Sezione 4
Section 4

LE RICERCHE ARCHEOMETRICHE
ARCHAEOMETRIC STUDIES

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 387-396

IMAGE PROCESSING IN MICROWEAR STUDIES ON FLINT ARTIFACTS

The first interest on functional analysis of the stone tools, analyzing the use-wear traces, is most probably represented by the pioneering work of S. Semenov, more than thirty years ago (SEMENOV 1964), practically unknow for long time in the Western World. Several years later, a new interest aroused on the subject, both regarding the so-called "macrowear" traces (impact scars, striations, etc.) according to a line of research put forward by ODELL (1980), where practically only low magnification microscopes (eventually with additional SEM studies) are needed, and the "microwear" traces, first suggested by L.H. KEELEY (1980) and his followers (see, for instance, ANDERSON GERFAUD 1981; MOSS 1983), where high magnification microscopes are needed in order to study the various "polishes" produced on the used part of the artifact.

It is quite obvious that a a preminent role in this studies is consitued by experimental work: only when we have a reasonable amount of experimental data with experiments performed on various materials (wood, bone, antler, hide, meat, etc.), we can dispose of a kind of "data-base" for the interpretation of the archaeological record.

Needles to say, there is still an important factor that has to be taken into account: the chemical study of the process of formation of use wear polishes and, even more important, the possible effects of post-depositional alterations on the prehistoric flint material (see, for instance, LEVI-SALA 1993; YAMADA 1993, and the literature quoted in these papers).

The main focus of the present paper deals instead with the experimental part of the microwear studies, and in particular with the attempts of quantifying it. The need of quantification is easily understandable, because most of the analysis consists in the interpretation of the various types of polishes present on the working edge(s) of the artifact contained in an image derived from observations of the samples with a high magnification (up to 500 X) microscope.

Is thus quite natural that the simple analysis "by eye" of these pictures may introduce a large degree of subjectivity in the results: "blind tests" were often done in order to assess a better "reliability" of the analysis.

More quantitative procedures of image processing have therefore been introduced in order to avoid these "blind tests", which are obviously time consuming.

The first approach was of the standard "pattern recognition" type, with statistical applications to the images processed. Apparently, the first attempts in this direction (GRACE *et al.* 1985; GRACE 1989) failed to give reasonable

answers, so that a second line of approach was tried: the use of Artificial Intelligence and expert systems (GRACE 1993; DRIES 1994).

In my opinion, the line of research more "pattern recognition" oriented was too quickly abandoned, and I may also add the the main drawback of the use of expert systems id the scarce flexibility of such systems, which obey strictly to rules essentially empirical and thus largely depending on the "teacher" and mostly variable through time.

In the present paper I will instead illustrate some results, which seem encouraging, obtained using the traditional "pattern recognition" statistical analysis.

The usual parameters derived from the microwear studies are of various type: the length of the polish along the worked edge of the tool, the width and, more important, its textural properties. As it was the case in the analysis done by R. Grace and collaborators (GRACE *et al.* 1985), we are here interested in quantifying the texture of the polish. The basic steps of the analysis are the following:

a) Digitization of the relevant portion of the image to be analyzed.
b) Transformation of the digitized image to a grey tone matrix.
c) Processing of this grey tone spatial matrix and computation of the features to be used in the statistical evaluation.
d) Statistical analysis of the features and discussion of the results.

The computation of the features is derived by a work published more than twenty years ago (HARALICK *et al.* 1973): the analysis done by R. Grace and collaborators (GRACE *et al.* 1985) was limited to the first three steps of the procedure outlined above, calculating only two of the statistics defined by HARALICK *et al.* (1973), called CON and ASM.

In Fig. 1 we can see a scatterplot between these two statistics for a series of experimental samples: actually the quanties plotted are the difference between the used and the unused sample both for CON and ASM statistics.

As can be seen, the unused samples cluster essentially around the origin, as expected, but the umpleasant result is that, apart two "outlyers" (open triangles) in the middle of the plot), representing two samples which worked hide, there is no clear distinction between samples which were experimented on wood, antler, plant or hide.

This negative result led R. Grace and collaborators to reject any further attempt of statistical pattern recognition analysis on the microwear traces and to shift to expert systems (GRACE 1993).

Actually, we have recently examined more carefully the paper of R. Haralick and collaborators (HARALICK *et al.* 1973), and we found that the number of features describing textural properties is *much larger* than the simple two, ASM and CON, employed by R. Grace and collaborators: in fact, there are 14 features defined for the analysis (HARALICK *et al.* 1973, 619).

We have thus tried to re-examine the possibilities of a statistical analysis

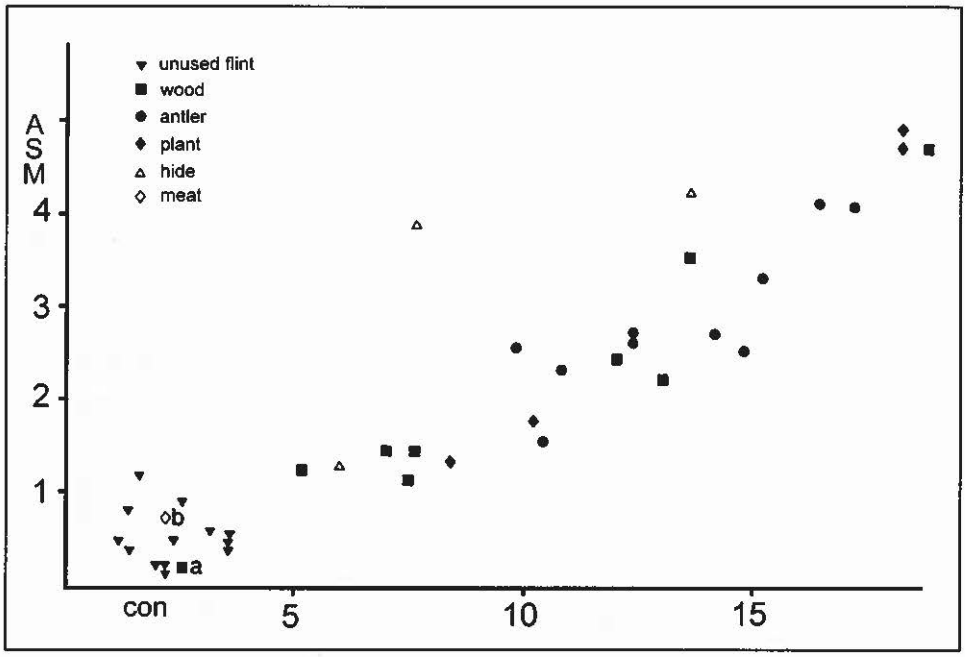


Fig. 1 – Scatterplot between the CON and ASM statistics for used and unused artifacts. For further explanations see the text (from GRACE *et al.* 1985).

on experimental microwear traces, considering 11 of these features. This work, done at the Faculty of Science of the University of Rome «La Sapienza» is still in progress, and the the research team is composed, according to the different phases and stages by C. Lemorini and P. Rossetti (experimentation and microwear microscope analysis, recorded on a standard CD), image processing and creation of the grey tone spatial matrixes (S. Morganti), processing of these matrixes and computation of the texture features (L. Zanello), statistical (univariate and multivariate) analysis of the features (A. Bietti).

In the present paper I will present only some preliminary results on a limited sample (BIETTI *et al.* 1994): work on a much larger series of samples is in progress.

Let us now define the features (HARALICK *et al.* 1973, 619) employed in our analysis:

$$F1 = \sum_{i,j} (p_{ij})^2 \qquad \text{(Angular Second Moment)}$$

$$F2 = \sum_{n=0}^{Ng-1} n^2 \left[\sum_{\substack{i,j=1 \\ |i-j|=n}}^{Ng} p_{ij} \right] \qquad \text{(Contrast)}$$

$$F3 = \frac{\sum_{i,j} (ij) p_{ij} - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \qquad \text{(Correlation)}$$

$$F4 = \sum_{i,j} (i - \mu)^2 \, p_{ij} \qquad \text{(Sum of Squares Variance)}$$

$$F5 = \sum_{i,j} \frac{p_{ij}}{1 + (i - j)^2} \qquad \text{(Inverse Difference Moment)}$$

$$F6 = \sum_{i=2}^{2N_g} i \, p_{x+y}(i) \qquad \text{(Sum Average)}$$

$$F7 = \sum_{i=2}^{2N_g} (i - F_6)^2 \, p_{x+y}(i) \qquad \text{(Sum Variance)}$$

$$F8 = \sum_{i=2}^{2N_g} p_{x+y}(i) \log [p_{x+y}(i)] \qquad \text{(Sum Entropy)}$$

$$F9 = - \sum_{i,j} p_{ij} \log p_{ij} \qquad \text{(Entropy)}$$

$$F10 = \text{variance of } p_{x-y} \qquad \text{(Difference Variance)}$$

$$F11 = - \sum_{i=0}^{N_{g-1}} p_{x-y}(i) \log [p_{x-y}(i)] \qquad \text{(Difference Entropy)}$$

where

N_g is the number of distinct grey levels

P_{ij} is the frequency of occurence of levels i,j as neighbors for distance d and fixed direction (see Fig. 2)

R is a normalizing constant, i.e. the total number of pairs i,j found for distance d and fixed direction (see Fig. 2)

$p_{ij} = P_{ij} / R$ is the normalized frequency matrix

$p_x(i) = \sum_{j=i}^{N_g} p_{ij}$ is the i-th value of the marginal probability matrix

$p_y(j) = \sum_{j=i}^{N_g} p_{ij}$ the same for the j-th value

$$p_{x+y}(k) = \sum_{i,j=1}^{N_g} p_{ij} \qquad i + j = k \qquad k = 2, 3, ..., N_g$$

$$p_{x-y}(k) = \sum_{i,j=1}^{N_g} p_{ij} \qquad k = |i - j| \qquad k = 0, 1, ..., N_g - 1$$

μ_x is the mean of p_x distribution $= \sum_i i\, p_x(i)$

μ_y is the mean of p_y distribution $= \sum_i i\, p_y(j)$

μ is the smean of p distribution $= \sum_{i,j} i\, p_x(i)_i$

and σ_x, σ_y the standard deviations.

The distances d (1, 2, etc.) of the nearest neighbor from the pixel i,j are illustrated in Fig. 2. In the same figure one can see the four *directions* (quoted in the formulas) for the computation of the features: the central row and column and the two diagonals (see HARALICK *et al.* 1973, Fig. 1).

As a result, the number of the 11 features outlined above (the other three features difined in the work of R. Haralick and collaborators have been not considered in the present paper only for computation difficulties), is doubled: we have thus the averages (FA1, FA2,..etc.) and the ranges (FR1, FR2, ...etc.) over the four directions.

We have thus a much larger set of parameters in comparison with the analysis by R. Grace and collaboratorators (incidentally, it is clear that the

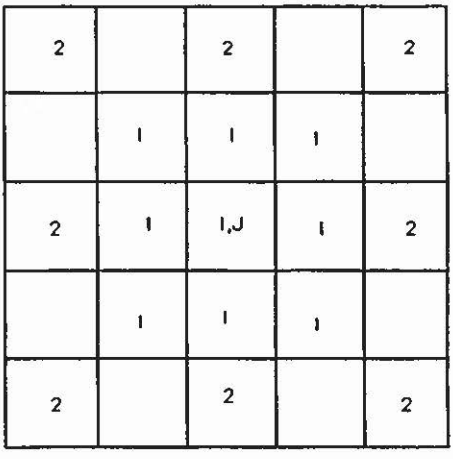


Fig. 2 – The nearest neighbors of pixel i,j for d = 1 and d = 2 (from BIETTI *et al.* 1994)

ASM statistics in Fig. 1 is the Angular Second Moment (F1 in our formulas) and CON is most probably the Contrast (F2 defined above)).

In our preliminary analysis the experimental sample consisted of 15 flint tools: nine of them wood working and the other six having worked hide.

The statistical analysis, after the computation of the 22 parameters defined above, consisted first in a simple univariate T-test at a 98% confidence level (a rather "severe" limit) in order to choose the diagnostic features for distinguishing between the two classes of artifacts. For d = 1 (we recall that d is the distance between the pixels (see Fig. 2)) the T-test gave very sharp results: only the features FA3 and FR3, representing the correlation (see the formulas above) are diagnostic. A further analysis that has been applied is the stepwise linear discriminant analysis, which, employing analyses of multiple and partial correlation, ranks the diagnostic features in a descending order of importance.

As a result, 13 features were selected: FR3, FA2, FR5, FR9, FR7, FA3, FR8, FR4, FR2, FR6, FA5, FR1, FR11. Needless to say, the features FA3 and FR3 were already selected by the T-test.

It is interesting to note that while the feature F2, (probably the CON of Grace *et al.* 1985), both in average and range, is diagnostic at a fairly good level of ranking, the angular second moment, F1 (ASM in Grace's paper) is one of the last features sorted, and only by its range.

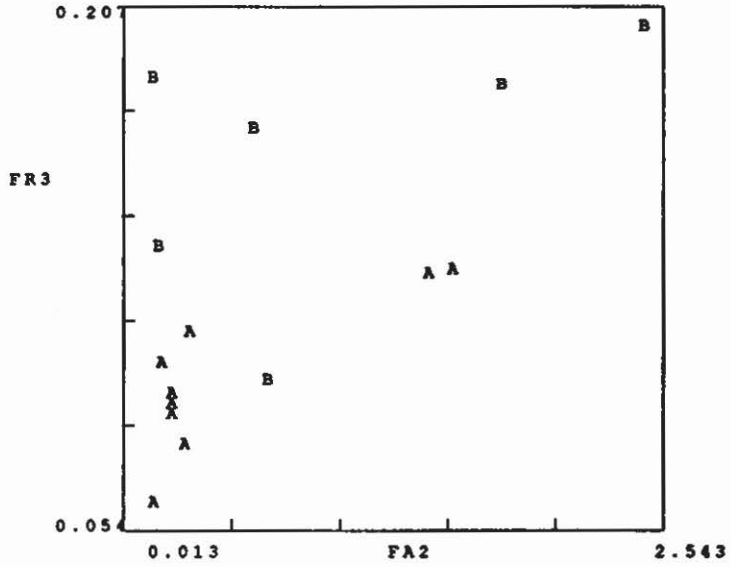
In Fig. 3a one can see the scatterplot of the data (for d = 1) between the features FR3 and FA2 and in Fig. 3b the same for the features FR3 and FA3: one can see clearly that the samples hide working (labelled B) are quite separated from the ones wood working (labelled A), with the exception of one hide working outlier, which is consistently mixed with the A' s: this specimen represents a hide working tool *but* at 400 X magnification (the other specimens ar all at 200 X magnification): is thus quite reasonable that it falls out from his class.

Principal component analysis has also been applied, but the results are rather poor (see Bietti *et al.* 1994, Fig. 4a and 4b), because of the limited number of samples and for the strong correlation between some features.

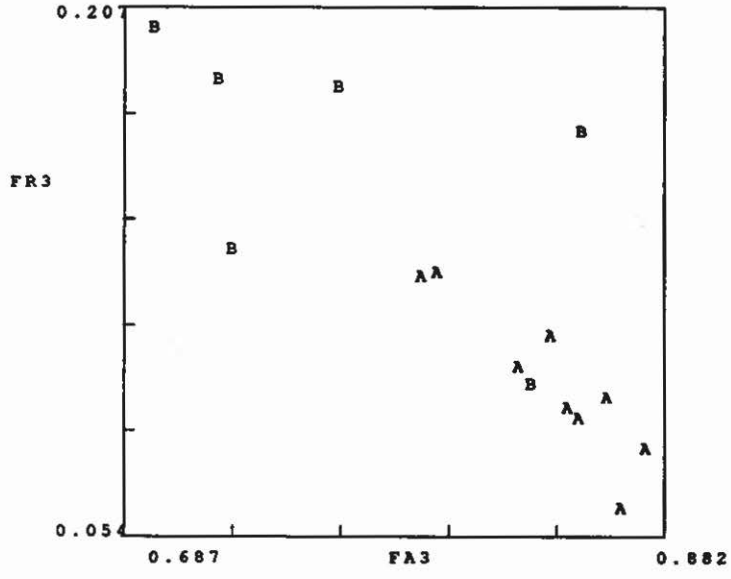
Moving now to the analysis with d = 2, the resolution between the two classes is much poorer: the T - test selects only one diagnostic feature, FA3, and the stepwise linear discriminant analysis again 13 features, but only 7 are in common with the analysis with d = 1.

In Fig. 4a we can see, for instance, the scatterplot between the features FA3 and FA1: the separation between the two classes is still reasonable (always with the some outlier of the hide working class mixed with the wood working specimens), but the scatterplot between the features FA3 anf FR4 (Fig. 4b) shows a rather bad resolution: is interesting to see that the scatterplot between the same two features in the case d = 1 (Fig. 5) gives a much better resolution.

As a conclusion, this preliminary analysis on a very limited sample gives, in my opinion, very incouraging results, and, at the present time, we are doing new analyses on a sample of about 100 experimental tools.

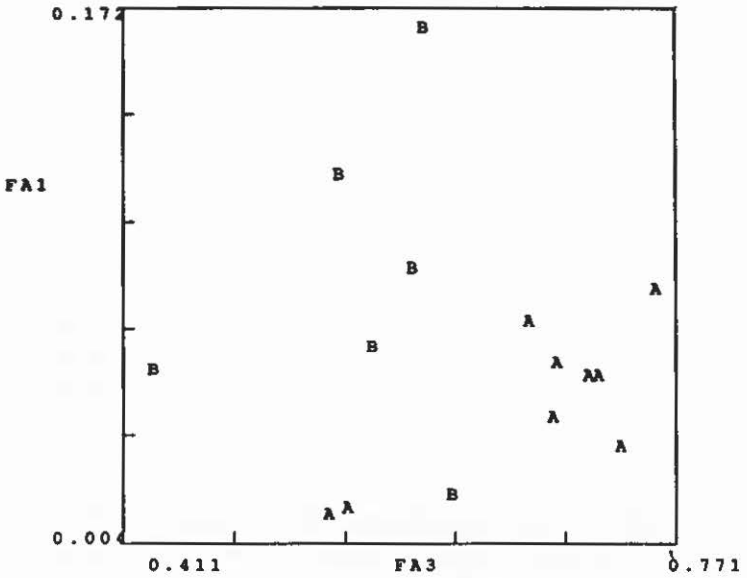


a

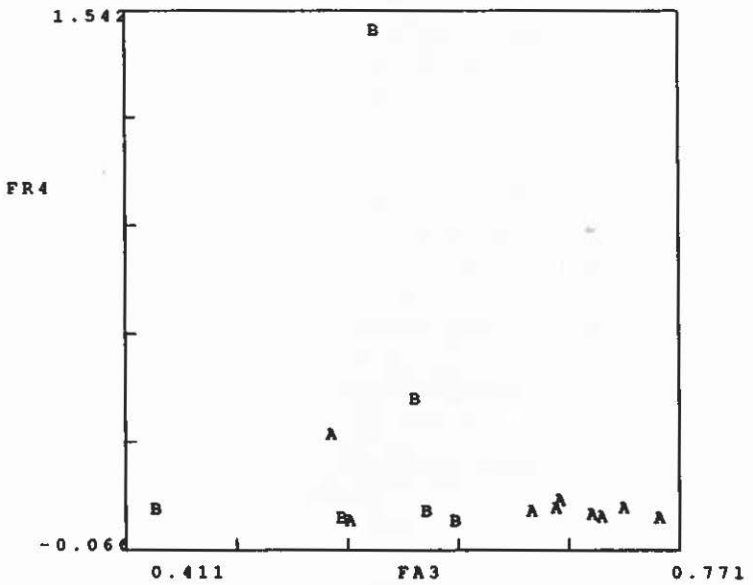


b

Fig. 3 – a) Scatterplot between the features FA2 and FR3 for artefacts wood working (a) and hide working (b) and d = 1; b) the same for the features FA3 and FR3 (from Bietti *et al.* 1994).



a



b

Fig. 4 – Same as in Fig. 3 for d = 2 and a) FA3 and FA1; b) FA3 and FR4 (from Bietti *et al.* 1994).

