

CADERNOS

LABORATORIO XEOLÓXICO DE LAXE ● N° 38

REVISTA DE XEOLOXÍA GALEGA E DO HERCÍNICO PENINSULAR





CADERNOS DO LABORATORIO
XEOLÓXICO DE LAXE

38



Servizo de Publicacións
UNIVERSIDADE DA CORUÑA





ISSN: 0213-4497

Depósito Legal: C 1054-1984

Imprime: Tórculo Comunicación Gráfica, S.A.

Portada: Las seis estalagmitas de O Courel (Lugo, España) en las que se basa la cronología de los últimos quinientos cincuenta mil años en Galicia

Maquetación y supervisión del inglés: Ana Martelli

Editor científico: Juan Ramón Vidal Romani



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

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
1. ASSESSMENT OF THE SPATIAL VARIABILITY OF SOIL CHEMICAL PROPERTIES ALONG A TRANSECT USING MULTIFRACTAL ANALYSIS	
Dafonte Dafonte, J., Valcárcel Armesto, M., Da Silva Días, R., Vidal Vázquez, E., and Paz González, A.	11
2. THE GLACIATION OF SERRA DE QUEIXA-INVERNADOIRO AND SERRA DO GERÊS-XURÉS, NW IBERIA. A CRITICAL REVIEW AND A COSMOGENIC NUCLIDE (10BE AND 21 NE) CHRONOLOGY.	
Vidal Romani, J.R., Fernández Mosquera, D. and Marti, K.....	25
3. VIDA Y MUERTE DE DOS MUJERES DE BRIGANTUM (NW DE IBERIA) MEDIANTE ISÓTOPOS ESTABLES Y ANTROPOLOGÍA FORENSE.	
Grandal-D'anglade, A, Serrulla Rech, F., Tomas Botella, V., Pérez Rama, M., Gomez, M., Ramil Gonzalez, E.....	45
4. GEOLOGICAL DIMENSION OF THE CULTURAL HERITAGE: A CASE EXAMPLE OF THE AJANTA CAVES (MAHARASHTRA, INDIA)	
Gontareva, E.f., Ansari, M.k., Ruban, D.a., Ahmad, M. & Singh, T.n.....	67
5. RADIACIÓN GAMMA EN ROCAS USADAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN: EL GRANITO DE BRAGA (NO DE PORTUGAL)	
Lima, M., Alves, C and Sanjurjo-Sánchez, J.....	79

**6. ESTUDO PRELIMINAR DO DEPÓSITO DE PALIGORSQUITE DE
FIGUEIRÓ DO CAMPO (SOURE, PORTUGAL)**

António Moura, José Lopes Velho e Willy Alves. 93

**7. INDICIOS DE PASTOREO EXTENSIVO EN EL NOROESTE PENIN-
SULAR DURANTE EL DOMINIO SUEVO**

Pérez-Rama, M., Vaqueiro Rodríguez, M. y Grandal-d'Anglade, A.. 107

Director de la publicación

J.R. VIDAL ROMANÍ

Comité Científico

A. Marcos (Oviedo); L.G. Corretgé (Oviedo); R. Vegas (Madrid); J. R. Martínez Catalán (Salamanca); F. Noronha (Porto); H. Chaminé (Aveiro); H. Granja (Braga); G. Sores de Carvalho (Braga); A. Varela (Cervo); R. Rodríguez (Madrid); R. Arenas (Madrid); C. R. Twidale (Adelaide); J. R. Vidal Romaní (A Coruña); Díaz Fierros, F. (Santiago)

Editores

Seminario de Estudos Galegos. Área de Xeoloxía e Minería. Universidade da Coruña. Instituto Universitario de Xeoloxía.

Objetivos de la revista

Revista dedicada a la geología de Galicia en general y a la del Hercínico en particular. En consecuencia no está restringida a ningún tema de geología, o relacionado, en tanto que se refiera a temas gallegos, si bien recoge todos los que se refieren al hercínico peninsular ibérico. Se considerarán casos especiales cuando a juicio del Comité Científico de la revista sea conveniente.

Periodicidad

Anual con números extraordinarios dedicados a temas monográficos intercalados.

Suscripción

El precio es variable para cada volumen en función del número de trabajos incluidos en cada uno de ellos. Para suscripciones dirigirse a la Secretaría del Instituto Universitario de Xeoloxía, Edificio Servicios Centrales de Investigación, Campus de Elviña s/n 15071 Coruña, Spain. Teléfono (+34) 981 167000, extensión 2910.

Información general

Los trabajos se presentarán en CD o por correo electrónico con el texto preparado en Word 2000 o versiones más modernas para Apple Macintosh o PC.

Los dibujos, gráficos o fotografías en blanco y negro deben ser adjuntadas por separado e indicar en el ejemplar mecanografiado en qué lugar del texto recomienda su inserción.

Aquellas personas que no puedan enviar el texto en soporte informático, deberán hacerse cargo de los gastos que suponga para la revista realizar ese trabajo.

El trabajo deberá incluir TÍTULO: Español e Inglés en minúsculas, palabras clave en Inglés y Abstract en Inglés.

Las citas bibliográficas dentro del texto se pondrán en mayúscula y la abreviatura para los siguientes autores será: "et al.".

Los textos enviados serán sometidos a la crítica de los Censores Científicos designados por la Revista.

Bibliografía: Autores en mayúsculas y las revistas o textos citados en cursiva.

Los autores de los trabajos deberán incluir su dirección completa, incluido código postal.

Separatas

Se enviará a cada autor un PDF con el artículo en la versión final.

Envío de manuscritos

- Los trabajos originales se enviarán a:

Instituto Universitario de Xeoloxia
Edificio Servicios Centrales de Investigación
Campus de Elviña s/n
Telephone: (+34) 981 167000 Ext. 2910
Fax: (+34) 981 167172
xeoloxia@udc.es
15071 A Coruña (Spain)

Incluyendo dirección habitual y teléfono.

— Una vez terminada la impresión, los originales serán devueltos a su autor/es, si así lo desean y expresan.

— *El número máximo de hojas que se admitirá por trabajo será quince (15)* incluyendo figuras, fotografías, mapas, etc.. Para trabajos de mayor extensión se ruega consultar al editor científico.

— El Instituto Universitario de Geología se reserva el derecho de devolver al autor/es aquellos que no se ajustan a estas normas.

Director of the publication

J.R. VIDAL ROMANÍ

Scientific committee

A. Marcos (Oviedo); L.G. Corretgé (Oviedo); R. Vegas (Madrid); J. R. Martínez Catalán (Salamanca); F. Noronha (Porto); H. Chaminé (Aveiro); H. Granja (Braga); G. Sores de Carvalho (Braga); A. Varela (Cervo); R. Rodríguez (Madrid); R. Arenas (Madrid); C. R. Twidale (Adelaide); J. R. Vidal Romaní (A Coruña); Díaz Fierros, F. (Santiago)

Editors

Seminario de Estudos Galegos. Área de Xeoloxía e Minería. Universidade da Coruña. Instituto Universitario de Xeoloxía.

Objectives of the journal

Journal devoted to the geology of Galician in general and to the Hercynian in particular. Therefore, it is not restricted to any subject of geology, or related subject, if it is referred to Galician subjects, though it includes all referred to the Iberian peninsular Hercynian. Special cases will be taken into account when the Scientific Committee of the journal considers them convenient.

Periodicity

Annual with extraordinary issues devoted to intercalated monographic subjects.

Subscription

The price varies for each volume according to the number of papers included therein. For subscription contact the Secretariat of the Instituto Universitario de Xeoloxia, Edificio Servicios Centrales de Investigación, Campus de Elviña s/n 15071 Coruña, Spain. Telephone (+34) 981 167000, extension 2910.

General information

Papers will be submitted in CD or by e-mail with the text in Word 2000 or later versions for Apple Macintosh or PC.

The drawings, graphics or photographs in white and black must be attached separately, and indicate in the typescript original where you recommend the insertion thereof.

Those persons who cannot send the text in computing support will have to pay the charges for this conversion.

The paper will have to include TITLE: Spanish and English in lowercase, key words in English and Abstract in English.

The bibliography quotations within the text will be in uppercase for the first author and the abbreviation for the others will be "et al.".

The sent texts will undergo the consideration of the Scientific Censors appointed by the Journal.

Bibliography: Authors in uppercase and cited journals or texts in italics.

The authors of the paper must include their complete address, including postal code.

Offprint

Each author will receive a PDF with the final version of the papers.

Remittance of papers

- The original papers will be sent to:

Instituto Universitario de Xeoloxia
Edificio Servicios Centrales de Investigación
Campus de Elviña s/n
Telephone: (+34) 981 167000 Ext. 2910
Fax: (+34) 981 167172
xeoloxia@udc.es
15071 A Coruña (Spain)

indicating habitual address and telephone.

— Once the printing of the originals is finished, the originals will be returned to its author/s, if they wish and indicate so.

— *The maximum number of the pages to be admitted will be 15* (fifteen) including figures, photographs, maps, etc.. For the papers of longer extension, please consult the scientific editor.

— The Instituto Universitario de Xeoloxia reserves its right to return those papers which are not adjusted to these rules.

Director da publicación

J.R. VIDAL ROMANÍ

Comité Científico

A. Marcos (Oviedo); L.G. Corretgé (Oviedo); R. Vegas (Madrid); J. R. Martínez Catalán (Salamanca); F. Noronha (Porto); H. Chaminé (Aveiro); H. Granja (Braga); G. Sores de Carvalho (Braga); A. Varela (Cervo); R. Rodríguez (Madrid); R. Arenas (Madrid); C. R. Twidale (Adelaide); J. R. Vidal Romaní (A Coruña); Díaz Fierros, F. (Santiago)

Editores

Seminario de Estudos Galegos. Área de Xeoloxía e Minería. Universidade da Coruña. Instituto Universitario de Xeoloxía.

Objectivos da revista

Revista dedicada á xeoloxía de Galicia en xeral e á do Hercínico en particular. En consecuencia, non está restrinxida a ningún tema de xeoloxía, ou relacionado, en tanto que se refira a temas galegos, si ben recolle todos os que se refiren ao hercínico peninsular ibérico. Se considerarán casos especiais cando a xuízo do Comité Científico da revista sexa conveniente.

Periodicidade

Anual con números extraordinarios dedicados a temas monográficos intercalados.

Suscripción

O prezo é variable para cada volume en función do número de traballos incluídos en cada un deles. Para suscripciones dirixirse á Secretaría do Instituto Universitario de Xeoloxía, Edificio Servicios Centrales de Investigación, Campus de Elviña s/n 15071 Coruña, Spain. Teléfono (+34) 981 167000, extensión 2910.

Información xeral

Os traballos presentaránse en CD ou por correo electrónico co texto preparado en Word 2000 o versións máis modernas para Apple Maxintosh o PC.

Os debuxos, gráficos ou fotografías en branco e negro deben adxuntarse por separado e indicar no exemplar mecanografiado en que lugar do texto se recomenda a súa inserción.

Aquelas persoas que non podan enviar o texto en soporte informático, deberán facerse cargo dos gastos que supoña para a revista realizar ese traballo.

O traballo deberá incluír TÍTULO: Español e Inglés en minúsculas, palabras chave en Inglés e Abstract en Inglés.

As citas bibliográficas dentro do texto poráanse en maxúscula e a abreviatura para os seguintes autores será: "et al."

Os textos enviados serán sometidos á crítica dos Censores Científicos designados pola Revista.

Bibliografía: Autores en maxúsculas e as revistas ou textos citados en cursiva.

Os autores dos traballos deberán incluír a súa dirección completa, incluído código postal.

Separatas

Enviarase a cada autor un PDF co artigo na versión final.

Envío de manuscritos

- Os traballos orixinais enviaranse a:

Instituto Universitario de Xeoloxía
Edificio Servicios Centrales de Investigación
Campus de Elviña s/n
Telephone: (+34) 981 167000 Ext. 2910
Fax: (+34) 981 167172
xeoloxia@udc.es
15071 A Coruña (Spain)

incluíndo dirección habitual e teléfono.

— Unha vez terminada a impresión, os orixinais serán devoltos ao seu autor/es, si así o desexan e expresan.

— *O número máximo de follas que se admitirá por traballo será quince (15) incluíndo figuras, fotografías, mapas, etc..* Para traballos de maior extensión rógame consultar ao editor científico.

— O Instituto Universitario de Xeoloxía resérvase o dereito de devolver ao autor/es aqueles traballos que non se axusten a estas normas.

Assessment Of The Spatial Variability Of Soil Chemical Properties Along A Transect Using Multifractal Analysis

DAFONTE DAFONTE, J.¹, VALCÁRCEL ARMESTO, M.¹, DA SILVA DÍAS, R.²,
VIDAL VÁZQUEZ, E.², and PAZ GONZÁLEZ, A.²

(1) Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Campus Universitario, 27002, Lugo.

(2) Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña, Campus A Zapateira, 15008, A Coruña.

Abstract

The spatial variability of soil properties can be assessed through concepts of scale invariance, fractals and multifractals. The aim of this study was to characterize the scaling patterns and structural heterogeneity properties of general soil chemical properties along a short (i.e. 52 m large) transect. Field measurements were carried out at the experimental farm of CIAM located in Mabegondo, A Coruña, Spain. The studied transect was marked following land slope, and 66 soil samples were collected at the 0-20 cm depth every 0.8 m. The soil properties analyzed were: pH (H_2O), organic carbon content, exchangeable Ca, Mg and K, exchangeable acidity ($H + Al$), exchangeable bases (SB), cation exchange capacity (CEC), percent base saturation (V) and extractable P. The soil properties studied showed various degrees of multifractality. The spatial distribution of pH was characterized by quasi-monofractal behaviour; CEC, ($H + Al$) and OM, presented a relatively low degree of multifractality, and the other soil properties studied showed stronger degrees of multifractality, being the highest one for Olsen extractable P. In general, the scaling features of the properties studied implied a multifractal nature, where the low and high density regions scaled differently.

Key words: spatial variability, soil chemistry, nutrients, multifractal analysis

1. INTRODUCTION

Spatial variability in earth sciences has been widely analyzed for different types of sampling schemes. Although samples have been more frequently collected in grids over areal surfaces (Caridad Cancela et al., 2005; Morales et al., 2010, 2014), several studies also performed sampling along transects (Caniego et al., 2005; Vidal-Vázquez et al., 2013), mainly to appraise localized variability.

Variability of soil properties stems from interactions between the five factors of soil formation (climate, parent material, topographic relief, organisms and time) and a number of physical, mineralogical, chemical, biological and environmental processes that most often do not run independently. Moreover, soil forming factors and soil processes can operate at various scales, so that the spatial variability of soil properties may exhibit nested effects. Consequently, either soil properties that are constant over time (such as particle size distributions, particle density, and to some extent also cation exchange capacity or organic carbon content) or those highly dynamic (water content, bulk density, porosity, nutrient status, fungal and bacterial biomass, etc.) can display a rich spatial (Vieira et al., 1983, 2010; Vieira and Paz González, 2003; Dafonte et al., 2010; Caridad-Cancela et al., 2005; Montanari et al., 2011) or spatial and temporal (Morales et al., 2010, 2014, Vidal Vázquez et al., 2012) variability.

Scaling analysis, such as fractal and multifractal analysis, also has been also used to adequately characterize the spatial variability of soil properties (Caniego et al.,

2005; Zeleke and Si, 2006; Vidal Vázquez et al., 2013) and to describe the combination of irregularity and structure of such properties for a large range of scales (Tarquis et al., 2008; Vidal Vázquez et al., 2008a, b; Siqueira et al., 2013; Paz-Ferreiro et al., 2008, 2010, 2014). While in monofractal scaling one single exponent is sufficient to capture the scaling behavior of the studied data set, multifractal scaling involves entire functions, which represents a hierarchy of exponents related to different levels of intensity or irregularities of the data series (Everstz and Mandelbrot, 1992; Falconer, 1997). Thus, multifractals are intrinsically more complex and inhomogeneous than monofractals. Both, fractal and multifractal scaling assume a hierarchical distribution of mass in space, so that the whole results from the union of similar subsets (Caniego et al., 2005; Tarquis et al., 2008).

The multifractal approach has been proved to be useful for characterizing the inner structure of soil general properties measured along transects and to compare them (Caniego et al., 2005; Zeleke and Si., 2006; Vidal Vázquez et al., 2013). Moreover, multifractal analysis has been demonstrated to provide more information about the inner structure and the spatial variability of a data set than semivariogram analysis (e.g. Kravchenko, 2008). This is because multifractal characteristics allow the assessment of anomalous behaviour of singular physical processes. The objective of this research was to quantify the scaling patterns and structural heterogeneity of various soil chemical properties measured in a small transect using multifractal spectra and indices.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Experimental site and sampling

Soil samples were collected at an experimental field of the “Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo” (CIAM), A Coruña province, Spain, (Latitude 43° 14' 47" N, Longitude 8° 16' 23" W). The site was on a gentle slope and the soil was a loamy textured Inceptisol (SSA, 2010). Sixty six soil samples were collected at 0 - 20 cm depth every 0.8 m along a transect, which was marked following the land slope. Thus the total length of the sampled transect was 52 m.

2.2. Analysis of general soil properties

Soil samples were air-dried, crushed and sieved through a 2 mm mesh. Soil pH, organic carbon content, exchangeable bases ($\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^{+}$) exchangeable acidity (H^{+} plus Al^{+3}), and extractable phosphorus were analyzed. In addition, cation exchange capacity (CEC), sum of exchangeable bases ($\text{SB} = \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^{+}$) and percent base saturation (V%) were computed from exchangeable cations. Organic carbon content was determined following the Walkley-Black method (van Raij *et al.* 2001; da Silva Días *et al.*, 2013). Phosphorus was determined colorimetrically after extraction by the resin method (van Raij *et al.* 2001; Paz-Ferreiro *et al.*, 2012). Exchangeable bases ($\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^{+}$) were determined after extraction with a cation exchange resin, whereas extractable acidity ($\text{H}^{+} + \text{Al}^{+3}$) was determined after Al extraction with KCl, as described in van Raij *et al.* (2001).

2.3. Multifractal analysis

Multifractal analysis was implemented following the moment method, which is next summarized. First, a mesh with size δ was employed to be superimposed over the whole support. In other words, the length of the transect was divided into smaller and smaller segments based on dyadic downscaling. This was implemented by successive partitions of the support in k stages ($k=1, 2, 3, \dots$) that generate at each scale, δ a number of segments, $N(\delta) = 2^k$ of characteristic size length, $\delta = L \times 2^{-k}$, covering the whole extent of the support, L , in this case a transect (e.g. Evertsz and Mandelbrot, 1992; Caniego *et al.*, 2005; Vidal Vázquez *et al.*, 2013).

Then, the experimental data for each variable studied were converted into the distribution of mass along the geometric support. Therefore, the probability mass function, $p_i(\delta)$, for each segment was estimated as a proportion according to:

$$p_i(\delta) = \frac{N_i(\delta)}{N_t} \quad (1)$$

where $N_i(\delta)$ is the value of the measure in a given segment, i^{th} , and N_t is the sum of the measure in the whole transect.

Multifractal analysis involves several scaling functions: mass exponent, τ_q , singularity spectrum, $f(\alpha)$, local scaling index, α_q , and generalized or Rényi dimension, D_q . In practice, using the box counting method, the so-called partition function scales with the segment size as follows:

$$\chi(q, \delta) = \sum_{i=1}^{n(\delta)} p_i^q(\delta) \quad (2)$$

Where $n(\delta)$ is the number of segments with size δ and statistical moments q are defined for $-\infty < q < \infty$.

A log-log plot of the quantity $\chi(q, \delta)$ versus δ for different values of q yields: $\chi(q, \delta) \propto \delta^{-\tau(q)}$, where τ_q is the mass scaling function of order q . Note that the method of moments is justified if the plots of $\chi(q, \delta)$ versus δ are straight lines (Halsey et al., 1986).

The mass exponent function τ_q was estimated from the partition function as:

$$\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \chi(q, \delta)}{\log(1/\delta)} \quad (3)$$

The function τ_q controls how the moment of measure μ_i scales with q . In general, multifractal measures yield a nonlinear function of τ_q , whereas a monofractal corresponds to linear τ_q .

For each box or segment, the probability distribution is: $p_i(\delta) = \delta^{\alpha_i}$, where α_i is the singularity or Hölder exponent characterizing density in the i^{th} box (Halsey et al., 1986). The Hölder exponent, given by $\alpha_i = \log \mu_i(\delta) / \log \delta$, may be interpreted as a crowding index for the degree of concentration of the measure, μ . It is, in fact, the logarithmic density of the i -th box of the partition of characteristic size δ .

For multifractal distributed measures, the number $N_\delta(\alpha)$ of cells of size δ having a singularity or Hölder exponent equal to α increases for decreasing δ and obeys a power law: $N(\alpha) \propto \delta^{-f(\alpha)}$, where the exponent $f(\alpha)$ is a continuous function of α . The graph of $f(\alpha)$ versus α , called the multifractal spectrum, typically has a parabolic concave downward shape, with the range of α -values increasing with the increase in the heterogeneity of the measure. The minimum scaling exponent $f(\alpha_q)$ corresponds to the most concentrated region of the measure, and the maximum

exponent $f(\alpha_{q^+})$ corresponds to the rarefied regions of the measure. The connection between the scaling exponents τ_q and $f(\alpha)$ can be made through a Legendre transformation. In this work, however, the functions τ_q and $f(\alpha)$ were obtained following Chhabra and Jensen (1989) with the equations:

$$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(\delta)]}{\log(\delta)} \quad (4a)$$

$$f(\alpha(q)) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i(q, \delta) \log[\mu_i(q, \delta)]}{\log(\delta)} \quad (4b)$$

The scaling function, τ_q is also related to the generalized fractal dimension (Hentschel and Procaccia, 1983), which can be defined by Equations 5a. In fact, the concept of generalized dimension, D_q , corresponds to the scaling exponent for the q^{th} moment of the measure. Moreover, the generalized dimensions can be also defined by Equation 5b. Note, however, that using Equations 5a or 5b D_1 becomes indeterminate because the value of the denominator is zero. Therefore, for the particular case that $q = 1$, Equation 5c is used.

$$D_q = \tau(q)/(q-1) \quad (5a)$$

$$D_q = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\log[\chi(q, \delta)]}{\log \delta} \quad (5b)$$

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n(\delta)} \chi_i(1, \delta) \log[\chi_i(1, \delta)]}{\log \delta} \quad (5c)$$

For a monofractal, D_q is a constant function of q , so no additional information is obtained by examining higher moments. However, for multifractal measures, the relationship between D_q and q is not constant. In this case, the most frequently used gener-

alized dimensions are D_0 for $q = 0$, D_1 for $q = 1$ and D_2 for $q = 2$, which are referred to as capacity, information (Shannon entropy) and correlation dimension, respectively.

The capacity or box-counting dimension, D_0 , is the scaling exponent of the number of non-empty segments. Thus, it is independent of the quantity of mass in each box, but takes into account the fact that the segments are occupied or not. The information dimension, D_1 , gives the probability of occupation of the i^{th} segment of size δ , without taking into account the way in which the measure is distributed within each of these segments. Thus, D_1 provides a physical characterization, indicating how heterogeneity changes across a certain range of scales, and it is also related to the Shannon entropy. The correlation dimension, D_2 , describes the uniformity of the measure values among intervals. The generalized dimension, D_q , is widely used for the comprehensive study of multifractals. Differences between D_q allow comparison of the complexity between the studied data sets. The higher the homogene-

ity of a structure, the closer the D_q values; thus in a monofractal D_q is constant.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Statistical analysis

A summary statistical analysis of the studied soil properties is listed in Table 1. Mean soil pH was 4.9 and overall pH values along the sampled transect varied from 4.6 to 5.4 along, which means very strongly acid to strongly acidic soil reaction. Mean organic matter content was 41.7 mg kg⁻¹, and the range of OM values varied from 28.0 to 62.0 mg kg⁻¹. Cation exchange capacity ranged from 9.37 to 15.06 Cmol+kg⁻¹, with a mean value of 12.23 Cmol+kg⁻¹, and the sum of exchangeable bases was lower than exchangeable acidity, as expected from the low pH values. Subsequently percent base saturation was lower than 50%. Olsen extractable phosphorus content ranged from 6.0 to 39.0 mg kg⁻¹.

Coefficients of variation were highest for Olsen extractable P and lowest for pH, and

	mean	std	c.v.	variance	maximum	minimum
pH	4.9	0.16	3.3	0.03	5.4	4.6
OM (g.kg-1)	41.7	7.76	18.6	60.23	62.0	28.0
CEC (Cmol+kg-1)	12.23	11.51	9.4	132.52	15.06	9.37
SB (Cmol+kg-1)	3.22	9.08	28.2	82.36	6.11	1.94
Ca (Cmol+kg-1)	2.54	7.72	30.4	59.59	0.50	1.50
Mg (Vmol+kg-1)	0.32	1.39	43.3	1.93	0.69	0.13
K (Cmol+kg-1)	0.36	0.72	20.1	0.51	0.56	0.23
H+Al (Cmol+kg-1)	9.01	11.84	13.1	140.07	12.10	5.80
V (%)	26.3	6.94	26.4	48.14	44.0	14.0
P (mgkg-1)	12.5	6.26	50.3	39.17	39.0	6.0

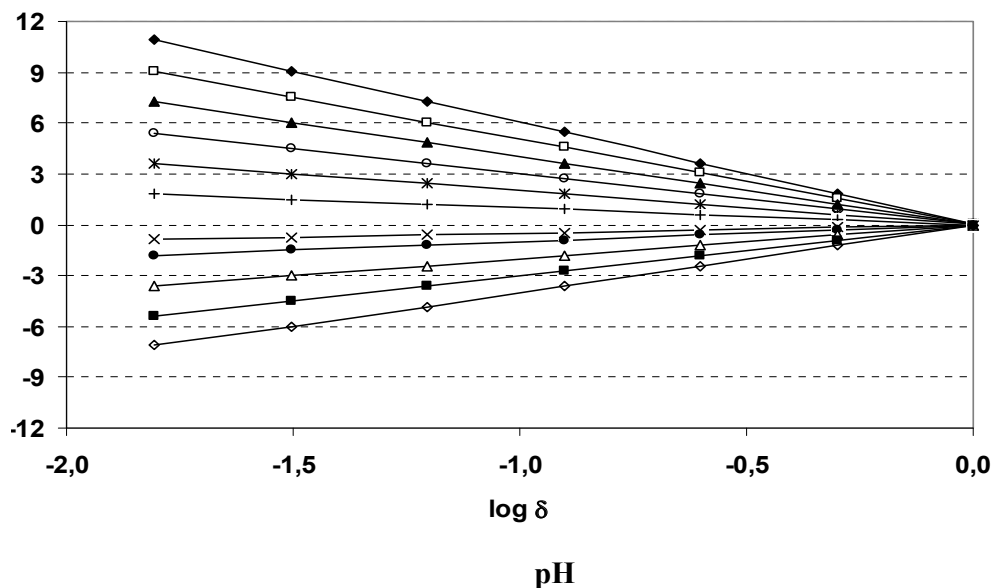
Table 1. Summary statistics of the studied soil properties measured along a transect (std = standard deviation, c.v.= coefficient of variation).

ranked as follows: $P > Mg > Ca > SB > V > K > OM > H + Al > CEC > pH$. Therefore, Olsen-P showed a CV higher than 50%; moreover exchangeable bases and the attributes of the exchange complex SB and V exhibited a relatively high statistical variability with CV's higher than 20%. Previous studies also have reported high and low values of spatial variability for exchangeable bases (Vidal Vázquez et al., 2013) and pH (Caniego et al., 2005; Vidal Vázquez et al., 2013), respectively.

3.2. Multifractal analysis.

The distribution of a measure is considered fractal (mono- or multifractal) when

the partition function for successive moments can be fitted by power law functions (Evertsz and Mandelbrot, 1992; Zeleke and Si, 2006). Therefore, plots of the normalized measure $\chi(q, \delta)$ versus measurement scale, δ , were examined, for all the statistical moments of interest, to find out whether the studied properties obeyed or not power law scaling. For moment orders in the range between $q = +5$ and $q = -5$, the logarithm of $\chi(q, \delta)$ versus the logarithm of δ fitted a linear model when the partition function was constructed for successive box sizes in steps of 2^k , $k=0$ to $k=7$. Consequently, partition functions have been estimated in the range of linear behaviour, involving box sizes limited to $0 < k < 7$.



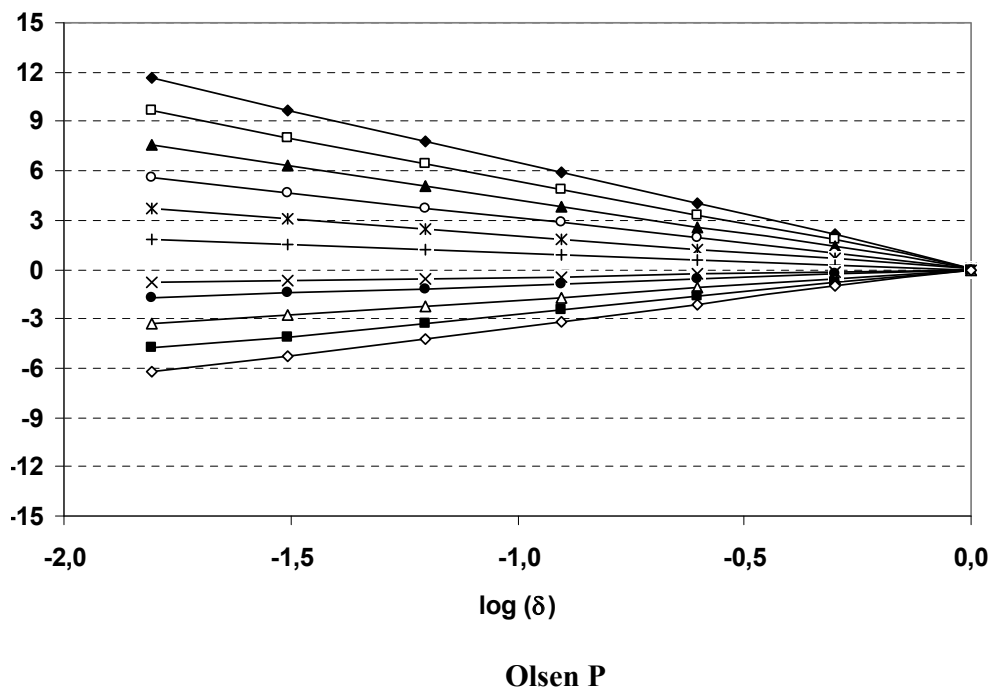


Figure 1. Examples of log-log plots of the partition function, $\chi(q, \delta)$, versus measurement scale, δ , for pH and Olsen extractable P.

Examples of partition functions are shown in Figure 1. The log-log plots of $\chi(q, \delta)$ - δ always fitted a linear model with high coefficients of determination ($P < 0.05$), and there were some differences in the goodness of fit to a power law between the variables studied.

The singularity spectrum was estimated by Equations 4a and 4b. The range of statistical moments used to compute $f(\alpha)$ - α plots was $-5.0 < \Delta q < 5.0$ for all the data

sets studied. Singularity spectra were concave down parabolic curves with more or less asymmetry, and for all the studied cases the left branch was longer than the right branch. Selected examples of singularity spectra are shown in Figure 2. Shape, amplitude and symmetry of the $f(\alpha)$ - α plots in Figure 2 show wide differences, which will be next addressed for testing the hypothesis of singular behavior of the measured soil properties.

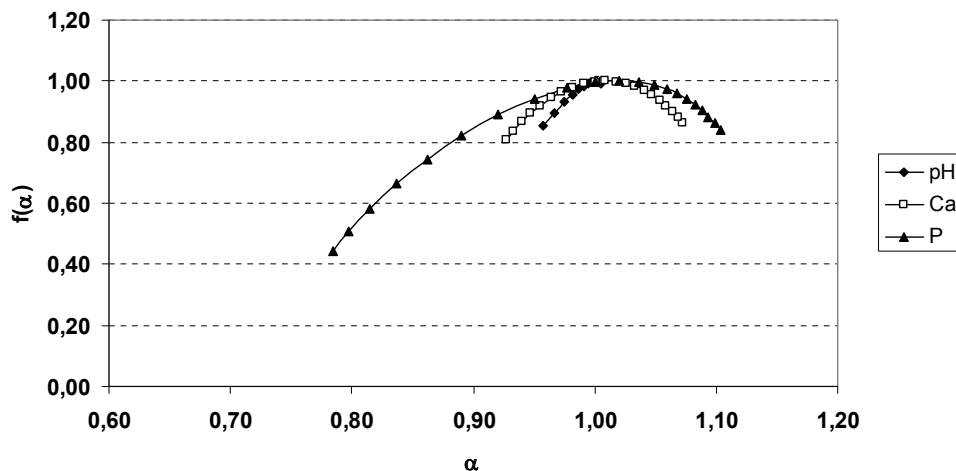


Figure 2. Singularity spectra for pH, exchangeable Ca and extractable P.

Several multifractal parameters obtained from the singularity spectra are listed in Table 2. The Hölder exponent of order zero, α_0 , varied between 1.001 and 1.020 and determination coefficients in estimating α_0 were 1.000. Moreover, when calculating α_{-5} and α_{+5} , determination coefficients were 0.996 and 0.986, respectively. Goodness of fit statistics of the singularity spectra showed the scaling properties of the studied soil variables can be fitted reasonably well with fractal or multifractal models.

Width or amplitude of the singularity spectrum, $(\alpha_{q^-} - \alpha_{q^+})$, in this case, $(\alpha_{-5} - \alpha_5)$, is an indicator of heterogeneity, because it

provides information on the diversity of the scaling exponents of a measure. So, the wider the $f(\alpha)$ spectrum is, the higher is the heterogeneity in the scaling indices. Differences in the width of the measure assessed as $(\alpha_{-5} - \alpha_5)$ ranged from 0.047 for pH to 0.0319 for Olsen extractable P.

The wider the $f(\alpha)$ - α spectrum is, the higher is the heterogeneity in the local scaling indices of the study variable and vice versa. Moreover, in a homogeneous fractal system the $f(\alpha)$ spectra would be reduced to a single point. Therefore, Figure 2 and Table 2 show that the studied variables have very different degrees of multifractality.

Variable	q_-	q_+	$(\alpha_{-.5} - \alpha_{.5})$	α_0	$\alpha_{-.5}$	$\alpha_{.5}$
pH	-5	+ 5	0.047	1.001 ± 0.000	1.005 ± 0.000	0.958 ± 0.021
OM	-5	+ 5	0.094	1.005 ± 0.001	1.043 ± 0.006	0.949 ± 0.019
CEC	.5	+ 5	0.055	1.002 ± 0.001	1.013 ± 0.004	0.958 ± 0.026
SB	-5	+ 5	0.238	1.011 ± 0.003	1.068 ± 0.022	0.830 ± 0.070
Ca	-5	+ 5	0.146	1.009 ± 0.002	1.073 ± 0.016	0.927 ± 0.012
Mg	-5	+ 5	0.222	1.017 ± 0.008	1.105 ± 0.050	0.883 ± 0.043
K	-5	+ 5	0.150	1.006 ± 0.001	1.045 ± 0.010	0.895 ± 0.051
H+Al	-5	+ 5	0.078	1.003 ± 0.001	1.029 ± 0.012	0.950 ± 0.032
V	-5	+ 5	0.179	1.009 ± 0.002	1.070 ± 0.020	0.891 ± 0.040
P	-5	+ 5	0.319	1.020 ± 0.003	1.103 ± 0.025	0.784 ± 0.019

Table 2. Parameters and indices obtained from the singularity spectrum.

In addition, shape and asymmetry of the $f(\alpha)$ - α spectrum can be employed to assess the heterogeneity of the measure. Note also that the presence of extremely high and extremely low data values and dominance of either low or high data are related to the left ($q \gg 1$) and right ($q \ll 1$) parts of the $f(\alpha)$ spectrum, respectively. For the studied soil properties measured along profiles, the left branch of the $f(\alpha)$ - α spectrum was wider than the right branch. Asymmetry toward the left indicates dominance of the lowest singularity exponents, α . In general, the left side was also longer than the right side, revealing that the geometrical size of points with the smallest exponents, α was smaller. The opposite was true for the narrower and shorter right side of the singularity spectrum. This suggests dominance of lowest values along the measured profiles and that these were quite similar to each other, as compared to

the highest values that were less frequent and showed more differences between one another along the profile.

Selected examples of generalized dimension spectra are shown in Figure 3. They follow a typical sigma shaped curve that crosses through 1.0 at $q=0$. The amplitude of the D_q curvature, however, varied widely and it was very narrow for pH, intermediate for exchangeable Ca and rather wide for Olsen-P. Standard errors of D_q also increased with increasing $|q|$, and their maximum values for $q=10$, $q=1$, $q=2$, $q=5$ and $q=-5$ were as high as ± 0.000 , ± 0.005 , ± 0.005 , ± 0.021 and ± 0.019 , respectively. Determination coefficients were highest for $q=0$, ($R^2=1.000$) and decreased with increased $|q|$; for $q=1$, $q=2$, $q=5$, and $q=-5$, the value of R^2 was higher than 1,000, 0.999, and 0.997 and 0.998, respectively (data not shown).

The curvature of the generalized dimension, D_q , was always much higher for positive than for negative values of q . This branch of the Rényi spectra corresponds to

the smallest concentrations of the measure. This is in accordance with the fact that the singularity spectra, $f(\alpha)-\alpha$, had a wider left branch.

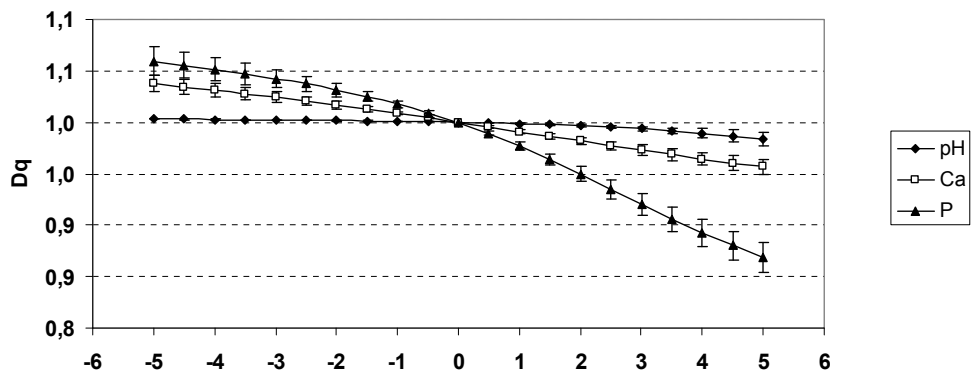


Figure 3. Generalized dimension.

The generalized dimension function also provides information to assess whether the scaling properties observed correspond to monofractal or multifractal behaviour. The spatial distribution of the soil properties studied would have a tendency to follow multifractal type of scaling if $D_0 > D_1 > D_2$. Table 3 shows that for pH, $D_0 \approx D_1$

$\approx D_2$, as the difference between D_0 and D_2 were lower than 0.05. Moreover, for CEC, (H+Al) and OM, values of $(D_0 - D_2)$ were lower than 0.01. However the remaining variables can be regarded as multifractal measures. This result evidences various degrees of multifractality of the studied soil properties.

Variable	$(D_{-5} - D_5)$	D_{-5}	D_5	D_0	D_1	D_2
pH	0,019	1.003 ± 0.000	0.984 ± 0.004	1.000 ± 0.000	0.999 ± 0.000	0.997 ± 0.001
OM	0.047	1.021 ± 0.002	0.974 ± 0.005	1.000 ± 0.000	0.995 ± 0.001	0.990 ± 0.002
CEC	0.024	1.006 ± 0.001	0.982 ± 0.006	1.000 ± 0.000	0.998 ± 0.001	0.995 ± 0.001
SB	0.125	1.037 ± 0.007	0.912 ± 0.021	1.000 ± 0.000	0.988 ± 0.002	0.973 ± 0.004
Ca	0.081	1.038 ± 0.005	0.957 ± 0.005	1.000 ± 0.000	0.991 ± 0.001	0.982 ± 0.002
Mg	0.135	1.059 ± 0.019	0.924 ± 0.019	1.000 ± 0.000	0.982 ± 0.005	0.964 ± 0.010
K	0.072	1.023 ± 0.003	0.951 ± 0.013	1.000 ± 0.000	0.994 ± 0.001	0.986 ± 0.002
H+Al	0.035	1.013 ± 0.003	0.978 ± 0.008	1.000 ± 0.000	0.997 ± 0.001	0.994 ± 0.002
V	0.092	1.035 ± 0.006	0.943 ± 0.011	1.000 ± 0.000	0.991 ± 0.001	0.980 ± 0.003
P	0.191	1.059 ± 0.009	0.868 ± 0.009	1.000 ± 0.000	0.977 ± 0.002	0.950 ± 0.005

Table 3. Parameters and indices obtained from the generalized dimension.

