining in european history conference of the fz himat*. Innsbruck: Innsbruck university press. Retrieved 2014-08-22, from https://www.academia.edu/5469112/Medieval_mining_sites_trade_routes_and_least-cost_paths_in_the_Bergisches_Land_Germany
- Herzog, I. (2014). Least-cost Paths – Some Methodological Issues. *Internet Archaeology*, 36. Retrieved 2014-08-22, from http://intarch.ac.uk/journal/issue36/herzog_index.html doi: 10.11141/ia.36.5
- Hlásny, R. T. (2005). *Spatio-temporal modelling and simulations in GIS–The principles* (Tech. Rep.). Ostrava: Matej Bel University, Dept. of Geography.

- Hodder, I. (1991). *Archaeological Theory in Europe: The Last Three Decades*. Routledge. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=zic0AAAAQAAJ>
- Hodder, I., & Orton, C. (1979). *Spatial Analysis in Archaeology*. Cambridge University Press. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=dgQ4AAAAIAAJ>
- Hughes, B. P. (1997). *Firepower: weapons effectiveness on the battlefield, 1630-1850*. Sarpedon Publishing.
- Johnson, I. (2003). Aoristic Analysis: seeds of a new approach to mapping archaeological distributions through time. In *Aoristic Analysis: seeds of a new approach to mapping archaeological distributions through time*. Vienna.
- Kholer, T. A., & Parker, S. C. (1986). Predictive models for archaeological resource location. In M. B. Schiffer (Ed.), *Advances in Archaeological Method and Theory* (Vol. 9, pp. 397–452). New York: Academic Press.
- Knapp, A. B., & Blake, E. (2005). Prehistory in the Mediterranean: The Connecting and Corrupting Sea. In E. Blake & A. B. Knapp (Eds.), *The Archaeology of Mediterranean Prehistory* (pp. 1–23). Blackwell Publishing Ltd. Retrieved 2015-05-08, from <http://onlinelibrary.wiley.com.sire.ub.edu/doi/10.1002/9780470773536.ch1/summary>
- Knowles, A. K. (2006). *Past time, past place: GIS for history*. ESRI, Inc.
- Knowles, A. K., & Hillier, A. (Eds.). (2008). *Placing history: how maps, spatial data, and GIS are changing historical scholarship* (1st ed ed.). Redlands: ESRI.
- Kolář, J., Macek, M., Tkáč, P., & Szabó, P. (2015). Spatio-Temporal Modelling As A Way to Reconstruct Patterns of Past Human Activities. *Archaeometry*. Retrieved 2015-11-10, from <http://onlinelibrary.wiley.com.sire.ub.edu/doi/10.1111/arc.12182/abstract> doi: 10.1111/arc.12182
- Lake, M. W., & Ortega, D. (2013). Compute-intensive GIS visibility analysis of the settings of prehistoric stone circles. In A. Bevan & M. Lake (Eds.), *Computational Approaches to Archaeological Spaces* (pp. 213–242). London: Left Coast Press.