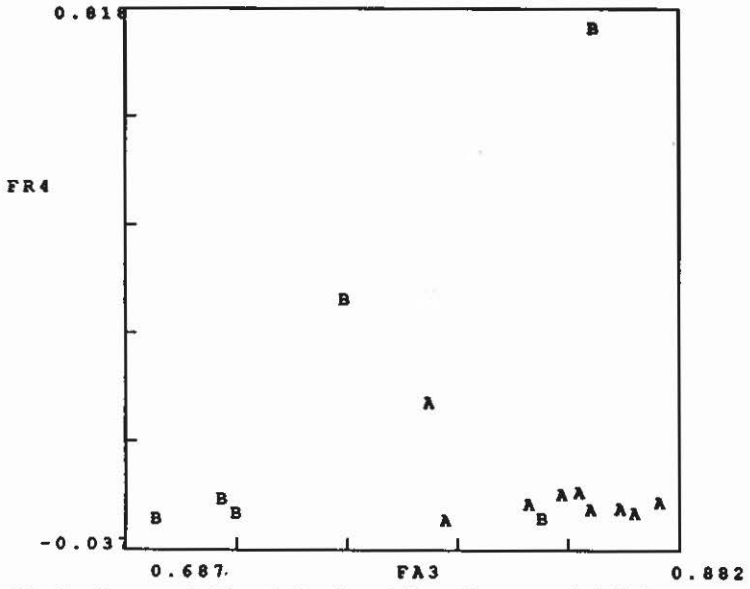


Fig. 5 – Same as in Fig. 4b for d = 1 (from BIETTI *et al.* 1994).

Apart of the enlargement of the sample, this new set of data will be a test for all a series of basic problems:
a) choosing the best magnification in the pictures: our impression is that 200X may be too low but 400X too high, thus enhancing problems of focus in the image, we think that 300X is probably a good compromise;
b) the working time on the various materials should be varied: it may well be that two hours of work on a soft material, such as meat, for instance, produces a polish similar to the one obtained, say, by half an hour work on bone or antler;
c) one should also try the "superimposition" of activities on different materials, analyzing, for instance, the polish produced by work on meat followed by a work on hide;
d) the set of experiments presented here has been performed on the same quality of flint (the well known flint of the Gargano, in Apulia): one should try to study the polishes on different types of flint.

All these analyses have to be done only on experimental tools: only later we can try to transfer the informations obtained on the archaeological materials: there is a large body of statistical techniques well suited to this end (see, for instance, BIETTI 1993).

AMILCARE BIETTI
Dipartimento di Biologia Animale e dell'Uomo
Università di Roma "La Sapienza"
Istituto Italiano di Paleontologia Umana, Roma

BIBLIOGRAPHY

ANDERSON GERFAUD P.C. 1981, *Contribution méthodologique à l'analyse des micro-traces d'utilisation sur les outils préhistoriques,* Thèse de III cycle, n. 1607, Paris.

Bietti A. 1993, *Supervised pattern recognition and experimental archaeology,* in P.C. ANDERSON, S. BEYRIES, M. OTTE, H. PLISSON (edd.), *Traces et Fonctions: les gestes retrouvés,* ERAUL (Liège) 50, 529-538.

BIETTI A., MORGANTI S., ZANELLO L. 1994, *Image processing in microwear analysis of prehistoric flint artefacts: an attempt at quantifying textural properties,* in J. JOHNSON (ed.), *Methods in the Mountains, Proceedings of UISPP Commission IV Meeting (Mount Victoria, Australia),* Sydney University Archaeological Series n. 2, 183-188.

DRIES M. H. VAN DE 1994, *WAVES: an expert system for the analysis of use-wear on flint artefacts,* in J. JOHNSON (ed.), *Methods in the Mountains, Proceedings of UISPP Commission IV Meeting (Mount Victoria, Australia),* Sydney University Arcahaeological Series n. 2, 173-181.

GRACE R. 1989, *Interpreting the function of stone tools: the quantification and computerization of microwear analysis,* B.A.R. Intern. Series 474, Oxford.

GRACE R. 1993, *The use of expert systems in lithic analysis,* in P.C. ANDERSON, S. BEYRIES, M. OTTE, H. PLISSON (edd.), *Traces et Fonctions: les gestes retrouvés,* ERAUL (Liège) 50, 389-400.

GRACE R., GRAHAM I.D.G., NEWCOMER M.H. 1985, *The quantification of microwear polishes,* «World Archaeology» 17, 112-120.

HARALICK R.M., SHANMUGAM K., DINSTEIN I. 1973, *Textural Features for Image Classification,* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernectics SMC - 3, 610-621.

KEELEY L.H. 1980, *Experimental Determinations of Stone Tool Uses. A Microwear Analysis,* Chicago, The University Press.

LEVI-SALA I. 1993, *Use-wear traces: processes of development and post-depositional alterations,* in P.C. ANDERSON, S. BEYRIES, M. OTTE, H. PLISSON (edd.), *Traces et Fonctions: les gestes retrouvés,* ERAUL (Liège) 50, 401-416.

MOSS E. 1983, *The Functional Analysis of Flint Implements,* B.A.R. Intern. Series 177, Oxford.

ODELL G.H. 1980, *Butchering with Stone Tools: some Experimental Results,* «Lithic Technology», 9, 2, 39-48.

SEMENOV S. 1964, *Prehistoric Technology* (transl. by M.W. Thompson), Corry, Adams and Mackay, London.

YAMADA S. 1993, *The formation process of "use-wear polishes",* in P.C. ANDERSON, S. BEYRIES, M. OTTE, H. PLISSON (edd.), *Traces et Fonctions: les gestes retrouvés,* ERAUL (Liège) 50, pp. 433-445.

ABSTRACT

In this paper we describe an attempt of application of image processing for the texture study of the use wear polishes on flint artifacts, experimentally obtained on two types of materials: wood and hide.

The quantification of the textural properties of the images, obtained with a high magnification (200X) metallographic microscope follows strictly the rules indicated by HARALICK *et al.* in 1973. 22 textural features have been obtained from the image and a statistical analysis then allows to discriminate between the two classes of materials. The techniques employed, T-test and linear stepwise discriminant analysis, show that the discrimination between tools working wood and working hide is quite good, in the case of distance between the pixels = 1.

Possibilities of future and more refined analyses are then discussed at the end of the paper.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 397-408

BEYOND THE HISTOGRAM
IMPROVED APPROACHES TO SIMPLE DATA DISPLAY IN ARCHAEOLOGY USING KERNEL DENSITY ESTIMATES

1. Introduction

Histograms are among the most widely used methods of data presentation in archaeology.

They are a particular example of a *density estimate* and their appearance depends on both the choice of origin of the histogram and the width of the intervals used. The origin is the lower boundary of the first interval in the histogram and it is assumed in what follows that the interval widths, also known as bin-widths, are equal. Whallon (1987) has expressed concern about this dependence, particularly since the choice of origin and bin-width may affect the archaeological conclusions drawn from a histogram.

As Orton (1988) noted, in commenting on Whallon's article, alternatives to the histogram that avoid some of their problems exist but have not been exploited by archaeologists. This remains the case. In another context Silverman (1993) has suggested that for comparative purposes – a common archaeological application – histograms are usually inefficient, and better approaches exist.

In the present paper an effective alternative to the histogram, kernel density estimation, is discussed and illustrated. Silverman's (1986) book helped popularise the ideas involved and an up-to-date account is available in Wand and Jones (1995). Apart from our own work (Baxter, Beardah 1995; Beardah, Baxter 1995) we are not aware of applications of these ideas to archaeological data presentation.

Given the pervasiveness of the histogram in archaeological data presentation archaeologists ought to be interested in these ideas. That this does not seem to be so is, we suspect, a consequence of a lack of accessible software to implement the methodology. Additionally, there are technical problems, concerning the choice of bin-width, that have only been resolved relatively recently. One of us (CCB) has developed a comprehensive set of routines within the MATLAB package that can carry out kernel density estimation using the methodologies described in Wand and Jones (1995). The present paper describes and illustrates some of these ideas.

Our hope is that archaeologists will be convinced about the value of kernel density estimation for archaeological data presentation. While our software can be made freely available to anyone who is interested we recognise that not everyone will have access to our resources (hardware and software). It is likely, however, that the methodology that we describe will become increasingly available, and we hope that the present paper will encour-

age archaeologists to experiment with it when it does so.

In the next section we illustrate the ideas of kernel density estimation by example.

Technical aspects are discussed informally in Section 3 and more mathematically in an appendix, where we concentrate on the potentially critical choice of bin – or window – width. Some further illustrative examples are given in Section 4. For simplicity of illustration the paper concentrates on univariate kernel density estimation, which is likely to be of most immediate interest to archaeologists. Extensions, including adaptive estimates, bounded estimates and two dimensional estimates are noted in the final section.

2. Initial example

To illustrate both the problems with histograms and their resolution using kernel density estimation Figure 1 may be consulted. This is inspired by the example of Whallon (1987) and was produced using the S-plus package using a routine given in Venables and Ripley (1994, 134-5). The histograms shown are based on the radii of 81 Danish Neolithic pots (Madsen 1988, 18). In each case a bin-width of 1.5 is used; the origin of the first bin is 2.9 for the first histogram and increases by increments of 0.3 thereafter.

The appearance of the histogram is clearly sensitive to the choice of origin. For example, in the fourth histogram the distribution is relatively uniform over the approximate range 4-11, contrasting with the clear peak in the second histogram.

The final diagram in the figure is the average of the five histograms, and is an example of an average shifted histograms (ASH) (Scott 1992). In contrast to the histograms its appearance does not depend on a particular choice of origin. It does depend on the choice of bin-width and, while smoother than the histograms, is not as smooth as we would like.

The ASH can be regarded as an approximation to a kernel density estimate (KDE) and provides one way of calculating a KDE. At their simplest KDEs can be thought of as providing smoothed versions of histograms that are dependent on bin-width but not on choice of origin. The smoothness is an advantage from a presentational viewpoint and makes it easier to compare several histograms. The main problem in practice is to obtain a sufficiently smooth representation of the data while also retaining its main features. In Fig. 1, for example, there appears to be a secondary mode at about 13 but this might disappear if a larger bin-width were used. The choice of bin-width is clearly critical. In our previous work (e.g. Beardah, Baxter 1995) we have chosen the bin-width (or window-width as it is called) subjectively, taking as a starting point an estimate that tends to over-smooth the data and systematically reducing this value thereafter. More recently we have incorporated a range of methods for automatic choice of window-width into the MATLAB routines that have been developed by the second author. The underlying ideas

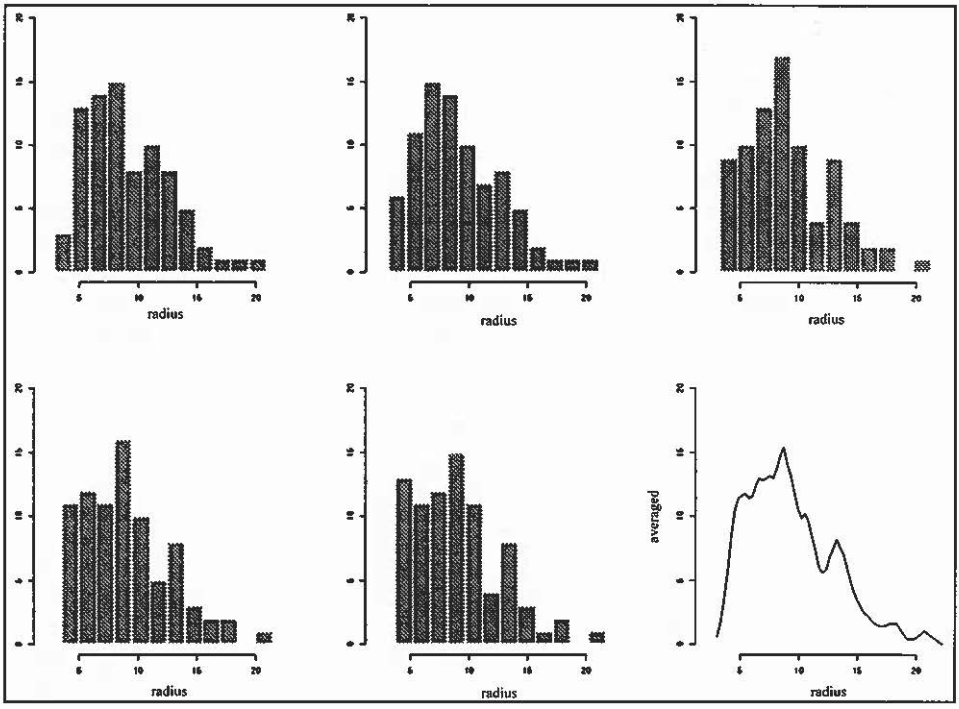


Fig. 1 – Five 'shifted' histograms and their average for the radii of 81 Danish Neolithic pots.

are described and illustrated in the next two sections.

3. Univariate kernel density estimates

It is possible to think of KDEs in different ways. In the previous section the KDE was presented as the average of a set of shifted histograms. An alternative viewpoint is as follows.

Given n points $X_1, X_2, ..., X_n$ situated on a line a KDE can be obtained by placing a 'bump' at each point and then summing the height of each bump at each point on the X-axis. The shape of the bump is defined by a mathematical function, the kernel $K(x)$, that integrates to 1. The spread of the bump is determined by a window- or band-width, h, that is analogous to the bin-width of a histogram. The kernel is usually a symmetric probability density function. The KDE is usually insensitive to the choice of kernel so that in what follows the normal density function is assumed.

Mathematically, this gives the KDE as

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \qquad (1)$$

where $\hat{f}(x)$ is an estimate of the density underlying the data.

Compared to the histogram the shape of $\hat{f}(x)$ does not depend upon the choice of origin, but is affected by the bandwidth h. Large values of h over – smooth, while small values under – smooth the data. In the examples in BAXTER and BEARDAH (1995) the value of h was varied and the final estimate chosen subjectively. Following WAND and JONES (1995) our MATLAB routines have since been modified to allow a more 'objective' choice of h.

The idea underlying the options available is as follows. We want a kernel density estimate which is in some way 'optimal'. In other words we aim to choose a value of h which makes our KDE as 'close' as possible to the true underlying density, $f(x)$ (which is unknown). The measure of 'closeness' is the asymptotic mean integrated square error (AMISE) which can be shown to have the form

$$AMISE(\hat{f}) = \frac{1}{nh}A + \frac{1}{4}h^4 B \tag{2}$$

Fuller details are given in the appendix. The terms A and B in equation (2) are dependent on the known kernel, while B is also dependent on the integral of the squared second derivative of the unknown $f(x)$ that we shall denote by $R(f'')$. This last term can be thought of as measuring the 'roughness' of the underlying density.

Note that the two terms within equation (2) have opposite effects as h is varied. For small h the first term (connected with the variance of $\hat{f}$) is large while the second term (the bias) is small, and vice versa for large h. This illustrates the importance of h and also suggests that there is an optimal value of h which minimises the AMISE. This minimising value is easily shown to be

$$h_{AMISE} = \left[\frac{A}{nB}\right]^{1/5} \tag{3}$$

This expression, which through B depends upon the second derivative of the unknown density f, is the starting point for many methods for automatic selection of h.

If it is assumed that the true density f is normal, equation (3) can be used to get the so-called *normal scale* estimate of h_{AMISE} that we will denote by h_{NS} (see the appendix). This depends on the standard deviation of the underlying density, which must be estimated. The normal scale estimate provides a quick and simply calculated value of h which works reasonably well if the data are close to normal in structure. However, for non-normal data (exhibiting modes for example) h_{NS} will tend to be too large and hence over-smooth.

To avoid this problem one approach is to estimate the roughness of the true density, $R(f'')$, on which B depends and use this in estimating h via (3). This approach gives rise to a family of *direct plug-in* (DPI) estimates that are used in the examples of the next section. Details are given in the appendix.

The roughness, $R(f'')$, can be written in terms of the fourth derivative of f. An estimate of this depends on the sixth derivative, however; while an estimate of the sixth derivative depends on the eighth derivative and so on. These derivatives are unknown, but functions of them can be estimated by using the normal scale rule, for example.

If we choose to estimate (a function of) the sixth derivative and work backwards from there we get the so-called 1-stage direct plug-in (DPI-1) bandwidth estimator. If we begin by estimating a function of the eighth derivative and working back from there a 2-stage DPI estimate is obtained, and so on.

Repeatedly taking simulated samples from a known density can show the effect of varying the number of stages in the DPI method. Such studies show that while the average value of h so obtained becomes closer to the true optimal h_{MISE} value as the number of stages is increased, the variability of h also increases. Again we have a trade off between bias and variance. WAND and JONES (1995) suggest that the 2-stage method provides the best compromise.

In the MATLAB routines written by the second author DPI-1, DPI-2 and DPI-3 estimates are available as well as the normal scale rule estimator. Related to the DPI estimates and also available is the *solve the equation* (STE) method. The essence of this approach is that an initial estimate of roughness is made, allowing an initial estimate of h. The associated estimate of f allows the roughness, and hence h, to be re-estimated. The process is repeated until h converges.

4. FURTHER EXAMPLES

As a first illustration of the ideas of the previous section consider Fig. 2. This is based on the rim diameters of 60 Bronze Age Italian cups. The data is given by BAXTER (1994, 233-4) and is a subset of material originally published by LUKESH and HOWE (1978).

Four estimates are shown with their associated values of h; these are the normal scale method and DPI-1, 2 and 3. These last three methods show that the data are clearly tri-modal, with the final mode a rather small one. As we move from DPI-1 to DPI-3 the tendency is for h to decrease and for the modes and troughs to be accentuated. The normal scale rule smooths the data too much so that the clear division between the first two modes is obscured and the third mode is missed.