Following previous criteria (Vidal Vázquez *et al.* 2013) the spatial distribution of pH is characterized by quasi-monofractal behaviour, CEC, (H+Al) and OM, present a relatively low degree of multifractality, and the other soil properties studied (exchangeable K, Mg and Ca, SB, V and Olsen-P) show a stronger degrees of multifractality.

The difference ($D_{-5} - D_3$) also has been frequently used as an index of multifractality. The value of this parameter ranged from 0.019 (pH) to 0.191 (Olsen-P). Therefore, again analysis of D_q spectra showed that the spatial distribution of the studied soil attributes exhibited various degrees of scaling heterogeneity or multifractality.

The sampled transects was representative of the main pedological conditions along a slope at the studied site. The spatial variability of this transect, sampled reflects the local effects of the main soil forming factors and processes. Therefore, the scaling properties of the soil attributes embody a realistic situation, consistent with observations at the small plot level. At this level, the multifractal approach gives a good description of the spatial variability along transects.

CONCLUSIONS

We investigated the multifractal properties of several soil chemical properties, including pH, OM, attributes of the soil exchange complex and Olsen extractable P sampled along a transect transects on a gentle slope. All the singularity spectra studied were characterized by a wider left branch, whereas the generalized dimension spectra had a wider right branch, which correspond to the smallest concentrations of the measure.

Singularity spectrum, $f(\alpha)$ - α , and generalized dimension, D_q , curves showed that

the spatial distributions of these soil properties exhibited various degrees of multifractality. Thus, the spatial distribution of pH was characterized by quasi-monofractal behaviour, CEC, (H+Al) and OM, showed a relatively low degree of multifractality, and the other soil properties studied (exchangeable K, Mg and Ca, SB, V and Olsen-P) exhibited a stronger degrees of multifractality.

Acknowledgments. This work was funded in by Ministry of Economy and Competitiveness, Spain) in the frame of project CGL2013-47814-C2.

REFERENCES

- CANIEGO, F.J., ESPEJO, R., MARTÍN, M. A., SAN JOSÉ, F. (2005). Multifractal scaling of soil spatial variability. *Ecological Modelling*, 182:291-302.
- CARIDAD-CANCELA, R., VIDAL VÁZQUEZ, E., VIEIRA, S. R., ABREU, C. A., PAZ GONZÁLEZ, A. (2005). Assessing the spatial uncertainty of mapping trace elements in cultivated fields. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(1,3): 253-274.
- CHHABRA A.B., JENSEN, R. V. (1989). Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum. *Physical Review Letters*, 62: 1327-1330.
- DAFONTE, DAFONTE, J., GUITIÁN OJEA, M., PAZ-FERREIRO, J., MACHADO SIQUEIRA, G., VIDAL VÁZQUEZ, E. (2010). Mapping of soil micronutrients in an European Atlantic agricultural landscape using ordinary kriging and indicator approach. *Bragantia*, 69: 175-186.
- EVERSTZ, C.J.G., MANDELBROT, B. B. (1992). Multifractal measures. In Peitgen, H., H. Jürgens, and D. Saupe.

- Chaos and Fractals, Springer, Berlin, 921-953.
- FALCONER, K. (1997). *Fractal Geometry. Mathematical Foundations and Applications*. John Wiley and Sons, Chichester.
- HALSEY, T.C., JENSEN, M. H., KADANOFF, L. P., PROCACCIA, I., SHRAIMAN, B. I. (1986). Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets. *Physical Review A*, 33: 1141-1151.
- HENTSCHEL, H.G.E., PROCACCIA, I. (1983). The infinite number of generalized dimensions of fractals and strange attractors. *Physica D*, 8: 435-444.
- KRAVCHENKO, A.N. (2008). Stochastic simulations of spatial variability based on multifractal characteristics. *Vadose Zone Journal*, 7(2):521-524.
- MONTANARI, R., LIMA, R.C., BONINI, A.S., MARUES, L.S., MINGUINI, R., CARVALHO, M.P., PAZ-FERREIRO, J., COSTA, N.R. (2011). Variabilidade dos atributos de um Latossolo vermelho sob plantio direto no cerrado brasileiro e produtividade da soja. [Variability of the features of a red latosol on direct yield in a Brazilian cerrado and soybean productivity]. *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 36: 219-237.
- MORALES, L.A., PAZ-FERREIRO, J., VIEIRA, S.R., VIDAL VÁZQUEZ, E. (2010). Spatial and temporal variability of EH and PH over a rice field as related to lime addition. *Bragantia*, 69: 67-76.
- MORALES, L.A., VIDAL VÁZQUEZ, E., PAZ-FERREIRO, J. (2014). Spatial distribution and temporal variability of ammonium-nitrogen, phosphorus, and potassium in a rice field in Corrientes, Argentina. *Scientific World Journal*. DOI.org/10.1155/2014/135906
- PAZ-FERREIRO, J., BERTOL, I., VIDAL VÁZQUEZ, E. (2008). Quantification of tillage, plant cover, and cumulative rainfall effects on soil surface microrelief by statistical, geostatistical and fractal indices. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 15 (4): 575-590.
- PAZ-FERREIRO, J., MIRANDA, J.G.V. and VIDAL VÁZQUEZ, E. (2010). Multifractal analysis of soil porosity based on mercury injection and nitrogen adsorption. *Vadose Zone Journal*, 9 (2): 325-335.
- PAZ-FERREIRO, J., VIDAL VÁZQUEZ, E. and de ABREU, C.A. (2012). Phosphorus Determination after Mehlich 3 Extraction and Anion Exchange Resin in an Agricultural Soil of Northwestern Spain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43: 102-111.
- PAZ-FERREIRO, J. and VIDAL VÁZQUEZ, E.V. (2014). Pore size distribution patterns in tropical soils obtained by mercury intrusion porosimetry: The multifractal approach. *Vadose Zone Journal*, 13 (6). DOI: 10.2136/vzj2014.01.0003
- SILVA DÍAS (da), R., de ABREU, C.A., de ABREU, M.F., PAZ-FERREIRO, J., MATSURA, E.E., and PAZ GONZÁLEZ, A. (2013). Comparison of Methods to Quantify Organic Carbon in Soil Samples from São Paulo State, Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44: 429-439.
- SIQUEIRA, G. M., SILVA, E.F.F., MONTENEGRO, A.A.A., VIDAL VÁZQUEZ, E. and PAZ-FERREIRO, J. (2013). Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 20 (4): 529-541.

- SOIL SURVEY STAFF. (2010). Keys to Soil Taxonomy. 11th Edition. Natural Resources Conservation Service. Washington. DC. 338 pp.
- TARQUIS, A.M., BIRD, N.R.A. WHITMORE A.P., CARTAGENA, M.C., and PACHEPSKY, Y. 2008. Multiscale Entropy-based Analysis of Soil Transect Data. *Vadose Zone Journal*, 7:563-569.
- VIDAL VÁZQUEZ, E., PAZ-FERREIRO J., MIRANDA, J.G.V. and PAZ GONZÁLEZ, A. (2008a). Multifractal analysis of pore size distributions as affected by simulated rainfall. *Vadose Zone Journal*, 7 (2): 500-511.
- VIDAL VÁZQUEZ, E., GARCÍA MORENO, R., MIRANDA, J.G.V., DÍAZ, M.C., SAÁ REQUEJO, A., PAZ FERREIRO, J. and TARQUIS, A.M. (2008b). Assessing soil surface roughness decay during simulated rainfall by multifractal analysis. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 15 (3): 457-468.
- VIDAL-VÁZQUEZ, E., PAZ-FERREIRO, J., VIEIRA, S., TOPP, G., MIRANDA, J. and PAZ GONZÁLEZ, A. (2012). Fractal description of the spatial and temporal variability of soil water content across an agricultural field. *Soil Science*, 177 (2): 131-138
- VIDAL VÁZQUEZ, E., CAMARGO, O. A., VIEIRA, S. R., MIRANDA, J.G.V., MENK, J.R.F., SIQUEIRA, G.M., MIRÁS AVALOS, J. M. and PAZ GONZÁLEZ, A. (2013). Multifractal analysis of soil properties along two perpendicular transects. *Vadose Zone Journal*, 12: 1-13. doi: 10.2136/vzj2012.0188.
- Van RAIJ, B., de ANDRADE, J. C., CANTARELLA, H. and QUAGGIO, J. A. (2001). Chemical analysis for evaluation of tropical soils fertility. Instituto Agronômico. Campinas. Brazil. 284 pp.
- VIEIRA S.R., HATFIELD, J. L. NIELSEN, D. R. and BIGGAR, J. W. (1983). Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 5:1-75.
- VIEIRA, S.R., and PAZ GONZÁLEZ, A. (2003). Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia*, 62: 127-138.
- VIEIRA, S.R., de CARVALHO, J.R.P. and PAZ GONZÁLEZ, A. (2010). Jack knifing for semivariogram validation. *Bragantia*, 69: 97-105.
- ZELEKE, T.B. and B.C. SI. (2006). Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques. *Geoderma*, 134:440-452.

The glaciation of Serra de Queixa-Invernadoiro and Serra do Gerês-Xurés, NW Iberia. A critical review and a cosmogenic nuclide (^{10}Be and ^{21}Ne) chronology.

VIDAL ROMANÍ¹, J. R., FERNÁNDEZ MOSQUERA, D.², Y MARTI, K.³

(1) Instituto Universitario de Geología. University of Coruña, Campus de Elviña s/n. 15071 A Coruña (Spain). (*) corresponding author xemoncho@udc.es

(2) Instituto Universitario de Geología. University of Coruña, Campus de Elviña s/n. 15071 A Coruña (Spain) xemos@udc.es

(3) University of California, San Diego. Department of Chemistry & Biochemistry (0317), 9500 Gilman Drive, 5322 Mayer Hall, La Jolla, California 92093-0317. U.S.A. kmarti@ucsd.edu

Abstract

The Serras of Queixa-Invernadoiro and Gerês-Xurés in the NW of the Iberian Peninsula are two small mountain massifs located at low altitude that were glaciated in the Pleistocene. The prevailing granitic lithology was a problem for mapping glacial forms (in many cases interpreted as banal granite forms) and for the identification of the tills (misunderstood as remains of regolith). A combination of geomorphological techniques (genetic mapping of granite forms and deposits), the micromorphological study of till thin sections and the morphoscopy of quartz grains at the SEM enabled to establish a model of the geomorphological evolution complemented with the chronology by cosmogenic nuclides (^{21}Ne and ^{10}Be) of both glacial systems. The obtained results represent the glacial evolution of the area from circa 250 ka B.P.

Keywords: glaciation, cosmogenic nuclides chronology, NW Iberian Peninsula, till, moraine, Pleistocene.

1. INTRODUCTION

The first works on the Pleistocene of the NW of the Iberian Peninsula have more than one century (Hult, 1873). Since then and up to 1990, with the exception of purely geomorphological works (Coudé-Gaussen, 1978, 1980, 1981; Hernández-Pacheco, 1949, 1957; Schmidt-Thomé, 1983), the study of the glaciation in the zone did not raise much interest due to the reduced area of the glaciated surface (Pérez González et al., 1989), even in the Iberian glacial context. The glacial erosional forms and deposits are scarce being usual the confusion of common forms in non-glaciated granite terrains with glacial cirques and polished surfaces (Twidale and Vidal Romaní, 2005).

The most frequent deposits are till s.l. and moraines. The former has been interpreted as remains of granite regolith though this does not occur in the glaciated zone (Vidal Romaní et al., 1990 a and b). The moraines (push or lateral) (Vidal Romaní et al., 1990 a and b; Brum et al., 1992, 1993; Twidale and Vidal Romaní, 2005) with a few exceptions, originate ambiguous morphologies that have been misunderstood as accumulations of residual blocks or slope deposits (Teixeira and Cardoso, 1979; Martínez de Pisón and Arenillas, 1979, 1984). The proglacial deposits (essentially fluvio-glacial terraces) escaped notice either due to their small dimensions, or because they were interpreted as simple torrential terraces. Very active periglacial dynamics, synglacial and postglacial (Texier and Meireles, 2003), contributed to mask the glacial features with a generalized regularization of slopes covering the glacial deposits (Brum et al., 1992, 1993). These facts together with the low altitude and geographic location of the moun-

tains even led to the questioning of the existence of glaciation in the region (Teixeira and Cardoso, 1979; Martínez de Pisón and Arenillas, 1979, 1984).

The initial geomorphological interpretation established a classic pattern of glacial cirques with associated valley glaciers (Coudé-Gaussen, 1978, 1980, 1981; Hernández-Pacheco, 1949, 1957; Schmidt-Thomé, 1973, 1983; Pérez González et al., 1989). However, since 1990, the glaciation of NW Iberia has been studied more systematically with special interest on the glacial deposits (Vidal Romaní et al., 1990 a and b; Brum et al., 1992, 1993). This new stage in the research consisted in the identification and micro-morphological study of the subglacial tills providing complementary data to the sometimes confusing geomorphological features. This research enabled to define the glacier limits with greater precision and to establish the ice dynamics in more detail.

Most authors of the previous works attributed the glaciation of NW Iberia to the Würm without having carried out any dating (Coudé-Gaussen, 1978, 1980, 1981; Hernández-Pacheco, 1949, 1957; Maldonado, 1994; Schmidt-Thomé, 1973, 1983). Only one author (Hernández Pacheco, 1957) describe remains of an older glacial phase for the Serra de Queixa glaciation (Ourense, Spain), attributing it to the Riss though again without absolute datings. The difficulties for obtaining an absolute chronology were essentially due to the predominantly erosive character of the glacial systems of the zone and to the scarce sedimentation, which is also mainly detrital. The only sediments that may be dated by radiocarbon accumulate in the glacial overexcavated basins near the present divides (Fig. 1) (Laguna Grande, Serra de Queixa-Invernadoiro, Maldonado, 1994;

Vidal Romaní et al., 1995) or in a proglacial setting (Lagóa de Marinho, Serra do Gerês-Xurés, Ramil-Rego et al., 1998). The oldest and most continuous sedimentary records of the zone have been preserved in those sites. However, their maximum age is 15 ka B.P. (14C), thus corresponding to a late stage of the later glacial or postglacial times.

So, the chronological model proposed for the west of the Spanish Pyrenees (Vilaplana, 1981; Bordonau, 1992), with a maximum age of 60 ka B.P., was initially assumed as valid for all the Cantabrian Chain, including Galicia (Jiménez, 1996; Vidal Romaní et al., 1995) and the north of Portugal (Brum Ferreira, et al., 1992). The extension of the Pyrenean chronology to the Iberian NW caused problems of correlation because

the rocky substratum is not the same. Also, neither the dimensions of the glaciation of the Pyrenees and of the Iberian NW nor the types of deposits and glacial forms present in both zones are comparable. As for example, glacial polish or striae typically found in any common glaciated landscape in the NW Iberian granite areas are scarce and only preserved in quartz dykes or in individual feldspars (Vidal Romaní et al., 1990 a and b). The postglacial weathering of the glaciated surfaces, though not intense (Soares de Carvalho and Lopes Nunes (1981) calculate the postglacial degradation in 15 mm thick) has greatly eliminated the glacial polish surfaces. Other types of forms and glacial deposits, frequent in the other glaciated areas of Iberia, are very scarce in NW Iberia.



Fig. 1.

2. REGIONAL SETTING.

Serra de Queixa-Invernadoiro and Serra do Gerês-Xurés are located in the NW of the Iberian Peninsula (Fig. 2). Serra de Queixa-Invernadoiro is the most important mountain of the province of Ourense (Galicia, Spain) and its higher height corresponds at Cabeza de Manzaneda (1778 m). It is delimited by the Sil River in the north, Xares and Bibei Rivers in the east, Camba and Támega rivers in the south and by the riverheads of the Limia and Arnoia rivers. The lithology of Serra de Queixa-Invernadoiro is a pre to synkinematic alkaline two-mica granite (Rubio and Rodríguez, 1981). This area is totally within the Spanish territory. The other studied zone, Serra de Gerês-Xurés, is mostly in the Por-

tuguese territory inside the National Park of Peneda-Gerês in the North of the province of Minho with a small area of 2 km² in the Spanish territory. It is located between the divides of the Limia River in the south of the province of Ourense and the Cávado River in the North of the province of Minho. In Serra de Gerês-Xurés there starts a river course of secondary order, the Homem. This river forms the main drainage axis of the glaciated area. The highest point of Serra de Gerês-Xurés is at Pico Altar de Cabrões (1508 m). The lithology of Serra de Gerês-Xurés is a biotitic granodiorite (Fernández and Pilas, 1974 a and b) of medium to coarse grain. According to Cottard (1979), the fine-grained granite of Carrís and the porphyritic granite of Gerês prevail in the Portuguese zone.



Fig. 2.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Geomorphological definition of the glacial dynamics:

The glaciated area has been defined using different geomorphological criteria: landforms and deposits of glacial origin (roches moutonnées, glacial polished surfaces, moraines, supraglacial and subglacial tills), granite forms (tor, castellated rocks and gnammas, essentially), and finally, the areas covered or not by granite regolith which allowed us to establish the maximum perimeter of the surface affected by the ice. For example, the gnammas and the big gra-

nitic residuals (tor and castellated rocks) are only present outside the glaciated area (De Uña and Vidal Romani, 2000).

These data were used to establish either the relative chronology of the glacial evolution or the maximum extent of the glaciation in both mountains (Figs 3a and b; 4a and b). Finally, though it is not of preferential interest for this work, the thickness reached by the ice during the glacial maximum has been approximately established according to the height of the lateral moraines above the present bottom of the valley. The values presented herein are approximate and give illustrative magnitudes.

Serra de Queixa-Invernadoiro

LEGEND

- Location of samples
- Ice-cap boundary
- Valley tongue and ice flow
- ▨ Glacial polished surface
- Glacial moraine
- ▲ Lodgement till
- ☆ Glacial overexcavated basin

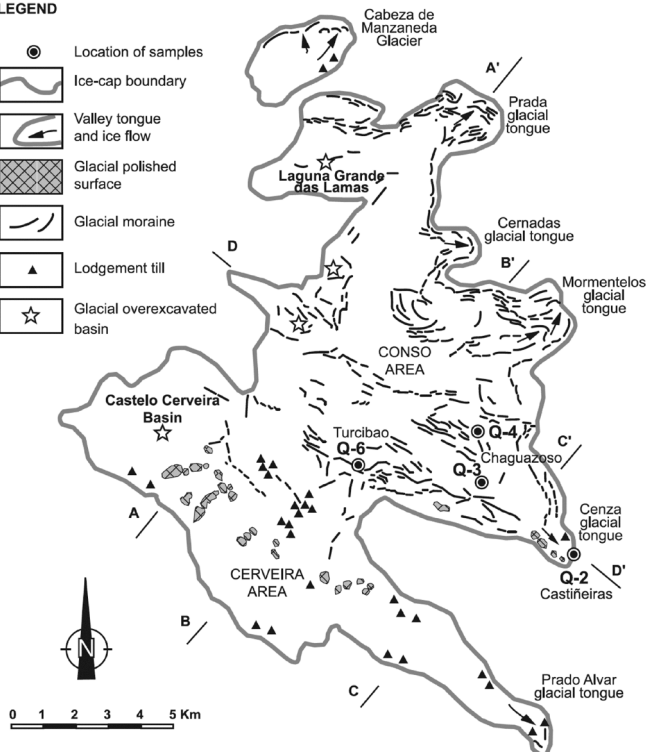


Fig. 3a.

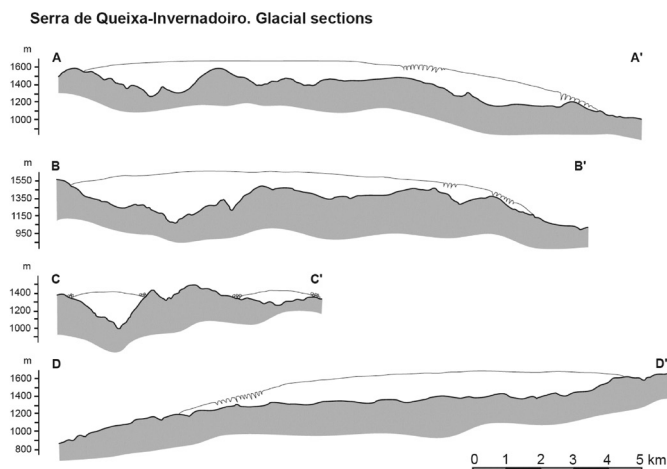


Fig. 3b.

3.2. Absolute chronology:

According to the geomorphological and sedimentological observations a selection of glacial polished surfaces and deposits (moraines) that represents the main phases of glacial evolution in both zones was carried out. In both cases, when possible, quartz dyke samples were collected. There were taken into account the topographic determinants to avoid temporal and spatial shielding (Cerling and Craig, 1994). For example, sample Q-2 (Fig. 3a) is affected by topographical shielding from an adjacent boulder. So, the production rate at this site was corrected according to Dunne et al. (1999), with a shielding coefficient of 15%.

The samples were obtained with a rock drill from bedrock or moraine boulders. We assume that the glacial erosion obliterated the pre-exposure record of cosmic radiation. When the samples were collected from moraine formations, largest boulders were selected in order to avoid multiple exposure stages.

The top 5 cm from the cores were cut and ground to several grain sizes. Optical inspection of the granite or quartz separates revealed that the 0.5 to 0.95 mm fraction showed the cleanest quartz grain abundance; thus, this fraction was used to separate the quartz for cosmogenic ^{21}Ne measurements. Remaining fractions were sent for AMS ^{10}Be measurements to PRIME Lab of Purdue University (U.S.A.).

Sample preparation for ^{21}Ne measurements began with a chemical etching for purifying quartz separates. This process was done following procedures described by Kohl & Nishiizumi (1992) and Dunai (2000) with minor variations. In order to reduce nucleogenic Ne concentration we must remove an outer shell of the quartz crystal equivalent to the alpha particles penetration depth. Changing chemical etching conditions (time and reagents concentrations) can improve the procedure yielding, saving more quartz for the measurement. Final inspection of the etched separates was done under the binocular microscope. Any quartz grain

showing dots or feldspar intergrowth was rejected for analyses.

To further resolve the remaining nucleogenic Ne component, as well as trapped Ne, the gas was extracted from the quartz grains using stepwise pyrolysis at temperatures from 300°C to 1200°C and melting at 1600°C. Extraction times were 30 min up to 800°C, and 20 min for higher temperatures. We followed the procedures of Niedermann et al. (1993, 1994) and Niedermann (2000) in the analyses of Ne by static mass spectrometry at Scripps Institution of Oceanography-UCSD (La Jolla, U.S.A.).

In Serra de Queixa-Invernadoiro (Fig. 3a and b) four samples were collected: a moraine boulder (Q-2) near Castiñeiras corresponding to the maximum advance and which should bear the oldest age for the glaciation of the zone. The following sample corresponds to a moraine boulder (Q-6) in Turcibao located between 1500 m and 1450 m ASL in the divide between the Conso and Cerveira rivers. It was deposited when the Serra de Queixa-Invernadoiro original ice cap separated into two different glaciers draining along the present valleys of

Conso and Cerveira Rivers. In this stage the ice volume was considerably smaller than the maximum represented by the Castiñeiras moraine. The third sample (Q-3) corresponds to the surface of a roche moutonnée located beneath the Chaguazoso moraine. In that moment both glaciers kept their independent evolution. Finally, another sample (Q-4) was taken from a glacial polished bedrock in the most inner zone of Glacier of Conso and corresponds to a late stage in the deglaciation.

In Serra do Gerês-Xurés (Fig. 4a and b), most of the glaciated area is located in the Portuguese zone, inside the Natural Park of Peneda-Gerês, an area with sampling restriction. So, we had to sample only the Spanish zone, which, as stated before, was affected by the ice during a diffuence stage. Therefore, the obtained date corresponds to the oldest glacial maximum preserved in the zone. Two samples were taken: X-1 in the same divide of the diffuence col of the Vilamés River, and X-2 among 3 push moraines which correspond to a local glacial maximum.

Serra de Gerês-Xurés

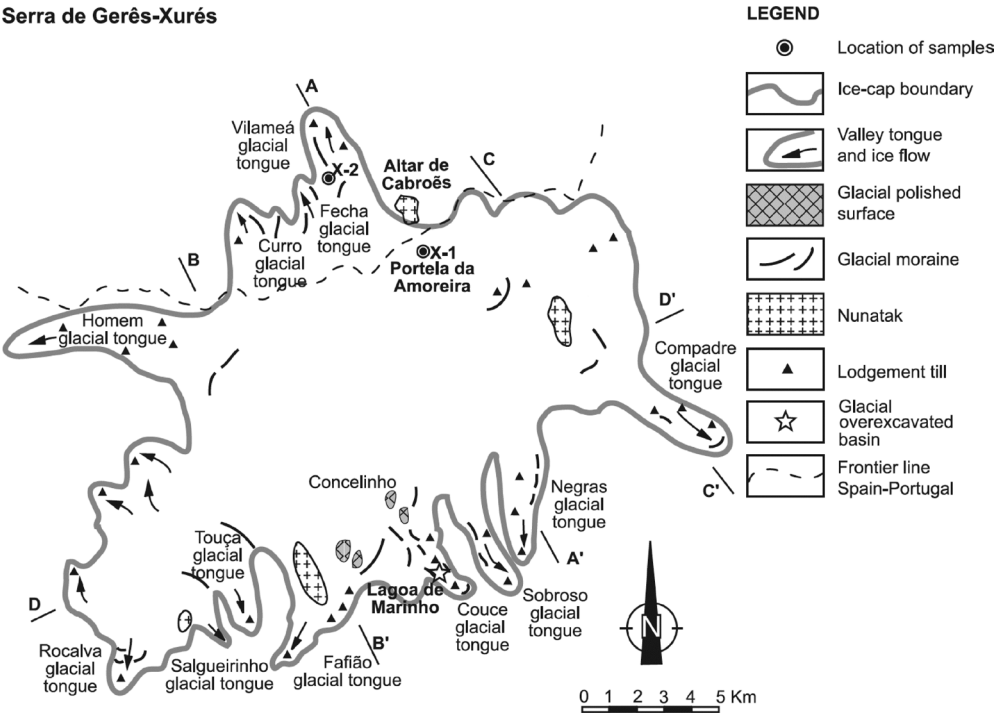


Fig. 4a.

Serra de Gerês-Xurés. Glacial sections

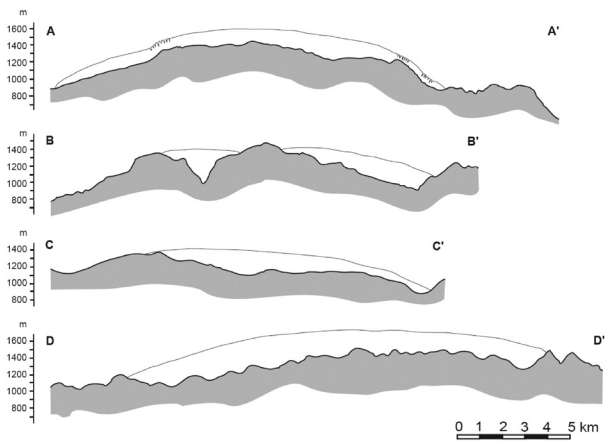


Fig. 4b.

4. RESULTS

We have identified 4 different types of till: lodgement till, subglacial melt-out till, deformational till and supraglacial or ablation till.

From these four types, the lodgement till gives greater information on the glacial dynamics. It appears in discontinuous and small outcrops not easy to map at the scale presented here. Therefore, only their approximate position is shown. All the outcrops of lodgement till present similar characteristics. It is a detrital sediment with a very compact sandy-muddy matrix (matrix supported) (Fig. 5), foliation in the contact with the bedrock (Fig. 6), and abundance of blocks with faceted shape of glacial origin. The texture is grain-supported though sometimes the very abundant matrix may separate the grains. Under the optical microscope the matrix shows brecciated-mylonitic facies with angular grains of quartz and feldspar, which may appear occasionally rounded. In some cases it is possible to observe a skel-sepic fabric typical of the lodgement till (Fig. 7). The morphoscopy of the quartz grains at the SEM shows striae, conchoidal fractures and steps, typical of sedimentary environments of high deformation like the subglacial ones.

In Serra de Queixa-Invernadoiro (Figs 3a and b) the cosmogenic chronology obtained for the 4 samples (Table 1) (Vidal Romaní et al., 1999; Fernández Mosquera et al. 2000) is coherent with the geomorphological relative chronology, that is, progressively more modern from outside to inside the glaciated zone. For this zone there also exists (Vidal Romaní et al., 1990 a and b) a minimum age of 13.4 ka B.P. (14C) (Vidal Romaní and Santos, 1993) in the base of the

sequence accumulated in the overexcavated glacial basin of Laguna Grande-As Lamas (Fig. 1). When this sequence began to accumulate (it starts with a lodgement till) there still persisted a small mass of glacial ice in the zone because the age of sample Q-4 and the one of the base of the sequence of Laguna Grande-As Lamas are similar.

The age of Q-2 (155 ± 30 ka B.P. (21Ne)) corresponds to a glacial maximum in the area. Q-3 (22 ± 17 ka B.P. (21Ne) and 23 ± 2 ka B.P. (10Be)) and Q-6 (85 ± 24 ka B.P. (21Ne)), though internal to the perimeter of the glaciated area, mark two different advances of minor entity in the glacial evolution of the sierra. Q-6 indicates the separation of the initial, unique ice cap into two glaciers (Conso and Cerveira areas) that evolved as independent systems in the final stage of Queixa-Invernadoiro. Q-3 has the peculiarity of being the moraine of with the biggest dimensions (40 m thick).

In Serra do Gerês-Xurés (Figs 4a and b) the studied samples correspond to a diffuence zone active during a glacial maximum (Brum et al., 1992, 1993; Vidal Romaní et al., 1990 a and b; Vidal Romaní et al., 1999; Fernández Mosquera et al. 2000). By then, there were generated the glacial tongues of Fecha, Curro and Vilamés (Vidal Romaní et al., 1990 a and b). The first sample (X-1) (131 ± 31 ka B.P. (21Ne)) corresponds to a glacial polished bedrock located in the Portela da Amoreira, at the riverhead of the Vilamés River below the residual of Altar of Cabrões. X-2 (231 ± 48 ka B.P. (21Ne)), among 3 morainic ridges, is located on the west slope of the valley of the Vilamés River and is also a glacial polished bedrock exposed after a previous glacial maximum (Vidal Romaní et al., 1990 a and b; Brum et al., 1992, 1993).



Fig. 5.

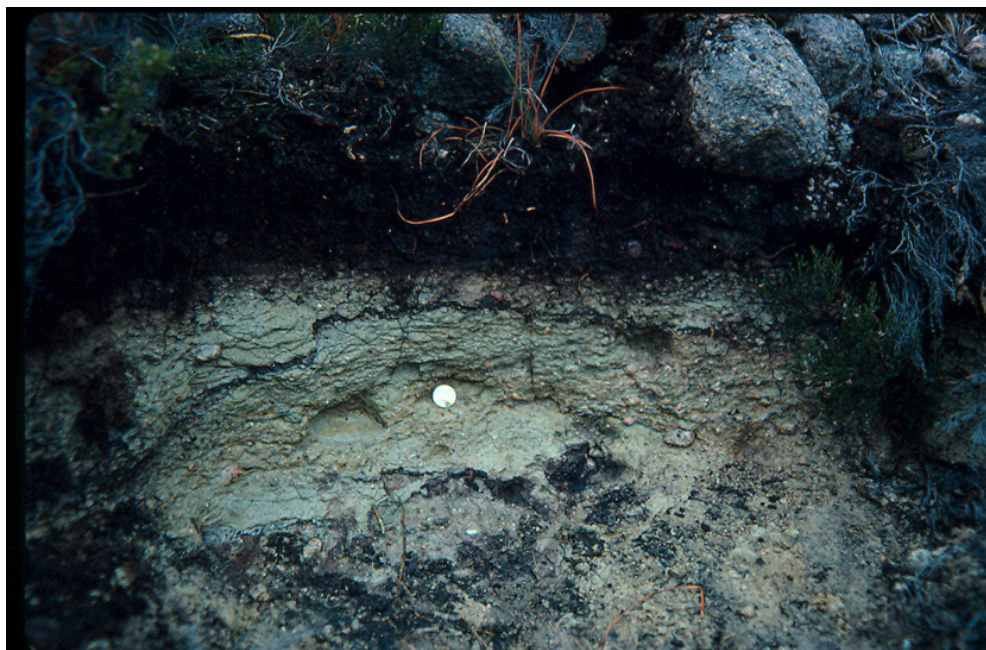


Fig. 6.

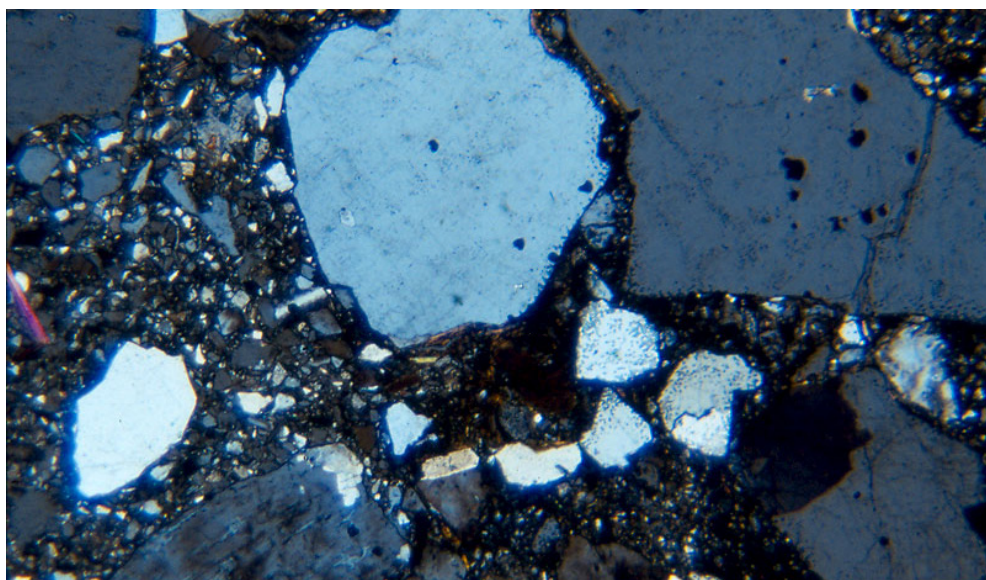


Fig. 7.

Sample	Surface type	Altitude (m)	Latitude (°)	Production rate ^{21}Ne at g/a	Cosmogenic ^{21}Ne (10 ⁵ atoms/g)	^{21}Ne exposure age (Ka)	Production rate ^{10}Be / ^{21}Ne at g/a	Cosmogenic ^{10}Be (10 ⁵ atoms/g)	^{10}Be exposure age (Ka)
Q-2 (Gd)	PM	1210	42.2	57,17	64.12 ± 6.74	155 ± 30			
Q-3 (Gd)	GP	1294	42.1	51,97	11.68 ± 9.19	22 ± 17	15,07	3.43 ± 0.15	23 ± 2
Q-4 (Qtz)	GP	1340	42.1	53,96	86.93 ± 3.93	16 ± 7	15,65	2.20 ± 0.16	14 ± 2
Q-6 (Gd)	LM	1450	42.1	59,01	49.9 ± 14.1	85 ± 24			
X-1 (Gd)	GP	1350	41.9	53,72	72.70 ± 9.36	131 ± 31			
X-2 (Gd)	GP	1150	41.9	49,10	114.61 ± 8.23	231 ± 48			

Table 1. Table 1 shows the calculated excess of cosmogenic ^{21}Ne , the measured concentration of cosmogenic ^{10}Be and their corresponding exposure ages from Serra de Queixa (Q-) and Serra de Xurés (X-) samples. Production rates were scaled according to Dunai scaling factors (2000) and corrected for topographical shielding when necessary (Q-2). The production rates used were $P(10) = 5.51$ atom/g.a (Heisinger et al., 2002) and $P(21) = 19.0 \pm 3.7$ atom/g.a (Niedermann, 2000), both at sea level and $>60^\circ$ geomagnetic latitude. ^{10}Be concentrations are referred to NIST ^{10}Be standard. ^{21}Ne blanks were $< 5 \times 10^5$ atoms/g. Calculated ages presented in this paper correct those shown in Fernandez Mosquera et al. (2000) due to production rates updating and shielding correction (Q-2). Samples from Queixa (Q-) were also mislabeled in Fernandez Mosquera et al. (2000), being Q-1 now Q-2, Q-2 now Q-3 and Q-3 now Q-4. In addition, errors in age uncertainties calculation were detected at Q-2, X-1 and X-2, so corrected uncertainties are shown in this paper. Gd= granodiorite, Qtz= quartz, PM= push moraine block, LM= lateral moraine, GP= glacial polished surface

5. DISCUSSION

The glacial history that has been preserved in Serra de Queixa-Invernadoiro and Serra do Gerês-Xurés starts after the maximum glacial advance observed in the zone. But the geomorphological mapping without absolute datings only provides a relative sequence of glacial events. However, the chronology established by cosmogenic nuclides enables to give a new view to the subject though the reconstructed geomorphological history is very incomplete.

In Serra de Queixa-Invernadoiro (Figs 3a and b), the glacial system had been in its maximum expansion when the Castiñeira moraine (Q-2) was formed. Its age of 155 ± 30 ka B.P. (21Ne) coincides with a cold glacial episode in the Vostok ice core (Petit et al., 1999) and is set up within the marine isotopic stage 6. The height of the moraine above the bottom of the present valley indicates a maximum thickness of the ice cap of about 200 m. The thickness of the moraine in its ending part, hardly 2 m, and its beveled morphology indicate a unique episode of glacial advance. Moreover, in front of the Castiñeiras moraine the features of the terrain change suddenly: the bedrock appears covered by a thick mantle of granite regolith and small granite rock residuals (tor and castellated rock type) outcrop frequently, thus proving that the glacial advance never exceeded this point. For the Spanish Pyrenees, Peña et al. (2004) establish the oldest Pleistocene glacial stage for this zone, the Sabiñánigo Phase, whose age was set up by OSL in fluvio-glacial terraces in 155 ± 24 and 156 ± 10 ka B.P., the same as for Q-2.

Q-6 (85 ± 24 ka B.P. (21Ne)) dates the division of the unique, former ice cap of Que-

ixa-Invernadoiro into two separated masses: the Conso and the Cerveira areas. Its height over the bottom of the present valley gives a thickness of the ice cap at this point of about 167 m. The obtained age could be assigned to the end of the marine isotopic stage 5a. According to Peña et al. (2004), in the Spanish Pyrenees the Aurín Phase, dated in 85 ± 5 ka B.P. by OSL in fluvio-glacial terraces, corresponds to Q-6, again coinciding the chronology of the glaciation of the Spanish Pyrenees with that of Serra de Queixa-Invernadoiro.

Q-3 marks the end of the construction of the Chaguazoso moraine, and the ages, 22 ± 17 ka B.P. (21Ne) and 24 ± 2 ka B.P. (10Be), coincide substantially and represent the end of a long cold period associated to marine isotopic stages 2 and 3. The Chaguazoso moraine is characterized by its big dimensions (40 m thick). This suggests that this last accretion should retrieve for a long time producing the great accumulation. In another peninsular glaciated zone located in the Sierra de Guadarrama, Spanish Central System, in the glacial cirque of Peñalara, a push moraine with similar characteristics (35 m thick) has a similar age determined by 10Be (Pedraza personal communication). This may indicate a stability for this stage of the Iberian glaciations, with continued small advances and retreats that explain the huge development in height of moraines. This stage is also the last maximum extent in the Pyrenees (Pallás et al., 2006) and in the major ice sheets of Britain and Scandinavia (Hughes et al., 2006).

Q-4 in Serra de Queixa-Invernadoiro gave an age of 16 ± 7 ka B.P. (21Ne) and 14 ± 2 ka B.P. (10Be), yielded again good agreement between both cosmogenic nuclides. It corresponds to the very end of

the deglaciation stage of the sierra. By the same time Laguna Grande-As Lamas silting begins ($13,4 \pm 4$ ka B.P.) (Vidal Romaní and Santos, 1993; Ramil-Rego et al., 1998).

In Serra do Gerês-Xurés (Figs 4a and b) the chronological record is older and reaches up to marine isotopic stage 8. X-2, 231 ± 48 ka B.P. (^{21}Ne), corresponds to a glacial expansion with diffuence from the Portuguese zone to the Spanish one (Vidal Romaní et al., 1990 a and b). At that moment the maximum thickness of the ice cap should be similar to the ones of Serra de Queixa-Invernadoiro. X-2 is located among 3 morainic ridges: one corresponding to an advanced pulsation, and the other two formed in one later pulsation (Brum et al., 1992), though all of them within the diffuence stage.