- Lapen, D. R., & Martz, L. W. (1993). The measurement of two simple topographic indices of wind sheltering-exposure from raster digital elevation models. *Computers & Geosciences*, 19(6), 769–779.
- Llobera, M. (2000). Understanding Movement: A pilot model towards the sociology of movement. In G. Lock (Ed.), *Beyond the Map: Archaeology and Spatial Technologies* (pp. 65–84). IOS Press. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=wJVfi0Epz68C>
- Llobera, M. (2001). Building Past Landscape Perception With GIS: Understanding Topographic Prominence. *Journal of Archaeological Science*, 28(9), 1005–1014. Retrieved 2013-01-21, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440301907204> doi: 10.1006/jasc.2001.0720
- Llobera, M., Fábrega-Álvarez, P., & Parcero-Oubiña, C. (2011). Order in movement: a GIS approach to accessibility. *Journal of Archaeological Science*, 38(4), 843–851. Retrieved 2013-10-01, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030544031000405X> doi: 10.1016/j.jas.2010.11.006
- Llobera, M., Wilkinson, K. M., Weiss, M.-C., Flaming, R. J., Marini, N. a. F., & Mazet, S. (2010). Into the Maquis: Methodological and Interpretational Challenges in Surveying La Balagne, Northwest Corsica. *Journal of Mediterranean Archaeology*, 23(2), 169–196. Retrieved 2013-01-21, from <https://www.equinoxpub.com/journals/index.php/JMA/article/view/10107> doi: 10.1558/jmea.v23i2.169
- Lock, G. (2001). Theorising the practice or practicing the theory: archaeology and GIS. *Archaeologia Polona. Special Theme: archaeology and archaeological science*, 39, 153–164. Retrieved 2013-01-27, from <http://www.iaepan.edu.pl/archaeologia-polona/article/612>
- Lock, G. (2009a). Archaeological computing then and now: theory and practice, intentions and tensions. *Archaeologia e Calcolatori*, 20, 75–84.
- Lock, G. (2009b). Human activity in a spatial context. In B. Cunliffe, C. Gosden, & R. Joyce (Eds.), *The Oxford Handbook of Archaeology* (pp. 169–188). Oxford: Oxford University Press.
- Lock, G., & Harris, T. (1997). Analyzing change through time within a cultural landscape: conceptual and functional limitations of a GIS approach. In P. Sinclair (Ed.), *Analyzing change through time within a cultural landscape: conceptual and functional limitations of a GIS approach*.

- Lock, G., & Molyneaux, B. (2006). *Confronting Scale in Archaeology: Issues of Theory and Practice*. Springer. Retrieved from http://books.google.es/books?id=E_fZlCgK0PsC
- Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., & Rhind, D. (2005). *Geographic Information Systems and Science*. John Wiley & Sons. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=-FbVI-2tSuYC>
- López, D. (2004). Primers resultats arqueobotànics (llavors i fruits) al jaciment protohistòric del Turó de la Font de la Canya (Avinyonet del Penedès). *Revista d'Arqueologia de Ponent*, 14, 149-178. Retrieved from http://www.rap.cat/online/rap14/rap_6.pdf
- López, D., Jornet, R., Morer, J., & Asensio i Vilaró, D. (2015). *La Font de la Canya, guia arqueològica. Un centre de mercaderies a la Cossetània ibèrica*. Institut d'Estudis Penedesencs.
- López Cachero, F. J. (2005). *La Necrópolis de Can Piteu-Can Roqueta (Sabadell) en el contexto del Bronce Final y Primera Edad del Hierro en el Vallés* (info:eu-repo/semantics/doctoralThesis, Universitat de Barcelona). Retrieved 2013-01-22, from <http://www.tdx.cat/handle/10803/2590>
- López Cachero, F. J. (2007). Society and economy in the Late Bronze Age and the early Iron Age in the Northeast of the Iberian Peninsula: an approach from the archaeological sources. *Trabajos de Prehistoria*, 64(1), 99-120. Retrieved 2013-01-22, from <http://tp.revistas.csic.es/index.php/tp/article/viewArticle/96> doi: 10.3989/tp.2007.v64.i1.96
- López-Cachero, F. J. (2011). Cremation Cemeteries in the Northeastern Iberian Peninsula: Funeral Diversity and Social Transformation during the Late Bronze and Early Iron Ages. *European Journal of Archaeology*, 14(1-2), 116-132. doi: 10.1179/146195711798369382
- López Cachero, F. J. (2012). La dinámica de las ocupaciones humanas del Bronce Final al Ibérico Antiguo entre los ríos Tordera i Llobregat. In V. Ropiot, C. Puig, & F. Maziere (Eds.), *Les plaines littorales en Méditerranée nord-occidentale.Regards croisés d'histoire, d'archéologie et de géographie, de la Protohistoire au Moyen Age* (pp. 93-110). Montagnac: Éditions Monique Mergoïl. Retrieved 2013-01-24, from <http://www.editions-monique-mergoil.com/index.html?menu=57509&id=57509&entree=1&c1=13>