To illustrate a type of use where KDEs may be particularly valuable consider Figs. 3 and 4. Fig. 3 shows histograms of the percentage content of calcium oxide in specimens of medieval French glass from four sites. The data are a subset of that given by BARRERA and VELDE (1989) and their site numbering is used. While it is of substantive interest to look at the distribution of calcium oxide, since this can reflect different glass-making traditions, the main point about the present example is that it typifies many such ar-

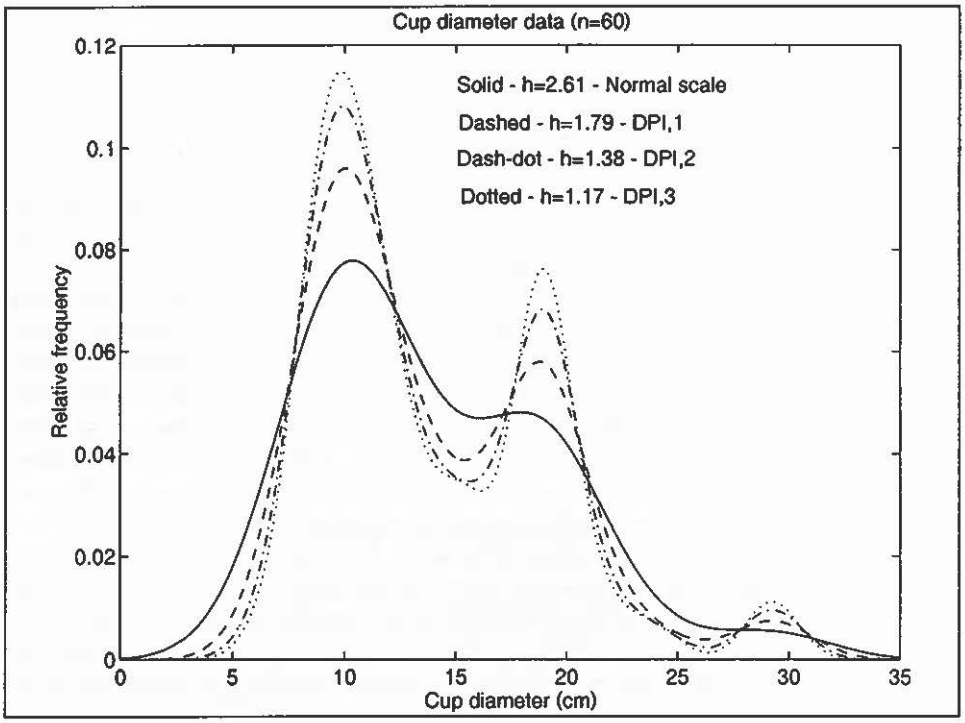


Fig. 2 – Four different *h* selection strategies generating KDEs based upon data representing the diameters of 60 Bronze Age cups from Italy.

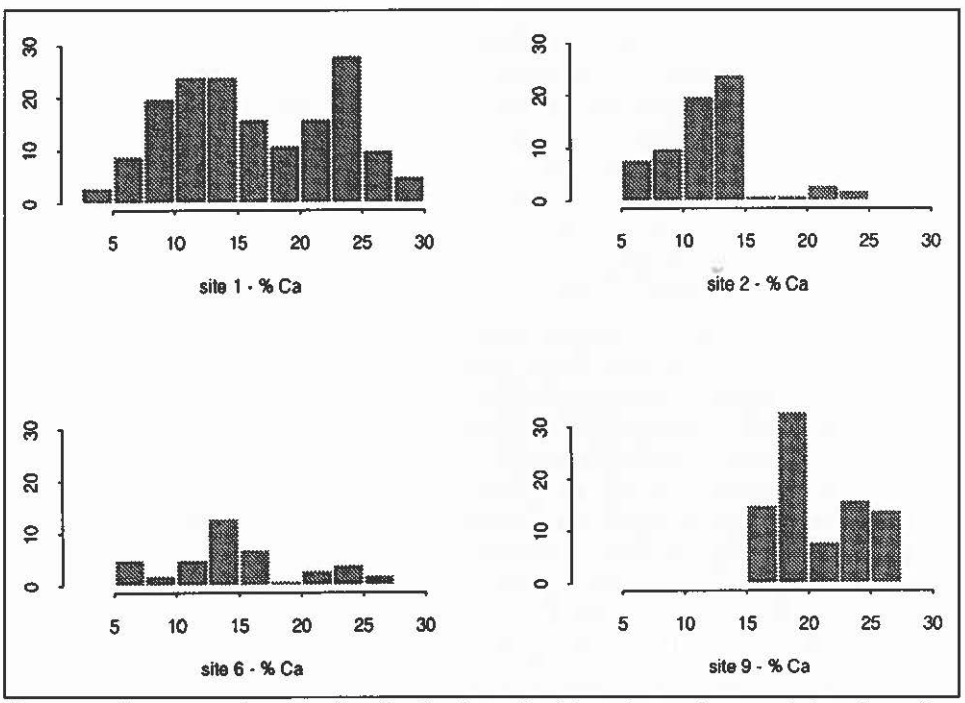


Fig. 3 – Histograms showing the distribution of calcium in specimens of glass from four French sites. Labelling corresponds to that in BARRERA and VELDE (1989) from which the data are taken.

chaeological uses where histograms are used for comparative purposes.

To facilitate comparison scales are the same in each histogram. Absolute numbers have been plotted, though relative frequencies might equally well have been used.

Comparisons reading down the page and within a column are straightforward; for example, it is clear that the calcium concentration of specimens from site 9 are typically greater than for site 2. Effecting comparisons reading across the page, or diagonally is much less straightforward, though it can be done, and difficulties of comparison would be magnified as the number of histograms increases (this is a small example compared with some in the literature).

A better, and potentially space-saving, way of effecting comparisons is shown in Fig. 4 where STE density estimates for the four histograms are superimposed (a relative frequency scale is also used). Comparisons are now much more direct and easy to make. Multi-modality is evident for some of the sites and the generally higher content of calcium in specimens from site 9 is obvious. The wider spread of values from site 1, which is also bi-modal, can be seen.

There is, of course, a limit to the number of estimates that can be usefully superimposed before the graph becomes too crowded. For exploratory

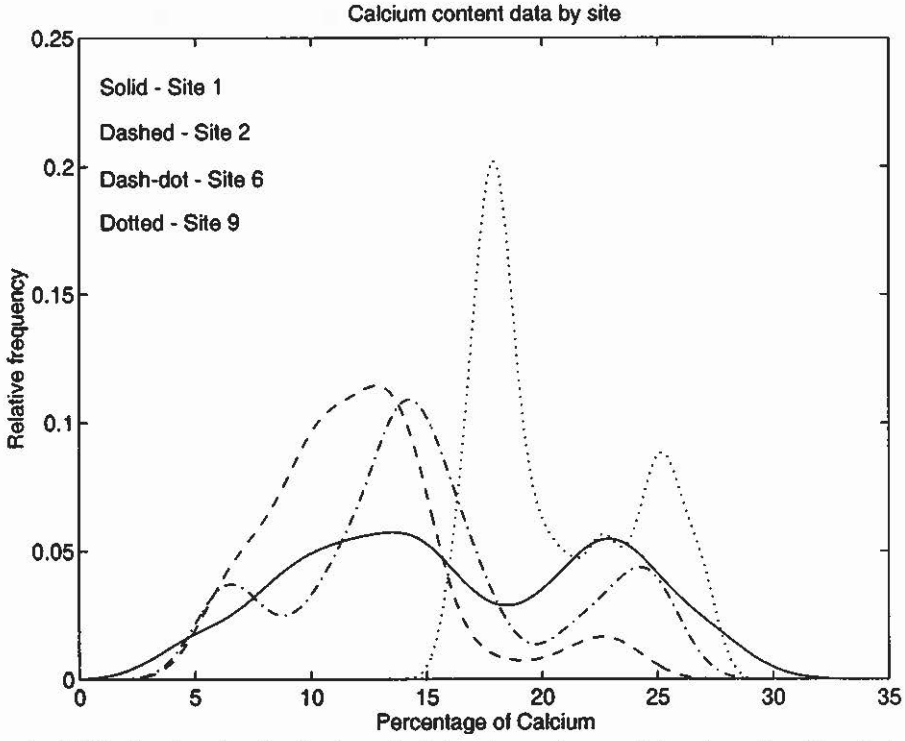


Fig. 4 – KDEs showing the distribution of calcium in specimens of glass from four French sites.

work the colours available with MATLAB mean that more estimates can be superimposed and compared than one might wish to publish when restricted to black-and-white. We note also, in passing, that box-and-whisker plots are often used to effect comparisons between distributions (CLEVELAND 1993). They are not suitable in the present case because not all distributions are unimodal.

5. EXTENSIONS

This paper has deliberately concentrated on univariate examples, which commonly arise in archaeology and where the advantages of kernel density estimates are, we hope, obvious. The MATLAB routines that have been developed can also handle bounded data where, for example, data are non-negative so that the KDE should be zero for negative values, and adaptive estimation (analogous to the use of variable bin-widths) where h can vary and is typically greater in less dense areas of the data space.

The most productive extension of the univariate KDE for archaeologists is likely to be to the bivariate case for which histograms, though occasionally presented, are unwieldy and difficult to interpret. The mathematical development is straightforward, although theory for the optimal choice of window-widths is less advanced than that for the univariate case.

BAXTER and BEARDAH (1995) have presented a successful application, based on bivariate plotting of the first two principal components from an analysis of glass compositions, in which the existence of three groups was clearly evident. The methodology is most useful for large data sets, where conventional two-dimensional plots are too dense for any patterns to be easily seen. Another potential area of application would be to the analysis of co-ordinates of finds, of the kind that are used in spatial k-means clustering for example (BAXTER 1994, 148-9).

BAXTER and BEARDAH (1995) also exploit the use of contouring, based on work by BOWMAN and FOSTER (1993). Bivariate kernel density estimates lend themselves naturally to contouring so that, for example, it is possible to highlight for subsequent interpretation – the densest parts of a plot. If a data set can be divided into sub-groups, by context or period for example, it is possible to plot selected contours for each sub-group separately in order to examine their similarities and differences. An assessment of the potential of these possibilities for archaeology awaits the wider exploitation of the methodologies that we have outlined.

MIKE J. BAXTER, CHRISTIAN C. BEARDAH
Department of Mathematics, Statistics and
Operational Research
The Nottingham Trent University

BIBLIOGRAPHY

BAXTER M.J. 1994, *Exploratory Multivariate Analysis in Archaeology*, Edinburgh University Press, Edinburgh.

BAXTER M.J., Beardah C.C. 1995, *Graphical presentation of results from Principal Components Analysis*, in J. HUGGETT, N. RYAN (eds.), *Computer Applications and Quantitive Methods in Archaeology 1994*, International Series 600, Oxford, BAR, 63-67.

BEARDAH C.C., BAXTER M.J. 1995, *MATLAB routines for kernel density estimation and the graphical representation of archaeological data*, Nottingham Trent University Department of Mathematics Research report 2/95.

BOWMAN A., FOSTER P. 1993, *Density based exploration of bivariate data*, «Statistics and Computing», 3, 171-7.

CLEVELAND W.S. 1993, *Visualising Data,* New Jersey, Hobart Press.

LUKESH S.S., HOWE S. 1978, *Protoapennine vs. subapennine: mathematical distinction between two ceramic phases*, «Journal of Field Archaeology», 5, 339-47.

MADSEN T. 1988, *Multivariate statistics and archaeology*, in T. MADSEN (ed.), *Multivariate Archaeology,* Aarhus, Aarhus University Press, 7-27.

ORTON C.R. 1988, *Review of quantitative research in archaeology*, M.S. ALDENDERFER (ed.), «Antiquity», 62, 597-98.

SCOTT D.W. 1992, *Multivariate Density Estimation*, New York, Wiley.

SCOTT D.W., TAPIA R.A., THOMPSON J.R. 1977, *Kernel Density Estimation Revisited*, «Nonlinear Anal. Theory Meth. Applic.», 1, 339-72.

SILVERMAN B. 1986, *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, London, Chapman and Hall.

VENABLES W.N., RIPLEY B.D.1994, *Modern Applied Statistics with S-Plus*, New York, Springer-Verlag.

WAND M.P., JONES M.C. 1995, *Kernel Smoothing,* London, Chapman and Hall, London.

WHALLON R. 1987, *Simple statistics*, in M.S. ALDENDERFER (ed.), *Quantitative Research in Archaeology: Progress and Prospects*, London, Sage, 135-50.

A. TECHNICAL APPENDIX

Several methods of objectively estimating h are discussed by WAND and JONES (1995) and are implemented in our MATLAB routines. A brief technical account of some of these methods follows.

A.1 NORMAL SCALE SELECTION OF h

The asymptotic mean integrated square error (AMISE) in equation (2) is given more fully by

$$AMISE(\hat{f}) = \frac{1}{nh}R(K) + \frac{1}{4}h^4\mu_2(K)^2R(f''),$$

where

$$R(K) = \int_{x\in\Re} K(x)^2\,dx = 1$$

and

$$\mu_2(K) = \int_{x \in \Re} x^2 K(x)\, dx = 1/(2\sqrt{\pi})$$

for the normal kernel.

The AMISE is a large sample approximation to the less easily manipulated mean integrated square error (MISE),

$$MISE(\hat{f}) = E \int (\hat{f}(x) - f(x))^2\, dx. \tag{4}$$

The minimising value of equation (3) is written more fully as

$$h_{AMISE} = \left[\frac{R(K)}{\mu_2(K)^2 R(f'')n} \right]^{1/5}.$$

Assuming that the true density f is normal with variance σ^2 leads to the *normal scale* estimate of h_{AMISE}, given by

$$\hat{h}_{NS} = \left[\frac{8\sqrt{\pi} R(K)}{3\mu_2(K)^2 n} \right]^{1/5} \hat{\sigma},$$

where $\hat{\sigma}$ is an estimate of s, the unknown standard deviationof f. If the normal kernel is used this reduces to the simple formula

$$\hat{h}_{NS} = 1.06 n^{-1/5} \hat{\sigma}.$$

A.2 Plug-in selection of h

Plug-in methods represent an improvement over the normal scale rule since they estimate $R(f'')$ for the true density rather than assuming that the true density is normal. To see how this is done we note that $R(f'')$ can be written as

$$R(f'') = \psi_4 = \int_{x \in \Re} f^{(4)}(x) f(x)\, dx$$

where $f^{(4)}(x)$ is the fourth derivative of $f(x)$.

This means that equation (3) can be written as

$$h_{AMISE} = \left[\frac{R(K)}{\mu_2(K)^2 \psi_4 n} \right]^{1/5} \tag{5}$$

and hence that h_{AMISE} can be approximated accurately if a good estimate of ψ_4 is available. Since $\psi_4 = E(f^{(4)}(X))$, a natural estimator for ψ_4 is

$$\begin{aligned} \hat{\psi}_4(g) &= n^{-1} \sum_{i=1}^{n} \hat{f}^{(4)}(X_i), \\ &= n^{-2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{g} K^{(4)} \left(\frac{X_i - X_j}{g} \right), \end{aligned} \tag{6}$$

where $\hat{f}$ is a KDE based upon a smoothing parameter g. In addition to providing more detail on the above, WAND and JONES (1995) show that the optimal value of g (minimising the mean square error) is given by

$$g_{AMSE} = \left[\frac{2K^{(4)}(0)}{-\mu_2(K)\psi_6 n}\right]^{1/7} \tag{7}$$

Unfortunately, this expression for g depends upon

$$\psi_6 = \int_{x\in\Re} f^{(6)}(x)f(x)\,dx$$

which in turn depends upon the unknown density f. Furthermore, estimating ψ_6 by $\hat{\psi}_6(g)$ (defined analogously to (6)) will not help as its optimal band-width g (defined in a manner similar to (7)) depends upon ψ_8, and so on.

We can get around this problem by initially using a quick and simple h selection strategy such as the normal scale rule to estimate g and hence calculate ψ_6. By assuming that f is normal with variance σ^2, it easily shown that

$$\psi_r = \frac{(-1)^{r/2}r!}{(2\sigma)^{r+1}(r/2)!\sqrt{\pi}}. \tag{8}$$

where r is even. Therefore, the so-called 1-stage direct plug-in (DPI) band-width selector consists of

1. Estimating ψ_6 via (8) with a suitable estimate, $\hat{\sigma}$ of σ.
2. Evaluating g_{AMSE} via (7).
3. Estimating ψ_4 via (6), where $g = g_{AMSE}$.

The DPI technique can be extended to 2 stages by initially estimating ψ_8 with a normal scale rule (i.e. using equation (8)), followed by estimation of ψ_6 and finally ψ_4 (see WAND and JONES 1995, section 3.6 for details). The extension to a still higher number of stages is obvious. Also, note that the 0-stage DPI method (where (8) is used to directly estimate ψ_4 and (5) to estimate h) is equivalent to the normal scale rule.

A.3 SOLVE THE EQUATION METHODS FOR THE SELECTION OF h

These methods are similar to the DPI approach, but take one step further by creating an iterative process with the 'optimal' h value as the solution of the iteration. The simplest such method is that of SCOTT, TAPIA and THOMPSON (1977) which again takes equation (3) as its starting point. Specifically, equation (4) can be written as

$$h = \alpha(K)\beta(f)n^{-1/5}.$$

In other words a product of two terms, the first of which is a function of the kernel only and a second term which depends upon (the second derivative of) f. If we guess a value, h_0, for the band-width and use it to form a KDE, $\hat{f}_0$,

then we can calculate a new, hopefully better, value h_1 via

$$h_1 = \alpha(K)\beta(\hat{f}_0)n^{-1/5}.$$

It is clear that this idea can be extended to an *iteration* whereby

$$h_{i+1} = \alpha(K)\beta(\hat{f}_i)n^{-1/5}$$

for $i = 0, 1, \ldots$ and h_0 is an initial guess for the band-width. Each KDE, $\hat{f}_i$, is calculated using band-width h_i.

More sophisticated *solve the equation* (STE) rules are explained in WAND and JONES. Essentially, such methods are based upon an iteration of the form

$$h_{i+1} = \left[\frac{R(K)}{\mu_2(K)^2\hat{\psi}_4(g(h_i))n}\right]^{1/5} \tag{9}$$

where the band-width g used to calculate $\hat{\psi}_4$ is a function of h_i. Put simply, these methods take a value of h_i (initially a guess h_0), use h_i to calculate a value of g which is used to calculate a new, hopefully better, value of h, h_{i+1} via (9). The process is repeated *to convergence*, that is until h_i and h_{i+1} are sufficiently close together.

A.4 CONCLUSIONS

We have seen that the DPI methods essentially provide an explicit formula for an 'optimal' band-width value. Solve the equation methods find h as the solution of an iteration. Other methods not discussed here, such as cross-validation (CV) techniques, rely upon minimising an often expensive to calculate objective function. Therefore it is no surprise that in terms of ease of implementation, the DPI and STE methods are rather more convenient than CV methods. In terms of performance Wand and Jones recommend 2-stage DPI or STE methods as generally better than CV variants, with the exception of the *smoothed* cross validation method (which is in some ways a hybrid between DPI and CV). All of these techniques have been implemented in our MATLAB routines so direct comparisons can be made.

ABSTRACT

The histogram is one of the most widely used descriptive statistical techniques in archaeology, but suffers from a number of well known problems. These include the dependence of its appearance on the choice of origin and interval width. Kernel density estimates provide an alternative to the histogram and avoid some of its problems. They have been little used in archaeology, probably because suitable software has not been widely available. We illustrate some of the advantages of kernel density estimates through several simple examples. Computation was done using the MATLAB package and routines written by the second author that are freely available. One issue in the use of kernel density estimates concerns a choice analogous to that of the interval width for a histogram. Our routines implement several approaches that are discussed in an appendix.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 409-416

I RISULTATI DELLE INDAGINI SCIENTIFICHE IN CAMPO ARCHEOLOGICO: IL PROBLEMA DELL'ARCHIVIAZIONE

1. Premessa

Come è noto l'utilizzazione di indagini scientifiche applicate ai Beni Culturali sta divenendo una realtà sempre più diffusa, con la conseguente produzione di un crescente numero di dati. Fino ad alcuni decenni fa le indagini scientifiche sui reperti archeologici o artistici erano piuttosto sporadiche, per cui era possibile legare la loro diffusione alla pubblicazione del materiale in esame, in genere sotto forma di appendice. Nel passato, grazie alla episodicità di tali impieghi, qualche volta le pubblicazioni contenevano un'approfondita discussione della tecnica utilizzata, con la esemplificazione dei risultati ottenuti, altre volte fornivano solamente i risultati sia sotto forma di dati quantitativi che di conclusioni, senza un riferimento diretto ai risultati stessi.