X-1, 135 ± 31 ka B.P. (^{21}Ne), marks the end of the diffuence into the Spanish zone, and, therefore, the beginning of the deglaciation, falling into the marine isotopic stage 5e. The oldest sample dated in the Massif of Queixa-Invernadoiro would correspond to an intermediate stage between X-2 and X-1 in Serra do Gerês-Xurés.

Based on our data, the glacial maximum in Serra do Gerês-Xurés would be the oldest date known up to now for the glaciaticism in the whole Iberian Peninsula. There exists a reference of a glaciation in the French Pyrenees (Quinif and Maire 1996) with a similar age (225 ± 14.7 – 12.8 ka B.P.) determined by $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ from a speleothem.

6. CONCLUSIONS

The study of the glacial dynamics in two areas of the NW Iberia has posed many challenges for years. The glaciation developed over granitic bedrock with a poor and bad differentiated sedimentary and geomor-

phological record. Thus, the geomorphological data only allowed the establishment of a relative sequence of events. The area affected by the glaciation has been established by direct (micromorphology of lodgement till, morphoscopy of quartz grains at the SEM) and indirect (presence of regolith, granite residuals) criteria, these latter exclusive of non-glaciated zones. The absolute chronology has been determined by two cosmogenic nuclides (^{10}Be and ^{21}Ne) that show a good correlation grade between them. The ages obtained for these massifs are also found in other glaciated massifs of Iberia (Pyreneans, Central System) dated by cosmogenics ^{10}Be , OSL or by $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. There also exists a good correlation grade with the cold phases marked by the marine isotopic stages of the Vostok ice core. Our work allowed us to distinguish glacial stages corresponding to 3 different glacial isotopic stages, the age of the morainic blocks coinciding with glacial advances and the age of the polish surfaces with deglaciation stages (Petit et al., 1999). The combined use of geomorphological, micromorphological and SEM techniques and cosmogenic nuclides was very useful to define the glacial dynamics and chronology of these small ice caps separated from the main glaciation.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been financed with the Project CGL2004-06516/BTE of the Ministry of Education and Science of Spain. We thank Aurora Grandal for her help in the drawing of the figures and Ana Martelli for the translation of the text into English and the writing style corrections. Dr Gonzalo Vieira and an anonymous reviewer greatly contributed to improve the original.

8. REFERENCES.

- Bordonau, J., 1992. Els complexos glàcio-lacustres relacionats amb el darrer cicle glacial als Pirineus. *Geoforma* Ed. Logroño. 251pp.
- Brum, A., Vidal Romaní, J.R., Vilaplana, J. M., Rodríguez, M.L., Zézere, J.L. and Monge, C., 1992. Formas e depósitos glaciários e periglaciários da Serra do Gerês-Xurés (Portugal; Galicia). Levantamento cartográfico. Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, 17, 121-135.
- Brum, A., Vidal Romaní, J.R., Vilaplana, J.M., Rodríguez, M.L., Zézere, J.L. and Monge, C., 1993. Formas e depósitos glaciários e periglaciários da Serra do Gerês-Xurés. Ourense. Levantamiento Cartográfico. Actas III Reunión Nacional del Cuaternario Ibérico Lisboa 1993. G.T.P.E.Q-G.E.T.C., 87-98.
- Cerling, T.E. and Craig, H., 1994. Geomorphology and in situ cosmogenic isotopes. *Annual Review of Earth and Planetary Science*. 22, 273-317.
- Cottard F., 1979. Petrologie structurale et métallogénie du complexe granitique de Lovios-Gerês. Le modèle de mise en place de la mine de Las Sombras (Sn-W-Mo-Bi) (Sud Galice-Espagne). Tesis Doctoral. Paris, France, 226 pp.(unpublished)
- Coudé-Gaussen, G., 1978. Confirmation de l'existence d'une glaciation würmienne dans les montagnes du NW du Portugal. *Comptes Rendues sommaires de la Société Géologique de France* 1, 34-37.
- Coudé-Gaussen, G., 1980. Les serras orientales du Minho (Portugal): orogénese, modèle granitique et altérations. *Revue de Géographie des Pyrénées et du Sud-Ouest*. 51-3, 291-313.
- Coudé-Gaussen, G., 1981. Les Serras da Peneda et do Gerês. *Étude Géomorphologique*. Memórias do Centro de Estudos Geográficos. 5, 254.
- De Uña, E. and Vidal Romaní, J.R., 2000. Procesos degradativos en antiguas superficies grabadas sobre granitos: indicadores de magnitud y patrones de estado. *Geogaceta* 28, 145-148.
- Dunai, T.J., 2000. Scaling factors for production rates of in situ produced cosmogenic nuclides: a critical reevaluation. *Earth and Planetary Science Letters* 176, 157-169.
- Dunne, J., Elmore, D. and Muzikar, P., 1999. Scaling factors for the rates of production of cosmogenic nuclides for geometric shielding and attenuation at depth on sloped surfaces. *Geomorphology* 27, 3-11.
- Fernández Mosquera, D., Martí, K., Vidal Romaní, J.R. and Weigel, D., 2000. Late Pleistocene deglaciation chronology in the NW of the Iberian Peninsula using cosmic-ray produced ^{21}Ne in quartz. *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B*, 1-6.
- Fernández, F. and Pilas, E., 1974 a. Mapa Geológico de Lovios. Hoja 301. Serie MAGNA. Servicio de Publicaciones I.G.M.E. Madrid, Spain.
- Fernández, F. and Pilas, E., 1974 b. Mapa Geológico de Portela d Home. Hoja 336. Serie MAGNA. Servicio de Publicaciones I.G.M.E. Madrid, Spain.
- Hernández-Pacheco, F., 1949. Huellas glaciares en la Sierra de Queija. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*. 47, 97-102.
- Hernández-Pacheco, F., 1957. El glaciario cuaternario en la Sierra de Queija (Orense). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*. 55, 27-74.

- Hughes P.D., Woodward J.C. and Gibbard P.L., 2006. Quaternary glacial history of the Mediterranean mountains. *Progress in Physical Geography* 30, 3, 334-364.
- Hult, R., 1873. *Fran Nord till Syd Kalender Fjällvandringar i Galicien och Zamora*. Geografiska Foreningen i Finland, 30-55. Helsingfors.
- Jiménez, M., 1996. El glaciarismo en la cuenca alta del Rio Nalón (NO de España): una propuesta de evolución de los sistemas glaciares cuaternarios en la Cordillera Cantábrica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 9, 3-4, 157-168.
- Kohl, P. and Nishiizumi, K., 1992. Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.56, 3583-3587.
- Maldonado, F., 1994. Evolución tardiglaciaria y holocena de la vegetación en los macizos del Noroeste Peninsular. Tesis doctoral, E.T.S. de Ingenieros de Montes, 171. Madrid, Spain. (unpublished).
- Martínez de Pisón E. and Arenillas M., 1979. Algunos problemas de morfología glaciaria en la España atlántica. *Acta Geológica Hispánica*, 14, 445-450.
- Martínez de Pisón E. and Arenillas M., 1984. Nuevos problemas de morfología glaciaria en la España Atlántica. *Estudios Geográficos*. C.S.I.C. Madrid, Spain, 175, 159-174.
- Niedermann S., Graf T. and Marti K., 1993. Mass spectrometric identification of cosmic-ray-produced neon in terrestrial rocks with multiple neon components. *Earth and Planetary Science Letters*, 118, 65-73.
- Niedermann S., Graf T., Kim J. S., Kohl C. P., Marti K. and Nishiizumi K., 1994. Cosmic-ray-produced ^{21}Ne in terrestrial quartz: the neon inventory of Sierra Nevada quartz separates. *Earth and Planetary Science Letters*, 125, 341-355.
- Niedermann, S., 2000. The ^{21}Ne production rate in quartz revisited. *Earth and Planetary Science Letters* 183, 361-364.
- Pallás R, Rodés A, Braucher R, Carcailler J., Ortuño M., Bordonau J., Bourlés D., Vilaplana J.M., Masana E. and Santanach P., 2006. Late Pleistocene and Holocene glaciation in the Pyrenees: a critical review and new evidence from ^{10}Be exposure ages, south-central Pyrenees. *Quaternary Science Reviews*. 25, 2937-2963.
- Peña J.L., Sancho C., Lewis C., McDonald E. and Rhodes E., 2004. Datos cronológicos de las morrenas terminales del Gállego y su relación con las terrazas fluvio-glaciares (Pirineos de Huesca). *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*, pp 71-84. Zaragoza (Spain).
- Pérez-González, A., Cabra, P., Martín, A., Capote, R., De Vicente, G., Rubio, J.M., Gallardo, J., Martín, J.L., Aguirre, E., Santonja, M., Vidal Romaní, J.R., Hoyos, M., Serrat, D., Gutiérrez Elorza, M., Peña Monne, J.L., Molina, E., De Pedraza, J., Rodríguez Vidal, J., Díaz del Olmo, F., Goy, J.L., Zazo, C., Baena, J., Del Olmo, P., Meco, J., Rey, J., Medialdea, T., Peralta, M., Díaz, L.A. and Calderón, V., 1989. Mapa del Cuaternario de España. Servicio de Publicaciones I.T.G.E., Madrid, Spain, 279.
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Basile, I., Bender, M., Chapellaz, J., Davis, M., Deaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius,

- C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stievenard, M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429-436.
- Quinif, Y. and Maire, R., 1996. Pleistocene deposits in Pierre Saint-Martin Cave, French Pyrenees. *Quaternary Research*, 49, 37-50.
- Ramíl-Rego, P., Muñoz, C. and Rodríguez M.A., 1998. Differences in the vegetation of the North Iberian peninsula during the last 16,000 years. *Plant Ecology*, 138, 41-62.
- Rubio, J. and Rodríguez, L. R., 1981. Mapa Geológico de España escala 1:50.000, nº 227/8-11, Manzaneda. Instituto Geológico y Minero. Madrid, Spain, 2ª serie, 1ª edición.
- Schmidt-Thomé, P., 1973. Neue niedrig gelegene zeugen einer wurmeis-zetlichen vergletscherung im nordteil der Iberischen halbinsel. *Eizeitaler Und Gegenwart*, 24, 384-389.
- Schmidt-Thomé, P., 1983. Besonders niedrig gelegene zeugen einer wurmeiszeitlichen vereibung in nord-west Spanien und nord Portugal. *Spat-imd Postglaziale Gletscherschwankungen Glazial und Periglazial Formen. Colloquium*, 1980 Rotterdam. 21, 3-230.
- Soares de Carvalho, G. and Lopes Nunes, J., 1981. Comentarios sobre imagens de factos denunciante de processos glaciarios quaternarios nas Serras do Gerês e da Peneda Portugal. *Memorias e Noticias*. 91-92. 164-171.
- Teixeira, C. and Cardoso, J.L., 1979. A não confirmação de fenomenos glaciários nas montanhas do norte de Portugal (Peneda-Gerês). *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*. XXI, II-III, 163-184.
- Texier, J.P. and Meireles, J., 2003. Relict mountain slope deposits of northern Portugal and environmental implications. *Journal of Quaternary Science* 18(2) 133-150.
- Twidale, C.R. and Vidal Romaní, J.R., 2005. Landforms and geology of granite terrains. Balkema, Amsterdam, Holanda 351 pp.
- Vidal Romaní, J.R., Brum, A., Zezere J., Rodrigues, L. and Monge, C., 1990a. Evolución cuaternaria del relieve granítico en la Serra de Gerês-Xurés (Minho Portugal y Ourense Galicia). *Cuaternario y Geomorfología*, S.E.G.-A.E.QUA., 4: 3-12.
- Vidal Romaní, J.R., Vilaplana, J. M., Brum, A., Zezere, J., Rodrigues, M.L. and Monge, C., 1990b. Estudio de los till subglaciares de la Serra de Gerês-Xurés (Minho Portugal Ourense Galicia). *Cuaternario y Geomorfología*, S.E.G.-A.E.QUA., 4, 13-25.
- Vidal Romaní, J.R. and Santos, M.L., 1993. Cronología relativa del máximo glaciar finipleistoceno en el sector nor-oriental de la Serra de Queixa (Ourense Galicia España). *Actas 3ª Reunião do Quaternario Ibérico*. Coimbra, Portugal. G.T.P.E.Q.-G.E.T.C., 215-222.
- Vidal Romaní, J.R., Santos, L. and Jalut, G., 1995. Cronología relativa del máximo glaciar finipleistoceno en el sector Nor-Oriental de la Serra de Queixa (Ourense, Galicia, España). *Actas III Reunión del Cuaternario Ibérico*, G.T.P.E.Q.-G.E.T.C., 215-222.
- Vidal Romaní, J.R., Fernández, D., Marti, K. and De Brum, A., 1999. Nuevos datos para la cronología glaciar pleistocena en el NW de la Península Ibérica. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 24, 7-29.

Vilaplana, J.M., 1981. El método de trabajo utilizado en el estudio del glaciario cuaternario del Pirineo y su posible apli-

cación en las sierras galaico-portuguesas. Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe. 2, 259-288.

Vida y muerte de dos mujeres de Brigantium (NW de Iberia) mediante isótopos estables y antropología forense

GRANDAL-D'ANGLADE, A. ¹, SERRULLA RECH, F. ², TOMAS BOTELLA, V. ³,
PÉREZ RAMA, M ¹, GOMEZ, M. ² e RAMIL GONZALEZ, E. ³

(1) Universitario de Xeoloxía. Universidade da Coruña. Edificio de Servicios de Investigación.
Campus de Elviña s/n. 15071 A Coruña. xeauroa@udc.es; mperezr@udc.es

(2) Unidad de Antropología Forense. Instituto de Medicina Legal de Galicia. Hospital de
Verín 32600 Verín (Ourense). fernandoserrullarech@hotmail.com

(3) AXA Arqueoloxía S.C. Avenida dos Caídos 3-7^a. 15009 A Coruña. vtomasbotell@gmail.
com; emilioramilgonzalez@gmail.com.

Resumen:

En este trabajo se obtienen datos antropológicos e isotópicos a partir de los restos óseos de dos individuos de edad tardorromana a efectos de reconstruir sus condiciones de vida y las causas de su muerte. Se trata de dos esqueletos femeninos conservados en el Museo Arqueológico de A Coruña datados entre los siglos III a VI dC. Se han aplicado técnicas de antropología forense para determinar patologías y lesiones que puedan haber afectado a los individuos estudiados. Para el estudio de paleodieta, se ha extraído colágeno óseo que se analiza mediante espectrometría de masas de relaciones isotópicas. Las relaciones isotópicas de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ y $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ obtenidas se comparan con datos procedentes de otras poblaciones contemporáneas. Los perfiles antropológicos confirman que se trata de mujeres adultas jóvenes, de posible ancestralidad caucásica, con signos de hiponutrición e infección crónica y cuyas señales isotópicas del colágeno muestran una importante contribución de los moluscos en su dieta. Estos resultados concuerdan con los datos arqueológicos disponibles, reflejando el progresivo empobrecimiento de la ciudad durante la crisis del Bajo Imperio.

PALABRAS CLAVE:

Paleodieta, isótopos estables, colágeno óseo, antropología Forense, Bajo Imperio Romano, Brigantium, A Coruña.

ABSTRACT:

In this paper we obtain anthropological and isotopic data from the skeletal remains of two individuals of the late Roman age in order to rebuild their lives and causes of death. These are two female skeletons preserved in the Archaeological Museum of A Coruña dating from III to VI centuries AD. Forensic anthropology techniques have been applied to identify diseases and injuries that may have affected the individuals studied. For the palaeodiet study, extracted bone collagen was analysed by isotope ratios mass spectrometry. The $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios are compared with data from other contemporary populations. Anthropological profiles confirm that these are two young adult females of Caucasian ancestry, with signs of chronic malnutrition and infection. Their isotopic signature shows a significant contribution of molluscs in their diet. These results are consistent with the available archaeological data, reflecting the progressive impoverishment of the city during the crisis of the Lower Empire.

KEY WORDS:

Palaeodiet, stable isotopes, bone collagen, forensic anthropology, Lower Roman Empire, Brigantium, A Coruña.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El marco geográfico: la ciudad de Brigantium

La ciudad de Brigantium, actualmente A Coruña, se encuentra situada en el

denominado Golfo Ártabro del NW de la península Ibérica (Figura 1). Situada sobre un amplio promontorio rocoso unido a tierra firme por un istmo antaño cubierto de arena, a lo largo de su historia temprana la ciudad experimentó una expansión y una retracción paralelas al sino del Imperio.

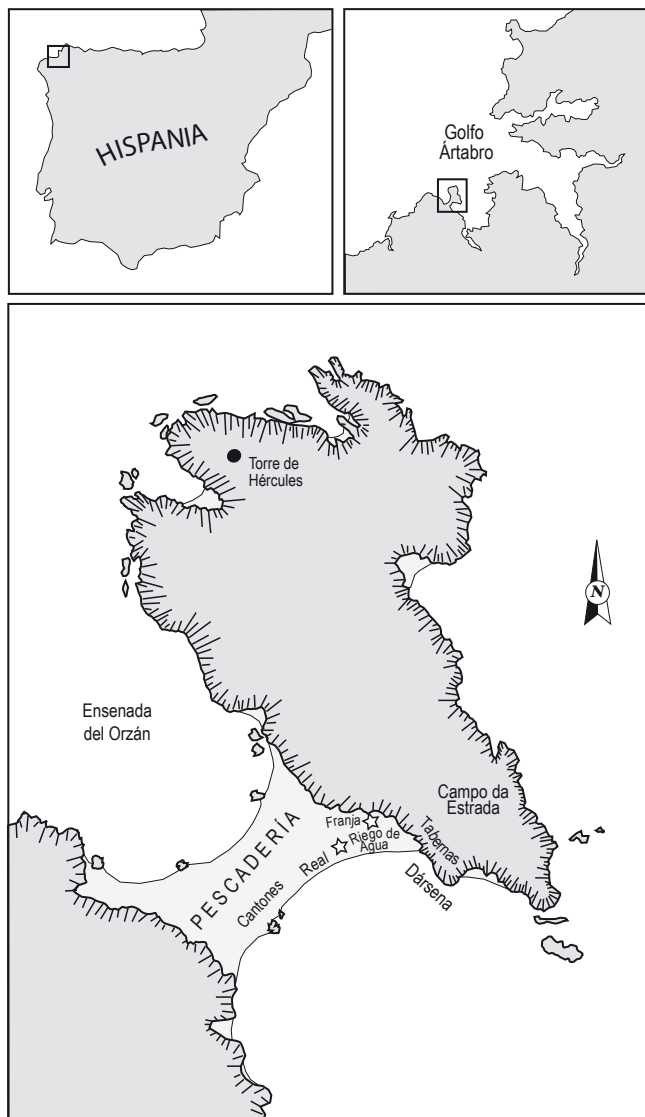


Fig. 1. Mapa de A Coruña en su aspecto aproximado de los primeros siglos de nuestra Era, donde se muestra la ubicación de las tumbas de las que proceden los esqueletos estudiados y otros lugares mencionados en el texto.

Ciudad portuaria que fue *mansio* de la Vía XX *per loca maritima* del itinerario Antoniano, comunicaba directamente con Lucus Augusti (Lugo), capital del *conventus*, y con otras capitales como Bracara Augusta y Asturica Augusta, sirviendo como puerto de indudable interés en las rutas comerciales al abrigo de las borrascas atlánticas. Dion Cassio, en su *Historia Romana* (Libro XXXVII, 52-53) menciona la llegada de Julio César a la población, en el año 61 a. C. La ciudad romana comienza a ser importante en la época Flavia, a finales del siglo I y durante el siglo II d. C., cuando se construye el Faro conocido como “Torre de Hércules”, aún en funcionamiento y declarado por la UNESCO Patrimonio de la Humanidad. Se ha propuesto también que el crecimiento urbano respondió no sólo a la actividad comercial sino a haber servido de puerto base para el avituallamiento de las legiones destacadas en Britania (Bello Diéguez, 2009; López Pérez, 2010a). Durante el siglo IV Brigantium debió de seguir siendo un puerto importante en las rutas del imperio. Es mencionada por Paulo Orosio (*Historiae adversum Paganos*) como uno de los tres ángulos de Hispania, pues considera que la forma de la península es triangular, siendo uno de sus vértices Brigantium, que “*levanta en la dirección de Bretaña un altísimo faro*”. A partir del siglo IV, sin embargo, la ciudad se retrae, hasta el punto de desaparecer de las crónicas escritas durante varios siglos (Naveiro López, 1994; Bello Diéguez, 1995).

1.2. Objetivos del trabajo

Este estudio tiene su origen en la iniciativa del Ayuntamiento de la ciudad de A Coruña de poner rostro a los restos humanos más antiguos conservados de

la ciudad, con motivo del 8º centenario de la misma. Para ello, se estudiaron desde el punto de vista antropológico tres esqueletos humanos de época romana. Conservados en el Museo Arqueológico de Coruña, proceden de diversas excavaciones arqueológicas desde el año 1949 y conservan suficientemente la morfología craneofacial para ponerles rostro mediante técnicas de reconstrucción facial y reconstruir su vida y su muerte mediante análisis antropológico-forenses (Serrulla & Gómez, 2008).

El objetivo principal de este trabajo consiste en aportar nuevos datos sobre estos individuos relacionados con su estilo de vida. Se trata del estudio de la paleodietas de estos humanos mediante el análisis de isótopos estables del colágeno óseo. Este análisis es una herramienta ampliamente utilizada para obtener inferencias ecológicas de los mamíferos extintos (dieta, fisiología, etc.) proporcionando además datos paleoambientales sobre el medio físico donde vivieron (Tieszen y Bouton, 1989; Koch, 1998; Hedges *et al.*, 2004). Entre los más utilizados se encuentran los isótopos del carbono y del nitrógeno contenidos en el colágeno preservado en el tejido óseo.

En los últimos años se han empleado insistentemente en el estudio de la composición de la dieta humana en el pasado, siendo cada vez más abundantes los datos de Neandertales, de humanos modernos paleo y mesolíticos, de yacimientos Neolítico o de distintos pueblos de épocas ya históricas (Bronce, Hierro, romanización, edad media, etc.). Mediante estos estudios se han determinado unos patrones de alimentación cambiantes a lo largo del tiempo (Lubell *et al.*, 1994; Schoeller, 1999; Richards, 2002; Tykot, 2003; Hedges & Reynard, 2007) que serán discutidos más adelante.

1.3. El contexto arqueológico.

Las actuaciones arqueológicas de las que provienen los esqueletos fueron realizadas en un contexto de arqueología urbana, con motivo de la ejecución de obras civiles: renovación del empedrado de la calle Real en el caso de los exhumados en el año 1949 por J. María Luengo (Luengo, 1955) y rehabilitación de un inmueble en la misma vía (Tomás Botella, 2004), por lo que la extracción de los restos se ha producido en ambos casos en un entorno muy alterado por la dinámica histórica urbana y en una extensión superficial limitada artificialmente por un parcelario más o menos reciente, que poco tiene que ver con la realidad espacial y topográfica de la ciudad romana, registrándose los datos de forma fragmentaria, lo que dificulta su interpretación y contextualización cultural. A ello hay que añadir la precariedad de medios y escasez de tiempo con que se realizan las actuaciones por las propias circunstancias de trabajo, que debe ejecutarse con entendimiento de intereses ajenos a su carácter patrimonial.

A esto hay que añadir, en este caso, las dificultades concretas que presenta la composición del subsuelo en el sector de la Pescadería de A Coruña, dado que se asienta sobre el istmo arenoso que une a tierra firme el promontorio de la Ciudad Vieja, con presencia de un sustrato muy homogéneo que borra la información cronológica que aportan las deposiciones de carácter antrópico de mayor antigüedad, no pudiéndose calibrar con la suficiente exactitud, según la lectura estratigráfica, el momento en que se abren las fosas de inhumación. Por lo tanto, las discriminaciones cronológicas se deben hacer, necesariamente, en base a otros

criterios de tipo relativo y a los aspectos culturales que puedan ser documentados. Sin embargo ese mismo sustrato arenoso puede haber favorecido o incluso permitido la preservación de los restos óseos gracias a su pH básico.

2. MATERIAL

2.1. Esqueletos MAC-110 y MAC-108

Los esqueletos llamados MAC-110 y MAC-108 se encuentran en el Museo Arqueológico desde hace más de 50 años. No se conservan datos concretos de su localización, aunque ambos son parte del conjunto de cinco esqueletos de adulto y uno infantil hallados en la calle Real por Luengo en sus excavaciones de 1949.

Según este autor (Luengo, 1955) el 3 de marzo de 1949 frente al nº 9 de la calle Real se hallan los esqueletos de un hombre, una mujer y un niño. Consta la realización de un estudio antropológico por el Dr. Peña que acredita un traumatismo craneal (occipucio) en el caso de la mujer. A mediados del mes de marzo de 1949, en una excavación dirigida por él mismo, se hallaron frente al número 7 de la misma calle huesos humanos y trozos de téglulas procedentes de una sepultura destruida en un nivel revuelto por los antiguos tendidos eléctricos. En la zona denominada “frente al Salón París”, correspondiente al nº 1 de la citada calle, el día 5 de mayo del mismo año se descubrió una cista antropoide 1,70 m (L), 0,50 m (cabecera) y 0,45 m (pies) que contenía un esqueleto. En las proximidades se hallaron huesos de animales y conchas de berberechos, mejillones y almejas. En las proximidades de la casa nº 1 de la calle Real, en una cista de piedras cubierta cuidadosamente con

lajas de granito, se halla otro esqueleto en postura supina con los brazos extendidos. La cabeza había desaparecido, cortada por los cimientos de la calle Real. Delante de las casas números 54 a 60 de la calle Riego de Agua (continuación de la Calle Real) se descubrió una sepultura formada por piedras de granito y tapada con lajas del mismo material. De lecho antropoide de 1,90 m de larga, 0,40 m de cabecera y 0,22 m en los pies, el esqueleto se encontraba colocado en decúbito supino con los brazos cruzados sobre el vientre. Junto a la rodilla derecha del esqueleto en posición tumbada había una pequeña vasija fusiforme. La posición de todos los esqueletos estaba orientada de Este-Oeste, con la cabecera a poniente.

Este mismo autor (Luengo, 1955) data la necrópolis entre los siglos I y IV d.C. Las inhumaciones objeto del artículo, por el rito empleado, se centran en un período bajo imperial romano (siglos III a VI d.C.). Los enterramientos estudiados, que se pueden asociar a tumbas arquitectónicas según lo indicado por Luengo, pueden ser datados en el período entre los siglos IV a VI d.C., conforme a la revisión que de esta excavación hizo el arqueólogo Juan Naveiro (Naveiro López, 1988).

De esta zona se estudiaron dos individuos, que se seleccionaron por encontrarse relativamente completos y en un estado de conservación aceptable. El esqueleto MAC-110 conserva el cráneo en buen estado. El esqueleto poscraneal presenta buen estado de conservación, aunque se observa la falta de algunos huesos (cúbitos, escápulas, muchos huesos de ambas manos y coxal y fémur izquierdos). Los huesos contienen arena adherida que despegas con el dedo y muchos presentan una peculiar pátina blanquecina.

En cuanto al esqueleto MAC-108, su cráneo se halla en buen estado de conservación, blanqueado, fragmentado pero adherido, con ausencia de paladar (maxilar y palatinos), etmoides y parte del esfenoides. El esqueleto poscraneal se halla en buen estado de conservación, blanqueado y sujeto mediante alambres que perforan los huesos a un tablero. Se realizó estudio antropológico (Serrulla & Gómez 2008), pero el hecho de que su esqueleto haya sufrido un tratamiento químico de blanqueado podría haber supuesto un problema a la hora de extraer colágeno bien preservado, por lo que de este individuo no se realizó análisis isotópico.

2.2. Esqueleto MAC-4414

Los restos del esqueleto llamado MAC-4414 se hallaron en la excavación realizada en el solar de la calle Real nº 34 de A Coruña entre los años 2000 y 2004, según se indica en la Memoria Arqueológica elaborada por el Arqueólogo Víctor Tomás Botella y la empresa arqueológica AXA Arqueoloxía. Se trata de una necrópolis romana de incineración datada en torno al siglo II, sobre la que se superpone la inhumación que nos ocupa, de edad en torno a los siglos III y IV d.C.. Los restos recibieron en la Memoria Arqueológica la denominación 'INHUMACION Nº 3'.

Para el esqueleto MAC-4414 habría que pensar quizá en el mismo intervalo cronológico que para los individuos anteriores, aunque al presentarse en fosa simple, sin ajuar, mostrando un empobrecimiento de los ritos funerarios, sería relativamente posterior. No convendría interpretar esta distinción como fruto de diferencias sociales, sino en cambios

culturales, que podrían llevarnos hasta época medieval, otro momento superpuesto al anterior en esta necrópolis de la calle Real, aunque no sea descartable, por paralelismos, su datación tardorromana.

En general el estado de conservación de los restos del individuo MAC-4414 es aceptable. El cráneo mantiene un buen estado de conservación, pero el esqueleto poscraneal muestra deterioro marcado en las epífisis de los huesos largos, columna vertebral y pelvis. En torno al orificio occipital existe pérdida posmortem de occipital, esfénoides y parte de ambos peñascos. El vómer está incompleto posmortem.

3. MÉTODOS

Para los estudios isotópicos, sobre todo para los encaminados a la determinación de la paleodieta, se emplea generalmente el colágeno preservado en el tejido óseo. Al tratarse de una proteína, el colágeno registrará los valores isotópicos procedentes de la alimentación y del correspondiente fraccionamiento que se produce durante la asimilación de las sustancias nutritivas y la síntesis del propio colágeno. Su tasa de renovación es de varios años, por lo que su estudio permite reconstruir la dieta del individuo durante un largo período de su vida.

A los efectos de obtener muestra para estudio de paleodieta, se emplearon restos de hueso cortical de MAC-110 y MAC-4414 en cantidad total de 350 mg. Las muestras se lavan en cubeta de ultrasonidos en sucesivos baños de agua destilada y acetona, y posteriormente se pulverizan en mortero de agata. Del polvo de hueso obtenido se destinan unos 20 mg a un análisis elemental

de contenido en C y N expresado en porcentaje del peso total. Estos datos son buenos indicadores de la recuperabilidad del colágeno preservado (Bocherens et al. 2005a). El análisis se realiza en un analizador elemental ThermoFinnigan Flash EA1112 con precisión analítica mejor que el 0,1%.

La extracción del colágeno se basa en el método propuesto por Bocherens *et al.*, 1997. Consiste en someter el polvo de hueso a una serie de digestiones en ácidos y bases que eliminan la materia inorgánica, seguidas cada una de ellas por ultrafiltraciones que eliminan las moléculas de menor tamaño, para obtener así el colágeno óseo, una proteína de gran tamaño formada por tres cadenas de polipéptidos organizadas en triple hélice con una composición aminoacídica bastante simple y repetitiva (glicina, prolina e hidroxiprolina principalmente no siendo ninguno de ellos esenciales, es decir, no deben ser incorporados en la dieta pues pueden ser sintetizados). El colágeno extraído en forma de gelatina, se liofiliza para su posterior análisis elemental e isotópico. Éste se realizó en los Servicios de Apoyo á Investigación de la Universidade da Coruña, en un Analizador elemental EA1108 (Carlo Erba Instruments) acoplado mediante una interfase ConfloIII (ThermoFinnigan) a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas MAT253 (ThermoFinnigan), con reproducibilidad analítica mejor que 0,2‰ para el C y el N, utilizando los estándares habituales (PDB para el carbono y AIR para el nitrógeno). Las medidas realizadas dan información de la abundancia isotópica relativa de cada isótopo con respecto a su estándar, ya que el equipo dispone de doble entrada. Además, se miden los porcentajes de C y N en el colágeno, que serán fundamentales a la hora de determinar la calidad del colágeno extraído.

La técnica se basa en el hecho de que en la naturaleza existen diversos elementos que se presentan con distinto número de neutrones y por lo tanto, distinta masa atómica. Estos isótopos son trazadores paleobiológicos pues, como resultado de la diferencia en masa atómica, muestran diferentes propiedades termodinámicas y cinéticas. En aquellos elementos con masa atómica <40 tales diferencias pueden llevar a un fraccionamiento isotópico (un cambio en la abundancia relativa de cada isótopo) durante los procesos fisicoquímicos que intervienen en las reacciones metabólicas, lo cual se traduce en una diferente proporción entre isótopo pesado e isótopo ligero antes y después del proceso (Koch, 1998).

El fraccionamiento natural es bajo, de forma que las proporciones isotópicas se miden en tantos por mil (‰) de desviación frente a un estándar, usando la notación δ que refleja la diferencia en la proporción entre isótopo pesado y ligero de la muestra con respecto al estándar. Los valores positivos de δ indican un enriquecimiento en el isótopo pesado con respecto al estándar, mientras que los valores negativos muestran una disminución de su abundancia relativa. El estándar del carbono está muy enriquecido en el isótopo pesado, de manera que en comparación, tanto los vegetales como los animales e incluso el CO₂ atmosférico presentan valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Aportación del estudio antropológico

Un estudio previo de los restos óseos mediante métodos clásicos de antropología forense (Serrulla & Gómez, 2008) permitió

la determinación de sexo, edad, talla, identidad racial, lesiones y enfermedades de los individuos estudiados, así como una reconstrucción facial de los mismos. Partiendo de ese estudio, desde el punto de vista antropológico se destacan los siguientes datos de interés:

4.1.1 Individuo MAC-110.

El esqueleto pertenece a una mujer adulta de una edad estimada en torno a 20-25 años, de talla sobre los 160 cm y con caracteres de ancestralidad caucásica (raza blanca). El ángulo del perfil facial se corresponde con una identidad racial negroide (Reverte Coma, 1991), lo que permite considerar la hipótesis de que la joven pudiera tener un origen norteafricano.

No se han hallado evidencias relativas a la causa de la muerte. Existen no obstante algunos datos que permiten reconstruir la patobiografía de esta joven mujer.

El esqueleto presenta patologías en las vértebras denominadas 'hernias de Schmorl', que representan una fase inicial de la hernia discal. El núcleo del disco intervertebral se hunde en el hueso y deja un orificio en el hueso seco. En general la aparición de hernias discales está relacionado en su génesis con el esfuerzo crónico al que se somete a la articulación intervertebral, aunque existen factores innatos y otros adquiridos. Es posible por lo tanto que una joven de 20 a 25 años que presente signos de hernias discales incipientes haya realizado esfuerzos físicos (carga de pesos) importantes (Campillo, 1983, 1993; Dastugue y Gervais 1992).

Otro rasgo de interés que se ha observado es la presencia de líneas de Harris, lo que se relaciona con un problema de falta de alimentación. Su existencia hace pensar en

un estado carencial (Ortner, 2003; Pérez, 1995).

El esqueleto presenta lesiones en ambas tibias (Serrulla & Gómez, 2008, Fig. 15), compatibles con varios diagnósticos y que presentan claramente distintas fases evolutivas. La lesión de la tibia derecha es claramente una lesión menos evolucionada que el resto y presenta signos de leve crecimiento perióstico por debajo, lo que sugiere que éste crecimiento perióstico se produjo días antes de la muerte (Serrulla, 2001). Estas lesiones pueden ser debidas a varias causas de las que se sugieren las siguientes: a) Osteomielitis: Es posiblemente el origen más probable de éstas lesiones. Puede tratarse de una infección diseminada por vía sanguínea de un foco situado en partes blandas (pulmón quizás) (Ortner, 2003). b) Sífilis secundaria: Las lesiones de la sífilis tienen una morfología similar y se localizan preferentemente en las tibias, pero se acompañan de otras lesiones en otros huesos y además son lesiones que raramente se presentan en personas jóvenes (Mann y Hunt, 2005). c) Cáncer y metástasis: El cáncer de mama y otros cánceres pueden avanzar y producir metástasis en los huesos (costillas, columna y piernas). Las lesiones son compatibles con una metástasis cancerosa aunque no hemos hallado lesiones en otras localizaciones. Las lesiones también son compatibles con la presencia de varios carcinomas que asientan en esta zona y muestras caracteres similares (zonas de osteólisis y zonas blásticas): condrosarcoma, sarcoma de Ewing, osteosarcoma, entre otros (Ortner, 2003).

En síntesis, la joven mujer que estudiamos es posible que realizara muchos esfuerzos físicos, que padeciera problemas de nutrición (ya fuera estado carencial o enfermedad

crónica) y que su muerte estuviera relacionada con un proceso infeccioso grave que pudo acabar con su vida.

4.1.2. Individuo MAC-4414

El esqueleto estudiado pertenece a una mujer, adulta de una edad estimada en torno a 35 años, de talla sobre los 145-150 cm y con caracteres de identidad racial caucásica (raza blanca). Como ocurre en el caso de MAC-110, existe un parámetro antropométrico (Índice Gnático de Flower) que se corresponde con una identidad racial negroide. Ello nos permite considerar como en el anterior la hipótesis de que la joven estudiada pudiera tener un origen norteafricano (Janz *et al.*, 1994).

No se han hallado evidencias relativas a la causa de la muerte. Existen no obstante muchos datos que sugieren los siguientes datos patobiográficos:

El estudio del cráneo confirma que este individuo sufrió bastantes meses antes de la muerte un traumatismo craneoencefálico en la zona frontal izquierda. El traumatismo produjo pérdida de hueso en su capa más externa y generó bordes nítidos, lo que nos sugiere que tuvo que producirse con un objeto corto-contundente de mayor componente contusivo que cortante. Podría tratarse de una azada, o de un cuchillo grande o espada pequeña. Este tipo de traumatismo es probable que hubiera curado con secuelas morfológicas (cicatrices) pero sin secuelas funcionales (sin repercusión neurológica encefálica) (Reichs, 1998).

En el maxilar inferior derecho se observa un avanzado foco de osteítis con fistulización, así como la existencia de una avanzada enfermedad periodontal para la edad estimada (Serrulla & Gómez, Fig. 18). Ello

nos confirma la presencia de un importante foco de infección oral activo en el momento de la muerte. Además hemos objetivado la presencia de una sinusitis crónica en el seno maxilar derecho con fistulización oral y escasos signos de regeneración de los bordes de la fistula oral. Ello permite considerar la extensión del foco de infección al maxilar superior (Nossintchouck, 1991).

Otro rasgo de interés es la hipotrofia de la extremidad superior izquierda (clavícula, humero, cubito y radio) que sugiere algún tipo de parálisis periférica por lesión medular o radicular.

En síntesis, la mujer cuyo esqueleto fue hallado en el solar de la calle Real de A Coruña padecía posiblemente desde bastante tiempo antes de morir, una forma incompleta de parálisis del brazo izquierdo (paresia). Meses antes de morir sufrió un fuerte golpe en la cabeza con algún instrumento corto-contundente tipo azada. Y también sufrió una avanzada infección crónica en la boca, dolorosa y activa posiblemente en el momento de la muerte. Es posible que la causa de la muerte tenga que ver con el importante proceso infeccioso de la boca (Ortner, 2003).

Muestra	rendimiento	%C col	%N col	C/N at	$\delta^{13}\text{C}$ col	$\delta^{15}\text{N}$ col
MAC-110	8,3	41,0	14,8	3,2	-18,7	10,2
MAC-4414	6,2	40,0	14,6	3,2	-16,7	10,8

Tabla 1. Resultados del análisis isotópico del colágeno óseo de MAC-110 y MAC-4414. El rendimiento de la extracción se expresa en miligramos de colágeno por gramo de hueso. %C col y %N col son los porcentajes de C y N en el colágeno. C/N at es la relación atómica entre C y N. Valores de $\delta^{13}\text{C}$ (referidos al estándar PDB) y $\delta^{15}\text{N}$ (referidos al nitrógeno atmosférico) se expresan en ‰.

4.2. Estudio de paleodieta mediante análisis de isótopos estables

4.2.1. Calidad de la extracción

Los resultados del análisis isotópico realizado a las muestras óseas de los individuos MAC-110 y MAC-4414 se presentan en la Tabla 1. En los dos individuos estudiados los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ varían ligeramente, pero se encuentran dentro de los límites normales para la especie humana.

Resulta fundamental poder constatar que el colágeno esté bien preservado sin contaminaciones o pérdida de alguno de sus constituyentes para que el resultado del

análisis isotópico sea válido. Lógicamente, el hueso fósil no conserva su colágeno intacto, sino que siempre sufre pérdidas, pero interesa determinar si esas pérdidas pueden falsear los valores isotópicos. También es necesario saber si el proceso de extracción de colágeno se ha realizado con éxito. Para comprobar la calidad del colágeno extraído se aplican tres criterios de calidad:

a) El rendimiento de la extracción. Se mide en miligramos de colágeno por gramo de hueso, generalmente expresado como porcentaje. El hueso fresco contiene aproximadamente un 22% de colágeno, pero para el hueso fósil se aceptan proporciones inferiores, hasta un límite de 3,5% (Van Klinken, 1999). El método de extracción

utilizado en este trabajo ofrece en ambos casos valores superiores al valor límite.

b) Las proporciones de carbono y nitrógeno en el colágeno extraído. Los valores medios en hueso fresco son de aproximadamente un 35 % de C y entre 11 y 16% de N. Para los fósiles se aceptan porcentajes no inferiores al 13% para el C y al 5% para el N (Ambrose, 1990; De Niro, 1985). Algunos autores prefieren considerar sólo aquellas muestras con valores similares a los del colágeno fresco (Van Klinken, 1999, Bocherens *et al.*, 2005a), como es el caso de las dos muestras analizadas.

c) La relación atómica C/N en el colágeno. En colágeno fresco esta relación fluctúa entre 2,9 y 3,6 y esta es la proporción que debe presentar el colágeno fósil para que se pueda considerar bien preservado (De Niro, 1985). Nuevamente, como se observa en la Tabla 1, el criterio de calidad se cumple en las dos muestras estudiadas.