- López Cachero, F. J., & Pons Brun, E. (2007). La periodització del bronze final al ferro inicial a Catalunya. *Cypsela: revista de prehistòria i protohistòria*, 17, 51–64. Retrieved 2013-01-24, from <http://www.raco.cat/index.php/Cypsela/article/view/250394>
- López Cachero, F. J., & Rovira, C. (2012). El món funerari a la depressió prelitoral catalana entre el bronze final i la primera edat del ferro: ritual i dinamisme social a partir del registre arqueològic. In F. J. López Cachero, C. Rovira, & F. Maziere (Eds.), *Les Necròpolis d'incineració entre l'Ebre i el Tíber (segles IX-VI a. C.): metodologia, pràctiques funeràries i societat* (Vol. 14, pp. 37–55). Monografies Museu d'Arqueologia de Catalunya-Barcelona.
- Madella, M., Rondelli, B., Lancelotti, C., Balbo, A., Zurro, D., Rubio-Campillo, X., & Stride, S. (2014). Introduction to simulating the past. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 21(2), 251–257. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/s10816-014-9209-8> doi: 10.1007/s10816-014-9209-8
- Marble, D. F. (1990). The potential methodological impact of geographic information systems on the social sciences. In Allen, Zubrow, & Green (Eds.), *Interpreting Space: GIS and Archaeology*. London: Taylor & Francis, Ltd.
- Martin Cólliga, A. (2009). Les sociétés du Néolithique moyen en Catalogne et leur gestion du funéraire. In J. Guilaine (Ed.), *Sépultures et sociétés du Néolithique à l'Histoire* (pp. 45–67). París: Éditions Errance.
- Martínez Bea, M. (2006). Arte rupestre y SIG en los alrededores de Santolea (Teruel). In I. Grau Mira (Ed.), *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje* (pp. 171–180). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Retrieved 2013-01-27, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2365160>
- Mestres, J. (2008). Vilafranca abans de la història. In R. Arnabat & J. Vidal (Eds.), *Història de Vilafranca del Penedès*. (pp. 1–43). Ajuntament de Vilafranca del Penedès.
- Mestres, J., & Esteve Gràcia, X. (2015). Sitges, cenotafis i sepulcres. In X. Esteve Gràcia, C. Miró, N. Molist, & G. Sabaté (Eds.), *Jornades d'Arqueologia del Penedès 2011* (pp. 37–76). Vilafranca del Penedès: Institut d'Estudis Penedesencs.

- Mestres, J., Farré, J., i Capella, N. M., & Juncosa, M. R. S. (2009). Espais i estructures arqueològiques. Bronze final i inici de l'edat del ferro. In *Intervenció al sector 01 del conjunt històric d'olèrdola: de la prehistòria a l'etapa romana:(campanyes 1995-2006)* (pp. 61–105).
- Mestres, J., Sanmartí, J., & Santacana, J. (1990). Estructures de la Primera Edat del Ferro de l'Hort d'en Grimau (Castellví de la Marca, Alt Penedès). *Olerdulae*, 1(4), 75–118.
- Miller, D. A. (2010). *Ballistics of 17th century muskets* (Doctoral dissertation). Retrieved 2014-09-15, from <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/4605>
- Mlekuž, D. (2010). Time geography, GIS and archaeology. In F. Contreras & F. J. M. Melero (Eds.), *Time geography, GIS and archaeology*. Granada, Spain, April 2010. Retrieved from http://www.academia.edu/376168/Time_geography_GIS_and_archaeology
- Molas Ribalta, P. (2007). *Memorias. Duque de Berwick*. Universidad de Alicante, Alicante.
- Murrieta-Flores, P. (2010). Travelling in a prehistoric landscape: Exploring the influences that shaped human movement. In *Making History Interactive. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*. (Vol. 2079, pp. 249–267). Archaeopress. Retrieved from http://lancaster.academia.edu/PatriciaMurrietaFlores/Papers/171804/Travelling_in_a_prehistoric_landscape_Exploring_the_influences_that_shaped_human_movement
- Murrieta-Flores, P. (2012). Entendiendo la movilidad humana mediante tecnologías espaciales: el papel de las áreas naturales de tránsito en el Suroeste de la Península Ibérica durante la Prehistoria Reciente. *TP*, 69(1), 103–122. doi: 10.3989/tp.2012.12082
- Murrieta Flores, P. A., & Wheatley, D. W. (2008). Grandes piedras en un mundo cambiante: los monumentos megalíticos en sus paisajes. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico (Sevilla)*.(67), 24–33. Retrieved 2013-01-27, from <http://eprints.soton.ac.uk/157879/>
- Nolan, T. J. (2009). Geographic Information Science as a Method of Integrating History and Archaeology for Battlefield Interpretation. *Journal of Conflict Archaeology*, 5(1), 81–104. Retrieved 2015-11-02, from <http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1163/157407709X12634580640290> doi: 10.1163/157407709X12634580640290