Appare oggi sempre più evidente come la funzione della pubblicazione dei risultati di una ricerca archeometrica non sia quella di sostituire l'archivio dei dati ottenuti ed elaborati nel corso della ricerca stessa, bensì di fornire i risultati e le conclusioni a cui si è pervenuti.

I dati richiedono invece un'archiviazione e una diffusione allo stesso modo dei dati descrittivi. D'altra parte solo la maggiore disponibilità di risultati di indagini scientifiche permette di ipotizzare un ampliamento dei criteri tradizionali di classificazione dei materiali, utilizzando per l'appunto dati qualitativi e quantitativi ottenuti grazie a tali indagini.

2. L'archiviazione dei dati è un problema ancora irrisolto

Per esemplificare il problema facciamo riferimento ad un importante restauro di un'opera d'arte quale il Marco Aurelio. In genere il lavoro di restauro viene preceduto e accompagnato da una serie di indagini sia di tipo diagnostico (radiografie, termografie, etc.), sia di tipo quantitativo (analisi delle leghe, porosità, etc.). La notevole mole dei risultati ottenuti non viene di norma pubblicata, anche perché alcuni risultati possono essere ripetitivi. Nella complessa opera di indagine sul Marco Aurelio hanno partecipato, come normalmente avviene, numerosi specialisti, ognuno dei quali ha utilizzato i metodi propri della sua disciplina. Nella pubblicazione scritta viene operata naturalmente una selezione molto rigida dei dati, legata alla interpretazione prodotta dagli studiosi: i risultati che non sono stati ritenuti significativi vengono così necessariamente omessi. Tale selezione, operata a monte sul record, produce perdita di informazione e nel contempo rende difficile verifi-

care le conclusioni raggiunte, o utilizzare gli stessi dati a supporto di nuove deduzioni. Solo l'accesso ai dati sperimentali nella loro globalità può infatti consentire una eventuale rilettura critica dei risultati stessi. Del resto non è possibile prevedere come i futuri indirizzi degli studi porteranno a rileggere i dati oggi prodotti.

Si tenga inoltre presente che la natura stessa del materiale archeologico, per la sua unicità, rende difficilmente ripetibili certe indagini, per cui è indispensabile poter accedere con relativa facilità ai risultati originari.

La reperibilità delle informazioni è legata alla definizione di regole di archiviazione, cioè all'individuazione di una collocazione "fisica" dell'archivio e alla disponibilità di un formato standard che permetta la gestione informatizzata dei dati.

3. Un'archiviazione incompleta dei dati comporta dei rischi per la conservazione degli stessi dati

Le diverse indagini scientifiche possono essere generalmente classificate in due categorie: immagini e segnali. Il formato di tali dati è stato largamente studiato in letteratura ed esistono sistemi standard di archiviazione e di trasmissione.

In particolare la larga disponibilità di calcolatori fa sì che praticamente tutti i sistemi di acquisizione attualmente usati prevedano l'archiviazione dei dati su un supporto di memoria di massa. In questo senso è inutile affrontare il problema di come trasmettere i dati: basta adeguarsi agli standard internazionali.

Al momento attuale è invece assai problematico accedere ai dati che sono dispersi nella moltitudine dei laboratori che li hanno prodotti. Va inoltre segnalato a questo proposito come sovente tali laboratori, non essendo istituzionalmente legati ai Beni Culturali, non conservino per lungo tempo i dati.

Il problema è quindi quello di studiare delle metodologie di archiviazione e di trasferimento delle informazioni, che consentano al singolo studioso di conoscere l'esistenza di determinati risultati di indagine e di potervi accedere.

Occorre sottolineare che la diffusione dell'informatica rappresenta da questo punto di vista un rischio, in quanto mentre nel passato l'archiviazione cartacea di dati scientifici (spettri, fotografie, etc.) non presentava problemi di leggibilità da parte del potenziale fruitore, attualmente non è remota la possibilità che dati pur disponibili non siano leggibili. Ciò è particolarmente vero nel caso delle immagini che attualmente sono archiviate con formati molto diversi, che per lo più non permettono di associare all'immagine stessa tutte quelle informazioni relative sia all'oggetto studiato sia alla tecnica impiegata nell'acquisizione dell'immagine, informazioni indispensabili alla rilettura del record.

In particolare esistono formati-immagine standard che hanno una larga diffusione e che sono stati usati anche nel settore dei Beni Culturali; il loro limite è, come detto, quello di non consentire l'associazione all'immagine di tutte le informazioni necessarie, per cui risulta pericoloso il loro impiego in questo particolare settore.

4. Un esempio: l'archiviazione di segnali prodotti utilizzando la Fluorescenza a raggi X

Un passo necessario alla definizione di formati standard per l'archiviazione e il trasferimento dei dati dovrebbe essere quello di consultare i ricercatori dei vari settori per studiare la maniera più efficace di trasferire i dati interattivamente. Si può certamente affermare che la conservazione dei segnali costituisce un problema meno oneroso rispetto alla conservazione delle immagini, per le quali si deve studiare quando sia possibile utilizzare sistemi di compressione "senza perdite" (error free), quando siano invece applicabili sistemi di memorizzazione meno gravosi.

L'evoluzione attuale delle indagini scientifiche sui Beni Culturali tende a realizzare sistemi di acquisizione dati che gestiscano più tecniche di misura. In alcuni casi è prevedibile che tali sistemi possano essere portatili consentendo di effettuare le misurazioni in loco.

Nell'ambito dei progetti per la realizzazione di tali sistemi mobili si è già cominciato a studiare il problema di standardizzare il formato dei dati, in modo che siano confrontabili tra loro i risultati delle misure effettuate in condizioni diverse.

In particolare nel campo della fluorescenza X (XRF), una tecnica di analisi basata sulla spettrometria dei raggi X, si è studiata tale problematica, poiché l'uso di sistemi informatici è basilare per decodificare gli spettri e tradurli in numeri comprensibili agli operatori del campo archeologico.

Il metodo XRF consiste nel sottoporre un campione ad un fascio di raggi X; questi provocano l'eccitazione degli atomi i quali, tornando allo stato stabile, emettono raggi X caratteristici di ogni elemento. Il segnale catturato da un apposito rivelatore viene rappresentato in uno spettro in cui ogni picco corrisponde ad un elemento. Dalla posizione del picco si può risalire all'elemento, dall'area del picco si ricava l'abbondanza relativa dell'elemento. Lo spettro consiste in una matrice di numeri.

Il sistematico uso che si è fatto negli ultimi anni della fluorescenza dei raggi X nel settore dei Beni Culturali, ha permesso di sviluppare una sensibilità per i problemi che si incontrano nella archiviazione e nel riutilizzo dei risultati.

Si potrebbe pensare che se l'indagine di fluorescenza è condotta in maniera quantitativa o semi-quantitativa, come ad esempio del caso dei metalli, il risultato dell'analisi sia l'unico dato che occorre conservare. Ciò non è vero

perché, soprattutto per le indagini semi-quantitative, come nel caso dell'uso non distruttivo della fluorescenza, la deduzione del risultato finale richiede:

- la elaborazione dello spettro acquisito, in altre parole il calcolo delle aree dei picchi e la sottrazione del fondo,
- l'uso di un modello analitico di elaborazione dei dati e
- l'uso di campioni standard.

Il procedimento con cui si arriva al risultato non è quindi univoco, bensì subordinato a delle scelte. Nel caso di alcune particolari indagini può essere addirittura più importante accedere direttamente allo spettro e ai rapporti tra i vari picchi dello spettro che non ai dati quantitativi dedotti, per poter trarre nuovi risultati dai dati prodotti nel corso delle misure.

Queste considerazioni mostrano come il dato principale che deve essere archiviato sia lo spettro; nello specifico esistono diversi sistemi standard di archiviazione degli spettri, utilizzati comunemente in diversi settori scentifici. Tali formati possono essere tenuti presenti per la definizione del formato dati negli studi archeometrici, ma non possono essere importati senza alcuna modifica, perché non consentono una corretta archiviazione dello spettro. Essi prevedono infatti solo l'archiviazione di tutti i dati inerenti al sistema di misura (ad esempio sorgente e rivelatore utilizzati, tensione di alimentazione, etc.). Nel caso di reperti archeologici o artistici è indispensabile tuttavia individuare sia il punto su cui è stata effettuata la misura o il prelievo, sia la modalità con cui è stata effettuata l'indagine. Per quanto riguarda la individuazione visiva del punto cui si riferisce una data analisi, una soluzione a tale problema può essere quella di produrre durante la misurazione delle immagini digitalizzate micro- e macroscopiche da allegare al file di dati. Nel caso dei metalli (Fig. 1) può essere opportuno fornire un'immagine del punto di misurazione (mediante fotografia digitalizzata o disegno) con la evidenziazione del punto spatinato che potrebbe non essere più riconoscibile in seguito.

Tutte le informazioni indicate come necessarie alla comprensione dei risultati dovrebbero essere necessariamente inglobate nell'*header* del file e soprattutto dovrebbero essere fornite in modalità standard.

A titolo esemplificativo riportiamo qui una proposta di un possibile formato-dati di fluorescenza per indagini sui metalli. Nelle Figg. 2-3 son presentati due spettri relativi rispettivamente ad un oggetto di bronzo e ad una ceramica; in Fig. 4 è presentato parte del contenuto di uno spettro e tutti i dati relativi alle condizioni di misura (taratura in energia, tensione del tubo, etc.); in Fig. 5 è il testo di un possibile *header* nel caso di analisi eseguite su materiali archeologici.

Un altro strumento molto usato nello studio dei reperti archeologici è il microscopio elettronico interfacciato a microsonda. Nel caso di analisi condotte mediante tale strumento la situazione si presenta più complessa dal momento che esiste uno spettro come il precedente associato a ciascun punto

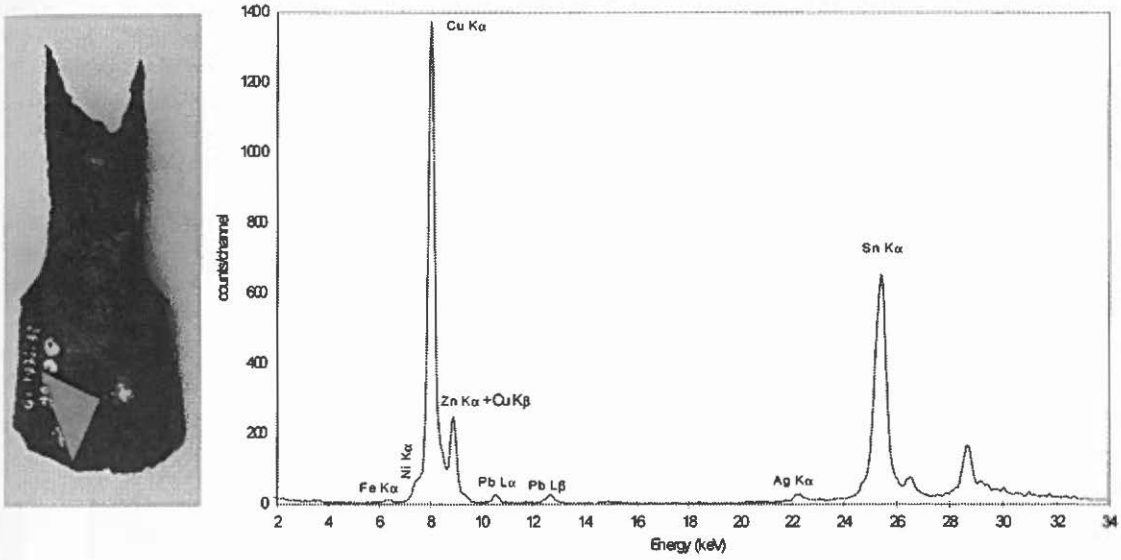


Fig. 1 – Immagine di un manufatto antico in bronzo in cui è evidenziato il punto dell'analisi.
Fig. 2 – Spettro XRF del punto evidenziato nel manufatto in Fig. 1.

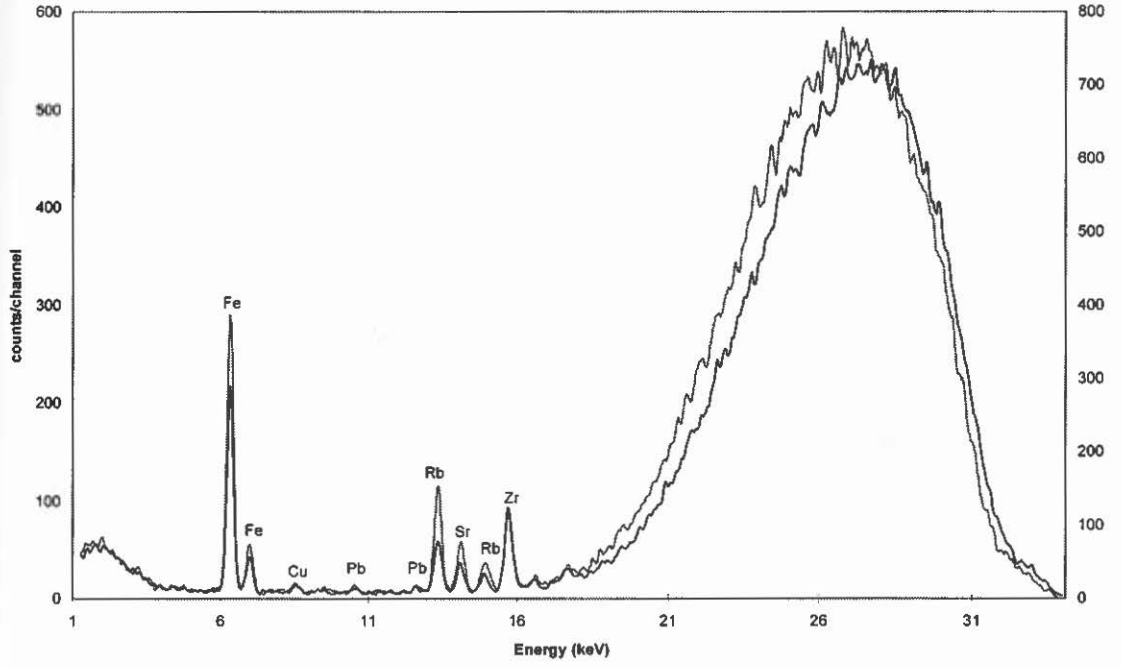


Fig. 3 – Spettri XRF di due punti della superficie di una ceramica dipinta.

Nome del file:.....
Data:.....
Ora inizio acquisizione:
Realtime:
Livetime: Deadtime:
Rivelatore: Risoluzione a 5.9 keV:
Sorgente eccitatrice: a) Sorgente Radioisotopica - Radioisotopo:
Energie di emissione:
b) Tubo a raggi X - tensione: (KV) corrente: (μa)
Emissione diretta: filtraggio intrinseco: filtro:
Targhetta secondaria: Elemento: Energie emesse:
Calibrazione: Energia1: Canale1:
Energia2: Canale2:
Energia3: Canale3:

Conteggi totali nello spettro:

Canale	Conteggi
1	95
2	89
3	75
4	83
5	112
6	109
7	131
8	139
9	123
10	108
11	148
12	188
13	270
14	347
15	463
16	469
17	408
18	270
19	224
20	155
21	150
22	113
23	97
24	103
25	112
26	80
27	88
28	92
29	95
30	99
31	130
32	147
33	191
34	242
35	336
36	354
.....	

Fig. 4 – Parte iniziale di un file contenente uno spettro.

Numero di inventario:
Codice di identificazione della scheda RA:
Riferimento al file immagine prodotto durante la misura:
Luogo Intervento:
Stato di conservazione della zona esaminata:
Presenza di altre indagini sulla stessa zona:
Modalità di esecuzione dell'esame:
a) Non distruttiva - Numero di punti esaminati:
Precisione del puntamento: (mm)
Spatinatura superficiale:
b) Mediante prelievo - Quantità di materiale: (mg)
Preparazione del campione:
Indagine qualitativa - Motivazioni della scelta:
Indagine (semi) quantitativa - Tipo di calibrazione:
Metodo di analisi impiegato:
Commenti:

Risultati dell'esame: Elementi trovati:
Conteggi nelle ROI:
Concentrazioni elementi:

Fig. 5 – Proposta di una testata per il record dei dati di analisi di materiali archeologici.

dell'immagine (Tav. XX, c-d) che costituisce il risultato dell'indagine. In questo caso la mole dei dati che occorre archiviare è molto più grande e la soluzione del problema non può essere che definita dalla equipe degli studiosi che usano in campo archeologico tale tecnica e che sanno quali sono realmente le informazioni indispensabili.

Questi due esempi mostrano come la soluzione al problema non sia per nulla semplice e come sia possibile commettere errori soprattutto in assenza di indicazioni da parte di utenti esperti.

5. Conclusioni

Siamo ormai entrati in una nuova realtà in cui i dati scientifici divengono indispensabili per connotare e comprendere a pieno il record archeologico. In questo contesto la grande quantità di dati prodotti non può essere gestita che mediante metodologie informatiche appositamente studiate.

Per tutte le tecniche vanno individuate le informazioni necessarie e sufficienti a connotare i dati così come illustrato nell'esempio e questo è compito della comunità scientifica nel senso più ampio del termine. Il complesso di tali informazioni non deve restare disperso nei singoli laboratori con il rischio di una perdita totale, ma dovrebbe essere archiviato presso una istituzione centrale legata al Ministero dei Beni Culturali e Ambientali o al Mini-

stero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica e messo a disposizione degli studiosi.

Ilaria Bonincontro
C.I.S.A.D.U., Università di Roma "La Sapienza"
Claudio Giardino
Dipartimento di Ingegneria chimica, dei materiali, delle materie prime e metallurgia
Università di Roma "La Sapienza"
Giovanni Ettore Gigante
Dipartimento di Fisica
Università di Roma "La Sapienza"

ABSTRACT

This study deals with the correct storage of data relative to scientific analysis of Cultural Heritage. The analysis of the present situation shows the high-rated danger of information scattering. The data acquired in scientific analysis appear as signals and images. The different problems involved in both cases have been discussed. The case of the XRF spectra is presented as detailed examples of the proposed approach.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 417-428

ALCUNE CONSIDERAZIONI SULL'USO DELLE IMMAGINI DIGITALI PER IL CONFRONTO DI REPERTI ARCHEOLOGICI

1. Premessa

Il CILEA (Consorzio Interuniversitario Lombardo per l'Elaborazione Automatica) ha da molti anni avviato un programma di ricerca sul trattamento delle immagini, acquisendo un buon livello di preparazione e di utilizzo di una serie di sistemi, oltre che una specializzazione in diversi campi applicativi. Di particolare interesse sono alcuni progetti di applicazione delle tecniche di trattamento delle immagini nel campo della ricerca sui beni culturali ed in particolare sui reperti archeologici, grazie anche ad una stretta e duratura collaborazione con la cattedra di Etruscologia ed Archeologia dell'Italia Antica dell'Università Statale di Milano.

Vogliamo ribadire innanzitutto che i criteri informativi alla base delle sperimentazioni in corso sono soprattutto quelli di porsi a fianco del singolo studioso senza cambiare il tradizionale metodo di ricerca, fornendo uno strumento di supporto capace di rendere oggettiva ma soprattutto di potenziare l'analisi autoptica degli oggetti oltre che di ampliare e rafforzare le tecniche di riconoscimento delle tipologie e quindi di datazione e di confronto.