4.2.2. Consideraciones sobre las fuentes de variación de los valores isotópicos

Para la interpretación de los valores obtenidos en el estudio isotópico del colágeno de ambos individuos es necesario tener en cuenta cuáles son los rangos de valores de las fuentes alimentarias y cómo éstos varían según distintos parámetros ambientales.

La composición isotópica relativa del carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en los vegetales, como base de la cadena trófica, depende directamente del tipo de plantas. En el medio terrestre hay dos grupos principales (plantas C3 y plantas C4) que se diferencian en sus rutas fotosintéticas y por lo tanto en la manera de incorporar el carbono a sus tejidos. Las plantas toman el carbono del aire en forma de CO_2 durante la

fotosíntesis. El CO_2 del aire presenta valores isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ en torno al -8 ‰. Las plantas, al tomar ese CO_2 , discriminan en contra del isótopo pesado, por lo que sus valores isotópicos estarán en general empobrecidos con respecto al CO_2 del aire. Sin embargo, en la incorporación de ese carbono existe una diferencia importante entre las plantas C3 (especies arbóreas y arbustivas de cualquier zona, y herbáceas de climas templados) y las C4 (herbáceas tropicales, entre ellas el maíz, la caña de azúcar o el mijo), de manera que las primeras presentan valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -25‰ y -28‰, mientras que los valores en las segundas fluctúan entre -14‰ y -12‰, aproximadamente (O'Leary, 1981; Van der Merwe, 1982).

Además, ciertos parámetros ambientales como la densidad de la cubierta arbórea, la temperatura y la humedad del medio también influyen en los valores isotópicos del carbono en los vegetales (Bocherens y Drucker, 2003a; Drucker *et al.*, 2008). Los valores isotópicos de los vegetales se reflejan a su vez en los tejidos de los herbívoros, en los que el fraccionamiento isotópico produce un enriquecimiento en el isótopo pesado con respecto a la dieta, aunque las diferentes rutas de síntesis de esos tejidos producen valores diferentes según el tejido analizado. El colágeno óseo responde a las variaciones observadas en proteínas y su enriquecimiento final con respecto a los vegetales de la dieta es de aproximadamente el 5‰ (Ambrose y Norr, 1993). Posteriormente en cada paso de la cadena trófica la variación es de aproximadamente + 1‰.

La composición relativa de los isótopos del nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) en el colágeno de los mamíferos se relaciona directamente con su posición en el seno de la cadena alimentaria, pues cada nivel trófico sobre el de herbívoro

se caracteriza por un incremento en promedio para el valor de $\delta^{15}\text{N}$ de aproximadamente un 3-4‰ (Bocherens y Drucker, 2003a).

Los principales factores que afectan a la composición isotópica del nitrógeno en el colágeno de los mamíferos herbívoros son tres: la síntesis de nitrógeno en el suelo, la dieta del animal y el metabolismo del nitrógeno en el animal (Koch, 1998). La síntesis del nitrógeno en el suelo depende fundamentalmente de factores climáticos, y por lo tanto puede variar cronológica y geográficamente.

Las plantas que fijan el nitrógeno (fundamentalmente las leguminosas, familia Fabaceae) tienen valores de $\delta^{15}\text{N}$ similares a la composición del N_2 atmosférico ($\sim 0\text{‰}$), mientras que aquellas que no asimilan este elemento por sí mismas y usan otras fuentes de nitrógeno (iones NH_4^+ y NO_3^- del suelo) suelen mostrar un rango más amplio de valores de $\delta^{15}\text{N}$, en general más positivos. En consecuencia, los animales que consumen plantas fijadoras de N_2 mostrarán normalmente valores de $\delta^{15}\text{N}$ comprendidos entre 0‰ y $+4\text{‰}$, mientras que en los herbívoros que se alimentan de plantas que no fijan el N_2 este rango oscila entre el $+2\text{‰}$ y el $+8\text{‰}$.

El medio marino representa un ecosistema diferente al terrestre, y las diferencias se reflejan también en los valores isotópicos. Los isótopos del carbono varían entre el medio continental (incluyendo el terrestre y aguas dulces) y el marino, en el que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ son más positivos, ya que la fuente de carbono para los productores primarios marinos no es el CO_2 del aire sino principalmente carbono inorgánico disuelto, con señales isotópicas cercanas a 0‰ (Peterson & Fry, 1987). Por ello los valores isotópicos de las faunas de

medios oceánicos presentan valores de $\delta^{13}\text{C}$ marcadamente menos negativos que los de medios continentales ya sean terrestres o de aguas dulces (Chisholm *et al.*, 2006). Además, en el medio acuático (tanto marino como aguas continentales) las redes tróficas son mucho más complejas que en los ecosistemas terrestres, por lo que tanto los productores primarios como los sucesivos consumidores presentan valores de $\delta^{15}\text{N}$ mucho más elevados (Schoeninger *et al.*, 1983; Schoeninger & DeNiro, 1984). Así, la ingesta de alimentos de origen marino, de aguas continentales o puramente terrestre se puede reconocer con facilidad en los valores de ambos isótopos.

4.2.3. Interpretación de los resultados isotópicos

Los humanos, fósiles o actuales, suelen presentar señales isotópicas elevadas, fruto de su alimentación mixta. Sin embargo a lo largo de la historia de la humanidad se observan unas variaciones características en las señales isotópicas que reflejan la tendencia alimentaria en cada momento. Durante el Paleolítico la dieta va evolucionando de predominantemente carnívora en Neandertales (Bocherens & Drucker 2003b; Bocherens *et al.*, 2005b; Richards & Trinkaus, 2009) a incluir alimentos de origen marino, al menos en las zonas costeras, desde finales del paleolítico superior (Richards *et al.*, 2001, 2005; Drucker & Bocherens 2004). La tendencia se invierte en el Neolítico con la expansión de la agricultura, cuando la alimentación a base de cereales y legumbres hace disminuir principalmente los valores isotópicos del nitrógeno (Tauber, 1981; Richards *et al.*, 2003; Jay, 2008). Durante la romanización

se observa en muchos yacimientos una tendencia, a veces muy marcada, al consumo de alimentos marinos en zonas incluso alejadas de los ambientes costeros (Richards *et al.*, 1998; Prowse *et al.*, 2004; Suárez Piñeiro, 2004; Serrulla *et al.*, 2011).

A partir de unas señales isotópicas dadas es difícil reconstruir la dieta de un ser

humano, debido a la enorme variedad de alimentos que puede llegar a consumir. En la Figura 2 se representan las señales isotópicas que registraría el colágeno humano a partir de diversos tipos de alimentos, si se siguieran dietas puras. Se han representado también los valores correspondientes a los individuos estudiados (MAC-110 y MAC-4414).

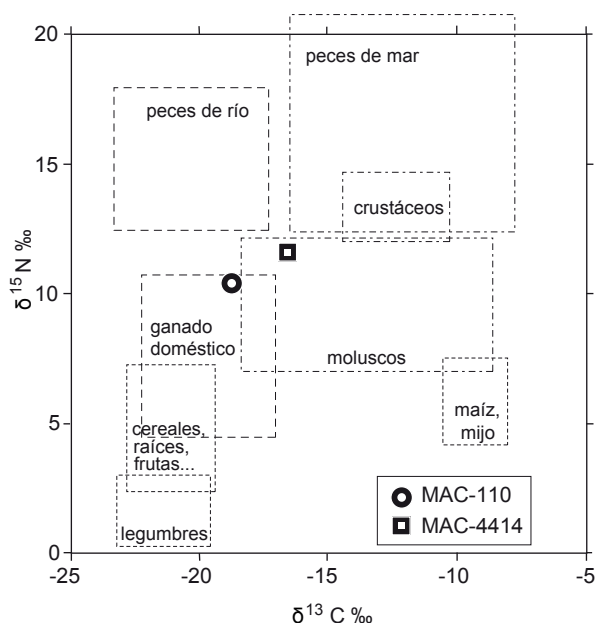


Fig. 2. Señales isotópicas que se producirían en el colágeno humano a partir de diversos tipos de alimentos, si se siguieran dietas puras (los valores ya están corregidos para el fraccionamiento isotópico correspondiente al colágeno óseo y a variaciones temporales en el carbono atmosférico). Se han representado también los valores correspondientes a los individuos estudiados (MAC-110 y MAC-4414). Los datos isotópicos de diversos alimentos de origen terrestre y marino proceden de la literatura (Richards & Hedges, 1999; Tykot 2003; Grall *et al.* 2006; Le Loc'h *et al.* 2008).

Los valores isotópicos obtenidos son totalmente congruentes con la cronología de los restos y su localización geográfica. Ambos individuos presentan valores que podrían considerarse intermedios, con una proporción apreciable de alimentos de origen marino en su dieta. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de MAC-4414 están más desplazados hacia las fuentes de origen marino, aunque sus valores de $\delta^{15}\text{N}$ son bajos para poder inferir una alimentación rica en pescado.

Los alimentos de origen vegetal tienen un menor aporte proteico que los de origen

animal, por lo que su contribución a la dieta mediante el estudio del colágeno puede quedar enmascarada (Schoeller, 1999). Sin embargo, las legumbres sí tienen una proporción elevada de proteínas, lo que unido a sus característicos valores de $\delta^{15}\text{N}$ cercanos a cero permitirían reconocer claramente su consumo en proporciones altas. En la dieta de los dos individuos estudiados no parece que las legumbres hayan tenido un papel sustancial.

Sin embargo, el rango de valores posible de los diferentes grupos de alimentos puede ser

excesivamente amplio para dar una idea más concreta del tipo de alimentos consumidos por los individuos estudiados. Con el fin de aproximarnos más a una caracterización de los alimentos habituales, hemos realizado un estudio comparativo con otras grupos humanos aproximadamente contemporáneos

en localizaciones geográficas equivalentes (zonas costeras). Para este estudio comparativo incluimos valores isotópicos tomados de la bibliografía, procedentes de diversos yacimientos cuyos datos se ofrecen en la tabla 2. El resultado de esta comparación se puede observar en la Figura 3.

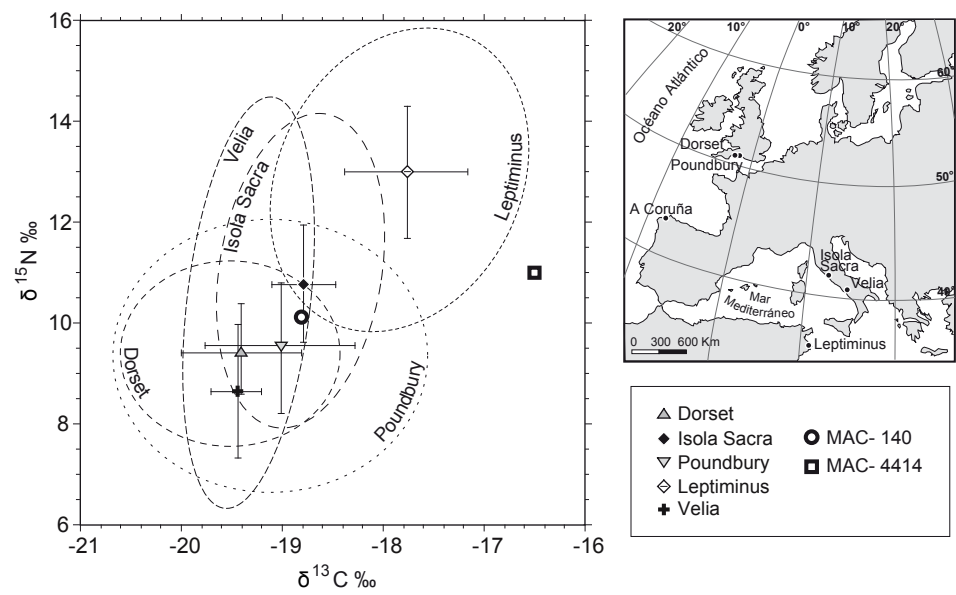


Fig. 3. Valores isotópicos de los individuos MAC-110 y MAC-4414 y otras poblaciones de edad romana tomadas de la literatura (Ver Tabla 2).

Necrópolis	Localización	Edad	Tipo de alimentación inferida	Bibliografía
Isola Sacra	Ostia, Italia	siglo II AD	mixta, con abundancia de pescado	Prowse et al., 2004
Velia	Sur de Italia	siglos I a II AD	mixta, con menor consumo de pescado	Craig et al., 2009
Leptiminus	Túnez	Siglos II a V AD	muy rica en pescado, en proporción creciente	Keenleyside et al., 2009
Dorset (diversos yacimientos)	Costa sur de Gran Bretaña	Siglo II a V AD	Aporte de pescado escaso	Redfern et al., 2010
Poundbury Camp	Costa sur de Gran Bretaña	Siglo IV AD	Aporte de pescado importante	Richards et al., 1998

Tabla 2. Datos de los yacimientos de cronología similar con estudios de paleodieta mediante isótopos estables utilizados como referencia en este estudio.

La muestra de Isola Sacra procede de una necrópolis romana del siglo II situado en la costa mediterránea. Estos romanos costeros muestran una alimentación mixta con abundancia de productos de origen marino (Prowse *et al.*, 2004). En Velia, localidad situada unos 400 km al sur de Isola Sacra, pero también en la costa, se ha observado un rango mayor de tipos de alimentos, pero en general un menor consumo de pescado, como indican sus bajos valores medios de $\delta^{15}\text{N}$ (Craig *et al.*, 2009). Los datos de Leptiminus (Túnez), de cuatro necrópolis de edades comprendidas entre los siglos II y V indican un consumo de pescado elevado y creciente en el tiempo (Keenleyside *et al.*, 2009).

En la zona atlántica se han realizado estudios en algunos poblados romanos de Gran Bretaña, entre los que incluimos los de Dorset (Redfer *et al.*, 2010) y Poundbury (Richards *et al.*, 1998). La principal diferencia observada entre estos conjuntos y los mediterráneos radica en una marcada diferencia en los valores isotópicos del carbono, más negativos en los yacimientos británicos, que se ha achacado a una diferencia de entre 1 y 2 ‰ ya en la base de la cadena trófica entre las zonas situadas más al sur de Europa y las más norteñas (Richards & Van Klinken, 1997; Heaton, 1999). Además, los valores de $\delta^{15}\text{N}$ de los yacimientos ingleses no alcanzan valores tan elevados como los más altos de Isola Sacra o los del siglo V de Leptiminus. Sin embargo los valores de Poundbury son interpretados como reflejo de una alimentación con cierta proporción de alimentos de origen marino, sobre todo cuando se comparan con los obtenidos a partir de individuos del mismo yacimiento u otros cercanos, pero de la Edad del

Hierro, cuyos valores isotópicos muestran una elevada proporción de alimentos vegetales y ganadería, sin apenas indicios de consumo de pescado de mar (Richards *et al.*, 1998; Jay, 2008). En los yacimientos de Dorset la diferencia en aporte de pescado entre los pobladores de la edad del Hierro y los romanizados apenas es notoria (Redfer *et al.*, 2010).

El individuo MAC-110 presenta unos valores isotópicos intermedios entre los valores medios de Isola Sacra y Poundbury. Podríamos suponer una alimentación con poco aporte vegetal, mientras que la proteína animal provendría de la carne y alimentos marinos en un nivel bajo de la escala trófica, como sería el caso de los moluscos.

MAC-4414 presenta un valor de $\delta^{13}\text{C}$ desplazado hacia valores menos negativos, y queda fuera de las categorías dietarias observadas en los yacimientos de edad romana. Podría suponerse que el desplazamiento en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ estaría relacionado con el consumo de plantas C4, como el mijo, pero sus valores de $\delta^{15}\text{N}$ son demasiado elevados, además de que el mijo no es un cultivo corriente en la Galicia romana (Suárez Piñeiro, 2004). De la combinación de valores isotópicos podemos deducir más bien una abundancia de moluscos en la dieta, como fue observada en algunas poblaciones históricas costeras (Tauber, 1986; Kosiba *et al.*, 2007).

El consumo de moluscos como complemento alimentario está bien documentado en los yacimientos prehistóricos, sobre todo desde el Mesolítico. La presencia de numerosos concheros en localidades costeras es un ejemplo de este consumo (Bailey, 1978; Richards & Hedges, 1999). Los moluscos suponen una fuente de proteína de digestibilidad

similar a la carne, son ricos en aminoácidos esenciales, en ácidos grasos insaturados (Omega 3 y 6), en vitaminas B6 y B12 y en diversos oligoelementos (Belitz *et al.*, 2009). Sin embargo, su escasísima biomasa y su pequeño aporte calórico (según Bailey, 1978, para conseguir el mismo aporte que un herbívoro de talla media se necesitan varias decenas de miles de moluscos) los hacen inviables como fuente principal de proteínas, además del elevado coste energético que supone su recolección.

4.3. Integración de resultados antropológicos y de paleodietas con los datos arqueológicos

A partir de los resultados del estudio antropológico y del estudio de la paleodietas, es posible interpretar que los individuos estudiados obtenían buena parte de sus recursos alimentarios a partir de moluscos, sin que probablemente sus necesidades nutritivas quedasen cubiertas. Los moluscos podrían ser obtenidos por los propios individuos, ya que las zonas adecuadas para su recolección abundan en las inmediaciones de la ciudad. Las patologías observadas en los esqueletos (hiponutrición, esfuerzo físico, golpes) podrían apoyar esta hipótesis.

Desde esta perspectiva es interesante, aunque complejo, llegar a una aproximación a la clase social a la que pudieran pertenecer estos restos humanos. Para la Coruña romana alto imperial (ss. I - II d. C.) contamos con diversos elementos epigráficos (aras, pedestales de estatuas, placas funerarias) (Pereira Menaut, 1991) que nos hablan de una población muy romanizada, posiblemente con elementos foráneos muy latinizados -están documentados libertos imperiales (Rodríguez Colmenero, 2005)- en lo que su onomástica refleja, haciéndonos

pensar en un enclave fundado “ex novo” (Pérez Losada, 2002) en relación con el puerto y el faro, sin sustrato indígena. Para la ciudad bajo imperial tenemos muchos menos datos; no contamos con epigrafía y la retracción física de la ciudad parece indicar que se readapta el asentamiento a consecuencia, también, de una progresiva disminución de la vida comercial en paralelo a la pérdida de influencia del imperio en un territorio tan alejado de la metrópoli.

El lugar de donde proceden los tres esqueletos (ver figura 1) está relacionado con la única necrópolis romana conocida de la ciudad, aunque se sospeche que hubiera podido existir otra, por lo menos, en la zona del Campo de la Estrada. Está situada, como era común en las ciudades romanas, en uno de sus caminos de acceso, a su entrada, lo que debió constituir la actual calle Real. Posiblemente, en un principio se limitó a esa zona exterior (aproximadamente a la mitad de la c/ Real), pero posteriormente, al recogerse la ciudad romana hacia la actual Ciudad Vieja, este cementerio se extendió sobre zonas antes habitadas (tramo inicial de la calle Real, Riego de Agua, Franja...). Suponemos que aquí se enterraba toda la población, sin que podamos discernir diferencias sociales hasta el momento, aunque sí haya algún indicio para su primera fase de existencia de alguna construcción funeraria por la aparición de placas y lápidas, sin que sepamos ni siquiera de que tipo, construcciones que podrían indicar alguna preeminencia en este aspecto.

En el marco físico de la ciudad bajo imperial, se testimonia la existencia de “villas”, lo que podría hacer pensar, además de la existencia de una élite “señorial”, en un proceso de ruralización de la sociedad, con un mayor peso del entorno como base

de aprovisionamiento con respecto a lo que pudiese ser obtenido por vías comerciales, aunque ejemplos del mantenimiento de este intercambio no falten (López Pérez, 2010b). Esto crearía una población ligada para su sustento a los recursos naturales que están a su alcance. Son frecuentes en la ciudad, incluida la calle Real, los hallazgos de concheros de este momento (Vázquez Gómez, 1996, Pérez Losada, 2002). Las especies registradas con más frecuencia son ostra (*Ostrea* sp.), berberecho (*Cardium* sp.) lapa (*Patella* sp.) y mejillón (*Mytilus* sp.), aunque no necesariamente por ese orden pues no se hizo estudio cuantitativo. Corresponden a ambientes intermareales tanto de playa como rocosos, ambos plenamente accesibles en el entorno inmediato de la ciudad.

5. CONCLUSIONES

El trabajo multidisciplinar es esencial para mejorar el conocimiento en muchas áreas de la ciencia y por supuesto también en la Historia. La aplicación de métodos forenses al campo de la Prehistoria o de épocas históricas con escasez de fuentes documentales escritas permite obtener un nuevo punto de vista que ayuda a profundizar en detalles hasta ahora no demasiado explorados.

Los resultados de los estudios de paleodieta practicados en este trabajo confirman los datos arqueológicos, que señalan la presencia de moluscos en las excavaciones arqueológicas donde se hallaron estos esqueletos. Las patologías observadas son compatibles con el elevado esfuerzo físico que deberían haber realizado los individuos en caso de haber tenido que recolectar moluscos y otros alimentos de

origen marino para su consumo personal. Las fuentes arqueológicas e históricas también indican una disminución de la vida comercial y un aumento de la vinculación a los recursos del entorno en la época bajo imperial en que vivieron los individuos estudiados. Todos los datos coinciden con el empobrecimiento generalizado del entorno urbano y la calidad de vida en Brigantium desde el Siglo IV, en contraste con el auge de siglos anteriores.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Excelentísimo Ayuntamiento de A Coruña para la exposición “Rostros Brigantium” (diciembre de 2008-Abril de 2009), con motivo del 8º aniversario de la fundación de la ciudad. Se agradece especialmente al Director del Museo Arqueológico Municipal, D. José María Bello Diéguez, la cesión del material para su estudio y exposición. Así mismo, agradecemos la colaboración de Benito López de Abajo, José Alfeirán, José Manuel Coello, Cruz Galindo, Enrique Pérez, el personal del Servicio de Radiología del Hospital Fundación Pública Verin, Iago Martínez y Prudencio García. El estudio isotópico se integra en la red CONSILIENCIA (R2014/001) del Programa de Consolidación e Estructuración Redes de la Xunta de Galicia.

BIBLIOGRAFÍA

Ambrose, S.H. 1990. Preparation and characterization of bone and tooth collagen for stable carbon and nitrogen isotope analysis. *Journal of Archaeological Science* 17: 431-451.

- Ambrose, S.H. y Norr, L. 1993. Experimental evidence for the relationship of the carbon isotope ratios of whole diet and dietary protein to those of bone collagen and carbonate. In: J. Lambert y G. Grupe (eds.): *Prehistoric Human Bone. Archaeology at the Molecular Level*. Springer Verlag. Berlín: 1-37.
- Bailey, G.N. 1978. Shell middens as indicators of post-glacial economics: a territorial perspective. In: P. Mellars (ed.): *The Early Post-Glacial settlement of Northern Europe*. Duckworth. London: 37-63.
- Belitz, H.-D.; Grosch, W. y Schieberle, P. 2009. *Food Chemistry*. Springer. Berlín. 1070 pp.
- Bello Diéguez, J. M. 1995. *Historia de La Coruña*. Editorial Vía Láctea. A Coruña. 456 pp.
- Bello Diéguez, J.M. 2009. *Brigantium* y su faro. Contextos arqueológicos en la ciudad de A Coruña. In: Arias Vilas, F., Fernández Ochoa, C., Morillo, A., (eds.): *Torre de Hércules: finis terrae lux. Simposio sobre os faros romanos e a navegación occidental na antiguidade. Brigantium*, 20, 43-66, A Coruña.
- Bocherens, H. y Drucker, D. 2003a. Trophic level isotopic enrichments for carbon and nitrogen in collagen: case studies from recent and ancient terrestrial ecosystems. *International Journal of Osteoarchaeology* 13: 46-53.
- Bocherens, H. y Drucker, D. 2003b. Reconstructing Neandertal diet from 120,000 to 30,000 BP using carbon and nitrogen isotopic abundances. In: M. Patou-Mathis y H. Bocherens (eds.): *Le rôle de l'environnement dans les comportements des chasseurs-cueilleurs préhistoriques*. British Archaeological Reports, International Series 1105, Archaeopress. Oxford: 1-7.
- Bocherens, H.; Billiou, D.; Patou-Mathis, M.; Bonjean, D.; Otte, M. y Mariotti, A. 1997. Palaeobiological implications of the isotopic signatures (^{13}C , ^{15}N) of fossil mammal collagen in Scladina Cave (Sclayn, Belgium). *Quaternary Research* 48: 370-380.
- Bocherens, H.; Drucker, D.; Billiou, D. y Moussa, I. 2005a. Une nouvelle approche pour évaluer l'état de conservation de l'os et du collagène pour les mesures isotopiques (datation au radiocarbone, isotopes stables du carbone et de l'azote). *L'Anthropologie* 109: 557-567.
- Bocherens, H.; Drucker, D. G.; Billiou, D.; Patou-Mathis, M. y Vandermeersch, B. 2005b. Isotopic evidence for diet and subsistence pattern of the Saint-Césaire I Neanderthal: Review and use of a multi-source mixing model. *Journal of Human Evolution* 49: 71-87.
- Campillo, D. 1983. *La enfermedad en la prehistoria. Introducción a la paleopatología*. Salvat. Barcelona.
- Campillo, D. 1993. *Paleopatología: los primeros vestigios de la enfermedad*. Fundación Uriach 1838. Barcelona.
- Chisholm, B.S.; Nelson, D.E. y Schwarcz, H.P. 2006. Stable carbon isotope ratios as a measure of marine versus terrestrial protein in ancient diets. *Science* 216: 1131-1132.
- Craig, O.E.; Biazzo, M.; O'Connell, T.C.; Garnsey, P.; Martinez-Labarga, C.; Lelli, R.; Salvadei, L.; Tartaglia, G.; Nava, A.; Reno, L.; Fiammenghi, A.; Rickards, O. y Bondioli, L. 2009. Stable Isotopic Evidence for Diet at the

- Imperial Roman Coastal Site of Velia (1st and 2nd Centuries AD) in Southern Italy. *American Journal of Physical Anthropology* 139: 572-583.
- Dastugue, J. y Gervais, V. 1992. Paleopathologie du squelette humain. Ed. Boubée. Paris.
- De Niro, M.J. 1985. Post-mortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to paleodietary reconstruction. *Nature* 317: 806-809.
- Drucker, D.G. y Bocherens, H. 2004. Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers of diet breadth evolution during Middle and Upper Palaeolithic in Europe. *International Journal of Osteoarchaeology* 14 (3-4): 162-177.
- Drucker, D.; Bridault, A.; Hobson, K.; Szuma, E. y Bocherens, H. 2008. Can carbon-13 in large herbivores reflect the canopy effect in temperate and boreal ecosystems? Evidence from modern and ancient ungulates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 195: 375-388.
- Grall, J.; Le Loc'h, F.; Guyonnet, B. y Riera, P. 2006. Community structure and food web based on stable isotopes ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$) analysis of a North Eastern Atlantic maerl bed". *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 338 (1): 1-15.
- Heaton, T.H.E., 1999. Spatial, species and temporal variations in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of C3 plants; implications for palaeodiet Studies. *Journal of Archaeological Science* 26: 637-644.
- Hedges, R.; Stevens, R.E. y Richards, M.P. 2004. Bone as a stable isotope archive for local climatic information. *Quaternary Science Review* 23: 959-965.
- Hedges, R.E.M. y Reynard, L.M. 2007. Nitrogen isotopes and the trophic level of humans in archaeology. *Journal of Archaeological Science* 34: 1240-1251.
- Janz, R.L.; Ousley, S.D. y Moore-Jansen P.M. 1994. *Data collection procedures for forensic skeletal material*. Report of investigations n°48. Departament of Anthropology. University of Tennessee. Knoxville.
- Jay, M. 2008. Iron Age diet at Glastonbury Lake Village: the isotopic evidence for negligible aquatic resource consumption. *Oxford Journal of Archaeology* 27 (2): 201-216.
- Keenleyside, A.; Schwarcz, H.; Stirling, L. y Ben Lazreg, N. 2009. Stable isotopic evidence for diet in a Roman and Late Roman population from Leptiminus, Tunisia. *Journal of Archaeological Science* 36: 51-63.
- Koch, P.L. 1998. Isotopic reconstruction of past continental environments. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 26: 573
- Kosiba, S.B.; Tykot, R.H. y Carlsson, D. 2007. Stable isotopes as indicators of change in the food procurement and food preference of Viking Age and Early Christian populations on Gotland (Sweden). *Journal of Anthropological Archaeology* 26 (3): 394-411.
- Le Loc'h, F.; Hily, C. y Grall, J. 2008. Benthic community and food web structure on the continental shelf of the Bay of Biscay (North Eastern Atlantic) revealed by stable isotopes analysis. *Journal of Marine Systems* 72: 17-34.
- López Pérez, C. 2010a. Reflexiones sobre la época Flavia en Brigantium a partir de los datos proporcionados por la Terra Sigillata. *CuPAUAM* 36, 95-106.

- López Pérez, C. 2010b. La vajilla fina de mesa de época romana en los solares nº 10-12 de la calle Tabernas (A Coruña). *Gallaecia* 29: 191-202.
- Lubell, D.; Jackes, M.; Schwarcz, H.; Knyf, M. y Meiklejohn, C. 1994. The Mesolithic-Neolithic transition in Portugal: isotopic and dental evidence of diet. *Journal of Archaeological Science* 21, 201-216.
- Luengo, J.M. 1955. Excavaciones de la necrópolis romana de La Coruña. *III Congreso Nacional de Arqueología (Santiago, 1953)*: 415-427. Zaragoza.
- Mann, R.W. y Hunt, D.R. 2005. *Photographic regional atlas of bone disease. A guide to pathologic and normal variation in the human skeleton*. 2nd Edition. Charles C Thomas Publisher LTD Springfield. Illinois.
- Naveiro López, J. L. 1994. *El golfo Ártabro. Arqueología e historia del gran puerto de los Galaicos Lucenses*. Asociación Amigos do Museo Arqueolóxico. Monografías urxentes, vol. 5. A Coruña, 96 pp.
- Naveiro López, J.L. 1988. Arqueología urbana en La Coruña y definición del asentamiento romano. In: R. Villares Paz (coord.): *La ciudad y el mundo urbano en la Historia de Galicia*. Universidade de Santiago. Santiago de Compostela: 35-62.
- Nossintchouck, R.M. 1991. *Manuel d'odontologie médico-legale*. Masson. París.
- O'leary, M.H. 1981. Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry* 20 (4): 553-567.
- Ortner, D.J. 2003: *Identification of pathological conditions in human skeletal remains*. 2nd Edition. Academic Press. San Diego.
- Pereira Menaut, G. 1991. *Corpus de inscripcions romanas de Galicia. Provincia de A Coruña*. Consello da Cultura Galega. Santiago de Compostela.
- Pérez Losada, F. 2002. Entre a cidade e a aldea. Estudio arqueohistórico dos "aglomerados secundarios" romanos en Galicia. *Brigantium* 13: 15-348.
- Pérez, A. (ed.) 1995. Salud, enfermedad y muerte en el pasado. Consecuencias biológicas del estrés y la patología. *Actas del III Congreso Nacional de Paleopatología (Barcelona, 1995)*. Barcelona.
- Peterson, B.J. y Fry, B. 1987. Stable isotopes in ecosystem Studies. *Annual Review of Ecology and Systematics* 18: 293-320.
- Prowse, T.; Schwarcz, H.P.; Saunders, S.; Macchiarelli, R. y Bondioli, L. 2004. Isotopic paleodiet studies of skeletons from the Imperial Roman-age cemetery of Isola Sacra, Rome, Italy. *Journal of Archaeological Science* 31: 259-272.
- Quatrehomme, G., Balaguer, T.; Staccini, P. y Alunni-Perret, V. 2007. Assessment of the accuracy of three-dimensional manual craniofacial reconstruction: a series of 25 controlled cases. *International Journal of Legal Medicine* 121: 469-475.
- Redfer, R.; Hamli, C. y Beavan Athfield, N. 2010. Temporal changes in diet: a stable isotope analysis of late Iron Age and Roman Dorset, Britain. *Journal of Archaeological Science* 37(6): 1149-1160.
- Reichs KJ (ed.) 1998. *Forensic Osteology. Advances in the identification of human remains*. Second Edition. Charles C Thomas Publisher LTD Springfield. Illinois.
- Reverte Coma, J.M. 1991. *Antropología Forense*. Ministerio de Justicia. Madrid.
- Richards, M.P. 2002. A brief review of the

- archaeological evidence for Palaeolithic and Neolithic subsistence. *European Journal of Clinical Nutrition* 56: 1270-1278.
- Richards, M.P. y Hedges, R.E.M. 1999. Stable isotope evidence for similarities in the types of marine foods used by the late Mesolithic humans at sites along the Atlantic coast of Europe. *Journal of Archaeological Science* 26: 717-722.
- Richards, M.P. y Trinkaus, E. 2009. Isotopic evidence for the diets of European Neanderthals and early modern humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 106 (38): 16034-16039.
- Richards, M.P. y van Klinken, G.J. 1997. A survey of European human bone stable carbon and nitrogen isotope values. In: A.G.M. Sinclair, E.A. Slate y J.A.J. Gowlett (eds.): *Archaeological Sciences*, Oxbow Archaeological Monograph, Oxford: 363-368.
- Richards, M.P.; Hedges, R.E.M.; Molleson, T.I. y Vogel, J. C. 1998. Stable isotope analysis reveals variations in human diet at the Poundbury Camp cemetery site. *Journal of Archaeological Science* 25: 1247-1252.
- Richards, M.P.; Jacobi, R.; Cook, J.; Pettit, P.B. y Stringer, C. 2005. Isotope evidence for the intensive use of marine foods by Late Upper Palaeolithic humans. *Journal of Human Evolution* 49 (3): 390-394.
- Richards, M.P.; Pettit, P.B.; Stiner, M.C. y Trinkaus, E. 2001. Stable isotope evidence for increasing dietary breadth in the European mid-Upper Paleolithic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 98 (11): 6528-6532.
- Richards, M.P.; Price, T.D. y Koch, E. 2003. The mesolithic and neolithic subsistence in Denmark: new stable isotope data. *Current anthropology* 44 (2): 288-294.
- Rodríguez Colmenero, A. 2005. Las nuevas stationes lucensis et brigantina en el finisterre ibérico del imperio romano. *Palaeohispánica* 5: 873-892.
- Schoeller, D.A. 1999: Isotope fractionation: Why aren't what we eat?. *Journal of Archaeological Science* 26: 667-673.
- Schoeninger, M. y DeNiro, M. 1984. Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48: 625-639.
- Schoeninger, M., DeNiro, M. y Tauber, H. 1983. Stable nitrogen isotope ratios of bone collagen reflect marine and terrestrial components of prehistoric human diet. *Science* 220: 1381-1383.
- Serrulla, F. (coord.) 2001. Monografico Antropologia Forense. *Boletín Galego de Medicina Legal e Forense* nº10. Asociación Galega de Médicos Forenses. Verín (Ourense).
- Serrulla, F. y Gómez, M. 2008. Aplicaciones de la técnica de aproximación facial forense en la identificación humana individual. *Cuadernos de Medicina Forense* 53-54: 291-307.
- Serrulla, F.; Grandal-d'Anglade, A.; Vilar Labarta, S. y Gómez, M. 2011. Aproximación facial y paleodieta en un esqueleto de la necrópolis de El Vergel (Ávila, España). *Munibe (Antropología-Arkeología)* 62, 341-349.
- Suárez Piñeiro, A.M. 2004. Sentados á mesa dun galaico-romano: dieta, alimentación e hábitos culinarios na Galicia romana. *Gallaecia* 23: 155-172.
- Tauber, H. 1981. ¹³C evidence for dietary habits of prehistoric man in Denmark. *Nature* 292: 332-333.

- Tauber, H. 1986. Analysis of stable isotopes in prehistoric populations. In: B. Hermann (ed.): *Innovative Trends in Prehistoric Anthropology. Mitteilungen del Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte* 7: 31-38.
- Tieszen, L.L.; Boutton, T.W. 1989. Stable carbon isotopes in terrestrial ecosystem research. In: P.W. Rundel, J.R. Ehleringer y K.A. Nagy (eds.): *Stable isotopes in ecological research*. Springer Verlag, Berlín: 167-195.
- Tomás Botella, V. 2004. Control arqueológico de obra en r/Real 34 (A Coruña). Informe valorativo (informe inédito).
- Tykot, R.H. 2003. Stable isotopes and diet: You are what you eat. In: M. Martini, M. Milazzo y M. Piacentini (eds.): *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*. IOS Press, Amsterdam: 433-444.
- Van Der Merwe, N.J. 1982. Carbon isotopes, photosynthesis, and archaeology. *American Scientist* 70: 596-606.
- Van Klinken, G.J. 1999. Bone collagen quality indicators for palaeodietary and radiocarbon measurements. *Journal of Archaeological Science* 26: 687-695.
- Vázquez Gómez, X.L. 1996. Excavación en la calle de la Franja 9-11. A Coruña. *Gallaecia* 14-15: 411-461.

Geological dimension of the cultural heritage: A case example of the Ajanta Caves (Maharashtra, India)

GONTAREVA, E.F.¹, ANSARI, M.K.², RUBAN, D.A.^{3,4,5*}, AHMAD, M.² & SINGH, T.N.²

(1) Tourism Program, Higher School of Business, Southern Federal University, 23-ja linija Street 43, Rostov-na-Donu, 344019, Russia

(2) Department of Earth Sciences, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai, 400076, India

(3) Department of Tourism, Higher School of Business, Southern Federal University, 23-ja linija Street 43, Rostov-na-Donu, 344019, Russia

(4) International Agency for Minerals Policy ('MinPol'), Austria

(5) contact address: P.O. Box 7333, Rostov-na-Donu, 344056, Russia; ruban-d@mail.ru

* corresponding author

Abstract

International development for the both geoconservation and geotourism requires attention to all kinds of (potential) geological heritage. The Ajanta Caves (western Maharashtra, India) is a famous cultural object consisting of 30 caves carved in the Deccan Traps and inscribed to the UNESCO list of the World Heritage Sites. Its examination permits to indicate four geological features, which are the artificial caves themselves (these mark geological activity of the man in the historical past), the end-Cretaceous flood basalts (these demonstrate the emplacement of Large Igneous Province and the relevant palaeoenvironmental catastrophe), the gorge of the Waghora River (this is peculiar landform resulted from the river erosion of hard rocks), and the rockfall hazard (this is an interesting engineering geological phenomenon linked to the caves construction/maintenance). Geological heritage value of these features is argued. Unfortunately, there is not any geotourism activity at the Ajanta Caves presently. The content analysis of the principal on-line resources (web pages) devoted to this cultural site reveals the absence of sufficient geological information that would

facilitate geotourism. Generally, judgements about the Ajanta Caves and the other similar sites in the geological dimension permit to consider the wide spectrum of the geological heritage. They also highlight some extra opportunities for geotourism, which can benefit by its development at cultural sites with thousands of visitors.

Key words: Ajanta Caves; Deccan basalts; Geological heritage; Geotourism; World Heritage Site.

INTRODUCTION

Geological heritage is a wide category, and it embraces exceptional geological objects in-situ (so-called “geosites”) and ex-situ (specimens in museum collections) (Wimbledon & Smith-Meyer, 2012; Gray, 2013; Prosser, 2013; Ruban, 2013). However, it would be wrong to limit the geological heritage to the only geological objects *sensu stricto*. In fact, this category includes also cultural items with heritage value that is (or may be) partly determined by their geological importance (cf. Hose, 2000; Migon, 2009; Necheş & Erdeli, 2014). Moreover, the geological experience is tied closely to the cultural experience (Tang, 2000; Goudie, 2002; Panizza & Piacente,

2009; Gordon, 2012; Gray, 2013; Lubova et al., 2013; Necheş & Erdeli, 2014). By example of Petra (Jordan), Migon (2009) demonstrated that the well-known UNESCO World Heritage Sites of cultural importance may also have geological heritage value.