- Ossorio, S. (1730). *Reflexiones militares*. Paris: Simon Langlois.
- Ostwald, J. (2007). *Vauban under siege: engineering efficiency and martial vigor in the war of the Spanish succession* (Vol. 41). Brill.
- Parceró Oubiña, C., & Fábrega Álvarez, P. (2006). Diseño metodológico para el análisis locacional de asentamientos a través de un SIG de base Raster. In I. Grau Mira (Ed.), *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje* (Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante ed., pp. 69–90). Retrieved 2013-01-27, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2365065>
- Petit i Mendizábal, M. A. (1986). *Contribución al estudio de la Edad del Bronce en Cataluña (comarcas del Moianès, Vallès oriental, Vallès Occidental, Maresme, Barcelonès y Baix Llobregat)* (Inèdita). Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra.
- Pinhasi, R., Fort, J., & Ammerman, A. J. (2005). Tracing the Origin and Spread of Agriculture in Europe. *PLoS Biol*, 3(12), e410. Retrieved 2013-01-22, from <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.0030410> doi: 10.1371/journal.pbio.0030410
- Pons Brun, E. (2014). L'evolució proto urbana de catalunya durant el període de transició a l'edat del ferro: una barreja de models autòctons i mediterranis. In O. Mercadal (Ed.), *La transició de l'edat del bronze final a l'edat de ferro. actes del xv col·loqui internacional d'arqueologia de puigcerdà* (p. 77-106). Puigcerdà, Catalunya: Institut d'Estudis Ceretans.
- Quantum Gis Development Team. (2014). *QGIS Geographic Information System* (Tech. Rep.). Open Source Geospatial Foundation Project.
- R Development Core Team. (2008). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.R-project.org/>
- Ratcliffe, J. H. (2000). Aoristic analysis: the spatial interpretation of unspecific temporal events. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(7), 669–679. Retrieved 2013-01-15, from <http://dx.doi.org/10.1080/136588100424963> doi: 10.1080/136588100424963
- Riart, F., Hernández, F. X., Rubio, X., & Riart, F. (2010). *La coronela de Barcelona, 1705-1714*. Rafael Dalmau.

- Rubio Campillo, X. (2009). *Modelització i simulació aplicades a la recerca i interpretació de camps de batalla* (info:eu-repo/semantics/doctoralThesis, Universitat de Barcelona, Barcelona). Retrieved 2013-01-27, from <http://www.tdx.cat/handle/10803/1339;jsessionid=7DE5441F78E6F704433CD997E822313F.tdx2#documents>
- Ruestes, C. (2008). Social organization and human space in North-Eastern Iberia during the third century BC. *Oxford Journal of Archaeology*, 27(4), 359–386. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-0092.2008.00314.x> doi: 10.1111/j.1468-0092.2008.00314.x
- Ruestes i Bitrià, C. (2006). El poblamiento ibérico y romano en la Layetania litoral (del río Besòs a la Riera de Teià): aplicación arqueológica de un SIG. In I. Grau Mira (Ed.), *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje* (pp. 227–246). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. Retrieved 2013-01-27, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2365291>
- Sanmartí Grego, J., Asensio i Vilaró, D., Belarte, M. C., & Noguera, J. (2009). Comerc colonial, comensalitat i canvi social a la protohistòria de Catalunya. *Citerior: arqueologia i ciències de l'Antiguitat*, 5, 219–238. Retrieved 2015-06-02, from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3248569>
- Sanpere i Miquel, S. (1905). *Fin de la nación catalana*. Tipografia L'avenç.
- Santos Retolaza, M. (2003). Fenicios y griegos en el extremo NE peninsular durante la época arcaica y los orígenes del enclave poceo de "Emporion". *Treballs del Museu Arqueologic d'Eivissa e Formentera = Trabajos del Museo Arqueologico de Ibiza y Formentera*, 51, 87–132.
- Silva, F., Stevens, C. J., Weisskopf, A., Castillo, C., Qin, L., Bevan, A., & Fuller, D. Q. (2015, 09). Modelling the geographical origin of rice cultivation in asia using the rice archaeological database. *PLoS ONE*, 10(9), e0137024. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0137024> doi: 10.1371/journal.pone.0137024
- Sánchez-Eliphe Lorente, M. (2011). (Re) Pensando el pasado. Un acercamiento postestructuralista a los sujetos de la Protohistoria. *Estrat crític: revista d'arqueologia*, 5(1), 62–71. Retrieved 2013-01-27, from <http://www.raco.cat/index.php/EstratCritic/article/view/254982>
- Terrats Jiménez, N. (2010). L'hàbitat a l'aire lliure en el litoral o prelitoral català durant el bronze inicial: anàlisi teòrica-metodològica aplicada a