2. I metodi

Le tecniche di elaborazione digitale delle immagini si rivelano particolarmente utili nel fornire criteri di confronto quantitativi, laddove tradizionalmente le operazioni si svolgono per semplici giustapposizioni visive, senza possibilità di cambiamenti di scala e/o di compensazioni anamorfiche per sopperire alle distorsioni dell'ottica fotografica e delle condizioni di ripresa, nonché alle deformazioni che il materiale del reperto ha subito nel corso del tempo. Dei vari filoni dell'*Image Processing* (IP) digitale, sicuramente quello dell'elaborazione della geometria fornisce i risultati più sorprendenti, anche se gli stessi fondamenti matematici e statistici dei vari algoritmi usati suggeriscono da una parte una grande cautela e, dall'altra, un'attenta valutazione degli elementi su cui poggiano le deduzioni finali dello studioso, che certamente non possono prescindere da considerazioni storico-culturali difficilmente trattabili con un *computer*.

Tutte le applicazioni sperimentate meriterebbero alcune considerazioni sul rapporto costi/benefici e sulla efficacia delle specifiche tecniche della elaborazione digitale delle immagini usate di volta in volta, nonché sulla qualità del materiale pittorico (fotografie, diapositive etc.) usato, dove l'esperienza

ha comprovato la necessità di disporre, ove possibile, di materiale realizzato *ad hoc* per le elaborazioni digitali. L'importanza di disporre di materiale visivo specifico, per esempio, si può facilmente dedurre ove l'analisi sia relativa a immagini di oggetti tridimensionali, come manufatti, bassorilievi, altorilievi etc.

Nel caso di analisi di immagini di opere bidimensionali, come dipinti, affreschi, o comunque di tipo pittorico, l'"immagine" riassume il contenuto informativo dell'opera nella sua interezza, mentre nel caso opposto degli oggetti tridimensionali essa rappresenta solo una delle molteplici angolazioni visive sotto cui può essere riguardata l'opera. Ciò pone dei problemi non indifferenti di ripresa fotografica (angolo di ripresa, illuminazione etc.) e, a parità di condizioni di ripresa, la necessità di usare praticamente solo il gioco delle luci e delle ombre per indagare la forma e la natura geometrica del reperto, specialmente nei casi dove il colore, che pure potrebbe essere di per sé oggetto di indagine, è del tutto assente.

Si precisa che per la realizzazione di questo intervento non sono state utilizzate volutamente foto realizzate *ad hoc* da fotografi professionisti poiché si è voluto provare il metodo applicato a materiale fotografico di studio.

Alcune applicazioni, tuttavia, sono risultate esemplari, sia per la precisione senza alternative dei metodi numerici, sia per la "naturalezza" dei trattamenti, naturalezza che ha contribuito non poco alla comprensione e al gradimento di queste tecniche da parte di operatori di contesti disciplinari apparentemente molto lontani dal mondo informatico e matematico.

Tra gli algoritmi più importanti di tipo geometrico dell'*Image Processing* sono stati sperimentati quelli che producono deformazioni geometriche, dai più semplici, come ad esempio la rotazione, ai più complessi, come le deformazioni polinomiali, tramite corrispondenze fra punti notevoli di controllo, allo scopo di registrare le immagini e renderle sovrapponibili in modo da oggettivare e enfatizzare il confronto. Oltre a questa categoria di elaborazioni, naturalmente sono state impiegate quasi tutte le tecniche di calcolo pittorico di cui è normalmente dotato ogni buon sistema di *Image Processing*.

Ci si riferisce, in particolare, a tutta quella serie di trattamenti intesi soprattutto a preparare un'immagine alle successive elaborazioni, come l'ottimizzazione del contrasto, l'utilizzo di filtri di smussamento e/o di enfatizzazione dei dettagli, la progettazione di *palette* di livelli di grigio opportune, gli scontornamenti per risolvere un oggetto dal suo sfondo e così via. L'obiettivo, sia delle elaborazioni geometriche che di quelle di pretrattamento, infine, è stato quello di preparare il materiale digitale per le vere e proprie elaborazioni di riconoscimento di forme (*Pattern Recognition*), o comunque per elaborazioni che evidenziassero in maniera più o meno automatica le "forme simili", fra cui si deve senz'altro sottolineare l'importanza delle procedure di correlazione dei livelli di grigio di due immagini registrate.

Riportiamo una breve descrizione di alcune tecniche usate, mentre rimandiamo all'appendice la descrizione dettagliata degli algoritmi:

1. **Contrasto**: è una riproposizione in termini di calcolo numerico delle normali tecniche fotografiche, soprattutto in fase di sviluppo e stampa. Vengono aumentate, o diminuite, le distanze reciproche fra livelli di grigio adiacenti, in maniera tale che l'occhio colga maggiori dinamiche di luminosità che permettano una migliore lettura dell'immagine.
2. **Equalizzazione dell'istogramma**: consiste in un contrasto ottimizzato, dove viene minimizzato il rischio che un gran numero di livello di grigio sia appiattito verso il basso (nero) o verso l'alto (bianco: in questo caso si parla di solarizzazione).
3. **Scontornamento** (problema figura/sfondo): al contrario delle apparenze si tratta di un problema tutt'altro che banale. Si va dal semplice scontornamento manuale tramite *mouse* a quelli più sofisticati che seguono automaticamente i contorni (*line followers*) o estraggono regioni statisticamente.
4. **Filtri**:
   4.1. di eliminazione dei disturbi (smussamento): provocano una certa sfocatura dell'immagine, come il filtro a media mobile.
   4.2. di evidenziazione delle zone di transizione delle luminosità (zone di contorno): filtro di *Sobel*, filtro laplaciano etc., eventualmente seguiti da procedimenti di assottigliamento delle linee rivelate (*thinning*).
   4.3. di esaltazione dei dettagli (*sharpening*): da usare con cautela perché di valenza quasi esclusivamente visiva.
5. **Operatori locali** per l'analisi della struttura locale dei grigi: operatori molto sofisticati (non lineari) che fanno ricorso anche a concetti di geometria non euclidea, come quella degli oggetti frattali, di cui si può sfruttare il concetto di dimensione frazionaria locale dei livelli di grigio dell'immagine, che consentono di valutare alcune caratteristiche interessanti, come il grado di levigatezza dell'oggetto rappresentato o, viceversa, quello di rugosità.
6. **Correlazioni locali**: si è usato il coefficiente di correlazione di *Pearson*, ben noto a chi si interessa di statistica. Il valore di tale coefficiente varia fra -1 (livelli di grigio delle due immagini confrontate che variano in maniera inversa) e 1 (quando i due livelli di grigio concordano nella variazione), passando per 0 (completa scorrelazione).
7. **Combinazione di più immagini** in un'immagine a colori: si usa principalmente per confrontare su una scala cromatica le varie immagini.
8. **Elaborazioni geometriche**:
   8.1. *rescaling* di un'immagine: si alterano le dimensioni dell'immagine conservando o meno i rapporti fra i lati.
   8.2. *warping*: si tratta di alterare la geometria dell'immagine secondo una regola qualunque. Si è usata principalmente la deformazione per punti di controllo (punti corrispondenti su due immagini) che consente la registrazione, ovvero la sovrapponibilità, di due immagini da confrontare.

Come detto prima questo intervento vuol focalizzare l'attenzione sulla possibilità di individuazione di un metodo oggettivo e preciso di ausilio al tradizionale metodo di confronto attuato, soggettivamente dai singoli studiosi, utilizzando la propria memoria sui particolari degli oggetti visti o, più spesso, la documentazione messa a disposizione su supporto cartaceo sia esso pubblicata o proveniente da fototeche di musei o archivi fotografici in genere.

I tipi di confronto archeologico possono essere divisi in due grandi e generiche categorie: le uguaglianze e le somiglianze. La ricerca di un'uguaglianza si applica, in campo archeologico, su tipologie (Bonghi Jovino 1990, 19-59) di oggetti o decorazioni prodotte con tecniche a stampo, come gli stampi per le terrecotte votive ed architettoniche, le monete, le decorazione a punzone o a cilindretto e quant'altro ancora.

La somiglianza, o similitudine o ascendenza o tradizione, si ricerca invece su quei manufatti che possono proporre delle somiglianze di stile, di tecnica, di tratto, eccetera.

Abbiamo applicato le procedure prima illustrate su numerosi confronti archeologici sia alla ricerca di uguaglianza sia di similitudine.

3. Le uguaglianze

Esaminiamo in primo luogo le procedure ed i risultati raggiunti su materiali a stampo, improntati su criteri di uguaglianza. Tra le procedure sopra mostrate alcune consentono di stabilire corrispondenze fra punti, permettendo la sovrapposizione di immagini di reperti, evidenziando così le uguaglianze o le differenze anche ricorrendo a sofisticati indici statistici di correlazione.

È stato così possibile ottenere il riconoscimento del prototipo o l'evidenziazione delle varianti, sia dove la frammentarietà del pezzo impediva una lettura certa, sia dove la presenza del ritocco ne comprometteva il confronto oggettivo.

Nel caso delle due teste votive capuane (Fig. 1) l'obiettivo è stato quello di verificare la generazione dei due esemplari dal medesimo stampo e l'individuazione di eventuali ritocchi prodotti a mano dopo la realizzazione del positivo o sulla matrice (per la scheda tecnica del prototipo, datazione e confronti cfr. Bonghi Jovino 1965, 60-64, tav. XXIV, 3; Bedello 1975,42-44, tav. VII, 2 e 81, tav. XXIV, 4).

Descriviamo brevemente la sequenza degli algoritmi applicati.

In prima istanza le immagini digitalizzate vengono trattate al fine di rendere una miglior visualizzazione dell'immagine stessa con trattamenti migliorativi sufficientemente modesti da non compromettere le informazioni contenute che entrano in gioco per la correlazione[1].

[1] A tal fine, per mantenere una base di confronto, anche lo scanner è stato calibrato allo stesso modo nell'acquisizione delle due immagini.

Fig.1 – Teste votive capuane (prototipo HXII) (BONGHI JOVINO 1965).

In secondo luogo si applica l'algoritmo di Warping fissando i punti di corrispondenza (punti di controllo) (Tav. XXI, a). Tengo a precisare che la scelta dei punti è uno dei momenti più delicati del procedimento dove è indispensabile la collaborazione tra informatico ed archeologo. L'archeologo infatti intuisce quali sono i punti più significativi, vale a dire i punti di maggior uguaglianza tra i due esemplari esaminati.

Date due immagini A e B, opportunamente corredate con i relativi punti di controllo, la procedura di *warping* ha come obiettivo quella di deformare geometricamente B (immagine di input) in modo tale che la sua deformata B' possa essere ragionevolmente sovrapposta ad A (immagine di riferimento). Tale operazione si dice registrazione di B su A, dove i punti di controllo di B, riportati su B', coincidono entro un margine d'errore accettabile con i corrispondenti su A. Per quanto detto sulla delicatezza della scelta della "nuvola" dei punti di controllo, nella deformata B' si considererà correttamente come regione di analisi e confronto solo la parte più ricca di punti di controllo, ovvero la parte in cui i punti di controllo sono stati scelti in maniera più uniforme e ben distribuita.

Applicando l'algoritmo di correlazione (vedi appendice tecnica) fra A e B' – ora confrontabili geometricamente per lo meno nella regione "densa" di punti di controllo – otteniamo una terza immagine (Fig. 2) che è una funzione complessa delle due immagini da confrontare. Il livello di grigio di questa immagine, rappresenta, *pixel* per *pixel*, una stima del grado di somiglianza delle due immagini confrontate in un piccolo intorno (areola) del *pixel* stesso, secondo una scala che va teoricamente da -1 a 1, ma che in pratica si riduce al solito *range* da 0 (nero) a 255 (bianco). In questa scala, i *pixel* con correlazione negativa (modi di variazione opposti dei livelli di grigio di A e

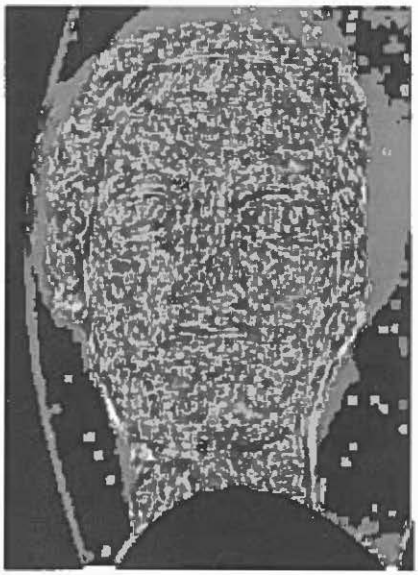


Fig. 2 – Risultato dell'applicazione della correlazione alle due immagini A e B'.

B') hanno un livello di grigio compreso tra 0 e 127, quelli completamente scorrelati hanno un valore 128 e quelli con correlazione positiva (modi di variazione concordanti dei livelli di grigio di A e B') via via crescente da 129 a 255. A livello di interpretazione visiva, quindi le parti dell'immagine risultato corrispondenti a correlazioni positive appariranno più chiare delle parti che non presentano alcuna correlazione significativa.

Va sottolineato, infine, che la scelta delle dimensioni (in *pixel*) dell'areola su cui eseguire la correlazione locale dipende fortemente dal grado di dettaglio in cui va "letta" l'immagine risultato. La scelta di un'areola troppo piccola, infatti, carica eccessivamente di dettagli il risultato ed inoltre rende instabile e a volte poco significativo il *sample* di correlazione, mentre, di converso, una troppo ampia "lima" dettagli altrimenti preziosi.

4. Le similitudini

Passiamo ora ad esaminare un confronto tra materiale prodotto non a stampo al fine di mettere a punto un criterio che ci permetta di evidenziare ed enfatizzare le somiglianze.

Come abbiamo descritto sopra, di non minore rilevanza sono gli algoritmi che permettono di ricercare gli indici di somiglianza. Queste procedure permettono di verificare oggettivamente quanto due immagini sono sovrapponibili e valutarne il grado.

Qui, a differenza del precedente caso delle uguaglianze, non è lecito

registrare le due immagini da confrontare in quanto non si tratta di stabilire delle concordanze fra gli stampi originali. Si preferirà piuttosto uniformare le scale delle due immagini in maniera simile per le dimensioni lungo le colonne (X) e lungo le righe (Y). Una volta rese uguali le due scale geometriche si potrà applicare il già visto algoritmo della correlazione, con le stesse modalità di interpretazione dell'immagine risultato.

È chiaro comunque che per confrontare due immagini occorre prima pretrattarle variando la luminosità e il contrasto globale, smussando i disturbi e migliorando il rapporto figura /sfondo.

Sono state scelte tra le sperimentazioni effettuate alcune eseguite sulle lettere di un'epigrafe ed altre eseguite su iconografie decorative monumentali.

Non è infatti da sottovalutare che la possibilità di trarre indici di somiglianza tra lettere di diverse epigrafi può favorire il riconoscimento della mano dello *scriptor* o, nel caso di confronti tra iconografie decorative, il riconoscimento di modelli omogenei.

Nel primo caso abbiamo voluto confrontare le coppie di lettere tratte da due epigrafi di due altari gemelli conservati a Milano (Reale 1989, 211-212; si tratta di due are in marmo bianco provenienti da Brienno - CO).

Dai testi delle due epigrafi sono state scelte le M di MATRONIS e MAXIMO, oltre che le R e le A di ARCHIGENES, parola presente su tutte e due le epigrafi (Tav. XXI, b-d).

Per aiutare una visione più nitida abbiamo colorato le singole lettere con colori complementari.

Nel secondo caso l'obiettivo era quello di ricercare il riconoscimento di modelli omogenei in confronti tra iconografie decorative.

Abbiamo preso in esame decorazioni di timpani triangolari con Medusa di stele funerarie conservate nel nuovo lapidario delle Civiche Raccolte Archeologiche di Milano (Sartori 1994, 38, 104, 124)(Figg. 3-4). Utilizzando gli operatori locali abbiamo estrapolato i contorni. Abbiamo sovrapposto infine le immagini ottenute a due a due per evitare esagerate sovrapposizioni (Tav. XXI, e).

5. Uguaglianze *versus* somiglianze

Possiamo notare la differenza sostanziale tra la ricerca di un'uguaglianza, dove è lecita, e la ricerca di una somiglianza. Infatti dove si ricerca un'uguaglianza è lecito distorcere l'immagine per eliminare o smussare le differenze date dalle dimensioni differenti, o dalle abrasioni, o dai ritocchi od altro. Quando invece si ricerca più semplicemente un grado di similitudine si sovrappongono le due immagini, semplicemente riscalate, e si osservano le sovrapposizioni.

I risultati ci sono sembrati soddisfacenti tanto che il metodo è già stato applicato su materiale in studio a supporto della ricerca tradizionale. A lato

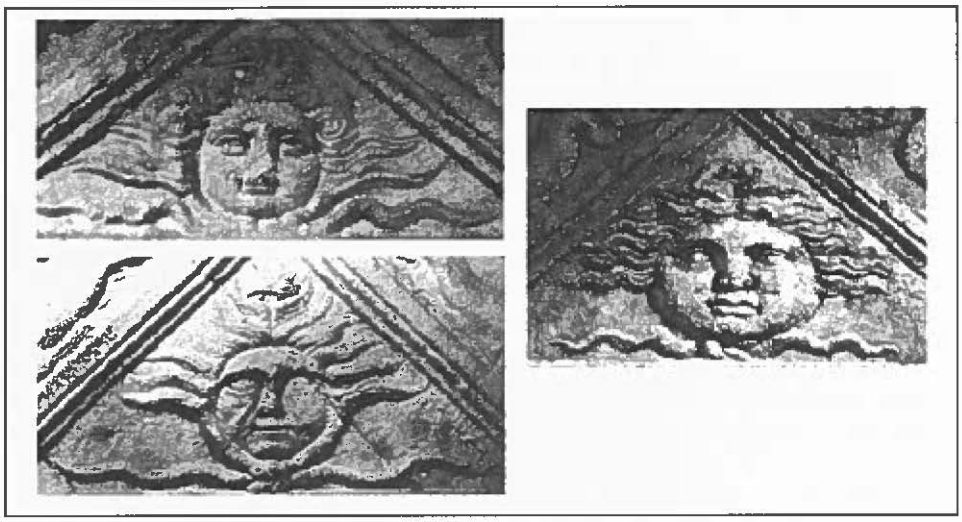


Fig. 3 – Timpani triangolari di stele funeraria con Medusa.

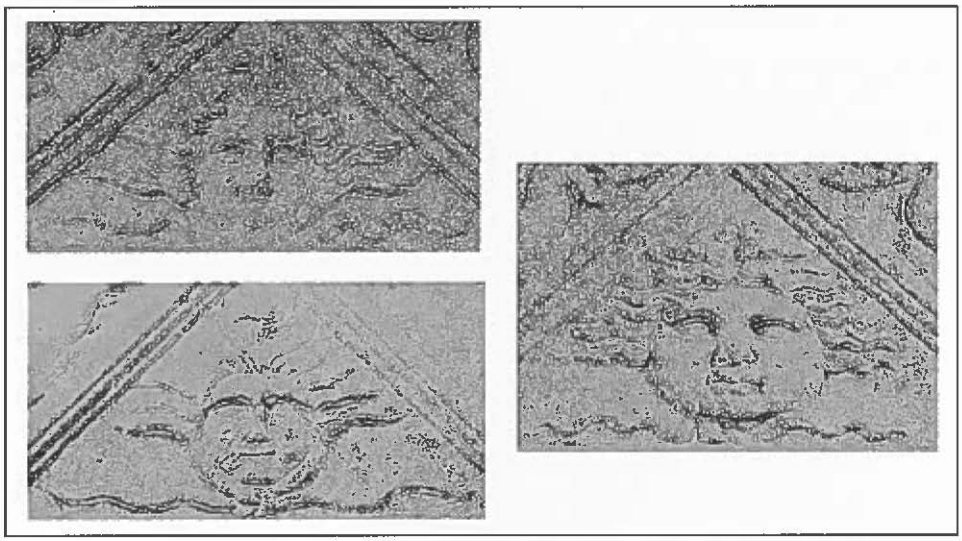


Fig. 4 – Risultato dopo l'utilizzo di operatori locali sui timpani triangolari con Meduse.

pratico la tecnica viene richiesta per lo più per fugare dubbi o nel tentativo di ricercare dati oggettivi di confronto. Inoltre tutte le tecniche di miglioramento vengono utilizzate per rendere al meglio le immagini e quindi per affrontare un confronto anche laddove non è stato possibile un esame autoptico dei reperti da confrontare.