In this article, we draw attention to the geological dimension of the world-famous cultural heritage object, namely the Ajanta Caves (Maharashtra, India). Similar to the above-mentioned Petra, it is also inscribed to the UNESCO list of the World Heritage Sites. Our aim is to recognize the main geological features of this site, to determine their geological heritage value, and to consider the importance of this value for the local tourism development.



Fig. 1. Geographical location of the Ajanta Caves.

THE AJANTA CAVES WORLD HERITAGESITE AND ITS GEOLOGICAL SETTING

The Ajanta Caves are located in the western part of the Maharashtra State of India (Fig.1). These are 30 artificial caves in the cliff above the valley (gorge) of the meandering Waghora River (Fig. 2). They were excavated (particularly, for the Buddhist ritual purposes) in two phases during the period of the 2nd century B.C.–6th century A.D.; later, they were abandoned and re-discovered in 1819. In 1983, they were inscribed to the UNESCO list of the World Heritage Sites (see relevant documents at <http://whc.unesco.org/en/list/242>). The cultural heritage value of the Ajanta Caves is determined by the cave architecture, wall paintings, and sculptures. Undoubtedly, the huge size of the caves also matters; at least, the Ajanta Caves is among the largest historical sites in the UNESCO list.

The geological setting of the Ajanta Caves was characterized recently by Ansari *et al.* (2014). The Ajanta Caves are carved in a compound basalt flow of the Ajanta Formation belonging to the Sahyadri Group of the Deccan Traps. Researches have identified five basaltic flows of alternating “aa” and compound “pahoe-hoe” characters (Walker, 1971; Bondre *et al.*, 2000, 2004). The thickness of individual flows ranges from a very few to 80 m (GSI, 2001). The compound “pahoe-hoe” flows show ropy structure and vesicular top with spheroidal vesicles, whereas the “aa” flows are dark grey and massive with fragmentary top and base (Rana & Vishwakarma, 1990).

METHODS

This study employs two qualitative approaches. The first approach is general evaluation of the geological heritage. At the beginning, we recognize the geological features that are linked to the Ajanta Caves World Heritage Site. For this purpose, the geological setting of this cultural heritage site is analyzed. The features are classified according to the typology of geological heritage proposed by Ruban (2010) and Ruban & Kuo (2010). Then, it is attempted to determine the geological heritage value of these features. This is possible via consideration of the degree of uniqueness of the latter, i.e., the rarity of the features on international, national, regional, or local scales. This degree also depends on the importance of the geological features for science, education, and tourism. We also attempt to follow the principle of interpretation of cultural objects in the terms of geology that was offered by Migon (2009).

Recognition of any geological heritage value of the cultural object indicates its geotourism potential. As suggested by our examination of the site and queries to the local authorities, there are not geotourism activities linked to the Ajanta Caves presently. However, visitors of such important sites may decide to pay attention to geology themselves through the available on-line resources (supposedly demanded by many tourists), if the relevant information is presented there. Therefore, our second approach is the content analysis of the on-line resources devoted to the Ajanta Caves. Direct or indirect consideration of geological phenomena on several principal web pages is checked in order to conclude about the availability of on-line geotourist resources and their quality.

GEOLOGICAL FEATURES AND THEIR HERITAGE VALUE

The most striking geological feature to be recognized at the Ajanta Caves World Heritage Site is the caves themselves. The excavation of 30 caves with the maximum length of >35 m (see physical parameters in the catalogue of the caves provided by the Archaeological Survey of India at http://asi.nic.in/asi_monu_whs_ajanta.asp) in hard basalts reflects voluminous geological/geomorphological activity of the man in the historical past (Fig. 2). According to the classification of Ruban (2010) and Ruban & Kuo (2010), the caves can be judged geohistorical feature. Its international geological heritage value is evident because of the above-mentioned huge size of the en-

tire cave ensemble. The attempted extraction of basalts linked to excavation of the Ajanta Caves was really huge, and this fact confirms the idea of humans as geological-scale agents (Hooke, 2000; Wilkinson, 2005; Goudie, 2013). Moreover, the cave excavation is a very peculiar example of the geological/geomorphological activity of the man, because it differs from the types of this activity (mining, quarrying, etc.) that are commonly mentioned in discussions of the anthropogenic influences on the geological environment (e.g., Goudie, 2013). Evidently, the Ajanta Caves can be used efficiently by geologists/geomorphologists for the purposes of demonstration of how strongly past civilizations could alter the geological environment and what were their abilities of construction of new landforms.



Fig. 2. Panoramic view of the Ajanta Caves World Heritage Site.

The other important geological feature is the rocks, in which the Ajanta Caves were excavated. These are the flood basalts (traps)

of the Deccan Plateau (Ansari et al., 2014) that were emplaced at the Cretaceous–Paleogene transition (Courtillot & Renne, 2003;

Baksi, 2014). These basalts are of outstanding interest because of two reasons. Firstly, they are typical products of the mantle plume activity resulted in the appearance of a large igneous province (LIP) of huge size in the end of the Mesozoic Era (Wignall, 2001; Abbott & Isley, 2002; Courtillot & Renne, 2003; Jerram & Widdowson, 2005; Courtillot, 2007; Baksi, 2014). Secondly, the emplacement of this LIP is considered among the main possible triggers of the end-Cretaceous global environmental crisis and the relevant mass extinction that devastated both continental and marine ecosystems and marked the end of ammonites and dinosaurs (Hallam & Wignall, 1997; Keller, 2003; Courtillot, 2007; Keller et al., 2008) (see Alvarez (2008) and Vajda & Bercovici (2014) for alternative explanation of this catastrophe). Undoubtedly, there are many geological localities in India with the exposures of the Deccan traps. However, the ex-

cellent accessibility and the appropriate conservation of the Ajanta Caves, as well as the good visibility of outcropped basalts make this site ideal for explanation of the Deccan flood basalt volcanism and the relevant palaeoenvironmental perturbations. This consideration permits to conclude about the regional-to-national geological heritage value of the igneous rocks from the Ajanta Caves World Heritage Site.

Of interest is the deep gorge of the meandering Waghora River, which is a peculiar geomorphological feature. On the one hand, it permits to see deep river erosion of hard rocks (basalts). On the other hand, the gorge has a spectacular horseshoe shape (Fig. 3). Additionally, cave excavation changed the natural landform and added artificial elements to it, and these changes are really impressive (see also above). These seem to be enough to judge about the Ajanta Caves as a local geomorphosite.

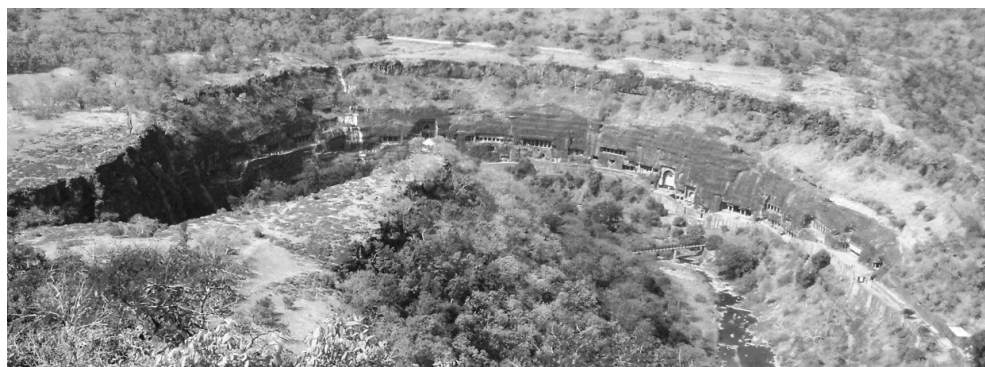


Fig. 3. The gorge of the meandering Waghora River - a peculiar landform.

Finally, rockfall hazard in the Ajanta Caves was explored recently by Ansari et al. (2014). As this phenomenon was proven possible, the engineering geological feature (according to the classification of Ruban (2010) and Ruban & Kuo (2010)) should

be recognized. It is of international heritage value because of two reasons. Firstly, although rockfalls are common slope processes (Guzzetti, 2013), their occurrence linked to caves is of special interest. On the other hand, rockfalls and other engineering

geological processes at important cultural sites should be treated as something specific because of their possible links to rock mass weakness resulted from the construction/maintenance of these sites and also because of significant possible damage or total lost of unique cultural objects. Thus, the investigations of Ansari et al. (2014)

have made the Ajanta Cave an ideal site for such rockfall studies. Slope processes are also of interest because of the implemented mitigation strategy, which is specific at the World Heritage Sites (at least, slope protection structures should be efficient, but they should not distract attention of visitors from the site itself - see Fig. 4).



Fig. 4. Structure erected for slope protection at the Ajanta Caves World Heritage Site. It is designed “ideally” to avoid distraction of visitors’ attention from the site itself, this structure looks similarly to authentic natural (basalts) and artificial (caves) features.

ON-LINE GEOTOURIST RESOURCES

The presence of four geological features (geohistorical, igneous, geomorphological, and engineering geological) at the Ajanta Caves that are all of heritage value highlight

the big geotourism potential of this World Heritage Site. Although geotourism activity is lacking there, on-line resources would permit visitors to learn about the geological importance of this site in addition to its outstanding cultural essence. Five main

web resources that can serve as the main sources of the knowledge about the Ajanta Caves for tourists are provided by the UNESCO (<http://whc.unesco.org/en/list/242>), the Archaeological Survey of India (http://asi.nic.in/asi_monu_whs_ajanta.asp), the Maharashtra Tourism Development Corporation Ltd. (<http://www.maharashtra-tourism.gov.in/mtdc/HTML/MaharashtraTourism/TouristDelight/Caves/Caves.aspx?strpage=AjantaCaves.html>), the Sacred Destinations (<http://www.sacred-destinations.com/india/ajanta-caves>), and the SANTRONIX Group (<http://ajantacaves.com/>). All are very informative with regard to the location of the site, its history, cultural heritage, conservation activities, and tourism opportunities. Unfortunately, none of them pay direct attention to geological features that one can observe together with the cultural heritage objects.

Indirect indications on geological features are available in the noted web resources, but they are too few and ‘dispersed’ among the other information. For instance, the UNESCO web page (<http://whc.unesco.org/en/list/242>) allows downloads of some official documents, where the local geology is explained briefly. Although it is unlikely that potential visitors will read these documents with attention, “volcanic lava” (a bit awful term) of the Deccan Plateau is also mentioned on the web page itself. The gorge of the Waghora River as a peculiar landform is considered in several web resources (e.g., see <http://ajantacaves.com/>). And, of course, physical parameters of the caves and the methods of their excavation (these permit to envisage the geological/geomorphological activity of the past civilizations) are mentioned here and there. Some geologically-wrong information is also found. The web page of the

SANTRONIX Group (<http://ajantacaves.com/>) informs about granite layers, although these are basalt layers in fact (GSI, 2001). Generally, what has been found on the noted web pages is not enough to judge these pages sufficient geotourist resources.

DISCUSSION

Why judgements of the cultural heritage in the geological dimension are necessary? In our opinion, they permit to extend the understanding of the geological heritage. The example of the Ajanta Caves demonstrates that some geological phenomena with heritage value can be found in ‘purely’ artificial objects. If so, is it not a new form of the geological heritage?! It seems to be sensible to note that Panizza & Piacente (2009) went so far to conclude about the importance of cultural aspects to the wide definition of geodiversity.

Determination of the geological features in the Ajanta Cave provides extra opportunities with regard to tourism. The annual number of visitors of this well-accessible site is very large and reaches hundreds of thousands per year (see statistics at <http://whc.unesco.org/en/list/242>). Their interest and satisfaction can be increased via ‘diversification’ of excursions by merging cultural and geological experience. And, vice versa, geotourism can also benefit from the latter. This activity grows rapidly, but still needs significant progress on the international scale (Hose, 2000; Dowling & Newsome, 2010; Hose & Vasiljević, 2012). If visits to the World Heritage Sites is so important driver of the global tourism (Yang *et al.*, 2010; Poria *et al.*, 2013; Su & Lin, 2014), explanation of geological peculiarities at such sites may help to promote geotourism.

Migon (2009) also considered the opportunity of enhancing geotourism via its development at such cultural heritage sites as Petra in Jordan. Geotourism development can be achieved by the local authorities and the international community of specialists in geoconservation and geotourism. The situation with the geological information on the Ajanta Caves World Heritage Site available on-line (see above) indicates how much should be done yet to promote geotourism at this site. However, presentation of sufficient geological knowledge on the already-available web pages will be an easy task. This would permit to facilitate geotourism development at the studied site because of the high importance of on-line resources for tourists. Excursion guides training (e.g. rise of their awareness of the geological heritage linked to the Ajanta Caves) seems to be also helpful. The noted tasks can be achieved via the activity of local, national, and/or international geoconservation/geotourism organizations.

Two additional remarks on tourism activities in the Ajanta Caves are necessary. Firstly, full consideration of the geological context of this site may enhance understanding of the visitors' emotion and satisfaction. We hypothesize that artificial caves may be so attractive also by analogy with natural caves. The picturesque gorge of the Waghora River, where the studied site is located, also increases potentially the attractiveness of the site. Secondly, the detailed investigation of the geological phenomena linked to the Ajanta Caves attempted by Ansari et al. (2014) permitted to judge about the tourist safety issues.

CONCLUSION

The case example of the Ajanta Caves in India demonstrates that cultural herit-

age objects may have recognizable geological features, some of which are of geological heritage value. Coupled with the earlier-made similar conclusion on the other world-famous cultural heritage site, namely Petra in Jordan (Migon, 2009), the significance of the cultural objects for the purposes of geoconservation and geotourism appears evident. Some efforts for further promotion of the Ajanta Caves as a geotourist destination are necessary, because the geological information about this UNESCO World Heritage Site (at least, presented by the principal on-line resources) is insufficient.

The attempted study stresses the general importance of judgements about the cultural heritage in the geological dimension. If so, it seems to be both urgent and interesting to analyze the geoconservation and geotourism potential of the other cultural sites of the world.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully thank J.R. Vidal Romaní (Spain) for his editorial support, as well as T.A. Hose (UK), I.-M. Necheş (Romania), W. Riegraf (Germany), and the other colleagues for their help with literature.

REFERENCES

- Abbott, D.H. & Isley, A.E. (2002). The intensity, occurrence, and duration of superplume events and eras over geological time. *Journal of Geodynamics*, 34: 265–307.
- Alvarez, W. (2008). *T. rex and the Crater of Doom*. Princeton University Press, Princeton, 185 pp.
- Ansari, M.K., Ahmad, M., Singh, R. & Singh, T.N. (2014). Rockfall hazard as-

- assessment at Ajanta Cave, Aurangabad, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 7: 1773–1780.
- Baksi, A.K. (2014). The Deccan Trap – Cretaceous–Paleogene boundary connection; new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and critical assessment of existing argon data pertinent to this hypothesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 84: 9–23.
- Bondre, N.R., Duraiswami, R.A., Dole, G., Phadnis, V.M. & Kale, V.S. (2000). Inflated Pahoehoe lavas from the Sangamner area of the western Deccan volcanic province. *Current Science*, 78: 1004–1007.
- Bondre, N.R., Duraiswami, R.A. & Dole, G. (2004). Morphology and emplacement of flows from the Deccan volcanic province, India. *Bulletin of Volcanology*, 66: 29–45.
- Courtillot, V. (2007). *Evolutionary catastrophes - the science of mass extinction*. Cambridge University Press, Cambridge, 173 pp.
- Courtillot, V.E. & Renne, P.R. (2003). On the ages of flood basalt events. *Comptes Rendus Geosciences*, 335: 113–140.
- Dowling, R. & Newsome, D. (2010). Geotourism: a Global Activity. In: Dowling, R. & Newsome, D. (Eds.). *Global geotourism perspectives*. Goodfellow Publishers, Woodeaton, pp. 1–17.
- Gordon, J.E. (2012). *Rediscovering a Sense of Wonder: Geoheritage, Geotourism and Cultural Landscape Experiences*. *Geoheritage*, 4: 65–77.
- Goudie, A. (2002). Aesthetics and relevance in geomorphological outreach. *Geomorphology*, 47: 245–249.
- Goudie, A. (2013). *The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present and Future*. Wiley-Blackwell, Chichester, 410 pp.
- Gray, M. (2013). *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature*. Wiley-Blackwell, Chichester, 495 pp.
- GSI, 2001. *Geoscientific studies for the conservation of Ajanta Caves*. Report Submitted by the Central region of GSI, Nagpur.
- Guzzetti, F. (2013). Rockfall. In: Bobrowsky, P.T. (Ed.). *Encyclopedia of Natural Hazards*. Springer, Dordrecht, pp. 875–877.
- Hallam, A. & Wignall, P.B. (1997). *Mass extinctions and their aftermath*. Oxford University Press, Oxford, 320 pp.
- Hooke, R.LeB. (2000). On the history of humans as geomorphic agents. *Geology*, 28: 843–846.
- Hose, T.A. (2000). European ‘geotourism’ - geological interpretation and conservation promotion for tourists. In: Barettono, D., Wimbledon, W.A.P., Gallego, E. (Eds.). *Geological heritage: its conservation and management*. ITGE, Madrid, pp. 127–146.
- Hose, T.A. & Vasiljević, D.A. (2012). Defining the nature and purpose of modern geotourism with particular reference to the United Kingdom and south-east Europe. *Geoheritage*, 4: 25–43.
- Jerram, D.A. & Widdowson, M. (2005). The anatomy of Continental Flood Basalt Provinces: geological constraints on the processes and products of flood volcanism. *Lithos*, 79: 385–405.
- Keller, G. (2003). Biotic effects of impacts and volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 215: 249–264.
- Keller, G., Adatte, T., Gardin, S., Bartolini, A. & Bajpai, S. (2008). Main Deccan volcanism phase ends near the K-T boundary: Evidence from the Krishna-Godavari Basin, SE India. *Earth and Planetary Science Letters*, 268: 293–311.

- Lubova, K.A., Zayats, P.P., Ruban, D.A. & Tiess, G. (2013). Megaclasts in geoconservation: sedimentological questions, anthropogenic influence, and geotourism potential. *Geologos*, 19: 321–335.
- Migon, P. (2009). Geomorphosites and the World Heritage List of UNESCO. In: Reynard, E., Coratza, P. & Regolini-Bisig, G. (Eds.). *Geomorphosites*. F. Pfeil, München, pp. 119–130.
- Necheć, I.-M. & Erdeli, G. (2014). Geolandscapes and Geotourism: Integrating Nature and Culture in the Bucegi Mountains of Romania. *Landscape Research*, doi: 10.1080/01426397.2014.939616.
- Panizza, M. & Piacente, S. (2009). Cultural geomorphology and geodiversity. In: Reynard, E., Coratza, P. & Regolini-Bisig, G. (Eds.). *Geomorphosites*. F. Pfeil, München, pp. 35–48.
- Poria, Y., Reichel, A. & Cohen, R. (2013). Tourists perceptions of World Heritage Site and its designation. *Tourism Management*, 35: 272–274.
- Prosser, C.D. (2013). Our rich and varied geoconservation portfolio: the foundation for the future. *Proceedings of the Geologists' Association*, 124: 568–580.
- Rana, R.S. & Vishwakarma, L.L. (1990). Occurrence of artesian conditions in the Sina river basin of drought prone Karjat Taluka, Ahmednagar district in Maharashtra. In: *Proceedings of the all Indian seminar on modern techniques of rain-water harvesting, water conservation and artificial recharge for drinking water, afforestation, horticulture and agriculture*. Groundwater Survey and Development Agency (GSDA), Pune, pp. 207–213.
- Ruban, D.A. (2010). Quantification of geodiversity and its loss. *Proceedings of the Geologists' Association*, 121: 326–333.
- Ruban, D.A. (2013). Geokonservatsionnyj aspekt nedropol'zovanija: ob'ekty geologičeskogo nasledija i vzaimosvjaz' ikh tipov [Geoconservation aspect of the interiors exploitation: geological heritage objects and combination of their types]. *Nedropol'zovanie XXI vek*, 2: 108–113. (in Russian)
- Ruban, D.A. & Kuo, I. (2010). Essentials of geological heritage site (geosite) management: a conceptual assessment of interests and conflicts. *Natura Nascosta*, 41: 16–31.
- Su, Y.-W. & Lin, H.-L. (2014). Analysis of international tourist arrivals worldwide: The role of world heritage sites. *Tourism Management*, 40: 46–58.
- Tang, C.M. (2000). Ugly Fossil Syndrome. *Palaos*, 15: 175–176.
- Vajda, V. & Bercovici, A. (2014). The global vegetation pattern across the Cretaceous–Paleogene mass extinction interval: A template for other extinction events. *Global and Planetary Change*, 122: 29–49.
- Walker, G.P.L. (1971). Compound and simple lava flows and flood basalts. *Bulletin of Volcanology*, 35: 579–590.
- Wignall, P.B. (2001). Large igneous provinces and mass extinctions. *Earth-Science Reviews*, 53: 1–33.
- Wilkinson, B.H. (2005). Humans as geologic agents: A deep-time perspective. *Geology*, 33: 161–164.
- Wimbledon, W.A.P. & Smith-Meyer, S. (Eds.) (2012). *Geoheritage in Europe and its conservation*. ProGEO, Oslo, 405 pp.
- Yang, C.-H., Lin, H.-L. & Han, C.-C. (2010). Analysis of international tourist arrivals in China: The role of World Heritage Sites. *Tourism Management*, 31: 827–837.

Radiación gamma en rocas usadas como material de construcción: el Granito de Braga (No de Portugal)

Gamma Radiation In Rocks Used As Building Materials: The Braga Granite (Nw Portugal)

LIMA, M.1, ALVES, C1 AND SANJURJO-SÁNCHEZ, J.2³

(1) Lab2PT - Landscape, Heritage and Territory Laboratory/Centro de Investigação Geológica, Ordenamiento e Valorização de Recursos (Fundação para a Ciência e a Tecnologia, PEst-OE/CTE/UI0697/2011 and PEst-OE/CTE/UI0697/2014), Campus de Gualtar, School of Sciences, University of Minho, Braga, Portugal

(2) University Institute of Geology “Isidro Parga Pondal”, University of A Coruña, A Coruña, Spain.

Abstract

Granite can be a rock with significative radioactivity levels due to its content in radioisotopes of K, U e Th. The Braga granite has been extensively used from the past in historical buildings of this city in North Portugal. A gamma radiation assessment has been made in quarry samples of the Braga granite with different weathering degree, in order to assess radiation risks in historical buildings, derived from their content in radionuclides. The specific activities of radioisotopes in ^{238}U and ^{232}Th decay chains and radioactive ^{40}K were measured by gamma spectrometry on samples with different weathering degree. The results were used to calculate the gamma building index (I_γ ; EU technical guidance RP112) a other indices to estimate the radiological hazard of the rock as building material. Specific activities are above world averages and all the samples have $I_\gamma > 1$ (the threshold that implies specific studies for building materials). This result can be especially relevant for historical building where this granite is used as bulk material.

KEYWORDS: gamma radiation, radioisotopes, granite, gamma spectrometry, historical buildings

Agradecimiento

La “Fundação para a Ciência e a Tecnologia” de Portugal financia las Unidades de Investigación Lab2PT - Landscape, Heritage and Territory Laboratory y el Centro de Investigação Geológica, Ordenamiento e Valorização de Recursos (este último por los proyectos PEst-OE/CTE/UI0697/2011 and PEst-OE/CTE/UI0697/2014).

1. INTRODUCCIÓN

La radiación natural es considerada de lejos como la principal responsable de la dosis de radiación ionizante externa que recibe la población durante su vida (UNSCEAR, 2000). Por ello, es extremadamente importante conocer las dosis de radiación ionizante que originan diversas fuentes de radiación naturales, y muy en particular conocer las principales fuentes de radiación gamma, ya que esta es la que tiene una menor energía pero un mayor alcance. Comparativamente, la radiación gamma tiene un alcance muy superior a las partículas beta o alfa, cuya capacidad de penetración es de unos micrometros y nanometros, respectivamente. A parte de estas fuentes de radiación debido a la existencia de radioisótopos en el suelo y el subsuelo, existe una exposición a radiación cósmica que depende de diversos factores como la latitud y la altitud, aunque su contribución global es menor (UNSCEAR, 2000).

En el medio natural, la principal fuente de radiación gamma son las rocas del subsuelo y los minerales del suelo (UNSCEAR, 2000). En el caso del interior de construcciones realizadas por el hombre, aparte de la radiación procedente del suelo y subsuelo, la principal fuente de radiación son los materiales de construcción, y particularmente los materiales pétreos. Se incluyen en este grupo el uso de roca natural, materiales cerámicos y materiales aglomerantes como cementos, morteros y hormigones. La importancia de estos radica en que se estima que como promedio los seres humanos pasan alrededor de un 80% del tiempo de su vida en el interior de estas construcciones (vivienda y lugar de trabajo), al menos en países industrializados y climas templados, y por lo tanto expuestos

a la radiación gamma emitida por los mencionados materiales (Moharram et al. 2011).

1.1. Radioisótopos en las rocas (influencia de procesos geológicos)

Los principales radioisótopos existentes en las rocas y los materiales del suelo son aquellos derivados de las series de desintegración del uranio (^{238}U and ^{235}U) y torio (^{232}Th), así como el potasio (^{40}K). Aunque el U no está presente en los silicatos mas comunes (debido a su gran radio iónico) pueden producirse enriquecimientos de uranio en las fases finales de cristalización fraccionada de magmas, en pegmatitas o por fusión parcial de rocas sedimentarias o ígneas ácidas de la corteza, ya de por sí comparativamente ricas en U. Las concentraciones medias estimadas de U son de aproximadamente 0,3 ppm en basaltos, 3,8 ppm en granitos, 3,7 ppm en esquistos y 2,2 ppm en carbonatos, pudiendo llegar a 300 ppm en rocas fosfatadas. Bajo la forma de U^{+6} el uranio es muy reactivo y soluble en agua formando el ión uranilo (UO_2^{+2}) presente en la mayor parte de especies minerales con U. En rocas cristalinas, el U es incorporado en minerales accesorios como xenotimo, circon, monacita, esfena y allanita. Al meteorizarse las rocas puede depositarse en el contorno de granos mineales y microfracturas como óxidos o silicatos de U (Dickson & Scott, 1997).

El Th es 3-4 veces mas abundante que el U en la corteza terrestre al ser menos móvil y soluble en superficie excepto a pH ácido o pH neutro en presencia de compuestos orgánicos. Suele aparecer en monacita, torianita (ThO_2) y torita (ThSiO_4) entre otros (Gascoyne, 1992), o como elemento traza en fosfatos, óxidos y silicatos como en la allanita.

ita, xenótimo y circón, en concentraciones superiores a 1000 ppm, o en proporciones traza en otros minerales. Los procesos de meteorización pueden liberar Th por desagregación o puede quedar retenido en óxidos-hidróxidos de Fe y Ti o en arcillas.

El K aparece sobre todo en feldespatos (principalmente ortoclasa y microclina con un 13% de potasio) y micas (biotita y moscovita contienen alrededor de 8% en K). Es relativamente abundante en rocas félsicas y escaso en las máficas (Dickson & Scott, 1997). Durante la meteorización puede ser incorporado o absorbido en arcillas como la illita o la montmorillonita.

1.2. Geoquímica de radionúclidos en Granitos

Las rocas formadas en los últimos estadios de implementación ígnea, como pegmatitas y apлитas retienen valores elevados de K y bajos de U y Th. Las rocas alcalinas están mas enriquecidas en Th que en U. Las rocas sedimentarias presentan una concentración en radionucleidos que refleja la roca que los origina por lo que su contenido en U, Th y K es muy variable. Sin embargo, en las rocas metamórficas, se considera que el metamorfismo no afecta al contenido en radioelementos, aunque el contenido en U y Th tiende a disminuir con el grado de metamorfismo de facies apídoto-amfibólicas, para la facies granulítica. El r  tio Th/U disminuye al aumentar la temperatura y la presión (Heier, 1975).

En general, se considera que las rocas graníticas presentan valores elevados de U y Th, debido al magma que los origina, a movimientos tectónicos asociados a su génesis y a que las rocas generadas en la corteza suelen estar enriquecidas en radioelementos (Moura et al., 2011). La cantidad de U que puede exi-

stir en un granitoide está determinada por sus minerales portadores, que en muchos granitos son accesorios (circón, esfena, xen  timo) pudiendo contener hasta un 85% del U.

Los procesos geológicos asociados a zonas de cizalla pueden provocar el enriquecimiento o empobrecimiento en radioelementos en rocas, dependiendo de si el cizallamiento es frágil o dúctil. El histórico de cristalización y los procesos de meteorización hidrotermal también pueden afectar a la distribución de los radionúclidos en rocas   gneas (Sroor et al, 2002). La formación de microbrechas en rocas sujetas a procesos de deformación ductil-frágil puede crear caminos a través de los cuales los fluidos enriquecidos en radionúclidos se mueven y subsecuentemente se depositan en rocas encajantes (Moura et al., 2011).

1.3. Comportamiento de los radioisótopos en rocas

En las series de desintegración de U y Th existen varios elementos que producen radiación gamma de forma significativa (con energía e intensidad suficiente) como para ser estimada su actividad por espectrometría gamma (IAEA, 2003). En rocas no alteradas, estas series se encontrarán en estado de equilibrio al ser sistemas cerrados. Si una serie con un isótopo padre de vida larga no se ve perturbada durante un tiempo aproximadamente 8 veces superior al período de vida media del isótopo hijo con mayor vida media, se considera que ambos miembros de la serie se desintegran a la misma tasa y por lo tanto están en equilibrio. La pérdida o movilización de algunos de estos elementos ocasiona un disequilibrio, que raramente ocurre en la serie del Th (^{232}Th) pero puede ser frecuente en la serie del ^{238}U . (tabla 1).

²³⁸ U serie			²³² Th Serie		
Isotopo	Vida media	Desintegración	Isotopo	Vida media	Desintegración
²³⁸ U	4.468x10 ⁹ años	alpha	²³² Th	1.405x10 ¹⁰ años	alpha
²³⁴ Th	24.1 días	beta	²²⁸ Ra	5.75 años	beta
²³⁴ Pa	1.17 min	beta	²²⁸ Ac	6.25 horas	beta
²³⁴ U	2.48x10 ⁵ años	alpha	²²⁸ Th	1.916 años	alpha
²³⁰ Th	7.7x10 ⁴ años	alpha	²²⁴ Ra	3.6319 días	alpha
²²⁶ Ra	1600 años	alpha	²²⁰ Rn	55.6 días	alpha
²²² Rn	3.82 días	alpha	²¹⁶ Po	0.145 seg	alpha
²¹⁸ Po	3.05 min	alpha	²¹² Pb	10.64 horas	beta
²¹⁴ Pb	26.8 min	beta	²¹² Bi	60.55 min	alpha+beta
²¹⁴ Bi	19.8 min	beta	²¹² Po	299 nseg	alpha
²¹⁴ Po	162 µseg	alpha	²⁰⁸ Tl	3.053 min	beta
²¹⁰ Pb	22.3 años	beta	²⁰⁸ Pb	estable	
²¹⁰ Bi	5.01 días	beta			
²¹⁰ Po	138.4 días	alpha			
²⁰⁶ Pb	estable				

Tabla 1. Principales isótopos de la serie de desintegración del ²³⁸U y ²³²Th, vida media y tipos de desintegración.

Como ejemplo, en la serie del ²³⁸U, uno de sus isótopos hijos es fácilmente movilizad y lavado debido a su solubilidad ya que la desintegración de ²³⁸U a ²³⁴Th origina una ruptura en el cristal del que el ²³⁸U formaba parte y quedando los isótopos hijos subsiguientes libres. Otros isótopos hijos como el ²²⁶Ra también son fácilmente movilizad y lavados mientras que el ²²²Rn, originado por su desintegración, se pierde fácilmente por emanación al ser un gas, sobre todo dependiendo de la porosidad de la roca, que aumenta con la meteorización. De hecho, el ²²⁶Ra es el isótopo considerado como radiológicamente mas importante, y se utiliza incluso como referencia en lugar del U (Kovler, 2007). En general se considera que las concentraciones medias de Ra, Th y K en la corteza terrestre son de 40 Bq/kg, 40 Bq/kg y 400 Bq/kg, respectivamente (EC, 1999).

3. RADIATIVIDAD EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

El uso de materiales pétreos en la construcción puede derivar en una elevada exposición a radiación gamma e incluso Rn en el interior de construcciones, debido a la elevada radiactividad de los materiales. Para estimar la dosis gamma efectiva en el interior de una construcción se considera un coeficiente de conversión de dosis absorbida en el aire y un factor de ocupación del interior. La UNSCEAR (2000) considera que el coeficiente de conversión es de 0.7 Sv/Gy mientras que el factor de ocupación es de 0.8 (que corresponde al 80% del tiempo de vida que se pasa en la vivienda, considerado adecuado para países industrializados y de climas templados). La dosis efectiva anual media a nivel mundial es de 0.48 mSv siendo el rango de 0,3-0,6 mSv.

3.1. Consideraciones de tipo legal

A pesar de estas consideraciones, no existe una regulación todavía bien desarrollada en los países de la Unión Europea acerca de la exposición a radiación gamma, a pesar del riesgo que supone para la salud (UNSCEAR, 2000), aunque en los últimos años se han dado pasos importantes para su desarrollo. La legislación mas antigua en Europa corresponde a restricciones fijadas por Finlandia para la exposición a radiación en edificios en 1991 (Markkanen, 1995). En 1999, la Unión Europea establece la European Basic Safety Standards Directive (BSS) restringiendo la exposición laboral a fuentes de radiación naturales pero sin líneas claras y dejando a los estados miembros el desarrollo de la legislación restringiendo la exposición a radiación. Esto ha llevado a algunos estados miembros a establecer restricciones en el uso de materiales de construcción. En general, se contempla para la UE que las dosis efectivas superiores a 1mSv/a deben ser consideradas y aceptadas en casos excepcionales en materiales utilizados de forma local, recomendándose una dosis efectiva de 0,3-1 mSv/a (EC, 1999).

En el año 2013 el Consejo de la Unión Europea aprobó la Directiva de la UE (Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de 2013) por la que se establecen las normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes (CUE, 2013) que entró en vigor en 2014. En ella se da un plazo de 4 años a los países miembros para establecer una legislación nacional al respecto. Una parte importante de la Directiva se refiere a los materiales de construcción (artículo 75, Anexos VIII y XIII). De acuerdo con esta norma existirá

una obligación de medir la actividad específica de radioisótopos en estos materiales por los fabricantes utilizando el índice de actividad, debiendo estos cumplir una serie de requisitos.

Varios países miembros de la UE han establecido ya normativas de control a este respecto, como Finlandia, Polonia y la República Checa, utilizando como base el índice de actividad gamma (Rosen, 2014). Esta regulación se extiende para limitar los niveles de contenidos en radionucleidos en materiales de construcción que puedan ser utilizados en techos, muros y pavimentos de viviendas o espacios habitables en el caso de la República Checa. Los criterios adoptados son mas estrictos que los de la RP 112, estableciéndose que los materiales que sobrepasen ciertos límites solo podrán ser utilizados en casos justificados. También la legislación de Polonia (junto con la de la República Checa) limitan el contenido en ^{226}Ra en materiales de construcción, con la intención de limitar la exposición a Rn (Rosen, 2014).

3.2. Consideraciones metodológicas

Para evaluar el riesgo de exposición a radiación gamma debido al uso de materiales de construcción con una concentración de isótopos radiactivos determinada se utilizan los índices de actividad, que normalmente se basan en la medición de las concentraciones de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K , aunque en casos especiales pueden considerarse otros núclidos como el ^{137}Cs , como por ejemplo en el uso de cenizas como aditivo en morteros y hormigones (Markkanen, 1995). Los índices de actividad deben considerar también la forma del espacio interior y la cantidad de cada material usado en la construcción. Un ejemplo es el índice gamma (I_γ) indicado por

la Comisión Europea, aunque existen otros como el índice alfa, estimado a partir del ^{226}Ra (EC, 1999; Righiy y Bruzzi, 2006).

En términos genéricos se consideran dos métodos para evaluar la exposición externa a radionúclidos naturales (UNSCEAR, 2000). Uno (indirecto) consiste básicamente en resumir directamente las tasas de dosis gamma externas medidas en el aire, en interior y exterior, substrayendo la tasa de dosis debida a la radiación cósmica. El otro (directo) consiste en calcular la tasa de dosis gamma externa en el aire por medio de mediciones de las concentraciones de radionúclidos en el suelo.

En los últimos años se han realizado medidas directas de las tasas de dosis absorbida en el aire por todo el mundo, abarcando aproximadamente al 70% de la población mundial (UNSCEAR, 2000), observándose rangos de 10-200 nGy/h con medias que varían entre 18 y 93 nGy/h, dependiendo de la litología y los materiales de construcción utilizados. En las medidas indirectas se han considerado diferentes coeficientes de transformación de la actividad de los isótopos en los materiales a la tasa de dosis absorbida (UNSCEAR, 2000).

4. ÁREA Y OBJETO DE ESTUDIO

En el NW de Portugal existe un importante volumen de granitoides correspondientes (Dias et al., 2002) a sucesivos pulsos magmáticos, principalmente correspondientes a la etapa postcolisional de la orogenia varisca (290-321 Ma). La composición y tipología de las rocas granitoides es muy variable agrupándose estos en cuatro tipos: granitoides sin-D3 (monzogranitos/granodioritas biotíticos y de dos micas), granitoides tardi-D3 (monzogranitos/granodiori-

tas esencialmente biotíticos), granitoides tardi a post-D3 (leucogranitos de dos micas muy peraluminosos) y granitoides post-D3 (granitos biotíticos a biotítico-moscovíticos).

La ciudad de Braga se localiza en la zona litoral norte, asentada en el conocido como granito de Braga que forma parte del complejo granítico de Braga. El granito de Braga ha sido usado con mucha frecuencia en la construcción de edificios a lo largo de la historia de la Ciudad para pavimentos, muros y techos. Por ello, existe una gran cantidad de edificios construidos, al menos parcialmente, con este granito. Es un granito rico en biotita, de grano fino a medio y ligeramente porfírico (Dias et al., 2002). Esta compuesto aproximadamente por un 22-27% de cuarzo, 27-32% de plagioclasa, 22-31 de feldespato potásico, 10-19% de biotita y 0-4% de biotita (Dias et al., 2002). Un estudio de campo de la roca permite observar su afloramiento en cantera en al menos 5 estados diferentes de meteorización. De estos, se ha considerado que el estado del 1 al 3, los mas utilizados como material de construcción, son los menos alterados.

Dentro de un programa nacional de medida de las dosis de radiación gamma natural en Portugal, Amaral et al. (1992) estimaron que la media aritmética de la tasa de dosis absorbida para el distrito de Braga es de 152,2 nGy/h con un intervalo de 95,5-226,5 nGy/h, siendo la dosis efectiva anual exterior e interior de 0,19 mSv/a y 0,9 mSv/a, respectivamente. En el Mapa Radiológico para el ayuntamiento de Braga, la tasa de dosis medida es superior a 90 nGy/h dentro de un intervalo de 54-211,7 nGy/h (Amaral, 2000; AIEA, 2003), dándose los valores mas elevados en suelos originados a partir de rocas intrusivas y menor en los de rocas metamórficas (esquistos).

El objetivo de este estudio es evaluar la radiactividad gamma del granito de Braga como material de construcción. Dado que su uso durante la historia de la ciudad ha sido extenso, en la actualidad existe una gran cantidad de estructuras históricas en las que ha sido utilizado este tipo de roca, lo que implica la necesidad de evaluar la exposición del público a la radiactividad gamma, tanto en viviendas como en zonas de trabajo situados en el área monumental de la ciudad. Para ello, se ha estimado la actividad de varios radioisótopos en muestras de granito de 5 grados de meteorización y se han utilizado los datos para calcular el índice gamma para materiales de construcción (gamma building index o I_γ) recomendado por la Guía Técnica de la UE (RP112) para el control legal de materiales de construcción (EC, 1999). Además, se han calculado otros dos parámetros utilizados para estimar la peligrosidad radiológica de los materiales como son la Actividad equivalente promedio de Radio (Ra_{eq}) y la dosis equivalente anual gonadal (AGED).

5. MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio realizado en este trabajo comprende dos partes: un análisis estimativo de la meteorización de diferentes muestras del granito de Braga y una análisis de actividad de los isótopos de U, Th y K o radioisótopos de sus correspondientes series de desintegración (Ra).

5.1. Estimación del grado de meteorización

Como es conocido, la meteorización disminuye la resistencia mecánica y cohesión de las rocas. Esta característica fue utilizada para estimar la meteorización de diferentes

muestras del granito de Braga, tras una primera estimación de la meteorización utilizando sus variaciones cromáticas, observables desde un punto de vista macroscópico, dado que se observa un cambio de color de la roca hacia el amarillo en los grados 1 y 2.