l'assentament de Can Roqueta (Sabadell-Barberà del Vallès). *Cypsela: revista de prehistòria i protohistòria*, 18, 141–155.

Thomas, J. (2000). *Interpretive Archaeology: A Reader*. Leicester University Press. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=X-aXzrF3158C>

Tilley, C. (1990). *Reading Material Culture: Structuralism, Hermeneutics and Post-Structuralism*. Wiley. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=FIVtQgAACAAJ>

van Rossum, G. (1995). *Python reference manual* (Tech. Rep.). Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands: CWI (Centre for Mathematics and Computer Science). Retrieved from <http://python.org/>

Wheatley, D., García-Sanjúan, L., Murrieta-Flores, P., & Marquez PÉREZ, J. (2010). Approaching the landscape dimension of the megalithic phenomenon in Southern Spain. *Oxford Journal of Archaeology*, 29(4), 387–405. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-0092.2010.00354.x> doi: 10.1111/j.1468-0092.2010.00354.x

Wheatley, D., & Gillings, M. (2002). *Spatial Technology and Archaeology: The Archeological Applications of Gis*. Taylor & Francis Group. Retrieved from <http://books.google.es/books?id=s2moTDyrJGYC>

Yubero Gómez, M., Esteve Gràcia, X., & Rubio Campillo, X. (2014). Estudi comparatiu de les dinàmiques de poblament durant el bronze final i la primera edat del ferro a la Depressió Prelitoral Catalana. In O. Mercadal (Ed.), *La transició de l'edat del bronze final a l'edat de ferro. actes del xv col.loqui internacional d'arqueologia de puigcerdà* (p. 225-239). Puigcerdà, Catalunya: Institut d'Estudis Ceretans.

Yubero Gómez, M., & Rubio Campillo, X. (2010). *Models geogràfics, GIS i arqueologia: el cas d'estudi del poblament prehistòric a la conca del riu Ripoll (Vallès, 5500-550 ane)*. Barcelona: Societat Catalana d'Arqueologia.

Yubero-Gómez, M., Rubio-Campillo, X., López-Cachero, F. J., & Esteve-Gràcia, X. (2015). Mapping changes in late prehistoric landscapes: A case study in the Northeastern Iberian Peninsula. *Journal of Anthropological Archaeology*, 40, 123–134. Retrieved 2015-08-23, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027841651500046X> doi: 10.1016/j.jaa.2015.07.002

- Yubero-Gómez, M., Rubio-Campillo, X., & López-Cachero, J. (2015). The study of spatiotemporal patterns integrating temporal uncertainty in late prehistoric settlements in northeastern Spain. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1–14. Retrieved 2015-05-14, from <http://link.springer.com/article/10.1007/s12520-015-0231-x> doi: 10.1007/s12520-015-0231-x
- Zhang, H., Bevan, A., Fuller, D., & Fang, Y. (2010). Archaeobotanical and GIS-based approaches to prehistoric agriculture in the upper Ying valley, Henan, China. *Journal of Archaeological Science*, 37(7), 1480–1489. Retrieved 2013-02-05, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440310000130> doi: 10.1016/j.jas.2010.01.008