Vogliamo sottolineare però che la complessità e la raffinatezza del metodo, oltre alla peculiarità delle caratteristiche di partenza del materiale pittorico utilizzabile, sminuisce l'applicabilità su larga scala. È infatti indubbio che per semplici confronti, l'occhio allenato dello studioso non può essere in nessun modo sostituito.

Non è inoltre da sottovalutare l'impossibilità di standardizzazione delle procedure; infatti le caratteristiche del reperto stesso e la qualità del materiale fotografico di volta in volta esaminato impone un'analisi univoca caso per caso.

Ed ancora, i modelli di studio sperimentati suggeriscono una stretta collaborazione tra esperti informatici ed archeologi. Abbiamo infatti constatato che solo il lavoro di équipe ha portato a buoni risultati. In altro modo gli esperimenti risultavano sbilanciati. Il metodo qui presentato infatti utilizza tecniche informatiche e matematiche assai complesse, non acquisibili in breve tempo dall'esperto archeologo. D'altro canto lo stesso esperto di *Image Processing* il più delle volte non è in grado di comprendere quali sono i reali obiettivi preposti alla ricerca archeologica e punta tutte le proprie energie su buone realizzazioni di ottima resa visiva, ma di scarsa pregnanza scientifica.

Quindi l'applicabilità del metodo mantiene un buon rapporto costi/benefici solo in casi particolari. Vale a dire quando l'oggettivazione di un confronto costituisce il perno fondamentale di una ricerca. Le applicazioni su reali percorsi di studio porteranno ad una valutazione complessiva del metodo, verificando in quali casi il trattamento delle immagini può divenire indispensabile ausilio di studio.

Emilia Groppo, Claudia Vai
CILEA, Milano
Carlo Jacob
Informatica Applicata
Università per Stranieri di Perugia

APPENDICE

Algoritmo della correlazione

Date due immagini da correlare, si consideri per ogni *pixel* delle matrici immagini un insieme di *pixel* circostanti (es. l'insieme degli otto *pixel* circostanti) ossia si prenda in considerazione una sottomatrice locale (areola) di *pixel* 3x3 o superiore e si valuti:

$$\rho = \sigma_{xy}/\sigma_x\sigma_y$$

ove:

$$\sigma_{xy} = m_{xy} - m_x m_y$$

$$\sigma_x = \sqrt{m_{xx} - m_x^2}$$

$$\sigma_y = \sqrt{m_{yy} - m_y^2}$$

con m si indica il valore medio, mentre x e y rappresentano gli insiemi dei *pixel* (*samples*) contenuti nelle sottomatrici relative a *pixel* corrispondenti delle due immagini.

ρ risulterà appartenere all'intervallo [-1, 1].
I valori di correlazione vanno poi distribuiti tra 0 e 255 in modo tale che:
-1 corrisponda a 0, 0 corrisponda a 128, 1 corrisponda a 255.

Modifica della luminosità e del contrasto dei toni di grigio

La modifica dei toni di grigio iniziale si rende necessaria per migliorare la visibilità di un'immagine. Essa è una combinazione di variazioni di luminosità e variazioni di contrasto. Le prime si ottengono attraverso il cosiddetto *histogram slide* e le seconde tramite l'*histogram stretching*.

L'*histogram slide* consiste nel sottrarre o aggiungere una costante a tutti i *pixel* dell'immagine, l'effetto che si ottiene è un'immagine più luminosa o più scura di quella di partenza, il cui istogramma risulta spostato a destra o a sinistra rispetto l'istogramma originale.

L'*histogram stretching* consiste nella moltiplicazione o divisione di tutti i *pixel* dell'immagine per un valore costante. L'istogramma dell'immagine risultante risulta più concentrato o più distribuito rispetto all'istogramma iniziale.

Elaborazioni geometriche

Utilizzando operazioni geometriche è possibile ottenere una ridistribuzione spaziale dei *pixel*.

L'equazione generale che descrive una trasformazione geometrica è:

$$F(x,y) \rightarrow G(u,v)$$

ove (x,y) sono le coordinate iniziali del *pixel* e (u,v) sono le coordinate del *pixel* in seguito alla trasformazione geometrica che mappa l'immagine F (immagine di *input*) nell'immagine G (deformata), di sistemi di riferimento rispettivamente (X,Y) e (U,V). Ogni operazione geometrica è definita da equazioni che definiscono le regole della mappatura. Lo *scaling* di una immagine, ad esempio, è definito mediante le due equazioni:

$$u=Sx$$
$$v=Sy$$

ove x e y sono le coordinate del *pixel* considerato in F, u e v le nuove coordinate del *pixel* in G, mentre S è il fattore di scala.

Equalizzazione dell'istogramma

L'equalizzazione dell'istogramma assicura la miglior ridistribuzione dei toni di grigio, nel senso che ottimizza sia il contrasto che la luminosità. Infatti, in molte immagini i *pixel* risultano distribuiti in maniera tale da non sfruttare appieno tutto l'intervallo 0-255 della scala dei grigi, con grande svantaggio nella "letttura" dell'immagine stessa.

Nell'equalizzazione dell'istogramma i valori dei *pixel* vengono ridistribuiti in modo da "popolare" uniformemente tutto l'intervallo 0-255.

Filtri

I filtri permettono di generare delle immagini in cui è possibile evidenziare solo le alte frequenze (rapide variazioni della luminosità) o le basse frequenze (piccole variazioni di luminosità) o le zone di transizione (zone di contorno) che portano alla individuazione o all'esaltazione dei contorni.

Le operazioni di filtraggio si basano sul metodo matematico della convoluzione.

Intuitivamente la convoluzione altro non è che la determinazione del nuovo valore di luminosità di un *pixel* in funzione del suo valore e di quelli dei *pixel* circostanti. Più precisamente si calcola il nuovo valore di luminosità di un *pixel*, come media pesata dei valori dei *pixel* circostanti e del *pixel* considerato. L'insieme dei pesi relativi al *pixel* considerato e ai suoi vicini è detto *kernel* (o maschera di convoluzione) e può essere considerato come una tabella di dimensioni, 2x2, 3x3 ecc. La media pesata differisce dalla media convenzionale per il fatto che i valori dei vari *pixel* vengono moltiplicati per i pesi corrispondenti nel *kernel* (coefficienti di convoluzione) i quali determinano la maggiore o minore influenza del *pixel* associato sul risultato finale.

Il *kernel* classico ha dimensioni 3x3 e i *pixel* circostanti il *pixel* centrale □ sono detti 8-vicini. Numerando i *pixel* circostanti da 0 a 7:

0 1 2
3 □ 4
5 6 7

la maschera di convoluzione:

w0 w1 w2
w3 w□ w4
w5 w6 w7

attribuisce il peso w0 al *pixel* numerato 0, w1 a quello numerato 1, e così via.

La maschera di convoluzione di un filtro di *sharpening*, che permette di accentuare le alte frequenze lasciando inalterate le basse frequenze, è costituita da un 9 centrale e da una serie di -1 intorno:

-1 -1 -1
-1 9 -1
-1 -1 -1

La maschera di convoluzione classica di un filtro passa basso, che riduce le alte frequenze producendo un'immagine più offuscata, è costituita da nove coefficienti di valore 1/9 (media mobile 3x3)

1/9 1/9 1/9
1/9 1/9 1/9
1/9 1/9 1/9

La classica maschera di convoluzione di un filtro di tipo Laplaciano modificato (passa alto) che permette di evidenziare tutti i contorni indipendentemente dal loro orientamento, è costituita da un 8 centrale e da una serie di -1 tutt'intorno.

-1 -1 -1
-1 8 -1
-1 -1 -1

Combinazione di immagini

La combinazione di due immagini può essere espressa matematicamente come:

$R(x,y)=I_1(x,y)$ & $I_2(x,y)$

ove $I_1(x,y)$ e $I_2(x,y)$ rappresentano le due immagini mentre & rappresenta la funzione di combinazione che corrisponde agli operatori matematici e logici +, -, x, /, AND, OR, OR esclusivo.

Operatori locali lineari e non lineari

In generale con il termine di operatore locale si intende ogni algoritmo matematico che opera su un intorno del *pixel* considerato, facendo concorrere al risultato tutti i *pixel* compresi nell'intorno stesso. Si distinguono operatori locali lineari in cui si ha:

$$Op(A+B) = Op(A)+Op(B)$$

con Op operatore generico e A e B immagini, come i familiari filtri passa alto, passa basso ecc. che operano tramite convoluzione, e operatori non lineari per cui si ha:

$$Op(A+B) \quad Op(A)+Op(B)$$

Di solito i risultati più interessanti si ottengono con quest'ultimi operatori tra cui possiamo citare il filtro mediano, il filtro min-max adattativo, il filtro di *coarseness* ecc.

Note tecniche

Le elaborazioni presentate sono state eseguite su *hardware* AST e PS/2 IBM, usando i seguenti *software:*

1. *Aldus Photostyler* 2, sistema operativo *MS Windows*
2. *Research Systems* ENVI 2.0 e IDL 3.6.1, sistema operativo *MS Windows*
3. *software ad hoc*, sistema operativo *OS/2 WARP*

BIBLIOGRAFIA

Baxes G.A. 1984, *Digital Image Processing. A Pratical Primer*, Denver, Cascade Press.

Bedello M. 1975, *Capua Preromana. Terrecotte votive, III, Testine e Busti*, Firenze, Sansoni ed.

Bonghi Jovino M. 1965, *Capua Preromana. Terrecotte votive, I, Teste isolate e mezzeteste*, Firenze, Sansoni ed.

Bonghi Jovino M. 1990 (ed.), *Artigiani e botteghe nell'Italia Preromana*, Roma, L'Erma di Bretschneider.

Cappellini V. 1985, *Elaborazione numerica delle immagini*, Torino, Boringhieri.

Gonzales R.C., Wintz P. 1977, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley.

Reale M. 1989, *Le iscrizioni latine del territorio comense settentrionale*, «Rivista Archeologica dell'Antica Provincia e diocesi di Como», 171, 207-297.

Rosenfeld A., Avinash C.K. 1982, *Digital Picture Processing*, London - New York, Accademic Press.

Sartori A. 1994, *Guida alla sezione epigrafica delle Raccolte Archeologiche di Milano*, Milano, Comune di Milano.

Zamperoni P. 1990, *Metodi dell'elaborazione digitale di immagini*, Milano, Masson.

ABSTRACT

The authors describe the use of digital image processing techniques aiming at achieving criteria of quantitative comparison. Usually these procedures are executed using visual superimposition of images and constrained by the lack of rescaling and anamorphic making up that could be used to cancel the optical distortions caused by lenses. The criteria used within the experimental activity are aimed at helping the archaeologists without changing their traditional research methods. These techniques can be seen as an interesting tool able not only to make impartial but also to enhance the autoptic analysis of the findings. The most important algorithms pertaining to Image Processing have been used for investigating the origin and the age of moulded and handmade objects.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 429-446

COMPUTER BASED ACQUISITION OF ARCHAEOLOGICAL FINDS: THE FIRST STEP TOWARDS AUTOMATIC CLASSIFICATION

1. Introduction

Usually a large number of sherds of archaeological pottery is found at excavations. These sherds are photographed, measured, drawn and catalogued. Up to now, all this has been done by hand, and means a lot of routine work for the archaeologist. Therefore it is necessary to construct an acquisition system for archaeological finds to form the basis for a subsequent automatic classification. We are currently constructing a system (prototype), that carries out an automated 3D-object acquisition with respect to the archaeological requirements. With the help of this system and the knowledge of an expert an automated classification of archaeological finds should be achieved.

Whereas the results of the conventional acquisition by different archaeologists may differ, this system should serve the archaeologist as a powerful tool to reduce the amount of routine work and to get an objective, reproducible acquisition of the material. Fig. 1 shows the drawing of a sherd found at the excavation site Petronell near Vienna. First it was measured with the help of a profile "comb" to get the contour line (Fig. 1a) and then a top view of the sherd was drawn (Fig. 1b). Approximately 1½ hours were necessary to complete this drawing. The processes can be carried out by computerized methods in both a faster and a more exact way. The process of drawing and archiving a sherd can be automated by computing the cross-section out of the three-dimensional model of the sherd and the topview with the help of the pictorial information of the surface of the sherd and the surface model.

In this paper an acquisition system consisting of a combination of the *shape from stereo method* (Menard 1991) and the *shape from structured light method* (Sablatnig 1991) is proposed that could help the archaeologist in his work and automate the archivation process. First we present an overview of existing methods for archaeological image acquisition methods. These systems are half-automated, so the amount of work has not really been reduced. Next we focus on the two acquisition methods to minimize failures in the output, providing a 3D-surface representation of a sherd.

The results of the two methods are compared with each other and the fusion of these methods for an archaeological application is shown. Finally, the outlook for a computer based automatic classification of archaeological finds is given. At the current stage of the project it is not possible to show final results, but we will test the new acquisition method with provincial Roman material from Austrian excavation sites and ceramic material from

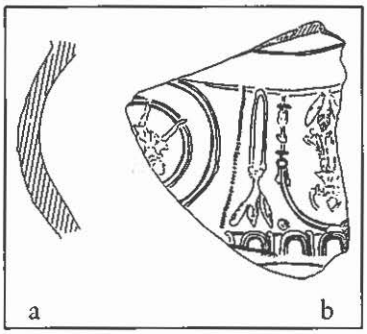


Fig. 1 – Sherd drawn by hand.

Velia in the future. In order to compare the new method to the traditional archaeological method, the material is tested and documented with both methods.

2. State of the art

Because conventional methods for pictorial acquisition are unsatisfactory, the search for some possible automatic solutions began early. We show two systems, ARCOS and SAMOS, which are representative for many other methods for getting pictorial and 3D-information from a sherd, because the stage of development of these two systems is comparable to our system. Further tests in the field of macrophotogrammetry are discussed.

2.1 *ARCOS (Kampffmayer/Karlsruhe)*

ARCOS, the *AR*chaeological *CO*mputer *S*ystem, was developed in Karlsruhe and combines video- and computer-techniques for the evaluation analysis and storage of archaeological data (Gathmann *et al.* 1984; Kampffmeyer 1985; Kampffmeyer, Teegen 1986; Kampffmeyer *et al.* 1986). Ceramic sherds are placed on a rotation plate, recorded by a video camera, then interactively processed and measured, and then drawn automatically. Ceramic sherds were oriented on a rotation plate according to their original position on the pot. Therefore, the reconstruction of the shape of a pot was based on the exact positioning of a sherd on the plate with the help of plasticine. The rotation of the sherd determined the shape of the original pot. Small inaccuracies in the positioning could therefore cause mistakes in the reconstructed pot. Textures on the sherd were not recorded and had to be added manually. The archivated drawing was printed on a matrix printer creating steps in the contour line.

ARCOS was tested in June 1987 at an excavation site in Velia, southern Italy, where the following problems occurred: the parameters for the description of the ceramic were numerically coded, so that the possibility of making

mistakes is rather high (KAMPFFMEYER *et al.* 1988; LUEBBERT, KAMPFFMEYER 1988). The program is installed in the computer as an chip and can not be adjusted to suit the requirements of individual excavation sites. The necessity to add contour lines manually (the inner profile cannot be seen by the camera) on the monitor leads to inaccuracy and depends on the method of work of the archaeologist (SABLATNIG *et al.* 1993). Moreover, the resolution of the system was too low, so that very small cracks in the profile were not detected. Another considerable problem was the computation of the thickness of a pot, because small differences in the illumination cause great differences in the results (KRINZINGER *et al.* 1990). The development of ARCOS was stopped, because of the bad results of the prototype and the work for the archaeologists was not really reduced. Textures on the sherd were not recorded and had to be added manually.

2.2 *SAMOS (Steckner/Hamburg)*

The second system is called SAMOS (*Statistical Analysis of Mathematical Object Structures*). It provides the automatic drawing and reconstruction of profiles from pottery (STECKNER, STECKNER 1987, 1988; STECKNER 1988, 1989). In order to get a contour line of a sherd or a pot, this contour line is digitized with the help of a tablet by determining several points on this line. The missing points are interpolated by the computer-system. Although the accuracy of a tablet is very high, errors occur from inaccurate positioning of the pen and from interpolation. A small number of measure points may cause edges in the contour line (MENARD, SABLATNIG 1991). After the half-automated input of the contour, several measurements – like volume, width, maximal perimeter etc. – are computed. These relevant measurements are computed automatically out of the digitized profile. Reconstructions of pots from sherds are made by comparing the actual contour line with the contour lines already existing in the system. The most similar is taken for the complete reconstruction and classification. This system is also not able to record the texture of sherds, so it is necessary to draw it separately or to describe it.

2.3 *Photogrammetry for archaeological finds*

Tests concerning the recording and measuring of archaeological finds were also performed in the field of photogrammetry (KLADENSKY 1981; KANDLER *et al.* 1985; WALDHAEUSL, KRAUS 1985; GRUBER, SCHINDLER-KAUDELKA 1986). These tests deal with the documentation of stamps in bricks and ceramic. The object is recorded photogrammetrically with the help of a camera and measured with a analytical stereo-measurement-system. With such a system the accuracy of the measurement of stamps on a brick can be increased, but the complete model of the object cannot be computed (Fig. 2). The mea-

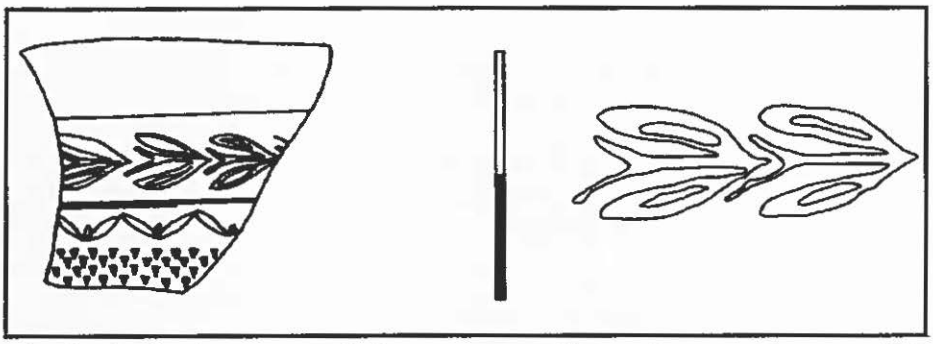


Fig. 2 – Result of a photogrammetrically measurement (GRUBER, SCHINDLER-KANDELKA 1986).

surement process is not automated and the archaeologist is not able to make the image acquisition without knowledge about the configuration parameters and illumination parameters. Moreover, a special stereo evaluation system has to be provided. The evaluation on such a stereo system can only be made by a specialist and does not reduce the amount of work. The evaluation method could be simplified by methods of digital photogrammetry (softcopy photogrammetry). For this method it is necessary to scan the photos on a scanner. The two digital stereo images can be used as input for a digital stereo evaluation system. The development of these systems are not finished, yet costs computation time and requires an operator (ALBERTZ *et al.* 1991; LEBERL 1991a,b).