Para un análisis mas objetivo del grado de meteorización, se realizaron medidas de porosidad por medio del coeficiente de absorción de agua. Después de preparar probetas de roca correspondientes a los 5 estados de meteorización observados en afloramientos y en una cantera, estas se secaron en estufa. Una vez secas se sumergieron en agua desionizada y se midió su masa tras 72 horas, encontrándose las muestras saturadas de agua. Para determinar el coeficiente de absorción de agua a presión atmosférica se utilizó la ecuación (1):

$$A_b = (m_s - m_d) \times 100 / m_d \quad (1)$$

siendo m_s la masa saturada y m_d la masa de la muestra seca.

5.2. Espectrometría gamma

Para el análisis de la actividad de isótopos de las series de U, Th y K se secaron en estufa las muestras y se molieron hasta obtener un tamaño de grano menor de 63 micras. Una vez molidas se calcinaron a 450°C para eliminar cualquier presencia de materia orgánica que pudiese haber en la superficie de las muestras o haber penetrado su interior. Las muestras fueron selladas durante 25 días hasta alcanzar el equilibrio del Rn y luego se realizaron los análisis de las muestras mediante un detector de semiconductor de Germanio tipo coaxial marca CANBERRA modelo GR6022. Este detector de radiación gamma se encuentra dentro

de un blindaje de plomo de baja actividad de 10 cm de grosor, y conectado a un sistema de reducción de fondo en anticoincidencia basado en un detector de centelleador plástico. Sus características principales son una eficiencia relativa del 60%, y una resolución de 1.05 keV y 2.2 keV para una energía de 122 keV y 1332 keV, respectivamente.

La medida de emisores gamma de las muestras, introducidas en sus respectivas cajas petri de polipropileno y selladas adecuadamente, es una técnica no destructiva que permite analizar la concentración de actividad de los siguientes radioisótopos naturales: Be-7, K-40, Tl-208, Pb-210, Pb-212, Bi-212, Pb-214, Bi-214, Ra-226, Ac-228 y Th-234; y artificiales: Cr-51, Mn-54, Co-58, Co-60, Fe-59, Zn-65, Nb-95, Zr-95, Ru-103, Ru-106, I-131, Cs-134, Cs-137, Ba-140, La-140, Ce-144, y Am-241. La actividad final de la muestra se calcula tras la calibración en eficiencia, corregida por autoabsorción y suma en coincidencia, de la geometría de recuento mediante simulación por Monte Carlo con los códigos GEANT4 y LABSOCS.

5.3. Índices de concentración de actividad

En términos generales, los índices son utilizados como una herramienta para evaluar la exposición a radiación gamma derivada de materiales de construcción. Consisten en la suma de las contribuciones de los radionúclidos que emiten radiación gamma presentes en los materiales evaluados. Las líneas maestras de la Comisión Europea (RP-112) constituyen el primer documento publicado (EC, 1999) que establece una serie de principios de protección radiológica respecto a la radiación gamma natural (externa e interna) en materiales de construcción (Moharram et al., 2011). Esta

guía de protección radiológica establece los valores para materiales de construcción de 300, 200 y 3000 Bq/kg (Ref_i) para las actividades de ^{226}Ra (serie del ^{238}U), ^{232}Th y ^{40}K , respectivamente para el índice de concentración de actividad gamma (I_γ). La Comisión Europea sugiere que los materiales de construcción deben estar exentos de toda restricción respecto a su radiactividad si el exceso de radiación gamma originado por ellos incrementa la dosis anual efectiva que una persona en 0,3 mSv como máximo. El índice de concentración de actividad gamma que resulta de la expresión (2):

$$I_\gamma = \sum (C_i / Ref_i) \quad (2)$$

Siendo C_i la concentración del isótopo i en Bq/kg en la muestra de estudio Ref_i .

Otro índice usado con frecuencia es el índice de actividad de radio equivalente (Ra_{eq}). Este fue propuesto por Beretka y Mathew (1985) para limitar la radiactividad en materiales de construcción en base a la actividad del Ra, y ha sido utilizada extensamente. El Ra_{eq} se define como la suma ponderada de las concentraciones de actividad de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K (3):

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1,43C_{Th} + 0,077C_K \leq 370 \text{ Bq/kg} \quad (3)$$

Los factores de ponderación para ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K son 1, 1,43 y 0,077, respectivamente. El máximo valor de Ra_{eq} en materiales de construcción no debe sobrepasar los 370 Bq/kg para un uso seguro, manteniéndose así la dosis externa por debajo de 1,5mSv/a (Serena, 2006).

El índice conocido como *AGED* (anual gonadal equivalent dose) se basa en el potencial peligro que supone la radiación gamma recibida en ciertos órganos. Las

gónadas, la médula ósea activa y las células de la superficie de los huesos son considerados órganos de interés para el UNSCEAR (1988). La dosis equivalente anual gonadal para los residentes en una casa o trabajadores en un determinado edificio o ambiente en el cual existen materiales de construcción con una cierta concentración de radionúclidos se calcula a través de la expresión (4):

$$AGED (\mu\text{Sv/a}) = 3,09C_{\text{Ra}} + 4,18C_{\text{Th}} + 0,314C_{\text{K}} \quad (4)$$

siendo 3,09, 4,18 y 0,314 los factores de conversión para ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K , respectivamente. El modelo considerado en este parámetro se basa en una casa típica con

paredes de espesor infinito, lo que permite comparar el *AGED* con una casa que contiene concentraciones de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K similares a las del promedio mundial en suelos (Arafa, 2004).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La absorción de agua en las muestras de granito mostró una muy baja porosidad en las muestras con menor grado de alteración (1 y 2), algo mayor e la muestra afectada por una meteorización intermedia (3) y creciente en las muestras mas alteradas (4-5). En la tabla 2 se pueden observar los resultados. Por tanto, las observaciones macroscópicas son coherentes con estos tests.

Muestra	1	2	3	4	5
$A_b(\%)$	0.7	0.8	1.6	3.1	8.6

Tabla 2. Resultados de los ensayos de absorción de agua del granito de Braga.

Los resultados de la espectrometría gamma se detallan en la tabla 3. En esta se pueden observar las actividades específicas de varios isótopos de las series de desintegración de U y Th, así como la actividad específica del ^{40}K . Se observa que el menor valor medido para la actividad del ^{238}U es de 70 ± 15 Bq/kg en la muestra 4. El menor valor medido para la actividad del ^{232}Th es de 34 ± 2 Bq/kg en la muestra 2 mientras que la actividad mas baja para el ^{40}K se observa en la muestra 1. En términos generales, se observa que la concentración de radionú-

clidos en las muestras del granito de Braga están por encima de los promedios mundiales para materiales de construcción, que son de 50, 50 y 500 Bq/kg para ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K , respectivamente (UNSCEAR, 2000). La única excepción a esto se observa en la muestra 2 para el ^{232}Th . También se observa una tendencia muy leve al descenso de la actividad del ^{238}U y un claro incremento de la concentración de ^{232}Th con la meteorización. Igualmente, parece observarse un incremento en la concentración de ^{40}K con la meteorización.

Muestra	Actividad específica ²³⁸ U (Bq Kg ⁻¹)	Actividad específica ²³² Th (Bq Kg ⁻¹)	Actividad específica ⁴⁰ K (Bq Kg ⁻¹)
1	139 ± 29	95 ± 4	1305 ± 60
2	71 ± 16	34 ± 2	2080 ± 87
3	114 ± 25	70 ± 5	1681 ± 72
4	70 ± 15	202 ± 10	1570 ± 68
5	110 ± 22	202 ± 8	1567 ± 65

Tabla 3. Actividades específicas de ²³⁸U, ²³²Th y ⁴⁰K ara las muestras.
ATENÇÃO que no artigo para Sevilha havia um erro no valor de 40-K para a primeira amostra (e que depois foi corrigido na dissertação) OK

El cálculo de los diferentes índices utilizados para evaluar el riesgo derivado del uso del granito de Braga como material de construcción revela la existencia de una correlación entre el grado de meteorización de los materiales y los índices obtenidos. Los valores de índice gamma (I_γ) obtenidos para las muestras con diferente grado de meteorización se pueden observar en la tabla 3. Estos resultados indican que las cinco muestras exceden el valor umbral de 1, recomendado para el uso como materiales de construcción por lo que debería considerarse un estudio mas profundo de éstos en relación a este índice dado su extenso uso en edificios históricos de la ciudad de Braga. El valor del índice se incrementa además con el grado de

meteorización, siendo el mínimo calculado de 1,1 y el máximo de 1,9.

Los índices de actividad de radio equivalente (Ra_{eq}) obtenidos están ligeramente por debajo o en el entorno del límite propuesto de 370 Bq/kg para un uso seguro en las muestras menos meteorizadas (el valor más elevado es 375 Bq/kg). Sin embargo, en las muestras que presentan un mayor grado de meteorización (4-5) se observa un incremento en este índice, de modo que sobrepasa ese valor de forma significativa. De un modo similar, el cálculo de la dosis equivalente anual gonadal muestra una variación importante acorde al grado de meteorización. Además, todas las muestras muestran valores elevados de *AGED* en comparación con la media mundial.

Muestra	Índice gamma (I_γ)	Radio Equivalente (Ra_{eq}) (Bq kg ⁻¹)	<i>AGED</i>
1	1.37	375	1236
2	1.10	280	1015
3	1.29	344	1173
4	1.77	480	1554
5	1.90	520	1676

Tabla 4. Parametros relacionados con la radiación gamma calculada a partir de las actividades de ²²²Ra, ²³²Th y ⁴⁰K en las muestras estudiadas. HÁ UMAS PEQUENAS CORREÇÕES NA PRIMEIRA AMOSTRA

7. CONCLUSIONES

El estudio de los radionúclidos emisores de radiación gamma en muestras de granito de Braga indican que esta roca tiene en términos genéricos una actividad específica de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K por encima de los valores promedios a nivel mundial para los materiales de construcción. En este estudio se observa que además existe un incremento en los valores de los índices relativos a la radiación gamma en estos materiales cuando están netamente meteorizados. El estudio de 5 muestras con diferente grado de meteorización muestra que todas ellas exceden el valor de I_γ indicado como límite por la CE (CUE, 2013), o sea, estos valores implicarían estudios detallados de los edificios donde este granito sea usado. Sin embargo, las recomendaciones de EC 112 indican que estos granitos no suponen un problema cuando utilizados como revestimientos superficiales (CE, 1999). El uso de otros indicadores como la dosis equivalente anual gonadal (*AGED*) muestra un resultado muy similar al del índice anterior. Sin embargo, respecto a otros indicadores, se observa que las muestras no meteorizadas o poco meteorizadas no exceden (o exceden muy poco) el índice Ra_{eq} promedio y recomendado para materiales de construcción.

A partir de estos resultados, y dado el extenso uso que ha tenido este tipo de roca en edificios y estructuras históricas de la ciudad de Braga, con el consiguiente riesgo de exposición del público a estos materiales, parece recomendable la realización de un estudio de los niveles de radiación gamma actuales in situ, en diversos edificios de la ciudad. Este estudio permitiría determinar si existen casos de una excesiva exposición de personas a radiación gamma con el con-

siguiente riesgo, ya que existen una serie de parámetros que solo un estudio de este tipo pueden considerar (Risica et al., 2001).

8. REFERENCIAS

- AIEA (2003) International Atomic Energy Agency: Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363, Vienna.
- Amaral, E. Alves J., Carreiro J. 1992. Doses to the Portuguese population due to natural gamma radiation. *Radiation protection dosimetry*: 541-543.
- Amaral, E.M. (2000) Natural gamma radiation in air versus soil nature in Portugal. *Proceedings IRPA*, 10, Hiroshima, P-1, P-12.
- Arafa, W. 2004. Specific activity and hazards of granite samples collected from the Eastern Desert of Egypt. *Journal of Environmental Radioactivity* 75, 315–327.
- Beretka, J., Mathew, P.J. (1985) Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Physics*, 48, 87-95.
- CUE – Consejo de la Unión Europea (2013) - Directiva 2013/59/Euratom del Consejo de 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom
- Dias, G., Sirngesl, P. P., Ferreira, N., & Leterrier, J. (2002). Mantle and Crustal Sources in the Genesis of Late-Hercynian Granitoids (NW Portugal): Geochemical and Sr-Nd Isotopic Constraints. *Gondwana Research*, 287–305.

- Dickson, B.L., Scott, K.M. (1997) Interpretation of aerial gamma-rays surveys – adding the geochemical factors. Australia. AGSO, Journal of Australian Geology and Geophysics, 17(2), 187-200.
- E.C. - European Comission. 1999. *Radiation protection 112 Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials*. Luxembourg.
- Gascoyne, M. (1992) Geochemistry of the actinides and their daughters. In: Ivanovich, M, Harmon, R.S., (eds.). Uranium series disequilibrium, applications to Earth, marine and environmental sciences. Clarendon Press, Oxford, 34-61.
- Heier, K.S. (1975) The movement of uranium during higher grade metamorphic processes. Theoretical and practical aspects of uranium geology. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 291(1381), 413-421.
- Kovler, K. 2009. Radiological constraints of using building materials and industrial by-products in construction. *Construction and Building Materials*, 23(1), 246–253. Haifa, Israel.
- Markkanen, M. (1995). *Radiation Dose Assessments for Materials with elevated Natural Radioactivity*. STUK-BSTO 32, Finnish Center for Radiation and Nuclear Safety. Helsinki.
- Moharram B., Suliman M., Zarhan N., Shennawy S., El Sayed A. External exposure doses due to gamma emitting natural radionuclides in some Egyptian building materials. *Applied Radiation and Isotopes* 2011; 70 (2012): 241–248
- Moura, C.L., Artur, A.C., Bonotto, D.M., Guedes, S., Martinelli, C.D. (2011) Natural radioactivity and radon exhalation rate in Brazilian igneous Rocks. *Applied Radiation and Isotopes: including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine*, 69(7), 1094-1099.
- Righi, S., Bruzzi, L. (2006) Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *Journal of Environmental Radioactivity*, 88, 158-170.
- Risica, S., Bolzan, C., Nuccetelli, C. 2001. Radioactivity in building materials: room model analysis and experimental methods. *The Science of the total environment*, 272(1-3), 119–26.
- Rosen, D. (2014) Radiation from masonry products – Dose assessment and classifications of emitted gamma radiation. 9th International masonry conference, Guimaraes, Portugal.
- Sroor, A., Afifi, S.Y., Abdel-Haleem, A.S., Salman, A.B., Abdel-Sammad, M. (2002) Environmental pollutant isotope measurements and natural radioactivity assessment of North Tushki area, Southwestern Egypt. *Applied Radiation and Isotopes*, 57 (3), 427-436.
- Sonkawadea, R.G., Kantb, K., Muralithara, S., Kumara, R., Ramola, R.C., 2008. Natural radioactivity in common building construction and radiation shielding materials. *Atmospheric Environment* 42, 2254–2259
- UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1988. New York.
- UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000. New York.

Estudo preliminar do depósito de palygorskite de Figueiró do Campo (Soure, Portugal)

Preliminary studies of the palygorskite deposit from Figueiró do Campo (Soure, Portugal)

ANTÓNIO MOURA¹, JOSÉ LOPES VELHO² e WILLY ALVES³

(1) Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Rua do Campo Alegre 4167-007 Porto, Portugal. Centro de Geologia da Universidade do Porto. Email: ajmoura@fc.up.pt

(2) Departamento de Geociências. Universidade de Aveiro. Campo de Santiago, 3810-146 Aveiro, Portugal.

(3) Mestrando no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. Campo de Santiago, 3810-146 Aveiro, Portugal

Abstract

The technical characteristics of miocenic palygorskite rich-sediments from an area near Figueiró do Campo (Soure, Portugal) are presented. The deposit is probably the most promising area in Portugal concerning palygorskite as a resource. In this first study we evaluate three samples collected in the bottom, medium and top levels of the deposit. The samples has 58-79 % in weight under 63 μ and the average particle size in the fraction < 63 μ has 0.2 to 2.2 μ in size. DRX data revealed that the fraction < 63 μ are 26-34 % quartz, 4-6 % Fe oxide and 61-70 % palygorskite. The fraction < 2 μ is 89-93 % palygorskite, 4-8 % quartz, 3-4 % Fe oxide and 0-3 % caolinite. The palygorskite fibbers were observed in MEV and average 344 nm (length) and 31 nm (thickness). From FRX analysis we obtain the following compositions: 69-60 % SiO₂, 11-17 % Al₂O₃, 7.5-5.1 % MgO and 3.6-6.6 % Fe total. CTC are in the range 7.2-11.2 meq/100g, and the pH between 6.0

and 7.1. The moisture are between 9.21 and 15.08 %. Oil and water sorption are respectively in the range 69-100 % and 75-134 %. Einlehner abrasivity is between 11 and 80 mg in the fraction < 63 μ , and 1.2- 1.9 mg in the fraction < 2 μ .

In the overall results do not exclude the possibility of a feasible exploitation. It is thus essential to proceed with a geophysical study (to determine the thickness and form of the deposit) and with boreholes exploration in order to get fresh samples from the interior of the mineralized level.

The deposit was probably formed in a restricted basin filled with alkaline waters and the palygorskite precipitated from solutions saturated with silica and magnesium although we cannot preclude a formation after an esmectite precursor.

Key words: palygorskite; deposit; Portugal

1. INTRODUÇÃO

A paligorsquite (também conhecida como atapulgite) é uma argila fibrosa com grande interesse industrial, sendo utilizada em aplicações tão diversas como a indústria farmacêutica e de cosmética, em camas para animais, em fluidos de sondagem, em fertilizantes, em pesticidas, na clarificação de vinhos, como absorvente industrial, entre outras (HEIVILIN, 1994).

Existem em Espanha várias explorações de paligorsquite. Na região de Cáceres situa-se aquele que tem sido considerado o maior jazigo europeu desta argila. Em Portugal, no entanto, a argila é mal conhecida, nunca tendo sido explorada. Porém, encontram-se referenciadas rochas sedimentares com paligorsquite em vários pontos de Portugal, todos em litologias do Cenozoico. O estudo de rochas sedimentares portuguesas ricas em paligorsquite foi pela primeira vez efetuado por GALOPIM DE CARVALHO (1968). Este geólogo estudou ambas as margens da bacia do rio Tejo identificando a argila em vários locais, embora em nenhum deles ocorresse em quantidade que fizesse prever o seu aproveitamento industrial. Posteriormente, REIS (1983) e CUNHA E REIS (1989) descreveram alguns locais, na bacia Lusitaniana, com paligorsquite na fração argilosa. DIAS (1994) dedicou a sua tese de doutoramento ao estudo de formações ricas em paligorsquite tendo estudado formações das bacias do Tejo, Douro e Guadiana, onde encontrou três locais com potencial interesse económico.

O objetivo do presente trabalho é contribuir para um melhor conhecimento da paligorsquite em Portugal através do estudo do depósito de Figueiró do Campo, localizado a cerca de 30 km a SW de Coimbra,

na região centro de Portugal pertencente à bacia do rio Mondego. O trabalho versou, principalmente, a determinação de um conjunto de características mineralógicas, químicas e tecnológicas de amostras do nível rico em paligorsquite. Serviu ainda para que se tecessem algumas ilações relativas à génese do depósito.

Este trabalho enquadra-se num projecto mais vasto de caracterização da paligorsquite em Portugal.

2. GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

O litótipo objeto do presente estudo pertence aos depósitos continentais da Formação dos Grés e Argilas de Amor (Miocénico médio) que fazem parte da Bacia Lusitaniana da Orla meso-cenozoica de Portugal e se distribuem numa área de algumas centenas de quilómetros quadrados entre os paralelos de Nazaré e de Coimbra (CUNHA E REIS, 1992). Segundo PAIS *et al.* (2010) esta formação constitui uma unidade alostratigráfica (sequência limitada por descontinuidades sedimentares) da designada Bacia do Mondego. A formação foi estudada por vários autores e, em particular, por REIS (1983) que a considerou como provável equivalente lateral do membro III da Formação do Bom Sucesso. Este autor descreveu no sector Condeixa-Alfarelos a área de Figueiró do Campo (concelho de Soure) onde afloram depósitos ricos em paligorsquite. Um destes depósitos foi alvo do interesse de uma empresa privada nos anos 1989-90, tendo em vista um eventual aproveitamento do depósito.

O depósito abrange uma área de aproximadamente 165 000 m² e localiza-se a WSW da aldeia de Figueiró do Campo situando-se na folha 19-C da Carta Geológica de Portu-

gal à escala 1:50 000 (figura 1). O nível é praticamente horizontal tendo na região uma espessura que varia entre 5 e 25 m. A muro encontra-se limitado por um nível conglomerático bastante silicificado e a topo é limitado por um depósito detrítico de cobertura

(Pliocénico) com espessura igual ou inferior a 10 m. A espessura média do nível rico em paligorskite, difícil de estimar, deverá rondar os 10 m. A algumas centenas de metros do depósito ocorrem outros, análogos, embora de menor área.

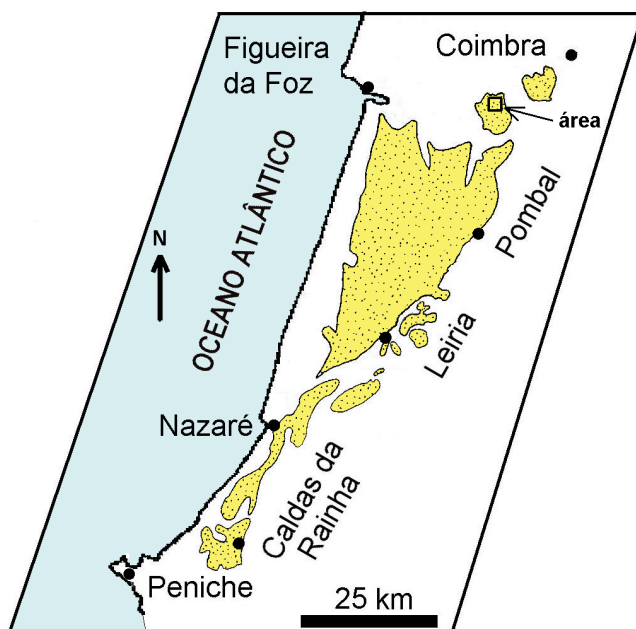


Fig. 1. Terrenos do neogénico no litoral ocidental de Portugal e localização da área do depósito (adapt. Reis, 1983).

3. AMOSTRAGEM

Neste primeiro estudo foi efetuada amostragem em três níveis: inferior, médio e superior (ou de topo) sendo as amostras designadas *Pi*, *Pm* e *Pt*, respetivamente. As amostras *Pi* e *Pm* foram colhidas na parte sudeste do depósito aproveitando uma pequena ra-

vina que o destapa (figura 2). A amostra do nível superior foi colhida na parte central. O nível inferior tem uma tonalidade esverdeada enquanto o médio e o superior tem cor alaranjada (figura 3). Foram estudadas duas frações granulométricas, $<63 \mu\text{m}$ e $<2 \mu\text{m}$ nas quais se realizaram um conjunto de análises mineralógicas e tecnológicas.

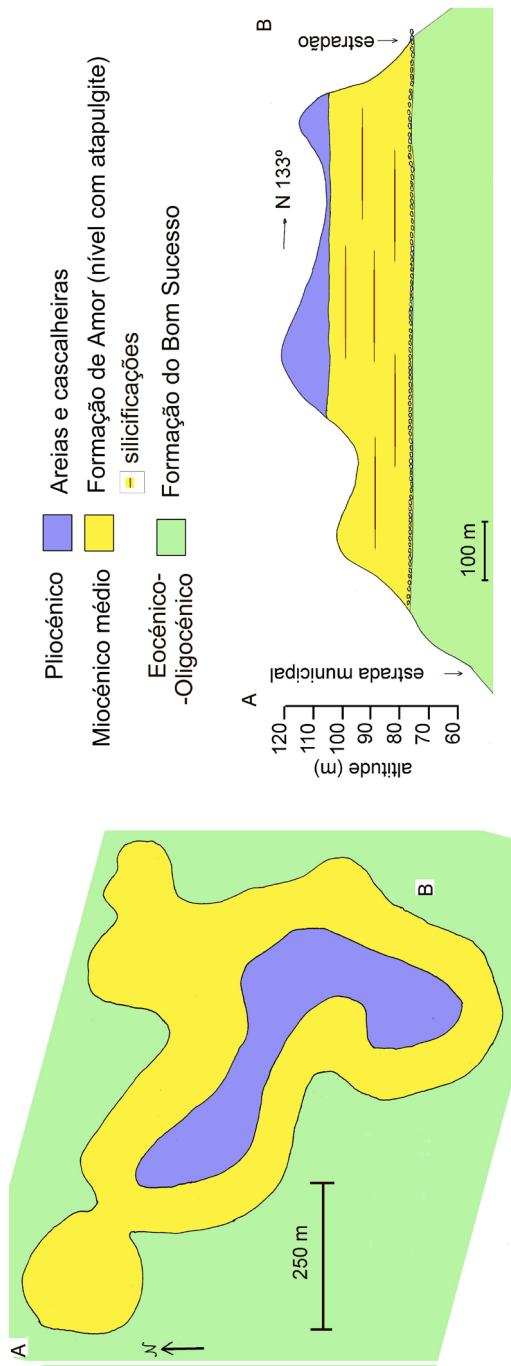


Fig. 2. Cartografia geológica simplificada do depósito de paligorsquite de Figueiró do Campo e perfil geológico esquemático.



Fig. 3. Imagem do afloramento onde foram colhidas as amostras *Pb* e *Pm*.

4. MÉTODOS DE ESTUDO

As amostras foram submetidas a difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX), microscopia eletrónica de varrimento (MEV), medição de pH, testes de absorção de água e de óleo, de abrasividade e de capacidade de troca catiónica.

Os DRX foram executados na amostra total e nas frações $<63\ \mu\text{m}$ e $<2\ \mu\text{m}$; nestas últimas foram executadas análises em amostras não orientadas e em amostras orientadas. Utilizou-se um difractómetro *Philips X'Pert* constituído por um gerador MPPC, um goniómetro *PW 3050* e um microprocessador *PW 3040/60* com registo em impressora. Nas

análises químicas por FRX foi utilizado o equipamento *Philips Automatic Bead Machine "Perl'X3"*. Nas observações no microscópio eletrónico de varrimento foi usado o equipamento *Quanta 400FEG ESEM / EDAX Genesis X4M* pertencente ao Centro de Materiais da Universidade do Porto. O pH foi medido no aparelho *Crison-Hanna -HI 8014* calibrado com soluções padrão de valores de pH 4,0 e 7,2; nestas análises a relação amostra/água foi de 1:2,5. Nos testes de absorções de água e de óleo usou-se a norma *ISO 787/5-1980*. A abrasividade foi determinada num abrasímetro *Einlechner AT-1000* e para a

capacidade de troca catiónica foi adotado o procedimento que utiliza acetato de amónio e que se encontra descrito em ALVES (2013).

5. RESULTADOS

5.1. Granulometria

As amostras estudadas correspondem a siltitos com uma percentagem de fração >63 µm variando entre 20% e 40%. A fração <4 µm corresponde a 49-62 % da rocha total (resultados obtidos a partir da análise com o equipamento Segigraph 6100).

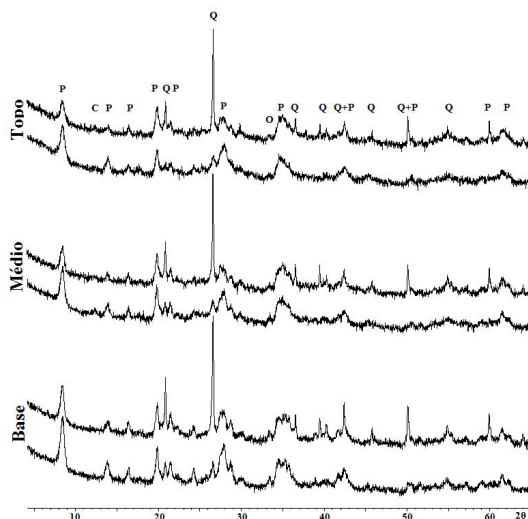


Fig. 4. Difractogramas correspondentes a amostras não orientadas das fracções <63 µm (espectros superiores) e <2 µm (espectros inferiores). P: paligorsquite, Q: quartzo, C: caulinite e O: óxidos de ferro (hematite e goethite).

5.2. Difração de raios X (DRX)

Na figura 4 encontram-se representados os difratogramas das amostras estudadas, correspondentes às fracções <63 µm e <2 µm. A amostra total apresenta um DRX idênti-

co embora com um pouco mais de quartzo e menos paligorsquite. Os resultados obtidos revelam uma clara predominância de paligorsquite e de quartzo, sendo esta última a impureza dominante. Tendo em conta a semiquantificação, indicada na tabela 1, é

possível concluir que em todas as amostras se verifica uma diminuição do teor em quartzo e um aumento do teor em paligorskite da fração <63 µm para a <2 µm. Os óxidos de ferro, representados pela hematite e pela goethite, ocorrem em pequena quanti-

dade. Nenhum dos difratogramas exibe picos relativos a esmectite ou sepiolite (figura 5). As amostras *Pm* e *Pt* apresentam vestígios de caulinite, sendo que a maior quantidade ocorre na fração < 2 µm da amostra *Pt* (tabela 1).

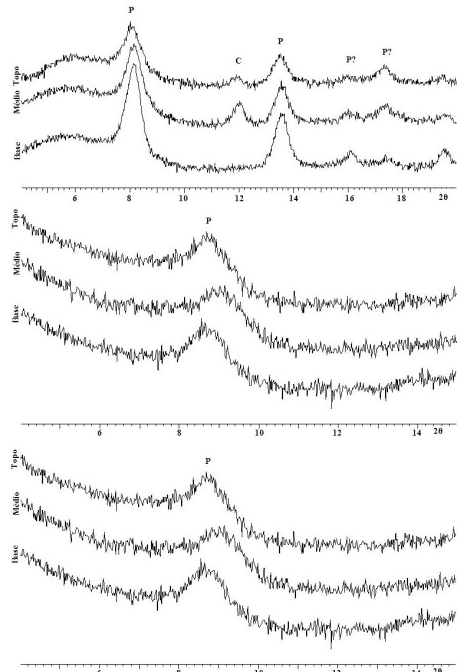


Fig. 5. Difratogramas de amostras orientadas correspondentes à fração <2 µm. A - Estado natural, em que P representa a paligorskite e C a caulinite; B - Etilenoglicol; C – Após aquecimento a 500 °C.

		Paligorskite	Quartzo	Óxidos de ferro	Caulinite
		(%)	(%)	(%)	(%)
<i>Pt</i>	<63 µm	61	34	5	*
	<2 µm	89	8	3	*
<i>Pm</i>	<63 µm	63	31	6	*
	<2 µm	89	7	4	3
<i>Pb</i>	<63 µm	70	26	4	nd
	<2 µm	93	4	3	nd

Tabela. 1. Semiquantificação dos minerais existentes nas amostras, em percentagem. P: paligorskite, Q: quartzo, C: caulinite e O: óxidos de ferro (hematite e goethite).

5.3. Análise química

Na tabela 2 encontram-se indicados os resultados das análises químicas obtidos por espectrometria de fluorescência de raios X, dos elementos maiores correspondentes às três amostras e, para cada uma, às duas frações granulométricas (<63 μm e <2 μm). Os teores de SiO_2 , Al_2O_3 , MgO e Fe total são os de maior destaque. É importante salientar a diminuição dos teores em SiO_2 , e o aumento dos teores em Al_2O_3 , Fe total e MgO (excetuando os teores de MgO da amostra *Pt*) da fração <63 μm para a <2 μm , o que indica uma diminuição do teor em quartzo e um aumento da paligorsquite. Por outro lado verifica-se que da base para o topo da coluna estratigráfica os teores de Fe total têm tendência para aumentar e o mesmo acontece com os de Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , Na_2O e K_2O . Os teores de SiO_2 e de

MgO mostram uma tendência oposta, isto é, verifica-se uma diminuição daqueles teores à medida que se sobe na coluna estratigráfica, que se encontra relacionada com o aumento do teor em Al_2O_3 . Na tabela 3 encontram-se indicadas as relações entre os elementos Si , Al e Mg . As relações observadas vêm corroborar algumas observações decorrentes dos resultados das análises químicas dos elementos maiores. As relações Si/Al e Si/Mg diminuem das frações <63 μm para as <2 μm , devido à diminuição de sílica da fração <63 μm para a fração <2 μm , sendo esta última mais rica em Al e Mg devido à presença de paligorsquite. Verifica-se, também, um aumento dos teores de Al em relação aos de Mg (a razão Al/Mg aumenta) da base para o topo, o que indica que o Al poderá estar a substituir o Mg na estrutura (nomeadamente nas camadas octaédricas) da paligorsquite.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe Total	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Perda ao rubro	Total	
Pt	<63 μm	60,34	0,80	16,26	5,88	5,22	0,20	0,09	1,77	0,05	0,07	9,22	99,90
	<2 μm	57,45	0,68	16,63	6,57	5,14	0,48	0,32	1,83	0,05	0,17	10,33	99,65
Pm	<63 μm	64,11	0,65	15,29	4,43	5,16	0,25	0,15	1,70	0,04	0,13	7,92	99,83
	<2 μm	58,43	0,37	16,45	5,53	5,80	0,33	0,18	1,60	0,04	0,09	10,96	99,78
Pb	<63 μm	68,77	0,54	10,91	3,61	6,42	0,17	0,07	0,59	0,02	0,02	8,80	99,92
	<2 μm	62,69	0,37	12,98	4,94	7,56	0,30	0,24	0,67	0,02	0,11	9,97	99,85

Tabela. 2. Resultados das análises químicas dos elementos maiores em percentagem de óxidos.

5.4. Microscopia eletrônica de varrimento (MEV)

As amostras foram analisadas no microscópio eletrônico com o objetivo de estudar a dimensão e a forma das partículas de paligorsquite. Na figura 6 mostram-se

algumas das observações mais significativas obtidas por MEV. Foram medidas várias fibras, com os seguintes resultados: comprimento médio= 344 nm e valores no intervalo [106, 980] nm; largura média= 31 nm, com valores no intervalo [14,50] nm, sendo a distribuição a que se pode observar na

figura 7. É possível observar e identificar na imagem A, alguns aglomerados e partículas fibrosas. Estes aglomerados são comuns e devem-se ao facto das partículas possuírem elevada capacidade de absorção, o que faz com que as partículas individualizadas se agreguem. Observam-se também algumas, embora poucas, partículas com cariz lamelar hexagonal, como acontece com a

amostra Pi, correspondente à imagem B. Estas partículas correspondem a caulinite. Em todas as amostras foi também possível observar partículas de forma globular irregular, as quais poderão corresponder a quartzo. Finalmente, não se observam diferenças nas características fibrosas das partículas de paligorsquite entre as amostras.

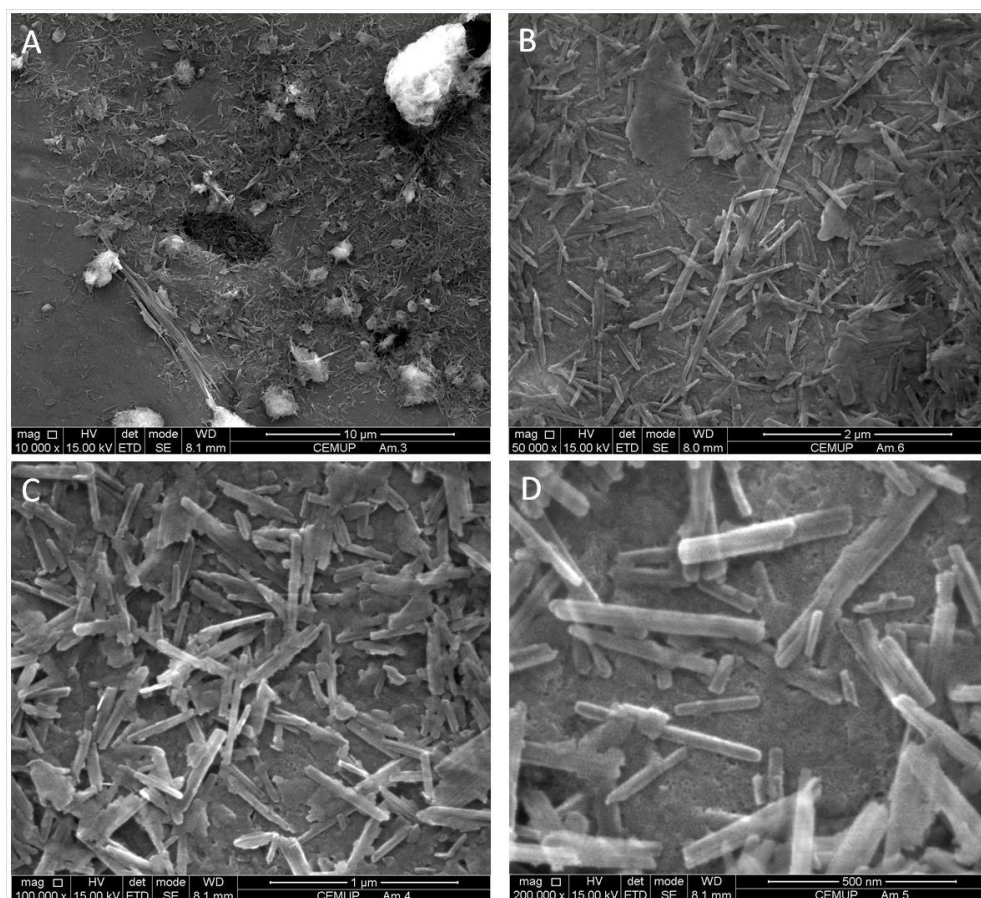


Fig. 6. Fotografias retiradas em MEV, onde se torna evidente o hábito fibroso das partículas. A - amostra Pt <63 µm; B - amostra Pt <2µm; C - amostra Pi <2 µm; D - amostra Pb <2 µm.

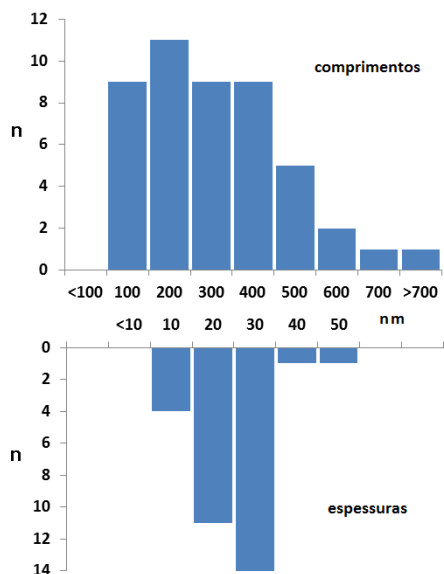


Fig. 7. Distribuição dos comprimentos e espessuras de fibras de paligorsquite medidas no MEV.

5.5. Propriedades tecnológicas

Na tabela 4 encontra-se indicado um conjunto de propriedades selecionadas que caracterizam a paligorsquite do ponto de vista tecnológico.

Os resultados mostram as diferenças marcantes entre as propriedades das frações <63 μm e <2 μm sobretudo em termos de abrasividade e de absorção de óleo e de água. A presença de quartzo constitui uma limitação clara do depósito em estudo o qual é responsável por maior abrasividade e menores valores de absorção de óleo e de água. Por outro lado, no que se refere à capacidade de troca catiónica, verifica-se uma tendência para aumentar à medida que se sobe na escala estratigráfica, se bem que, com exceção da amostra *Pi*, não se note a influência da fração granulométrica, como seria de esperar. De facto, entre as frações granulométricas <63 μm e <2 μm , não se detetam diferenças marcantes à exceção da amostra *Pi*, o que

poderá relacionar-se com os baixos valores daquela propriedade por comparação com os valores considerados habituais para a paligorsquite, que variam entre 20 meq e 50 meq por 100 g (VELHO, 2005).

6. DISCUSSÃO

6.1. Análise tecnológica

Os resultados de DRX traduzem uma diminuição do teor em paligorsquite da base para o topo em ambas as frações bem como um aumento do teor em quartzo e em caulinite. A mineralogia da fração <2 μm é favorável à utilização da argila na maioria das aplicações, mas o mesmo não se passa na fração <63 μm devido aos teores de quartzo elevados.

Os teores em MgO diminuem da base para o topo em consonância com a diminuição do teor em paligorsquite, no entanto as mesmas análises mostram uma tendência na

diminuição do teor em sílica da base para o topo facto que não se coaduna com o aumento do teor em quartzo no sentido ascendente. Esta discrepância deverá ser resolvida com o aumento do número de amostras analisadas.

Os resultados preliminares até agora obtidos mostram que o principal contaminante da paligorsquite é o quartzo que a acompanha até à fração argilosa ($<2\ \mu\text{m}$) se bem que aqui em quantidade diminuta. O quartzo é responsável por retirar à paligorsquite características como a capacidade de troca catiónica e propriedades de absorção, dois atributos muito importantes em termos de potencial de aplicações.