2.4 *Monocular acquisition systems for archaeological finds*

In contrast to stereo methods, monocular methods work with only one camera and try to get the 3D-information using a priori knowledge, such as illumination direction and surface texture. This class of algorithms is called "Shape from X", where X stands for the type of evaluation. Two representatives are "Shape from Shading" and "Shape from Texture".

Shape from shading tries to compute depth out of the gray level variations of an intensity image if the position of the light source is known (BICHSEL, PENTLAND 1992; HORN 1990; OLIENSIS 1991; PENTLAND 1990; WOODHAM 1972). Shape from texture uses the surface texture from an object to compute the model (IKENCHI 1984; KENDER 1979; OHTA *et al.* 1981). The orientation and the distance surface elements can be computed with the help of the texture gradient. This texture gradient describes the modification of the density and the size of texture elements and so the surface orientation can be determined. Out of the distortion of the texture the angle to the image plane can be computed. If the texture is not distorted the image and object plane are parallel. None of these methods was used for the pictorial acquisition of archaeological sherds. Monocular acquisition methods have the disadvantage that a priori knowledge about surface and illumination are necessary.

3. Acquisition method

With the help of image processing methods it is possible to make an automated acquisition of archaeological sherds. In order to get the 3D-information of a sherd, we tested two different representative methods, in particular shape from stereo (Cochran, Medioni 1992; Grimson 1981; Hoff, Ahuja 1989) and shape from structured light (Ishii, Nagata 1976; Jervis 1983; Lin *et al.* 1989; Wust, Capson 1991).

3.1 *Shape from stereo*

The stereo analysis method is similar to the human vision system. Because of the way our eyes are positioned and controlled, our brains usually receive similar images of a scene taken from nearby points of the same horizontal level. Therefore the relative position of the images of an object will differ in the two eyes. Our brains are capable of measuring this disparity and thus estimating the depth (Marr, Poggio 1979). Stereo analysis tries to imitate this principle. Fig. 3 shows the experimental configuration of the stereo system. The sherd to be recorded is placed in the measurement area. Two fixed CCD cameras are used to get intensity images from two different positions. The orientation parameters of the stereo configuration are given as follows:

B = 65 mm	distance between two cameras
d = 520 mm,	distance between object – and image plane
f = 16 mm,	focus of the lenses
res = 512x480 Pixel	resolution of the CCD cameras

Out of these parameters the accuracy can be determined with 1.6 mm. The search for the correct match of a point is called *correspondence problem* (Jenkin *et al.* 1991), the central and most difficult part of the stereo problem. Several algorithms were published to compute the disparity between images, such as the correlation method (Luo, Maitre 1990; Subrahmonia *et al.* 1990) the correspondence method (Grimson 1985) or the phase difference method (Jenkin *et al.* 1991). Consider the case of a single point $P(x,y,z)$ in the scene. If this point can be located in both images its three dimensional world coordinates may be computed, if the relative orientation between the cameras is known. For a given pair of stereo images and the known orientation parameters of the cameras, the corresponding points are supposed to be on the epipolar lines (Weng 1992). Since a parallel camera alignment is used in this paper the epipolar lines are the scanlines in both images. If for a given point $I_L(x,y)$ in the left image a corresponding point $I_R(x,y)$ in the right image can be found the three dimensional position of $P(x,y,z)$ can be computed with the additional information about the camera parameters. The larger the distance between corresponding points $I_L(x,y)$ and $I_R(x,y)$ the nearer is the point $P(x,y,z)$

to the camera. The difference between the two image positions is called disparity. A disparity map is an intensity image where the disparity is represented by the gray level. A correspondence partner for a point $I_L(x,y)$ in the left image is searched by considering a rectangular window of intensity values around $I_L(x,y)$ and computing similarity measures between this window and windows around potential correspondence points in the right image, shown in Fig. 4. The correlation $C(x_L,y_L,w)$ between two regions of size w can be written in a continuous way in the one-dimensional case as:

$$C(x_L,x_R,w) = \frac{\int_{\xi=-w/2}^{w/2} [I_L(x_L+\xi)-\mu_L][I_R(x_R+\xi)-\mu_R]d\xi}{\int_{\xi=-w/2}^{w/2} [I_L(x_L+\xi)-\mu_L]^2 d\xi \int_{\xi=-w/2}^{w/2} [I_R(x_R+\xi)-\mu_R]^2 d\xi} \quad (1)$$

The correlation $C(x_L,y_L,x_R,y_R,w)$ for two-dimensional regions can be extended from (1). The two-dimensional function C is used fo r matching. In order to fulfill the archaeological requirements it is essential to compute a dense disparity map, where disparity is defined for every pixel in the entire image. In order to get a dense disparity map and to increase efficiency of the algorithm, 5x5/4 gaussian image pyramides are used to solve the correspondence problem in a hierarchical manner (Kropatsch 1991; Rosenfeld, Kak 1982). The disparity maps $D(x_L,y_L,n)$ for each pyramid level n are computed as follows:

$$D(x_L,y_L,n-1) = \begin{cases} |x_L-x_R| & \max\{C(x_L,y_L,x_R,y_R,w,n-1)\} > t \\ 2*D(x_L,y_L,n) & else \end{cases}, \quad (2)$$

where t is the treshhold accepting a corresponding point.

Fig. 5 depicts the principle of this approach. Fast stereo evaluation is carried out in the top pyramid level n (due to the low resolution) resulting in a disparity map which is the course information considered in the evaluation process of level $n-1$. This process is iterated until the disparity map for the lowest level is computed. If no corresponding point can be found for a candidate in the left image, the information of the pyramid level above is used to get an average disparity information for that point (Menard, Brändle 1995). The result is a dense disparity map, which can be seen in Fig. 6, and in Fig. 7 an object model with the mapped intensity image is shown, which is constructed out of the disparity map.

3.2 *Shape from structured light*

The second acquisition method for estimating the 3D-shape of a sherd is shape from structured light, which is based on active triangulation. A very

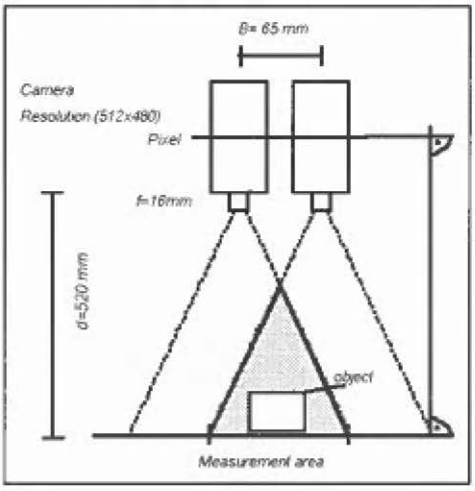


Fig. 3 – Configuration of the stereo system.

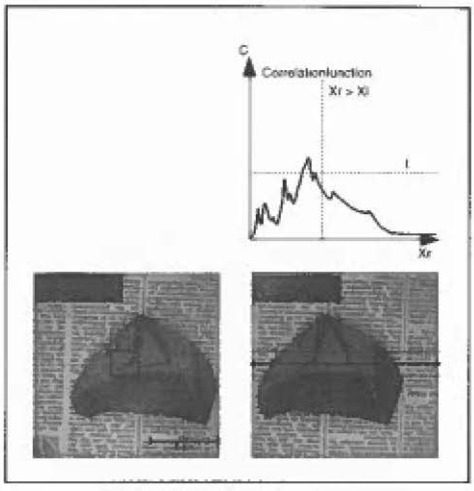


Fig. 4 – Stereo pair of a test sherd.

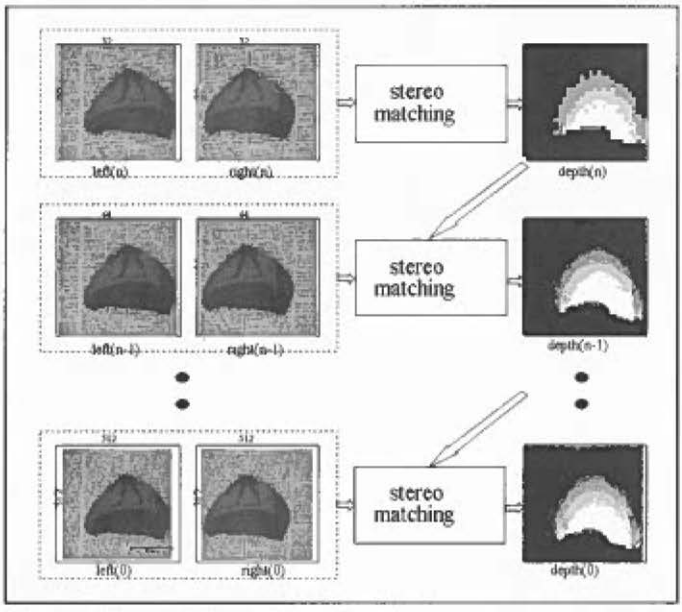


Fig. 5 – Hierarchical matching algorithm.

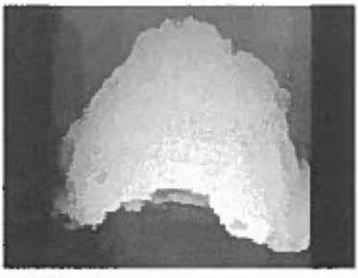


Fig. 6 – Dense disparity map of the test sherd.

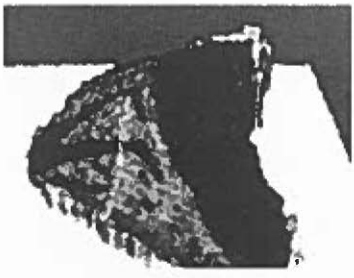


Fig. 7 – Constructed object model with mapped intensity image.

simple technique to achieve depth information with the help of structured light is to scan a scene with a laser plane and to detect the location of the reflected stripe. Out of the distortion along the detected profile the depth information can be computed (SABLATNIG 1991). In order to get dense range information the laser plane has to be moved in the scene. Another technique projects multiple stripes at a time onto the scene. In order to distinguish between stripes they are coded (Coded Light Approach) either with different brightness or different colors (BOYER, KAK 1987). A robust encoding method is the time-space encoding of projection directions. In one method a projection of time encoded laser dots was used (ALTSCHULER *et al.* 1979), which was improved by (WAHL 1984; INOKUCHI *et al.* 1984) by using time space encoding of stripes by projecting a sequence of n stripe pattern onto the scene.

In our acquisition system the stripe patterns are generated by a computer controlled transparent Liquid Crystal Display (LCD 640) projector. The light patterns allow the distinction of 2^n projection directions. Each direction can be described uniquely by a n-bit code, which can be seen in Fig. 9 schematically. In Fig. 8 the intensity image of the test sherd is shown. This image and one image without illumination is taken prior to the range image computation to determine the maximum and the minimum intensity for each pixel of the sherd. The camera with the optical center O_c is placed in a certain angle to the projector having the optical center at O_p. The camera grabs gray level images $I(x,y,t)$ of the distorted light patterns at different times t, which can be seen in Fig. 10 (a-f).

For each pixel in the image a n-bit code is stored. With the help of this code and the known orientation parameters of the acquisition system the 3D-information of the observed scene point can be computed. The orientation parameters are given by a calibration procedure performed prior to any depth computation by an algorithm developed by FAUGERAS (1993). In order to minimize the errors of incorrect coding a Gray-code is used for the direction of illuminations. The robustness of the technique depends on the correct detection of the edge between illuminated and non-illuminated area, the so-called edge, described in (TROBINA 1995). In our setup the projector stripes are approximately parallel to the image columns. The result of the test sherd shown in Fig. 8 computed by determining the depth points along the edges shown in Fig. 10 can be found in Fig. 11 as a range image comparable to a dense disparity map of the stereo algorithm. This range image can be taken to construct an object model of the sherd, where the intensity image can be mapped onto the surface in order to produce a realistic model of the sherd (Fig. 12).

4. COMBINATION OF THE TWO ACQUISITION METHODS

The results of the two acquisition methods were not sufficient enough for archaeological requirements, because each of the methods presented has

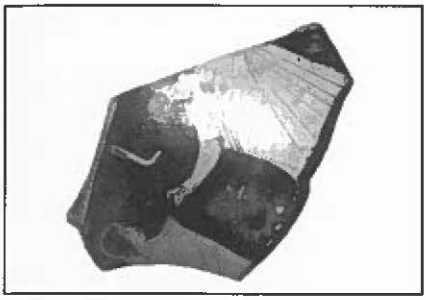


Fig. 8 – Gray level image of a test sherd.

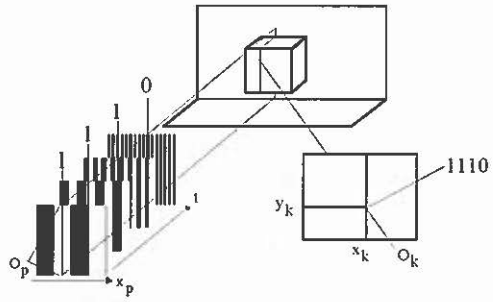


Fig. 9 – Principle of Code-Light-Approach.

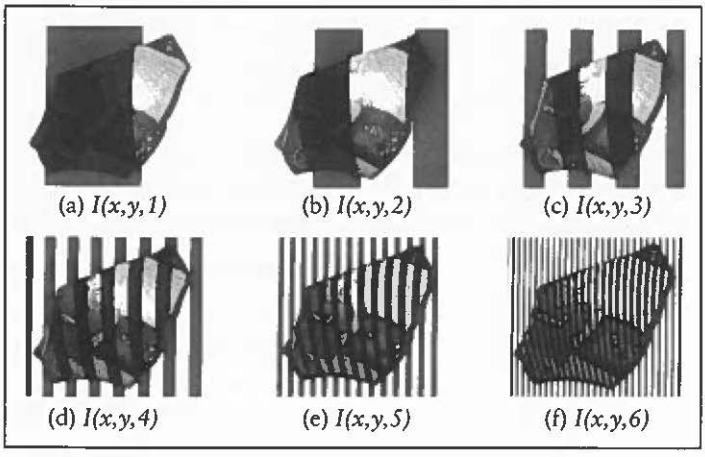


Fig. 10 – Gray level images of the first 6 out of 9 stripe patterns.

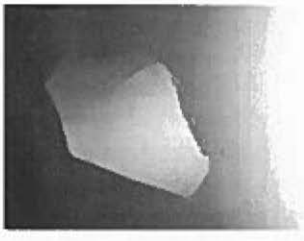


Fig. 11 – Dense range image of the test sherd.

Fig. 12 – Constructed object model.

disadvantages (MENARD, SABLATNIG 1992). On the one hand it is necessary to get an accuracy of 0.5 mm especially in regions with textures and ornaments, on the other hand the pictorial acquisition is extremely important for archiving (Fig. 1). The results of the stereo method are not accurate enough, because regions without texture are only approximated, the results of the struc-

tured light technique have the drawback of fixed line distance and therefore the accuracy between lines is not high enough.

In order to reduce the disadvantages a combination (fusion) of the two presented acquisition methods is used. A fusion of two different data sources reduces the error probability dramatically (Wei 1989) because the result is computed out of two data points for one object point. Furthermore the pictorial acquisition of the visual surface of the sherd is possible in true color. The accuracy of the individual results of the two acquisition methods is improved by interdependencies of the two algorithms, the stereo method influences the structured light computation and vice versa. Pictorial information changes for instance the grid density because only areas of archaeological interest on the surface of the sherd, such as reliefs are computed with high resolution in depth, whereas areas with low interest, like uniform areas with no texture, are computed with lower resolution. Textured areas are also computed by the stereo algorithm, therefore increasing the accuracy and reliability of the computed data.

In order to construct a robust and accurate acquisition system for the archaeologist that provides pictorial and 3D-acquisition, the system has to be portable to be useable in the field and should therefore be small and not too heavy.

4.1 *Data acquisition*

The system for the fusion of the stereo- and the structured light method is shown in Fig. 13. The two CCD cameras are used by both acquisition methods. In order to get light stripes onto the surface of the sherd, a LCD 640 light projector is used which is able to project 640 horizontal and vertical lines onto an 30cm x 30cm measurement area. Therefore the resolution of the lightstripe method is 0.5 mm in x- and y- direction. With the help of these lightstripes no transportation through the measurement area is needed. First, the light projector illuminates the measurement area without lightstripes in order to get two intensity images. These two images are used to locate the object in the measurement area and to determine where areas of archaeological interests (reliefs, paintings, lines) are on the surface of the sherd. This information is used to drive the light projector so that those parts of the surface, which are of archaeological interest are computed with higher accuracy than other parts, as shown in Fig. 14. Therefore the intensity image defines the density of the lightstripes. The two cameras are used to take 4 different lightstripe images. The use of two cameras reduces the amount of occluded areas not seen by one of the cameras and increases the accuracy, because two different images of the same structure can be used to compute the depth information. Furthermore, vertical and horizontal lines are not projected at the same time to reduce errors in finding corresponding lines and to reduce fringe computation on line crossings.

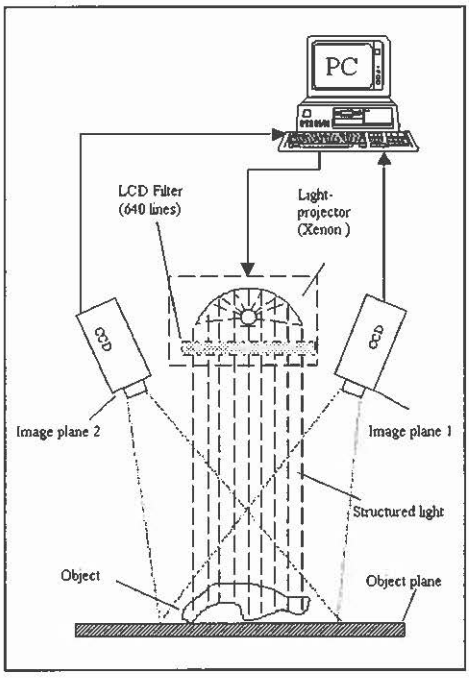


Fig. 13 – Fusion of stereo and structured light.

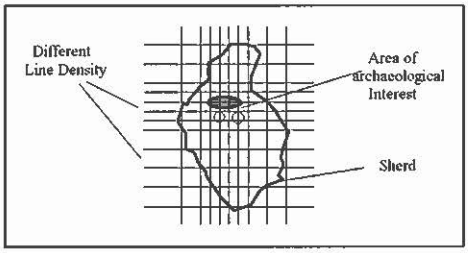


Fig. 14 – Influence of stereo.

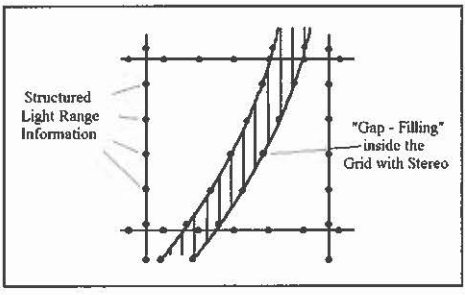


Fig. 15 – Higher accuracy due to stereo.

4.2 *Depth computation*

Following image acquisition, four different structured light computations take place and lead to four range images produced by the structured light algorithm. These four range images are then combined into one range image, which is the first range approximation for the following stereo matching algorithm. Fig. 15 shows one grid produced by the structured light method, where the dots indicate points with depth information. Depth computation with the help of the stereo matching can be obtained for all texture points on the surface of the sherd inside the grid. So the stereo algorithm fills the "gaps" inside the grid. Because of the depth information along the grid lines an approximation of the height inside the grid is possible. This reduces the search space for the corresponding point in the two stereo images considerably. Fusion of the data obtained by structured light with the information obtained by stereo will give more exact depth information.