Apesar da presença ubíqua de quartzo, os dados obtidos a partir dos ensaios de absorção de água e de óleo são favoráveis e assemelham-se com os requisitos para as aplicações típicas da paligorsquite (HARBEN, 2002; LUZ, 2008). Os dados de abrasividade correspondentes à fração $<2\ \mu\text{m}$, para todas as amostras, são positivos e refletem a diminuição do teor em quartzo, no entanto, para a fração $<63\ \mu\text{m}$ os dados de abrasividade são elevados e constituem uma limitação do depósito de paligorsquite.

No entanto os valores da capacidade de troca catiónica são insuficientes, devendo ser melhorados, tendo em vista o uso industrial desta matéria-prima. Para tal será decisivo diminuir fortemente o teor em quartzo através de processos de beneficiação como o hidrociclone juntamente com a peneiração e ativar as amostras de paligorsquite com ácido. Ensaios de ativação ácida recentemente realizados (ALVES, 2013; VELHO et al., 2014) sobre amostras do mesmo material, mostraram um aumento significativo da capacidade de absorção, e ao mesmo tempo tornaram o material mais claro

6.2. Análise sobre a génese

Observa-se frequentemente nos sedimentos onde a paligorsquite ocorre, a existência conjunta de esmectite, para além de ilite, ocasionalmente sepiolite e em alguns casos, de caulinite. A formação da paligorsquite é atribuída a neoformação ou a transformação a partir de outro mineral (em geral esmectite), requerendo um meio aquoso com $\text{pH} < 8,5$, baixa pressão de CO_2 e salinidade alcalina moderada.

Em termos gerais, os principais fatores que influenciam a ocorrência de paligorsquite são (JONES E CONKO, 2011): 1- Material de origem: rochas graníticas a ultramáficas, bem como sedimentos lacustres; 2- Clima: árido a semiárido, com chuvas restritas, dependendo das temperaturas regionais (temperado a quente); 3- Parâmetros físico-químicos: o pH ideal para a formação de paligorsquite é entre 6 e 8,5. Águas com $\text{pH} > 9,5$, elevada alcalinidade salina, elevada pressão em CO_2 e elevadas razões $(\text{Mg}+\text{Fe})/\text{Si}$ são fatores desfavoráveis à formação desta argila (GUGGENHEIM E KREKELER, 2011).

A montmorilonite é proposta como mineral aluminoso precursor. As reações em solução aquosa entre silicatos que contêm alumina, sílica e Mg^{2+} são uma condição importante na génese da paligorsquite (WEAVER e BECK, 1977; GALÁN e POZO, 2011). A velocidade da dissolução aquosa de uma fase precursora (por exemplo, esmectite) pode ser aumentada de modo a que a nova fase (paligorsquite) possa ser gerada em pouco tempo.

Em ambientes de sedimentação continental, a existência de um substrato lítico rico em magnésio, alumínio e silício é um fator favorável à formação de paligorsquite.

No entanto a entrada de sílica no sistema pode resultar de qualquer rocha magmática, metamórfica ou sedimentar, que possua o quimismo favorável. Neste aspeto, basaltos ou gabros olivínicos, dolomitos e argilitos esmectíticos constituem as rochas mais favoráveis a fornecerem o magnésio (em particular) para a formação de paligorsquite. Estratigraficamente o Cenozoico envolvente da região é caracterizado pela predominância de sedimentos siliciclásticos de ambientes fluviais em clima temperado. Alguns quilómetros a sudeste do depósito ocorrem dolomitos e calcários dolomíticos de idade jurássica. A presença de paligorsquite implica uma mudança nas características ambientais com aumento da temperatura e alcalinidade das águas, traduzida por um quimismo mais rico em alumínio e, sobretudo, em magnésio. Esta mudança climática durante o miocénico médio tem sido reportada a nível mundial traduzida por um aumento da aridez (MILLER e FAIRBANKS, 1983). Na área de Figueiró do Campo, REIS (1983) observou amostras com paligorsquite e esmectite para além de amostras com paligorsquite mas sem esmectite, bem como pequenas quantidades de caulinite na metade superior do corte analisado.

Nas amostras deste estudo detetou-se, para além da paligorsquite, pequenas quantidades de caulinite (em algumas amostras) mas não se observou esmectite.

7. CONCLUSÕES

Dos estudos realizados até ao momento podemos concluir o seguinte:

1. Mineralogicamente, os principais aspetos a referir são a presença contínua de quartzo e de paligorsquite da base ao topo do depósito. O quartzo

é responsável pelo menor desempenho ao nível da absorção e de capacidade de troca catiónica. A presença do contaminante ferro é responsável pela coloração amarelada de parte do depósito.

2. A qualidade geral do litótipo obriga à necessidade de processos de beneficiação para a remoção de parte do quartzo, principal contaminante, através, por exemplo do uso de um hidrociclone, juntamente com peneiração, seguida de ativação com ácido de modo a incrementar as propriedades de absorção e de capacidade de troca catiónica.
3. O estudo confirmou o potencial industrial do depósito, após beneficiação, pelo menos nas aplicações tradicionais, aproveitando as suas características absorventes.
4. O mecanismo genético responsável pela formação de paligorsquite envolve uma mudança radical no ambiente caracterizado por condições mais alcalinas, com pH mais elevado, traduzido por um ambiente quente e seco favorável à presença de águas com elevado teor em magnésio, silício, alumínio e ferro.

REFERÊNCIAS

- ALVES, W., 2013. Caracterização da paligorsquite de Figueiró do Campo. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- CUNHA, P. P. e REIS, R. P., 1989. Principais ocorrências de paligorsquite, em depósitos de idade cretácica superior e terciária, em Portugal Central. 1º Reunião Luso-Espanhola de Argilas, p 22.
- CUNHA P. P, REIS R. P., 1992. Establishment of unconformity-bounded sequences in the Cenozoic record of the western Iberian margin and synthesis of

- the tectonic and sedimentary evolution in central Portugal during Neogene. Abstracts of the First Congress RCANS, Lisboa, pp 33–35.
- DIAS, I., 1998. Caracterização Mineralógica e Tecnológica de Argilas Especiais de Bacias Terciárias Portuguesas. Tese de doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- GALÁN, E. e POZO, M., 2011. Palygorskite and sepiolite deposits in continental environments. Description, genetic patterns and sedimentary settings. Em *Developments in Palygorskite-Sepiolite Research: A New Outlook on These Nanomaterials*, E. Galán, A. Singer (editores), Elsevier. *Developments of Clay Science*. p. 125-166.
- GALOPIM DE CARVALHO, A., 1968. Contribuição para o Conhecimento Geológico da Bacia Terciária do Tejo. Serviços Geológicos de Portugal, Memória nº15 (Nova Série), Lisboa, 210p.
- GUGGENHEIM, S. e KREKELER, M., 2011. The structure and microtextures of the palygorskite-sepiolite group minerals. *Developments in palygorskite-sepiolite research. A new outlook on these nanomaterials*. Editado por Galan, E. e Singer, A. (editores). Elsevier. *Developments in Clay Science* 3, pp. 3-65.
- HARBEN, P., 2002. The industrial minerals Handybook: A guide to markets, specifications and prices. 4th edition. Metal Bulletin plc, London.
- HEIVILIN., H. M., 1994. *Hormites: Palygorskite (Atapulgitite) and Sepiolite, in Industrial minerals and rocks*, Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration. p. 249-254.
- JONES, B. e CONKO, K., 2011. Environmental influences on the occurrences of sepiolite and palygorskite: A brief review. Em *Developments in Palygorskite-Sepiolite Research: A New Outlook on These Nanomaterials*, E. Galán, A. Singer (editores). Elsevier. *Developments of Clay Science*. p. 69-81.
- LUZ, A. e ALMEIDA, S., 2008. Argila - Atapulgitite e Sepiolite. Em *Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações. Parte 2 - Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações*. CETEM Rio de Janeiro, p. 223-238.
- MILLER, K. e FAIRBANKS, R., 1983. Evidence for Oligocene-Middle Miocene abyssal circulation changes in the western North Atlantic. *Nature*, 306 (5940), p. 250-253.
- PAIS, J., CUNHA, P. P., LEGOINHA, P., 2010. Litostratigrafia do Cenozóico de Portugal. Em Neiva, J.M. et al., (Editores). *Ciências Geológicas e Investigação*. V. I, 365-376.
- REIS, R. P., 1983. A sedimentologia de depósitos continentais. Dois exemplos do Cretácico Superior-Miocénico de Portugal. Tese de doutoramento. Universidade de Coimbra.
- VELHO, J., 2005. Mineralogia Industrial. Princípios e Aplicações. Edições Lidel, Lisboa, 600 p.
- VELHO, J., MOURA, A. e ALVES, W., 2014. Activação ácida em sedimentos palygorskíticos da região de Soure. (trabalho submetido a congresso).
- WEAVER, C., e BECK, K., 1977. Miocene of the S.E. United States: a model for chemical sedimentation in a perimarine environment. *Development in Sedimentology*, 22: p. 234.

Indicios de pastoreo extensivo en el noroeste peninsular durante el dominio suevo

PÉREZ-RAMA, M.¹, VAQUEIRO RODRÍGUEZ, M.^{1, 2} y GRANDAL-D'ANGLADE, A.^{1, 2 *3}

(1) Instituto Universitario de Xeoloxía “Isidro Parga Pondal”. Universidade da Coruña. 15071 A Coruña.

(2) Clube de Espeleoloxía A Trapa (CETRA).

* aurora.grandal@udc.es

Resumen:

Las condiciones edáficas de Galicia (NW de España), debido al sustrato ácido predominante, dificultan la conservación de los restos arqueozoológicos asociados a los asentamientos humanos. En estos casos, la búsqueda en zonas alternativas, como cuevas y trampas naturales en las zonas de pastoreo, puede aportar información sobre los recursos animales disponibles.

Se presenta aquí un estudio de los restos de ganado vacuno doméstico encontrados en Cova da Tara o Tara da Triega (Serra do Courel, Lugo). Con una edad de alrededor de 1500 años, los huesos corresponderían a la época de la dominación sueva del Noroeste peninsular. Estos animales habrían llegado vivos a la cueva, de donde se deduce que deambulaban libremente en los alrededores, lo que señala un tipo de pastoreo extensivo. El desgaste dentario y el estudio de isótopos estables en el colágeno óseo reflejan una alimentación poco abrasiva, probablemente arbustiva, concordando con la de zonas de montaña. La talla media calculada para estos animales es pequeña, similar a la descrita para ganado vacuno prerromano.

Palabras clave: Manejo de ganado, Alta Edad Media, Galicia, isótopos estables, desgaste dental.

Abstract:

The soil conditions in Galicia (NW of Spain), due to the predominant acid substrate, makes difficult the conservation of archaeozoological remains associated with human settlements. In these cases, the search for alternative areas, such as caves and natural traps in pasturelands, can provide information on the animal resources available.

We present here a study about domestic cattle remains found in Cova da Tara or Tara da Triega (Serra do Courel, Lugo), with an age of about 1500 years BP. The bone remains were laid at the time of the Swabian domination of peninsular northwest. These animals would come alive to the cave, from which it follows that roamed freely around, indicating an extensive livestock management. The tooth wear and the study of stable isotopes in bone collagen reflect a little abrasive diet, probably shrub, matching the vegetation of mountain areas. The average height calculated for these animals is small, similar to that described for pre-Roman cattle.

Keywords: livestock management, High Middle Ages, Galicia, stable isotopes, dental wear.

1. INTRODUCCIÓN.

Ya sea centrándose en los restos descartados del consumo y preparación de alimentos, animales empleados para el trabajo y como compañía, o señales de prácticas religiosas y funerarias, la mayoría de estudios zooarqueológicos suelen estar asociados a lugares de asentamiento, industria o enterramiento humanos. En Galicia, el tipo de geología existente en la mayor parte de su territorio, en la que el alto pH favorece una rápida destrucción de los restos orgánicos (Grandal d'Anglade *et al.*, 1997), representa una dificultad para la obtención de restos animales en este tipo de contextos arqueológicos. Sin embargo, la zooarqueología es un necesario complemento a otro tipo de aproximaciones al estudio del pasado de los seres humanos, permitiendo una mejor comprensión de su economía, hábitos, intereses y recursos disponibles, siendo estos estudios fundamentales para comprender la historia de los animales domésticos, y cómo ha variado tanto su morfología como su función a lo largo del tiempo.

En las zonas kársticas de Galicia, hasta no hace mucho e incluso hoy en día de forma ocasional, las cuevas se han usado como refugios improvisados, almacenes o lugares de eliminación de desperdicios, incluyendo animales débiles o enfermos. Alejadas a veces kilómetros de las viviendas más cercanas, estas formaciones naturales son sin embargo conocidas y utilizadas por la gente de la región. Esto no representa ninguna contradicción ya que en un entorno rural, incluso antes del uso generalizado de transportes motorizados, las personas aprovechaban recursos de una zona relativamente amplia, y no tan sólo los lugares inmediatamente adyacentes a sus viviendas:

los bosques eran una fuente de madera, caza y ciertos alimentos como las castañas o las bellotas y las zonas de pastoreo y las tierras de labor no siempre están en los mismos terrenos que las viviendas. La actividad que se produce en estas zonas, alejadas de estructuras humanas, no suele ser objeto de estudio de la arqueología, ya que las señales que podrían dejar, como por ejemplo los cambios en la vegetación y el suelo debido a talas, desbroces o actividad de rebaños de animales, senderos de acceso abiertos o incluso ciertos tipos de delimitaciones, como la plantación de hileras de árboles y arbustos, suelen desaparecer, o hacerse mucho más difíciles de detectar su presencia con el paso del tiempo. Sin embargo, eso no significa que todas las huellas hayan desaparecido. El interior de las cuevas, por su ambiente estable que facilita la conservación de los restos, y su disponibilidad para haber sido usadas como refugio temporal, puede aportar información complementaria a la disponible en otros tipos de yacimientos más tradicionales.

Los materiales aquí tratados se corresponden con restos animales recogidos en Cova da Tara, en la Serra do Courel (Figura 1), un sistema glaciar cuaternario fósil que coincide con una zona cárstica. En O Courel se pueden encontrar las huellas de un glaciario de tipo alpino ocurrido durante la última fase glaciar pleistocena, que cubrió la zona con un casquete de unos 65 km² (Vidal Romaní *et al.*, 1992). Durante los momentos de glaciario la entrada de la cueva se situaba por debajo del nivel de los hielos, por lo que el acceso a la cueva sólo pudo producirse una vez que las condiciones climáticas fueran favorables, imponiendo una restricción temporal a los restos que allí se encuentran.

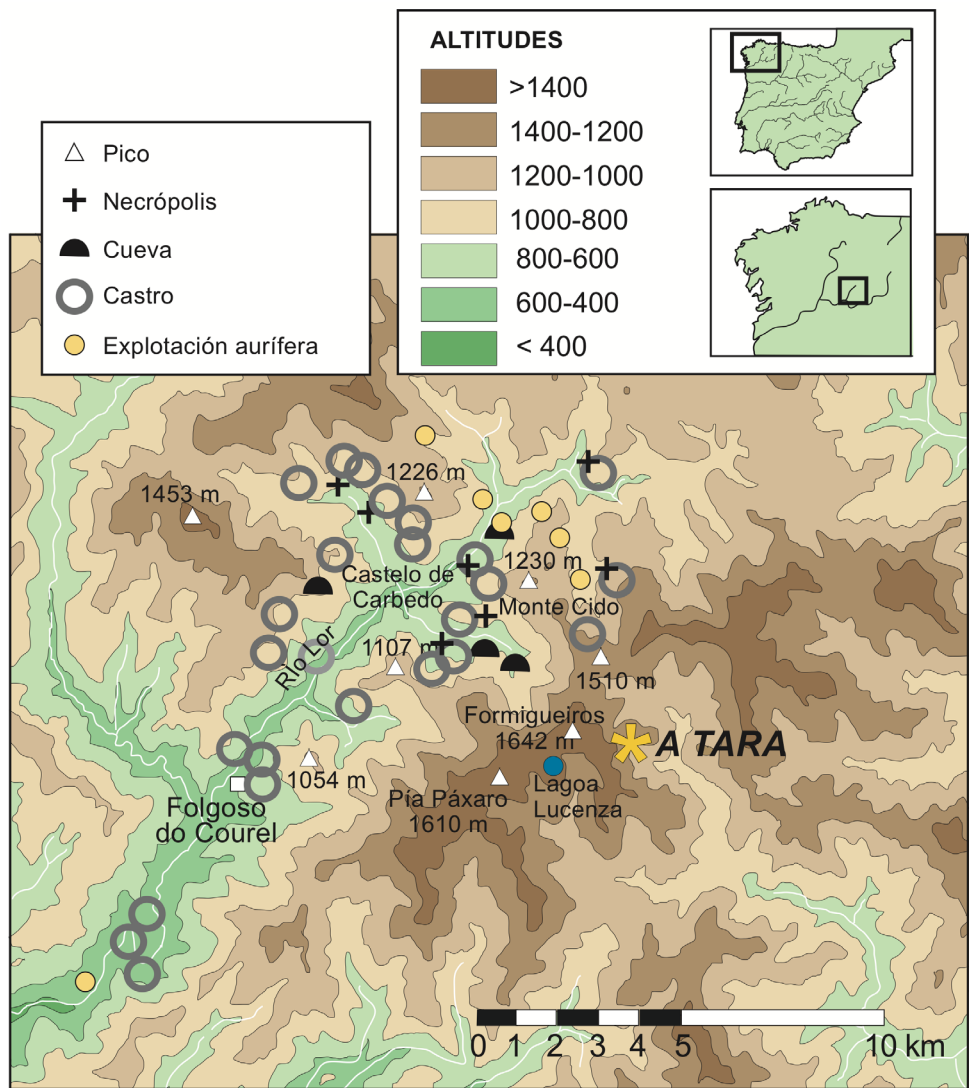


Fig. 1. Localización de la cueva de A Tara, y principales yacimientos arqueológicos descritos en las inmediaciones.

Si bien no hay restos de edificaciones de épocas medieval, romanas o castreñas en el entorno inmediato de la cueva, ni se han encontrado útiles o restos de origen humano en su interior, sí existen abundancia de construcciones arquitectónicas y restos arqueológicos de estas épocas en las zonas cercanas (Luzón Nogué *et al.*, 1980). Tomando tan sólo un radio de 10 km alrededor de la cueva, podemos encontrar el Castillo medieval de Carbedo, construido probablemente sobre el asentamiento de un antiguo castro, el Monte Cido, en cuya necrópolis se encontraron una tabla de hospitalidad del año 28 dC y un águila romana de bronce, así como un buen número de castros y lugares de explotación aurífera, junto con señales del trazado de antiguas vías de comunicación que unían entre sí las poblaciones y los lugares de extracción de mineral. Los trabajos de intensa explotación aurífera llevados a cabo por los romanos, según Luzón Nogué *et al.* (1980), habrían provocado la movilización hacia la zona de un gran número de personas, que probablemente aprovecharían los asentamientos castreños. Existen indicios aún más antiguos de presencia humana en la zona. En otra cueva próxima, A Cova do Oso, se encontraron restos de cerámica

que fueron datados, debido a su estilo, entre el principio de la Edad de Bronce y principios de la del Hierro (Luzón Nogué *et al.*, 1980). No es aventurado, entonces, suponer la existencia de poblaciones relativamente cercanas a la cueva entre la época romana y medieval, pudiendo haber sido la zona visitada, bien fuera de manera regular u ocasional, incluso no existiendo asentamientos humanos asociados directamente a la cueva. Sin olvidar además, que la llegada de los suevos no significó el abandono de los castros, que siguieron teniendo actividad durante esa época (Díaz Martínez, 1983),

La entrada de la cueva está constituida por una estrecha abertura en el suelo en forma de embudo (Figura 2), que conecta con una galería descendiente en rampa de pendiente media -47° . Aproximadamente a -14 m de profundidad termina en una serie de escalones abruptos hasta alcanzar la entrada de la sala principal, que se desarrolla entre los -26 y los -37 m de profundidad, por lo que es necesario ayudarse de material de progresión vertical (posicionamiento y acceso mediante técnicas de cuerda) para poder superar con seguridad estos desniveles, en los que la arcilla, húmeda y resbaladiza, dificulta encontrar asidero.

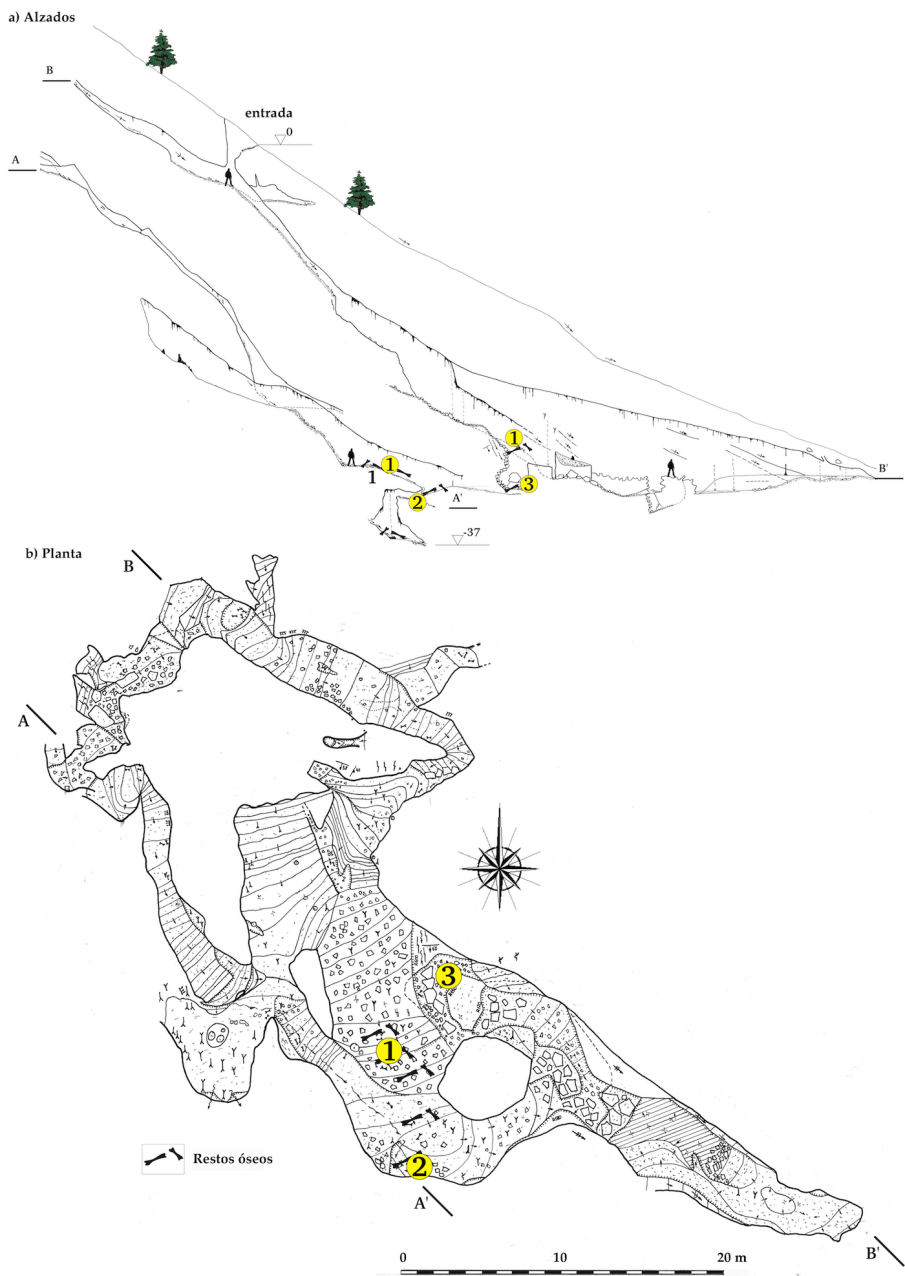


Fig. 2. Topografía (a) y perfil (b) de Cova da Tara. Los números señalan las zonas donde se recogió material. Cartografía elaborada sobre la topografía base incluida en Vaqueiro (2007).

Las dimensiones de la boca, que queda fácilmente oculta por la nieve (Figura 3a), y la topografía en rampa-pozo, hacen que la cueva funcionase como trampa natural.

Animales en busca de refugio o que cayesen a través de la entrada en situaciones de baja visibilidad, como las que podría provocar la lluvia o la nieve, descenderían prácticamente en caída libre hasta los -26 m, donde, además de sufrir las consecuentes lesiones, encontrarían grandes dificultades en subir de nuevo a la superficie por sus propios medios, mientras que, una vez dentro, si optasen por vagabundear en busca de otra salida, la

falta de luz y la topografía de la cueva les haría difícil orientarse.

Los efectos de la gravedad tienen gran importancia en la cueva. En las zonas de menor pendiente existen acumulaciones de cantos (Figura 3b), resultados de procesos de desprendimiento. Los restos óseos se han localizado en la zona baja de la sala principal, o al pie de los distintos escarpes en los que se configura la sala. Algunos huesos están cubiertos por los cantos y posiblemente se habrían desplazado con los materiales del depósito durante su caída (Figura 3c). Sin embargo, también se han encontrado esqueletos en posición original.



Fig. 3. Vista del exterior de la entrada a la cueva durante el invierno (a) e interior de Cova da Tara (b), mostrando la fuerte pendiente con rocas procedentes de desprendimientos y la forma de acumulación de ese material. Detalle de resto óseo in situ (c). Fotografías: M. Vaqueiro.

2. MATERIAL Y MÉTODOS.

En la topografía de la cueva (Figura 2) se señalan las zonas de trabajo con presencia de restos óseos. Los restos tratados aquí se extrajeron de las zonas señaladas como 1 y 2. También se recuperaron restos en la zona 3.

Excepto una hemimandíbula de lagomorfo, todos los materiales identificados en las zonas señaladas corresponden a artiodáctilos, en la mayoría pertenecientes a especies domésticas, en concreto, vaca (*Bos taurus* L.) y ovicaprino, aunque también fueron recuperados algunos fragmentos óseos de ciervo (*Cervus elaphus* L.). Asociados a las zonas de trabajo no se encontraron restos de depredadores o animales carroñeros u omnívoros, como podrían ser perros o lobos, aunque existiesen poblaciones de estos animales en la zona. En la cueva sí se encontró un único hueso de oso pardo (*Ursus arctos* L.), aunque no estaba asociado a las zonas indicadas, habiéndose datado en 2535 ± 40 años BP (García-Vázquez *et al.*, 2011), por lo que su cronología, como se verá más adelante, es anterior a los animales domésticos aquí tratados.

Los restos de ganado bovino y ciervo fueron recuperados en su mayoría en la zona 1, aunque algunos de ellos estaban en el punto 2, al que habían llegado rodando junto con rocas y otros sedimentos. La zona 3 indica un segundo punto de recogida de restos, en la que se recuperaron varios restos de ovicápridos. Otros restos puntuales de ovicápridos fueron recogidos en otras zonas de la cueva. Al no disponer de datación para estas especies, no se incluyen en este trabajo.

Cova da Tara presenta una morfología que impide llevar a cabo la recolección de muestras en condiciones óptimas, ya que no se pudo disponer una cuadrícula y

establecer divisiones por cuadrantes. Así mismo, debido a la pendiente y estrechez de la galería de acceso en la actualidad y lo escarpado del terreno en ciertos puntos, es difícil extraer las muestras y llevarlas al exterior, por lo que se produjeron algunas fracturas en el material durante el proceso. La recolección no fue exhaustiva, limitándose la recuperación de restos en superficie, sin remoción de sedimentos.

La toma de medidas de los restos se realizó según el protocolo de Von Den Driesch (1976), utilizando calibres electrónicos de precisión 0,01 mm, excepto en el caso de las longitudes máximas de los huesos largos, para lo que se usó un tablero osteométrico de precisión 0,5 mm.

Los restos identificados que estaban en un mejor estado de conservación permitieron realizar el cálculo de la altura del animal siguiendo los Factores de Fock y Matolcsi, en el caso de los bóvidos (según aparecen reflejados en Altuna, 1980).

Nueve restos de costilla de vaca doméstica fueron analizados para obtener el valor isotópico de carbono y nitrógeno en colágeno óseo. La extracción de colágeno se realizó en el Instituto Universitario de Xeoloxía de la UDC siguiendo el método de Bocherens *et al.*, (1997). La limpieza de la muestra se realizó en baños repetidos en acetona y agua destilada en cubeta de ultrasonidos, empleándose posteriormente HCl sobre la muestra ya reducida a polvo para eliminar el carbono inorgánico y NaOH para evitar las posibles contaminaciones de ácidos orgánicos. El colágeno extraído, tras permanecer la muestra en HCl 0,01 M a 100° durante 17 horas, fue liofilizado, realizándose su determinación isotópica en los Servicios de Apoyo a la Investigación de la UDC. Los valores isotópicos obtenidos se expresan

según la notación delta (δ), que indica la desviación con respecto a un estándar en la proporción entre isótopo pesado y ligero. Los estándares utilizados fueron los habituales: la caliza PDB para el carbono y el Nitrógeno atmosférico para el nitrógeno.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Estudio faunístico.

En la zona 1 y 2 se recuperaron un total de 429 fragmentos, que, una vez reconstruidos

arrojan un total de 260 restos de *Bos taurus*, 5 de otras especies, y 151 fragmentos no identificables. Los restos óseos de *Bos taurus* se relacionan en la tabla 1. Se excluyen del listado las piezas pertenecientes a otras especies: una hemimandíbula de lagomorfo (*Oryctolagus cuniculus*), un escafocuboide de ovicáprido fusionado con un gran cuneiforme, fusión que quizás se debiera a algún proceso patológico, y tres piezas pertenecientes a ciervo (*Cervus elaphus*): un fragmento de asta, una primera falange y un fragmento de pelvis.

Cráneo	36	Dentición:	
Mandíbula	7	INFERIOR	
		Incisivos	4
Vértebra:		Segundo Premolar	2
Axis	2	Tercer Premolar	2
V. Cervicales	9	Primer Molar	3
V. Torácicas	13	Segundo Molar	2
V. Lumbares	3	Tercer Molar	3
V. Caudales	1	SUPERIOR	
Indeterminables	21	Segundo Premolar	1
		Tercer Premolar	2
Costillas	80	Cuarto Premolar	3
		Primer Molar	3
		Segundo Molar	3
		Tercer Molar	3
Escápula	5	Pelvis	6
Húmero	5	Fémur	3
Ulna	4	Rótula	4
Radio	4	Tibia	4
Carpó:		Tarso:	
Piramidal	1	Astrágalo	2

Cabezo-trapezoidal	2	Calcáneo	2
Ganchudo	1	Escafo-cuboides	2
		Gran Cuneiforme	1
Metacarpo	2	Metatarso	2
Falanges:			
Falange 1^a	4		
Falange 2^a	2		
Falange 3^a	1		
Total : 260			

Tabla 1. Número de restos de *Bos taurus* encontrados en las zonas 1 y 2

De los materiales recuperados en la zona 1 y 2, la ulna de *Bos taurus* CT-304 fue datada mediante el método AMS¹⁴C, que ofrece la ventaja de permitir obtener la datación a partir de muestras muy pequeñas. La datación fue realizada en el Tandem Laboratoire de la Universidad de Uppsala, asignándosele el número de análisis Ua-24251. Los resultados arrojaron una edad de 1600 ± 40 años BP. La edad calibrada es de 1488 ± 52 Cal BP (Fairbanks *et al.*, 2005), que la sitúan entre los años 410 y 585 dC, coincidiendo con el Reino Suevo en Galicia.

3.2. Consideraciones tafonómicas.

Aunque se ha datado directamente una de las piezas encontradas, debido a que existen distintas zonas de acumulación de los restos y no pudiendo reconocerse estratos de deposición de sedimentos, no es posible establecer una relación cronológica entre la fauna presente en toda la cueva, por lo que no es posible conocer la cronología de toda la fauna. Mientras que en la zona 2, debido a la pendiente y configuración, se encuentran huesos arrastrados desde puntos situados más arriba, y restos del mismo

animal pueden encontrarse repartidos entre la zona 1 y 2, no ocurre lo mismo con la zona 3, donde la dinámica natural de la cueva habría transportado los restos óseos a otras zonas sin que haya relación entre la acumulación entre las zonas 1 y 2 y los restos obtenidos en el punto 3. Por ello los restos óseos de la zona 3, pertenecientes todos ellos a ovicápridos, no se incluyen en este estudio.

La tabla 1 refleja el número de restos óseos de *Bos taurus*, pero teniendo en cuenta las condiciones de la cueva, es de destacar que ciertos factores influirían en las diferencias entre el número de restos recuperados respecto a los depositado inicialmente. Aunque hay muchas piezas relativamente bien conservadas, los desprendimientos de rocas provocan la fragmentación (y en algunos casos, aplastamiento) de los restos, lo que origina una sobrerrepresentación de algunas partes del esqueleto. Aunque fue posible reconstruir los huesos largos, al menos en parte, los fragmentos de cráneo, costillas o vertebras presentaban más dificultades.

Al estudiar los restos de *Bos taurus* se llegó a la conclusión de que pertenecían únicamente a 2 individuos, en lugar de ser una acumulación de restos variados de in-

dividuos distintos. En primer lugar, aunque de cada parte esquelética concreta hay poca representación, se han recuperado fragmentos o huesos completos de casi todas las partes esqueléticas. La proporción en que se han encontrado es similar a la que existe en el esqueleto completo, y no parece haber habido ningún tipo de proceso de selección como el que podría producirse si los animales hubiesen sido consumidos por carnívoros o troceados por seres humanos (Figura 4). Por otra parte, aunque algunos de los huesos presentan marcas de roedores, no se han encontrado huellas antrópicas, como marcas de corte o quemado, ni tampoco señales dejadas por carnívoros. Algunos de los huesos, además, estaban en suficiente buen estado de conservación para que fuese posible incluso articular algunas de las extremidades de los animales. Aunque existió movimiento por gravedad de algunas de las piezas debido a la pendiente en la zona 1, los huesos desplazados por este motivo lo hicieron a lo largo de la pendiente hasta acumularse en la zona 2, de donde fueron recuperados, por lo que este

transporte no determinó una pérdida importante de restos. Las únicas desviaciones importantes del número de restos de bóvido recuperados y los esperables si los esqueletos estuvieran completos, corresponde a la sobrerrepresentación de restos de costillas y craneales, debido probablemente a su mayor grado de fragmentación, y la infrarrepresentación de vértebras (posiblemente por aplastamiento debido a la caída de bloques), algunos huesos del carpo y el tarso, así como de las falanges, los huesos más pequeños y periféricos del esqueleto, que pueden haberse perdido o no haber sido recuperados, al tratarse de una recogida superficial y no una excavación propiamente dicha. También es posible, sin embargo, que debido a que el espesor del hueso cortical es mucho menor que en los huesos largos, y a su tamaño, los huesos pequeños que sufrieran aplastamiento entre las rocas fueran completamente destruidos, o dejasen fragmentos demasiado pequeños para permitir la reconstrucción o incluso el reconocimiento de la parte esquelética a la que pertenecían.

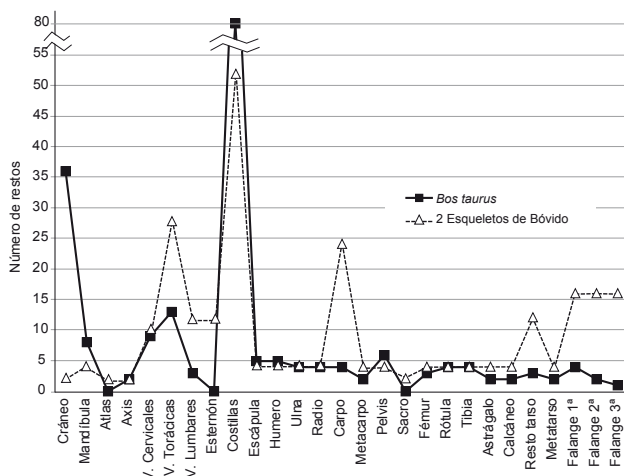


Fig. 4. Representación del número de restos hallados. Comparación con las piezas presentes en dos esqueletos de bóvido completos.

Por lo tanto, se calculó para el conjunto de las zonas 1 y 2 un NMI de 2 para *Bos taurus* y 1 para ovicáprido, liebre y ciervo. En el caso de la liebre y el ovicáprido de esa zona de la cueva, sólo fue encontrado un resto óseo de cada especie.

Todos estos datos parecen indicar que los animales que se encontraron llegaron al interior de la cueva accidentalmente, lo que vendría propiciado por la difícil topografía de la cueva, de la que ya se ha hablado con anterioridad, y que podría dar lugar a que animales que buscasen refugio hubiesen quedado atrapados. Si bien es cierto que podría tratarse de una zona utilizada para deshacerse de los cadáveres de animales muertos por causas naturales y, por tanto, descartados para el consumo, una función para la que incluso hoy en día no es demasiado extraño encontrar ejemplos en el lugar, destaca el hecho de que los restos fueran encontrados en partes de la cueva alejadas de la entrada, lo que implicaría recorrer un largo trecho desde la entrada, por terreno difícil, especialmente si no se cuenta con material de escalada y sin iluminación natural. Además, no hay que olvidar que la cueva se encuentra en una zona de gran pendiente y a unos 1025 metros de altitud sobre el nivel del mar. Todo ello sugiere más la caída accidental y deambulación de los animales en busca de una salida alternativa, que el transporte de cadáveres de animales.

3.3. Encuadre histórico de los animales.

A lo largo de la Historia, la talla de los animales domésticos ha ido variando en función a los intereses humanos y a las posibilidades reales de influir en ella mediante la selección para la reproducción de aquellos ejemplares que cumplieran con los criterios

requeridos. Esta variación en la morfología de los animales domésticos no sólo tiene interés en los estudios de las primeras fases de la domesticación; la selección de ciertas características durante la cría de animales depende de las necesidades e intereses de los criadores (carne, leche, trabajo, compañía, etc.), lo que a su vez es un indicio de la economía y tipo de sociedad de la época. En este sentido, las variaciones en la talla de los animales domésticos con el dominio romano y posteriormente con la declinación del Imperio (Fernández Rodríguez, 2003) corresponden con los cambios en la sociedad de la época.

Pocas fuentes históricas existen sobre los acontecimientos de este periodo, siendo la principal las Crónicas de Hidacio, por lo que aún existen muchos vacíos en nuestros conocimientos de este periodo. Durante la última época del Imperio, la presión señorial y los excesivos impuestos sobre el campesinado provocaron que al principio, en las capas más bajas de la población hubiese muchos que apoyasen la llegada de los invasores germanos, aunque fuese durante poco tiempo. Sin embargo, esta paz fue de corta duración siendo frecuentes posteriormente los saqueos y conflictos con la población, aunque los grandes terratenientes parecen haber sufrido menos en este sentido que el pueblo llano (Díaz Martínez, 1983).

La cronología de los restos estudiados sitúa el conjunto faunístico en los primeros decenios de la época sueva en Galicia. La influencia de estos pueblos bárbaros de gran tradición ganadera sobre el manejo de la cabaña local, o incluso la aportación de cabezas de ganado foráneas, pudo quedar reflejada en una diferencia en las tallas medias de las especies domésticas.

En el caso de los bóvidos de A Tara, debido a que no ha habido apenas transporte de los restos, fue posible reconstruir parte de los esqueletos de los animales, lo que permitió calcular la edad de los restos en base al análisis de sus dentaduras. Los dos bóvidos son animales con sus epífisis completamente soldadas y dentición definitiva completa, lo que nos permite suponer una edad superior a los tres años, probablemente cercana a los cinco

años en base al grado de desgaste del tercer molar inferior, lo que indica que habían pasado varios años desde que habían alcanzado su tamaño definitivo y la madurez sexual. Las medidas de todos los restos recuperados de bóvido se presentan en el Anexo. El tamaño calculado para los animales a partir de las piezas de las que se pudo obtener la longitud máxima puede verse en la Tabla 2.

Sigla	Pieza	individuo	edad	LM (mm)	Factor	Altura cruz (mm)
123-166-177-275	Metacarpo	Bos 1	>3 años	183,5	6,25	1146,88
13	Radio	Bos 1	>3 años	266,5	4,3	1145,95
220	Radio	Bos 2	>3 años	227,0	4,3	976,1

Tabla 2. Cálculo de la alzada de los bóvidos encontrados. Las piezas con varios números de identificación corresponden a huesos que fueron reconstruidos tras el siglado de sus fragmentos.

Podemos comparar los datos anteriores con los encontrados por Fernández Rodríguez (2003) para la cabaña ganadera del Noroeste Peninsular (Tabla 3 y Figura 5).

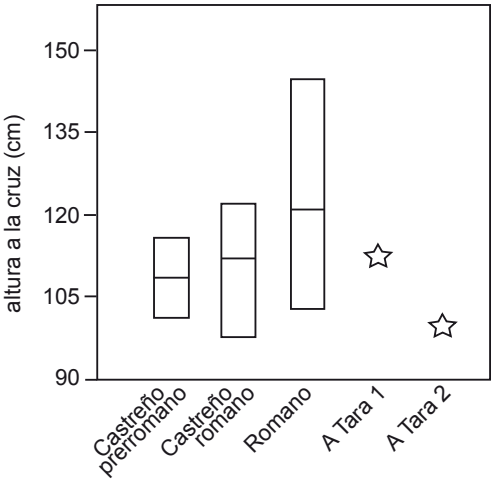


Fig. 5. Comparación de las alzadas de ganado vacuno tardohistórico del noroeste peninsular, según Fernández Rodríguez (2003), con la de los individuos de A Tara. Medidas en cm.

	Castreño Prerromano		Castreño Romano		Romano	
Especie	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
<i>Bos taurus</i>	101,3-115,8	108,5	97,4-122,0	112,7	102,6-144,6	120,6
<i>Ovis aries</i>	45,3-59,6	49,8	47,9-62,3	53,4	53,6-73,9	62,2
<i>Capra hircus</i>			64,4		55,7-68,9	63,4

Tabla 3. Alzada de los animales domésticos del noroeste peninsular según Fernández Rodríguez (2003). Medidas en cm.

Las dos medidas obtenidas para el individuo 1 son coincidentes e indican una alzada en la cruz de unos 114,6 cm. La única medida para el individuo 2 da una alzada menor, de aproximadamente 97,6 cm. Ambos están por debajo de la media de *Bos taurus* para la Galicia romana, estando el individuo 2 en el límite inferior de tamaño para cualquiera de las épocas.

La introducción de animales de mayor talla explicaría el aumento de la talla media en las cabañas ganaderas en Europa a lo largo de la ocupación romana, con respecto a épocas posteriores, aunque estas mejoras no se dieron en todas las poblaciones al mismo tiempo, ni la evolución posterior fue la misma, manteniéndose o aumentando en algunos casos las tallas medias, mientras que en otras zonas las tallas disminuyeron hacia el final del Imperio Romano (Albarella *et al.*, 2008, Armitage 1982, Teichert, 1984). En *Bos taurus* de Galicia la talla media y la máxima aumentó apreciablemente con la romanización, aunque no hay grandes diferencias en las tallas mínimas (Fernández Rodríguez, 2003). Teniendo esto en cuenta, no es extraño que los bovinos encontrados en Cova da Tara sean de tamaño similar a los provenientes de asentamientos castreños y romanos, o incluso a los de

épocas prerromanas, a pesar de pertenecer a un periodo posterior. También es posible que no todas las poblaciones domésticas fueran sometidas a los mismos esfuerzos de mejora. Si tenemos en cuenta que a pesar del aumento de la media y las tallas máximas, las tallas mínimas no aumentaron, esto podría deberse a que aunque se introdujeron animales de mayor talla, la cabaña ganadera local, de menor tamaño, no tuvo necesariamente que ser sustituida por completo durante la romanización, o todas las poblaciones sometidas a cruces. Incluso es posible que en algunas zonas los animales importados tuviesen dificultades para adaptarse al clima y las condiciones de vida, por lo que en ciertas condiciones los animales locales podrían haber presentado menores exigencias en cuanto a su alimentación y cuidados, y haber sido preferidos por sus facilidades de mantenimiento. Sin embargo, datos de yacimientos de la Alta Edad Media del País Vasco (Grau Sologestoa, 2009; Escribano Sanz, 2000) indican que, al menos en esas poblaciones, las tallas de los animales domésticos disminuyeron tras el fin del Imperio.

Los dos ejemplares de *Bos taurus* recuperados son de edad relativamente

avanzada, habiendo ya sobrepasado la edad a la que se alcanza el crecimiento máximo. Hubiese sido más económico su sacrificio si su único interés fuera la carne. El que los animales siguieran vivos puede suponer que se trataba de animales destinados a la reproducción y cría o que también eran explotados de otras maneras, como la obtención de leche o la ayuda con el trabajo agrícola.

A pesar de que en los últimos siglos se han introducido muchas mejoras en la cría y selección de animales, alcanzando la mayoría de razas de animales domésticos tamaños muy superiores a los de las poblaciones durante el dominio romano, existen hoy en día en Galicia varias razas animales de tamaño relativamente pequeño, con valores de altura a la cruz próximos a los encontrados en animales de épocas prerromanas. En concreto, en cuanto a ganado vacuno destaca la vaca Cachena, que sobrevive aún hoy en día y es objeto de protección especial. Tiene una alzada de entre 100 y 130 cm para las hembras, y de entre 105 y 135 cm para los machos (Xunta de Galicia, 2000). Es una raza adaptada a zonas montañosas, y tradicionalmente explotada en régimen extensivo o semiextensivo, lo que podría explicar su pequeño tamaño, ya que al tener que explotar zonas más agrestes no pueden desarrollar un gran tamaño. La vaca Cachena es originaria de las regiones montañosas de Ourense; sin embargo a finales de los noventa su explotación se extendió a toda Galicia.

3.4. Aproximación a la dieta de los bóvidos de A Tara.

Las clasificaciones de dieta de una especie no son, en muchos casos, algo absoluto, y la dieta de una población concreta no sólo depende de qué tipo de alimentos sean los más adecuados, sino también de cuales tienen a su disposición. Así podemos encontrar poblaciones de especies generalmente clasificadas como ramoneadoras que adoptan una alimentación mixta o pastadora, o al contrario. La dentición de *Bos taurus* encontrada posee unas características de mesodesgaste que se encuentra en animales ramoneadores o de dieta mixta, pero es menos frecuente en los pastadores, aunque sí aparece en pastadores que recurren a vegetales con menor cantidad de fitolitos. Las cúspides de los molares superiores son altas y redondeadas o afiladas, como se muestra en la Figura 6, en lugar de romas y bajas, lo que indica una dieta con un bajo grado de abrasión (Fortelius y Solunias, 2000). Haynes (1984) encontró que las poblaciones de bisontes del Wood Buffalo National Park tenían un menor ritmo de desgaste en el primer molar mandibular, así como cúspides más altas y afiladas que aquellas de los bisontes de las llanuras, lo que atribuyó a que la dieta de los primeros estaba basada en plantas ciperáceas abundantes en aquella zona, con mucha menor cantidad de fitolitos que la hierba de las llanuras.

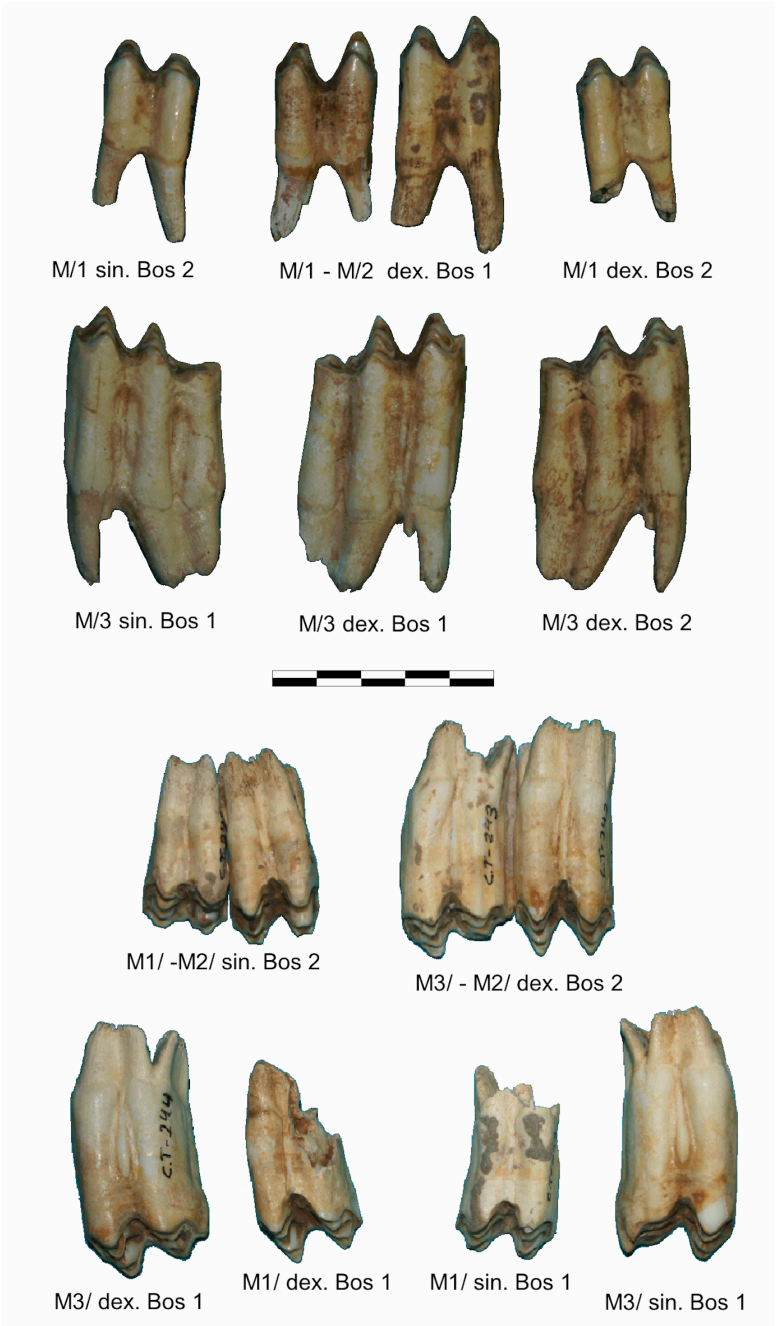


Fig. 6. Molares de bovino de A Tara, mostrando un grado escaso de mesodesgaste. Escala en cm.

Al haberse recuperado únicamente dos animales, no es posible realizar un análisis estadístico de la población. A pesar de eso, su perfil dental podría considerarse un indicio de que estos animales tenían un porcentaje importante en su dieta de alimentos poco abrasivos, como podrían ser hojas, helechos, hierbas jóvenes o arbustos, lo que concuerda con el tipo de alimentación que podrían tener animales no estabulados que pastasen libremente durante la mayor parte del día.

Los análisis de isótopos estables son una herramienta usada con frecuencia en una gran variedad de campos, como pueden ser fisiología, ecología, o paleontología, y cada vez más los análisis de isótopos estables de C y N en colágeno óseo se utilizan

en arqueología para ampliar el espectro de información que los restos humanos y animales pueden proporcionar. Los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ están relacionados con el tipo de dieta y hábitat, por lo que permiten conocer mejor la forma de vida de las comunidades analizadas (De Niro y Epstein, 1978, 1981; Bocherens y Fogel, 1995).

Los resultados isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$) de las muestras figuran en la tabla 4. Los criterios de calidad para el colágeno extraído se cumplen sobradamente en todos los casos, ya que los porcentajes de nitrógeno y carbono son similares a los del colágeno óseo fresco, al igual que la relación entre el carbono y el nitrógeno (C/N), comprendida entre 2,9 y 3,6, como en el colágeno actual (Grandal *et al.*, 2010).

Muestra	% N	Delta ^{15}N	%C	Delta ^{13}C	C/N
500	15,2	3,2	39,8	-21,5	3,1
501	14,7	3,3	39,3	-21,9	3,1
502	14,3	3,4	37,8	-21,9	3,1
504	15,2	3,8	40,7	-21,8	3,1
505	15,0	3,4	40,2	-21,6	3,1
506	14,7	3,7	38,6	-21,7	3,1
507	15,5	3,8	42,1	-21,9	3,2
508	13,5	3,5	36,4	-21,9	3,1
509	15,3	3,7	41,5	-22,1	3,2

Tabla 4. Resultados del análisis isotópico de los restos de *Bos taurus* de A Tara. % de C y N expresan el porcentaje de estos elementos en el colágeno óseo. Los valores de delta se expresan en ‰. C/N es la relación atómica entre ambos elementos en el colágeno analizado.

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos a partir de las muestras de bóvidos de A Tara se encuentran entre 21,4‰ y 22,1‰. Coinciden por tanto con los que se obtendrían de una dieta a partir de plantas C3, árboles y herbáceas de climas templados y fríos (con valores medios de $-26,5 \pm 2\text{‰}$, que se traducirían en el colágeno óseo de herbívoros en aproximadamente $-21,5\text{‰}$ debido al fraccionamiento isotópico que se produce

durante su asimilación). Puede descartarse la contribución a la dieta de plantas C4, herbáceas de climas tropicales como el maíz, la caña de azúcar o el mijo, con valores de $\delta^{13}\text{C}$ netamente más positivos (media de $-12,5 \pm 1\text{‰}$). El mijo es un cereal que aparece en el norte de la Península Ibérica en la transición del Bronce final a la Primera la Edad del Hierro (Vázquez Varela, 1993) pero su cultivo no fue frecuente en la Galicia romana

(Suárez Piñeiro, 2004) y aparece escasamente en los espectros polínicos gallegos de época castreña (Dopazo *et al.*, 1996). Apenas existen datos sobre la intensidad de su cultivo en la época que nos ocupa.

El $\delta^{15}\text{N}$ de las muestras varia entre 3,3‰ y 3,8‰, valores que, si los comparamos con los valores de *Bos taurus* tardorromano y altomedieval de Alemania (Hakenbeck *et al.*, 2010) se sitúan muy por debajo de la media (fig. 7).

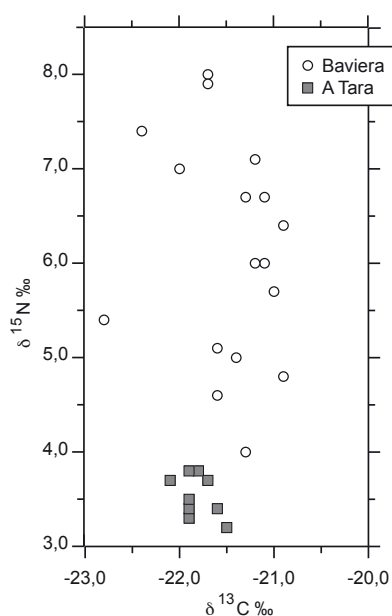


Fig. 7. Comparación de valores isotópicos de los bóvidos de A Tara con individuos centroeuropeos (Hakenbeck *et al.*, 2010) de cronología aproximadamente similar.

Hay varias posibles explicaciones para estos valores. Estudios sobre materiales actuales demuestran que los valores de $\delta^{15}\text{N}$ en suelos y plantas muestran un gradiente latitudinal y altitudinal que responde a las variaciones en el clima, debido al descenso de la actividad microbiana en los suelos de las zonas frías (Mariotti *et al.*, 1980; Amundson *et al.*, 2003). En hábitats alpinos, el $\delta^{15}\text{N}$ de ungulados modernos descende un 1,1‰ por cada 1000 metros de elevación sobre el nivel del mar (Mannel *et al.*, 2007). Las altitudes medias en la zona de A Tara, calculadas en un radio de unos 10 km, superan los 900 m sobre el nivel del mar. Si los bóvidos se mantuvieron

preferentemente en las zonas altas de la sierra, los valores isotópicos de las plantas de las que se alimentaban pueden haber sido apreciablemente bajos. Existe también un gradiente Norte-Sur para los valores isotópicos del N en los suelos y las plantas causado igualmente por la disminución de la actividad microbiana en climas fríos. Por ello, sería de esperar que los individuos de las poblaciones norteñas presentasen valores de $\delta^{15}\text{N}$ también bajos. Es probable que el gradiente latitudinal tenga una menor incidencia sobre los valores de partida de la dieta que la altitud de la zona, que en el caso de los individuos con los que se han comparado, es más baja (apenas alcanza

los 500 m sobre el nivel del mar en Baviera). Por último, el conjunto de ganado vacuno de Baviera procede de un contexto muy antropizado. Si los animales se alimentaron en zonas de pastos preparados al efecto, es posible que el suelo estuviera sometido a manejo y enriquecido con abonos orgánicos, lo que eleva considerablemente los valores isotópicos del nitrógeno en las plantas y a lo largo de toda la cadena trófica (Van Klinken *et al.*, 2000).

Por otra parte, las plantas fijadoras de N, como las leguminosas, presentan valores especialmente bajos en su $\delta^{15}\text{N}$ ya que lo obtienen directamente del aire a través de micorrizas simbioses (Hobbie *et al.*, 2000). Ericáceas, leguminosas y rosáceas son familias especialmente destacables en las zonas de matorral de O Courel. Existen 65 especies de leguminosas en esa región, siendo abundantes en las zonas altas de la sierra en formas arbustivas: retama (*Cytisus scoparius*), carquesa (*Pterospartum tridentatum*), codeso (*Adenocarpus complicatus*) o incluso el tojo (*Ulex* sp. y *Genista* sp.), que a pesar de sus espinas, es consumido por las vacas cuando sus brotes aún están tiernos, se emplea como forraje y constituye una parte importante de las zonas de matorral. Sus formaciones dominan el paisaje de ciertas áreas, y son preferibles como zonas de pastoreo a los brezales, formaciones de *Calluna* y *Erica*, ya que la presencia de taninos y la baja digestibilidad en estas especies las hacen poco adecuadas para la alimentación de ovejas y vacas (González Hernández y Silva Pando, 1999; González Hernández *et al.*, 2003).

Si tenemos en cuenta que su dentición parece indicar un tipo de dieta poco abrasiva, es posible que estos valores representen un cierto aporte de plantas fijadoras de N

(Virginia y Delwiche, 1982), tales como podrían ser la paja de leguminosas usada como forraje, el trébol en praderas o tojo y retama en las zonas de matorral. Incluso hoy en día se sigue manteniendo en algunas zonas el uso de las zonas de matorral como zonas de pasto para ganado, abundando los tojos y retama, fijadoras de nitrógeno y que son además empleadas como cama para el ganado (Xunta de Galicia 2005).

Hay que recordar que la zona de alta montaña gallega tiene unas características climáticas, geomorfológicas y de vegetación distintas de otras zonas de la Península Ibérica o incluso de las zonas bajas de Galicia, lo que influenciaría el modo de aprovechamiento local del territorio. Hoy en día en el Courel, dentro de las tierras de uso agrario, el principal uso es la ganadería. El espacio destinado a los forrajes, especialmente los forrajes verdes, incluyendo praderas, supera a cualquier otro tipo de cultivo (Xunta de Galicia, 2005).

La evolución de la vegetación en la zona durante el Holoceno es bien conocida gracias a los estudios polínicos realizados en la cercana laguna de Lucenza (ver Fig. 1). Las secuencias polínicas de la laguna de Lucenza muestran una disminución del polen arbóreo durante el periodo Atlántico (desde 2500 años BP hasta la actualidad) ligada a un incremento plantas herbáceas. Esta deforestación va unida también a una abundancia de microcarbones, lo que permite suponer una importante acción antrópica para aclarar la vegetación por medio de rozas. Este tipo de actividad frecuentemente se ha asociado con la expansión de la agricultura, pero también va ligada a la obtención de pastos para la ganadería (Ramil Rego, 1993a). Este podría ser el caso de O Courel ya que aquí no se

detecta la presencia de polen de cereales en el espectro polínico hasta aproximadamente 1500 años BP y con una representación muy escasa, inferior al 3% que se considera indicativo de actividades agrícolas en las inmediaciones (López Sáez, *et al.*, 2003). Otras secuencias provenientes de cotas más bajas de la geografía gallega muestran ya la presencia de cultivos de cereales, especialmente el trigo, desde varios milenios antes (Santos Fidalgo *et al.*, 1997, 2000; Ramil Rego, 1993b). En ningún caso los espectros polínicos de montaña en Galicia reflejan el cultivo de cereales a cotas altas (Ramil Rego, 1993a). Pero el espectro polínico tampoco señala la presencia importante de pastizales, ya que las especies marcadoras de pradera (López Sáez *et al.*, 2003) también están muy escasamente representadas en los niveles superiores de Lucenza (Santos *et al.*, 2000).

Mientras que las zonas más altas pudieron presentar dificultades para su uso como tierras de labor o praderío, eso no excluye un aprovechamiento de otros recursos, como la madera, las castañas o zona de alimentación de ganado.

Las zonas montañosas gallegas se han usado y aún lo hacen como zonas de pastoreo extensivo, con la presencia de rebaños mixtos en los que el ganado bovino comparte el espacio con ovejas y cabras, aprovechándose las distintas características de los animales para hacer un aprovechamiento más eficiente de los recursos de una misma área en montes gestionados de forma comunal.

La presencia de estos bóvidos en la cueva parece señalar que el uso de las tierras circundantes para ganadería extensiva también se realizó durante la época sueva, mientras que las características dentales y los valores isotópicos de colágeno sugieren

su pastoreo en zonas de matorral o en praderas abiertas con abundancia de trébol. Aunque la primera opción concuerda mejor con el entorno en el que fueron encontradas, no se puede descartar que tuviesen distintas zonas de pastoreo dependiendo de la época.

4. CONCLUSIONES.

Las características de la Cova da Tara hacen que haya sido a veces una trampa natural, habiendo caído en su interior tanto animales domésticos como salvajes. La gran pendiente existente en el interior impediría la salida de los animales por su propio pie y haría muy difícil rescatar a los animales atrapados. Esto hace que la cueva ofrezca en su interior una muestra de la fauna que frecuentaba la zona, incluyendo los animales domésticos. Este tipo de yacimiento puede ser de gran interés a la hora de complementar la información obtenida a partir de los restos animales encontrados en asentamientos humanos, especialmente en zonas como Galicia, en las que los restos óseos se degradan con rapidez debido a las características geológicas de la mayor parte del territorio.

Si bien durante la época romana se introdujeron animales de mayor tamaño, las tallas mínimas no variaron, y no parece haber una tendencia al aumento de las tallas de los animales domésticos durante la Alta Edad Media. Durante la época sueva los campesinos vivieron una difícil situación social, debido a los conflictos con los suevos y la presión de los impuestos, lo que podría haber impulsado a que intentasen maximizar el provecho obtenido de los recursos de los que ya disponían, teniendo poca capacidad para invertir en mejoras o arriesgarse con variedades ganaderas más delicadas cuando

las pérdidas, en caso de su muerte, serían difíciles de asumir. Incluso hoy en día varias de las razas de animales domésticos gallegos propios de zonas montañosas tienen un tamaño similar a los que se podrían encontrar en la época romana y prerromana, a pesar de que la mayoría de las razas de la península alcancen tamaños mucho mayores. Esto permite suponer que frente a un aumento de talla, a lo largo del tiempo, en ciertas zonas se prefirió seleccionar preferentemente otras características, como la capacidad de trabajo del ganado vacuno, la resistencia a condiciones climáticas duras o la capacidad de subsistir en zonas subóptimas, características que permitirían dedicar menos tiempo y recursos al cuidado de los animales y permitirían compaginar mejor la ganadería con otras actividades. Así, no siempre debe asumirse que un mayor tamaño de los animales por sí solo resultaría más provechoso para sus cuidadores en cualquier circunstancia.

Las características dentales y los valores isotópicos en colágeno óseo indican que los *Bos taurus* de A Tara aprovecharían como pasto las áreas de matorral de las zonas altas, dando uso a un espacio que de otra manera proporcionaría un provecho mucho más limitado a los pobladores de la zona, y que permitiría el mantenimiento de los animales sin tener que sacrificar tierras adecuadas para el cultivo.

Los bóvidos recuperados en el interior demuestran la explotación de los animales en régimen extensivo o semiextensivo, pudiendo recorrer libres la zona, al menos durante las horas diurnas, para aprovechar la vegetación presente. Cabe suponer que esto se debería a que los pobladores no tenían acceso a pastos de mayor calidad para sus ganados, o bien el esfuerzo

necesario para realizar el desplazamiento hasta ellos no sería compensado por las ventajas que supondría. Ya que no conocemos hasta que punto los dueños de los animales dependían de ellos, o si tan sólo eran un recurso adicional, dependiendo sus ingresos y manutención principales de otras fuentes, no podemos saber con seguridad hasta que punto era para ellos importante proporcionarles cuidados de calidad. El hecho de que ambos animales sobrepasaran los tres años de edad, hace que podamos suponer que no se destinaban al consumo, por lo que se trataría de animales de cría o para proporcionar otros recursos, como productos lácteos o fuerza de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo hubiese sido imposible sin la ayuda prestada por los espeleólogos que colaboraron durante el recorrido y los trabajos en las cuevas, y proporcionaron tanto las fotografías del interior como la topografía subterránea. Aunque son muchos los que colaboraron, nuestro agradecimiento especial por las incontables horas de trabajo es para Victorino Marzabal (Tarín), Begoña Barreiro Ben, Reinaldo Costas Vázquez y Rosa María Suárez Pérez. Este trabajo se encuadra en el *Programa de Consolidación e Estructuración Redes* (R2014/024) de la Xunta de Galicia.

BIBLIOGRAFÍA

Albarella, U., Johnstone, C. y Vickers, K. 2008. The development of animal husbandry from the Late Iron Age to the end of the Roman period: a case study from South-East Britain. *Journal of Archaeological Science* 35, 1828-1848.

- Altuna, J. 1980. Historia de la domesticación animal en el País Vasco desde sus orígenes hasta la romanización. *Munibe* 32, 1-164.
- Armitage, P. L. 1982. Developments in British cattle husbandry from the Romano-British period to early modern times. *The Ark* 9, 50-54.
- Bocherens, H. y Fogel, M. L. 1995. Trophic Structure and Climatic Information From Isotopic Signatures in Pleistocene Cave Fauna of Southern England. *Journal of Archaeological Science* 22, 327-340.
- Bocherens, H., Billiou, D., Patou-Mathis, M., Bonjean, D., Otte, M. y Mariotti, A. 1997. Palaeobiological implications of the isotopic signatures (^{13}C , ^{15}N) of fossil mammal collagen in Scladina Cave (Sclayn, Belgium). *Quaternary Research* 48, 370-380.
- De Niro, M. J. y Epstein, S. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42, 495-506.
- De Niro, M. J., Epstein, S. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45, 341-351.
- Díaz Martínez, P. de la C. 1983. Los distintos "grupos sociales" del noroeste hispano y la invasión de los suevos. *Studia historica. Historia Antigua* 1, 75-88.
- Dopazo Martínez, A., Fernández Rodríguez, C. y Ramil Rego, P. 1996. Arqueometría aplicada a yacimientos galaico-romanos del NW peninsular: valoración de la actividad agrícola y ganadera. P. Ramil Rego, C. Fernández Rodríguez y M. Rodríguez Guitián (coords.), *Biogeografía Pleistocena-Holocena de la Península Ibérica*, Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, 317-331.
- Escribano Sanz, O. 2000. La dieta animal de época romana en Álava. *Zainak. Cuadernos de Antropología-Etnografía* 20, 203-210.
- Fairbanks, R. G., Mortlock, R. A., Chiu, T.-C. Cao, L., Kaplan, A., Guilderson, T. P., Fairbanks, T. W. y Bloom, A. L. 2005. Marine Radiocarbon Calibration Curve Spanning 0 to 50,000 Years B.P. Based on Paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C Dates on Pristine Corals. *Quaternary Science Reviews* 24, 1781-1796.
- Fernández Rodríguez, C. 2003: *Ganadería, Caza y Animales de Compañía en la Galicia Romana: Estudio Arqueozoológico*, Brigantium: Boletín do Museo Arqueolóxico e Histórico da Coruña 15, A Coruña.
- García-Vázquez, A., Vidal-Gorosquieta, A. y Grandal-d'Anglade, A. 2011. El clima holoceno a través de las paleodietas del oso pardo (*Ursus arctos*) y el Uro (*Bos primigenius*). A. Pérez-García, F. Gascó, J.M. Gasulla y E. Escaso (eds.), *Viajando a Mundos Pretéritos*, Ajuntament de Morella, Morella, 131-143.
- García-Vázquez, A., Grandal-d'Anglade, A., Vaqueiro-Rodríguez, M. y Vidal-Romani, J.R. 2011. On the relation between cave and brown bears in O Courel Sierra (Galicia, NW Spain). *Quaternaire* 4, 59-69.
- González-Hernández, M. P. y Silva-Pando, F. J. 1999. Nutritional attributes of understory plants known as components of deer diets. *Journal of Range Management* 52, 132-138.
- González-Hernández, M. P., Karchesy, J. y Starkey, E. E. 2003. Research observation: Hydrolyzable and condensed tannins in plants of northwest Spain forests. *Journal of Range Management* 56, 461-465.

- Grandal-d'Anglade, A., López-González, F. y Vidal-Romaní, J. R. 1997. Condicionantes en la distribución de macromamíferos en Galicia (NW Península Ibérica) durante el Cuaternario superior. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 22, 43-66.
- Grandal-d'Anglade, A., Pérez-Rama, M., García-Vázquez, A., Vidal-Gorosquieta, A. y González-Fortes, G. 2010: *Geocaracterización de yacimientos arqueológicos: conservación de restos paleontológicos y obtención de datos biogeoquímicos*, A.J. López Díaz y E. Ramil Rego (eds.), Arqueoloxía: Ciencia e Restauración, Monografías do Museo de Prehistoria e Arqueoloxía de Vilalba 4, Vilalba, 57-70.
- Grau Solagestoa, I. 2009. Ganadería en la Alta Edad Media, Estudio comparativo de los yacimientos alaveses de Zornoztegi, Zaballa y Salvatierra-Agurain. *Munibe* 60, 253-280.
- Grigson, C. 1982. Sex and age determination in some bones and teeth of domestic cattle: a review of the literature" B. Wilson, C. Grigson y S. Payne (eds.) *Ageing and Sexing Animal Bones from Archaeological Sites, BAR British Series* 109, Oxford, 7-23.
- Hakenbeck, S., Mcmanus, E. Geisler, H. Grupe, G. y O'Connell, T. 2010. Diet and Mobility in Early Medieval Bavaria: A Study of Carbon and Nitrogen Stable Isotopes. *American Journal Of Physical Anthropology* 143, 235-249.
- Haynes, G. 1984. Tooth wear rate in northern bison. *Journal of Mammalogy* 85, 487-491.
- Hobbie, E. A., Macko, S. A. y Williams, M. 2000. Correlations between foliar $\delta^{15}\text{N}$ and nitrogen concentrations may indicate plant-mycorrhizal interactions. *Oecologia* 122, 273-283.
- López Sáez, J.A.; López García, P. y Burjachs, F. 2003. Arqueopalinología: Síntesis Crítica. *Polen* 12, 5-35.
- Luzón Nogué, J.M. y Sánchez-Palencia Ramos, F. J. 1980: *El Caurel*, Excavaciones Arqueológicas en España 110, Madrid.
- Lynch, A.H., Hamilton, J. y Hedges, R. E. M. 2008. Where the wild things are: aurochs and cattle in England. *Antiquity* 82, 1025-1039.
- Mariotti, A., Pierre, D., Vedy, J.C. y Bruckert, S. 1980. The abundance of natural nitrogen 15 in organic matter of soils along an altitudinal gradient. *Catena* 7, 293-300.
- Noe-Nygaard, N., Price, T.D. y Hede, S.U. 2005. Diet of aurochs and early cattle in southern Scandinavia: evidence from ^{15}N and ^{13}C stable isotopes. *Journal of Archaeological Science* 32, 855-871.
- Prummel, W. y Frisch, H. J. 1986. A guide for the distinction of species, sex and body side in bones of sheep and goat. *Journal of Archaeological Science* 13, 567-577.
- Ramil Rego, P. 1993a. Evolución climática e historia de la vegetación durante el Pleistoceno Superior y Holoceno en las regiones montañosas del NW ibérico. A. Pérez Alberti, L. Guitián Rivera y P. Ramil Rego (Eds), *La evolución del paisaje en las montañas del entorno de los Caminos Jacobeos*, Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, 25-60.
- Ramil Rego, P. 1993b. Paleobotánica de yacimientos arqueológicos holocenos de Galicia, (N,O, Cantábrico). *Munibe* 45, 165-174.
- Santos Fidalgo, L., Vidal Romaní, J.R. y Jalut, G. 1997. Contribución al conocimiento de la vegetación holocena

- en el NO de la Península Ibérica (Galicia, España). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 22, 99-119.
- Santos Fidalgo, L., Vidal Romani, J.R. y Jalut, G. 2000. History of vegetation during the Holocene in the Courel and Queixa Sierras, Galicia, northwest Iberian Peninsula. *Journal of Quaternary Science* 15, 621-632.
- Suárez Piñeiro, A.M. 2004. Sentados á mesa dun galaico-romano: dieta, alimentación e hábitos culinarios na Galicia romana. *Gallaecia* 23, 155-172.
- Teichert, M. 1984: *Size variation in cattle from Germania romana and Germania libera*. C. Grigson y J. Clutton-Brock (eds.), *Animals in Archaeology*: 4, Husbandry in Europe, BAR International Series 107, Oxford, 93-103,
- Van Klinken, G.J.; Richards, M.P. y Hedges, R.E.M. 2000. *An overview of causes for stable isotopic variations in past European human populations: environmental, ecophysiological and cultural effects*. In: S.H. Ambrose, M.A. Katzenberg (Eds.), *Biogeochemical Approaches to Palaeodietary Analysis*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 39-63.
- Vaqueiro, M. 2007. Topografía Subterránea. Láminas Karst y Pseudokarst de Galicia y Portugal. 2004-2007. Depósito legal VG:172-07.
- Vázquez Varela, J.M. 1993-1994. El cultivo del mijo, (*Panicum miliaceum*, L.) en la cultura castreña del Noroeste de la Península Ibérica. *Cuadernos de Estudios Gallegos* XLI (106), 65-73.
- Vidal Romani, J. R. Grandal d'Anglade, A., Fernández Ferrín, J. y Vila Anca, R. 1992. El Glaciocarst del Courel (Lugo). *Furada* 6, 35-40.
- Virginia, R. A. y Delwiche, C. C. 1982. Natural ¹⁵N abundance of presumed N₂-fixing and non-N₂-fixing plants from selected ecosystems. *Oecologia* 54, 317-325.
- Xunta De Galicia 2000: *ORDE do 27 de setembro de 2000 pola que se aproba a regulamentación específica do Libro Xenealóxico da Raza Bovina Cachena*, Diario Oficial de Galicia, nº 207 de 25 de octubre, 14.494 - 14.498.
- Xunta De Galicia 2005: *Plan de ordenación de los recursos naturales, Espacio natural protegido Os Ancares - O Courel, Tomo I*, Xunta de Galicia, Consellería de Medio Ambiente, Dirección Xeral de Conservación da Natureza.
- Xunta De Galicia 2011: *DECRETO 149/2011, de 7 de julio, por el que se establece el Catálogo oficial de razas ganaderas autóctonas de Galicia, se regula el reconocimiento oficial de las asociaciones de criadores de razas autóctonas de Galicia que creen o gestionen libros genealógicos y se aprueban los programas para su conservación, mejora y fomento*, Diario Oficial de Galicia 141, 22 julio del 2011, 20634-20714.

ANEXO. TABLAS DE MEDIDAS DE *BOS TAURUS* DE A TARA.

Abreviaturas:

CR: craneal

MA: mandibular

art: articulación

s art: superficie articular

L: longitud

A: anchura

Al: altura

D: diámetro

T: transversal

AT: anteroposterior

M: máximo

m: mínimo

p: proximal

d: distal

Número	pieza	lado	Individuo	L serie molar	L serie premolar	L serie molari-formes	L rama horizontal hasta borde oral alveolo P2	Al tras M3	Al frente M1	Al frente P2	Al mediana rama vertical
107-165	Man-díbula	S	Bos 1	78,69	45,02	124,04	239	67,92	48,94	41,52	143,59

Número	pieza	lado	Individuo	LM	AM
247	Incisivo	S	Bos 2	12,07	7,97
248	Incisivo	D	Bos 2	12,32	7,99
249	Incisivo	S	Bos 2	11,91	7,34
261	Premolar 2 _{CR}	S	Bos 1	13,97	12,13
256	Premolar 3 _{CR}	D	Bos 1	16,14	14,60
257	Premolar 3 _{CR}	S	Bos 1	16,15	14,46
258	Premolar 4 _{CR}	D	Bos 1	16,43	19,02
259	Premolar 4 _{CR}	S	Bos 1	16,70	18,18
290	Premolar 4 _{CR}	D	Bos 2	15,86	18,60
245	Molar 1 _{CR}	D	Bos 1	23,62	20,97
239	Molar 1 _{CR}	S	Bos 1	24,07	21,54
241	Molar 1 _{CR}	S	Bos 2	20,87	19,71
242	Molar 2 _{CR}	D	Bos 1	23,86	23,16
238	Molar 2 _{CR}	S	Bos 1	24,07	23,48
240	Molar 2 _{CR}	S	Bos 2	21,63	22,23
244	Molar 3 _{CR}	D	Bos 1	27,65	22,47
243	Molar 3 _{CR}	D	Bos 2	27,15	21,18
237	Molar 3 _{CR}	S	Bos 1	27,55	22,26
246	Premolar 2 _{MA}	D	Bos 2	10,87	7,78
260	Premolar 3 _{MA}	D	Bos 2	18,18	11,50
262	Molar 1 _{MA}	D	Bos 1	23,39	15,82
264	Molar 1 _{MA}	D	Bos 2	21,14	13,37
253	Molar 1 _{MA}	S	Bos 2	20,52	13,30
263	Molar 2 _{MA}	D	Bos 1	23,31	15,97
207	Molar 2 _{MA}	D	Bos 2	22,53	14,68
254	Molar 3 _{MA}	D	Bos 1	34,39	15,86
255	Molar 3 _{MA}	S	Bos 2	33,27	14,79
305	Molar 3 _{MA}	D	Bos 2	33,34	14,34

Número	pieza	lado	Individuo	LM cuerpo	A s art anterior	A s art posterior	Am
36	Axis		Bos 1	94,01	88,1	29,11	52,62
227	Axis		Bos 2		77,91		

Número	pieza	lado	Individuo	Am cuello	DAP cavidad glenoidea	DT cavidad glenoidea
124-223-225-235-272	Escápula	D	Bos 2	38,86		
5-6-7-8-9-10-11-18	Escápula	S	Bos 1	47,58	53,67	47,75

Número	pieza	lado	Individuo	DTm	DTMp	DTM tróclea
1	Húmero	D	Bos 1	36,55	76,68	69,96
2	Húmero	S	Bos 1	36,37		70,34

Número	pieza	lado	Individuo	LM	L Olecranon	AM art p
33	Ulna	S	Bos 1	340		
304	Ulna	D	Bos 1		52,19	42,15

Número	pieza	lado	Individuo	LM	DTMp	DTM art p	DTm	DTMd	DTM art d
13	Radio	S	Bos 1	266,5	77,79	70,83	41,32		
32	Radio	D	Bos 1	266	78,33	69,89	41,59	69,87	47,69
220	Radio	S	Bos 2	227			32,5	59,41	49,71
221	Radio	D	Bos 2			59,26	33,07		

Número	pieza	lado	Individuo	LM	DTm	DAPm
102-119	Metacarpo	S	Bos 1		31,87	
106-123-177-275	Metacarpo	D	Bos 1	183,5	31,9	22,63

Número	pieza	lado	Individuo	DAP cavidad cotiloidea
164	Pelvis		Bos 1	49,44

Número	pieza	lado	Individuo	DTMd	DTm	DAP cabeza
37	Fémur	D	Bos 1	91,5	35,53	39,58
38	Fémur	S	Bos 1		35,42	39,57
112-174-180-236	Fémur	D	Bos 2		29,31	

Número	pieza	lado	Individuo	LM	DTMp	DTMd	DAPMd
3	Tibia	S	Bos 1	326		58,05	
4-12-127	Tibia	D	Bos 1	322,5	90,95	58,55	44,62

Número	pieza	lado	Individuo	L lateral	L medial
131	astragalo	S	Bos 1	60,23	30,51

Número	pieza	lado	Individuo	LM	DTM
114	tarso calcaneo	S	Bos 1	120,65	
115	tarso calcaneo	D	Bos 1		40,24

Número	pieza	lado	Individuo	LM	DTMp	DAPMp	DTm	DTMd	DAPMd	DAPm
34	Metatarso	S	Bos 1	214		41,74	26,8	52,06	34,42	26,3
35	Metatarso	D	Bos 1	214	47,73	41,06	27,37			26,3

Número	pieza	lado	Individuo	LM	DTMp	DTmd	DTm
30	Falange 1		Bos 1	55,19	27,34	27,93	24,24
31	Falange 1		Bos 1				25,1

Número	pieza	lado	Individuo	LM	DTMp	DTmd	DTm
129	Falange 2		Bos 1		29,34	25,96	23,98

Número	pieza	lado	Individuo	LM	L sup ventral
132	Falange 3		Bos 1	67,39	66,36

Volume 38. 2015
ISSN: 0213-4497

REVISTA DE XEO
LABORATORIO
XEOLÓXICO
DE LAXE
CO PENINSULAR
LOXIA GALEGA
E DO HERCÍNIO

UNIVERSITARIO
INSTITUTO
DE XEOLOXIA
ISIDRO PARGA PONDAL



Servizo de Publicacións
UNIVERSIDADE DA CORUÑA