The range data computing process is shown in Fig. 16. The result of this working process the object model of the sherd – is one element of the archaeological system which is able to provide the cross section and the top view of the sherd as shown in Fig. 1. Together with the color image archive and the color classification based on the color image this archaeological sys-

tem provides multi data information about the archived sherd. The object model can be visualized on a computer monitor as well as on a laser printer in any desired viewing angle by interactively rotating and scaling based on geometric transformations. One possible way of visualization is a representation of the 3D-object model by a wire frame model and can be rotated in any direction interactively. In addition to the wire frame model the corresponding intensity image can also be displayed. As a third feature, the cross-section of the sherd is permanently displayed. So the archaeologist can orientate the sherd very precisely, in order to get the correct profile section for plotting. After defining the correct profile section it is plotted together with the additional parameters of the sherd such as excavation site, excavation layer, material and others.

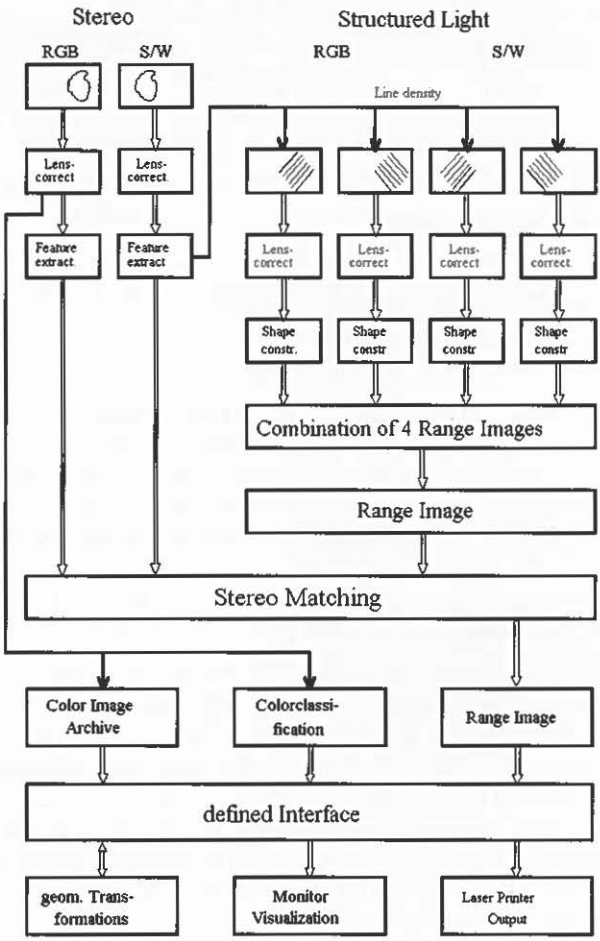


Fig. 16 – Schematic working process.

5. Outlook

The 3D-information of the surface of a sherd is the basis for any further classification and therefore also the basis for an archaeological database. The exact orientation of the sherd is done by the archeologist manually, correcting the orientation proposed by the system. The proposed orientation is based on the rotational symmetry which in the case of sherds is the curvature of the inner surface, since this curvature must be a circle in the direction of the rotation during manufacturing. Following the orientation, the profile section is stored together with the pictorial information and sherd relevant data for further classification. This classification is based on matching different profiles and classifying them due to the similarity of the profiles. Since the profile are very accurate and independent of human measurement errors, the result is a classification based on objective, computable and reproducible criteria, which would be very helpful in the work of archaeologists (Caselitz 1988; Furger-Giunti, Thommen 1977; Scheider *et al.* 1989).

Furthermore, the optimal configuration of the system can be guaranteed by permanent collaboration between archaeologists and technologists. Further goals to be obtained can be summarized as follows:

- **Construction of a picture database:**
  The intensity images of the sherds are stored in a picture database. Together with each intensity image, the appropriate parameters such as excavation site, excavation layer, material, color, archive number etc., are stored. On the one hand, it should be possible to search for text index keys (like excavation site or archive number), and on the other hand, it should be possible to search for patterns in this database.
- **Automatic orientation of a sherd:**
  With the help of the object model the position of the sherd on the pot should be available by detecting circles on the surface. If it is possible to detect these circles the rotational axe can be determined. Furthermore the profile of the sherd can be compared with profiles in a database and so an exact position of a sherd on a pot can be computed.
- **Proposals for pairwise sherd mosaicing:**
  Pairs of preselected, matching sherds are searched for in the existing database and proposed for reassembling if the surfaces of fracture correspond.
- **Assembling parts of pots from sherds:**
  The object model of the selected, matched sherds are assembled to parts of pots, in order to make the reconstruction easier and more exact.
- **Reconstruction of pots with the help of existing part-assemblies:**
  The model of the complete pot is reconstructed out of the existing part assemblies. This model can be transformed into a gray level image with the help of ray tracing methods.

– **Automatic computation of the dimension of a reconstructed pot:**
The dimensions of the reconstructed pot such as diameter, height, thickness and thelike can be computed.

All of the above mentioned goals can only be reached if the first and most important step, data acquisition is works well. Therefore, we currently focus on the fusion of the two acquisition methods in order to have an optimal basis for all further goals. In the future this system could be used for various tasks like information exchange via computer networks, support in teaching, presentations, publications and many others.

6. Conclusion

In this paper two acquisition methods for archaeological finds that could help the archaeologist in his work and automate the archivation process were proposed. First we presented an overview of existing methods for archaeological image acquisition methods. These systems are half-automated, so the amount of work has not really been reduced. Next we focused on the acquisition methods to minimize errors in the output and to automate this process completely. In order to get the 3D-information of a sherd we tested two different and representative methods, in particular, *shape from stereo* and *shape from structured light* for providing a 3D-surface representation of a sherd. The results of these two acquisition methods were compared with each other and the fusion of these two methods for an archaeological application was shown. Finally, outlooks for a computer based automatic classification of archaeological finds were given.

7. Acknowledgements

The authors want to thank Petros Dintsis and Ursula Zimmermann of the Institute for Classical Archaeology, University of Vienna, for the fruitful discussions and the cooperation in helping us to design a useful archaeological system which is still being improved. Their comments and suggestions were invaluable. We also want to thank Werner Zorman, Norbert Brändle and Radim Halir for their help in the project. This work was partly supported by the Austrian National "Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung" under grant P9110-SPR.

Robert Sablatnig
Christian Menard
Department for Pattern Recognition and Image Processing
Institute for Automation
Technical University of Vienna

BIBLIOGRAPHY

ALBERTZ J., JESCHKE W., KOENIG G., STORL J., WEWEL F. 1991, *Transputer- Netzwerke und ihr Einsatz in Digitalen Photogrammetrischen Systemen*, «Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung», 2, 65-73.

ALTSCHULER M., ALTSCHULER B., TABOADA J. 1979, *Measuring surfaces space-coded by a laser-projected dot matrix*, «Imaging Applications for Automated Industrial Inspection», SPIE, 182.

BICHSEL M., PENTLAND A.P. 1992, *A simple algorithm for shape from shading*, in *Proc. of inernational Conference on Computer Vision and Pattern Recognition '92*, Champaign, Illinois, 459-463.

BOYER K., KAK A. 1987, *Color-encoded structured light for rapid active ranging*, «IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 9, 14-28.

CASELITZ P. 1988, *Formanalyse und Keramikklassifikation*, «Schriften des Deutschen Archäologen- Verbandes», 10, 71-89, Freiburg.

COCHRAN S.D., MEDIONI G. 1992, *3-D Surface Description from Binocular Stereo*, «IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 14, 10, 981-994.

FAUGERAS O. 1993, *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*, Cambridge, MA MIT Press.

FURGER-GIUNTI A., THOMMEN P. 1977, *Archäologie und EDV am Beispiel der spätkeltisch-frührömischen Funde von Basel*, «Archäologische Korrespondenz Blatte», 7, 131-139.

GATHMANN I., KAMPFMEYER U., LUEBBERT U., PARTMANN T. 1984, *ARCOS, ein Gerät zur automatischen bildhaften Erfassung der Form von Keramik*, «FhG Berichte», 2, 30-33.

GRIMSON W.E.L. 1981, *From Images to Surfaces. A Computational Study of the Human Early Visual System*, Cambridge, MA MIT Press.

GRIMSON W.E.L. 1985, *Computational Experiments with a Feature Spaced Stereo Alghorithm*, «IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 7, 1, 17-34.

GRUBER M., SCHINDLER-KAUDELKA E. 1986, *Stempelidentifikation norditalischer Modelkeramik mit photogrammetrischen Methoden*, in H.VETTERS, G. PICCOTTINI (edd.), *Die Ausgrabungen auf dem Magdalensberg 1975-1979*, Verlag des Geschichtsvereines für Kärnten, Klagenfurt, 451-455.

HOFF W., AHUJA N. 1989, *Surfaces from Stereo: Integrating Feature Matching, Disparity Estimation and Contour Detection*, «IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 11, 2, 121-136.

HORN B.K.P. 1990, *Height and Gradient from Shading*, «International Journal of Computer Vision», 5(1), 37-76.

IKEUCHI K. 1984, *Shape from Regular Patterns*, «Artificial Intelligence», 22, 1, 49-75.

INOKUCHI S., SATO K., MATSUDA F. 1984, *Range-imaging system for 3-d object recognition*, in *Proceeding of International Conference on Pattern Recognition*, Montreal, Canada, 806-808.

ISHII M., NAGATA T. 1976, *Feature Extraction of Three-dimensional Objects and Visual Processing in a Hand – Eye System Using Laser Tracker*, «Pattern Recognition», 8, 4, 229-237.

JERVIS R.A. 1983, *A Perspective on Range Finder Techniques for Computer Vision*, «IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 5, 2, 122-139.

JENKIN M.R.M., JEPSON A.D., TSOTSOS J.K. 1991, *Techniques for Disparity Measurements*, «Computer Graphics and Image Processing», 53, 1, 14-30.

KANDLER M., SCHLOEGELHOFER F., TSCHANNERL J., WALDHAEUSL P. 1985, *Die photogrammetrische Dokumentation von Ziegelstempeln*, in M. Kandler (ed.)

Lebendige Altertumswissenschaft: Festgabe zur Vollendung des 70. Lebensjahres von Hermann Vetters dargebracht von Freunden, Schülern und Kollegen, Holzhausen, Wien, 428-430.

KAMPFFMEYER U. 1985, *ARCOS: Eine Testuntersuchung auf der Saalburg*, «Saalburg Jahrbuch», 40-41, 121-133.

KAMPFFMEYER U., TEEGEN W.R. 1986, *Untersuchungen zur rechnergestützten Klassifikation von Gefäßformen am Beispiel der eisenzeitlichen Keramik des Gräberfeldes von Veio, Quattro Fontanili*, «Die Kunde N.F.», 37, 1-83.

KAMPFFMEYER U., RUPPRECHT G., WITTEYER M. 1986, *ARCOS: Ein Computer zeichnet römische Keramik*, «Mainzer Zeitschrift», 81, 191-200.

KAMPFFMEYER U., ZAMPERONI P., TEEGEN W.R., GARCA L. 1988, *Untersuchungen zur rechnergestützten Klassifikation der Form von Keramik*, «Arbeiten zur Urgeschichte des Menschen», 11, Frankfurt / Main.

KENDER J.R. 1979, *Shape from Texture*, in *Proceedings of 6th. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Tokyo, 475-480.

KLADENSKY J. 1981, *Konstruktion und Erprobung einer Makro-Photogrammetrie-Meßeinrichtung*, Diplomarbeit, TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.

KRINZINGER F., SCHICK M., TEEGEN W.R. 1990, *Un calcolatore disegna e registra ceramica antica: il sistema ARCOS-I sullo scavo a Velia, Com. di Marina di Ascea, Prov. di Salerno*, «Archeologia e Calcolatori», 1, 179-209.

KROPATSCH W.G. 1991, *Image Pyramids and Curves – An Overview*, Technical Report PRIP-TR02, Dept. of Pattern Recognition and Image Processing, Technical University Vienna.

LEBERL F.W. 1991, *Digitale Bildanalyse für großräumige Erdvermessung*, «Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Photogrammetrie», 79, Jahrgang, 3, 224-234.

LEBERL F.W. 1991, *The Promise of Softcopy Photogrammetry*, in H. EBNER (ed.), *Digital Photogrammetric Systems*, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 3-14.

LIN W.C., CHEN S.Y., CHEN C.T. 1989, *A New Surface Interpolation Technique for Reconstructing 3D-Objects from Serial Cross Sections*, «Computer Vision, Graphics, and Image Processing», 48, 124-143.

LUEBBERT U., KAMPFFMEYER U. 1989, *Forschungsprojekt ARCOS: Ein Rechner und Programmsystem für die Archäologie*, «Archäologie in Deutschland», 1/89, 36-40.

LUO W., MAITRE H. 1990, *Using Surface Model to Correct and fit Disparity Data in Stereo Vision*, in *Proceedings IEEE International Conf. on Pattern Recognition*, 1, 60-64.

MARR D., POGGIO D. 1979, *A Computational Theory of Human Stereo Vision*, «Proc. Roy. Soc.», B 204, 301-328.

MENARD C. 1991, *Das Stereoverfahren, ein Verfahren zur bildhaften Erfassung archäologischer Fundgegenstände*, Diplomarbeit, TU Wien, Institut für Automation.

MENARD C., SABLATNIG R. 1991, *Methoden zur Digitalisierung urgeschichtlicher Gefäße*, Institut für Automation, Abteilung für Bildverarbeitung und Mustererkennung, TU Wien.

MENARD C., SABLATNIG R. 1992, *Two Different Methods for the 3D-Acquisition of Archaeological Finds: Stereo and Structured Light*, in H. BISCHOF (ed.), *Pattern Recognition 1992, Proceedings of the 16. ÖAGM – Meeting*, Vienna, München, Oldenbourg Verlag Wien, 150-160.

MENARD C., BRÄNDLE N. 1995, *Hierarchical Area-Based Stereo Algorithm for 3D Acquisition*, in *Proceedings of International Workshop on Stereoscopic and Three-Dimensional Imaging*, Santorini, Greece, 195-201.

OHTA Y., MAENOBO K., SAKAI T. 1981, *Obtaining Surface Orientation from Texels under Perspective Projection*, in *Proceedings of 7th. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vancouver, 746-751.

OLIENSIS J. 1991, *Uniqueness in Shape from Shading*, «International Journal of Computer Vision», 6(2), 75-104.

PENTLAND A.P. 1990, *Linear Shape from Shading*, «International Journal of Computer Vision», 4(2), 153-162.

ROSENFELD A., KAK A. 1982, *Digital Picture Processing*, 2nd. Edition, Academic Press, New York.

SABLATNIG R. 1991, *Das Lichtschnittverfahren, ein Verfahren zur Erfassung archäologischer Fundgegenstände*, Diplomarbeit, TU Wien, Institut für Automation.

SABLATNIG R., MENARD C., DINTSIS P. 1993, *A Preliminary Study on Methods for a Pictorial Acquisition of Archaeological Finds*, in P.M. FISCHER (ed.), *Archaeology and Natural Science (ANS)*, 1, Paul Gothenburg, Astroems Foerlag, 143-151.

SABLATNIG R., MENARD C., DINTSIS P. 1994, *Bildhafte, dreidimensionale Erfassung von archäologischen Fundgegenständen als Grundlage für die automatisierte Klassifikation*, in O. STOLL (ed.), *Computer und Archäologie*, Computer und Antike 3, Scripta Mercaturae Verlag, St. Katharinen, 59-84.

SCHEIDER G., *et al.* 1989, *Naturwissenschaftliche Kriterien und Verfahren zur Beschreibung von Keramik*, «Acta Praehistorica et Archaeologica», 21, 7-39.

STECKNER C., STECKNER C. 1987, *SAMOS. Statistical Analysis of Mathematical Object Structure*, «Bollettino d'informazioni», 8, 1, 79-99.

STECKNER C., STECKNER C. 1988, *Das SAMOS Projekt*, Schriften des deutschen Archäologen Verbandes E.V., «Archäologie und neue Technologien», 10, Freiburg, 140-160.

STECKNER C. 1988, *SAMOS: Dokumentation, Vermessung, Bestimmung und Rekonstruktion von Keramik*, in *Akten des 13. internationalen Kongresses für klassische Archäologie Berlin*, 631-635.

STECKNER C. 1989, *Das SAMOS Projekt*, «Archäologie in Deutschland», 1/89, 16-21.

SUBRAHMONIA J., HUNG Y.P., COOPER D.B. 1990, *Model-Based Segmentation and Estimation of 3D Surfaces from Two or More Intensity Images Using Markov Random Fields*, in *Proceedings IEEE Int. Conf. on Pattern Recognition*, 1, 390-397.

TROBINA M. 1995, *Error Model of a Coded-Light Range Sensor*, Technical Report BIWI-TR-164, Communication Technology Laboratory, ETH Zuerich, Switzerland.

WAHL F. 1984, *A Coded Light Approach for 3-Dimensional (3D) Vision*, Research Report RZ 1452, IBM.

WALDHAEUSL P., KRAUS K. 1985, *Photogrammetrie für die Archäologie*, in M. KANDLER (ed.), *Lebendige Altertumswissenschaft: Festgabe zur Vollendung des 70. Lebensjahres von Hermann Vetters dargebracht von Freunden, Schülern und Kollegen*, Wien, Holzhausen, 423-427.

WEI J. 1989, *Modellgesteuerte Szenen-Interpretation durch Fusion von Intensitäts- und Abstandsbildern*, Dissertation, Universität Karlsruhe, Fakultät für Informatik.

WENG J. 1992, *Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation*, «IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 14, 965-980.

WOODHAM R.J. 1972, *Photometric Stereo: A Reflectance Map Technique for Determining Surface Orientation from Image Intensity*, in *Proceedings SPIE, 22nd Technical Symposium*, 155, San Diego, 136-143.

WUST C., CAPSON D.W. 1991, *Surface Profile Measurement Using Color Fringe Projection*, «Machine Vision and Applications», 4, 3, 193-204.

ABSTRACT

During excavations a large number of sherds of archaeological pottery is found. These sherds are photographed, measured, drawn and catalogued. Up to now, all this has been done by hand, and means a lot of routine work for the archaeologist.

In this paper two acquisition methods for archaeological finds are proposed forming the first step towards automatic classification, that could help the archaeologist in his

work and automate the archivation process. First we present an overview of existing methods for archaeological image acquisition methods. These systems are half-automated, so the amount of work has not really been reduced. Next we focus on the acquisition methods to minimize failures in the output and to automate this process completely. In order to get the 3D-information of a sherd we are using two different and representative methods, in particular, shape from stereo and shape from structured light for providing a 3D-surface representation of a sherd.

Further we discuss a fusion of these two methods for an archaeological application and finally, outlooks for a computer based automatic classification of archaeological finds are given.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 447-468

ANALISI STATISTICHE E ARCHEOMETRIA: UNO STUDIO SULLE CERAMICHE DEL IV E III MILLENNIO A.C. PROVENIENTI DA ARSLANTEPE (MALATYA, TURCHIA)

1. Premessa

In questo articolo si descrivono alcuni aspetti di un progetto[1] indirizzato allo studio della produzione ceramica attraverso l'analisi dei prodotti e delle tecnologie impiegate, in un arco di tempo molto esteso ed in un'area dove si sono succedute comunità portatrici di culture diverse e caratterizzate da diverse forme di organizzazione socio-economica.

Mediante un insieme di analisi e il confronto tra i tipi di manifattura ceramica si è voluto verificare se e quanto la produzione sia variata in funzione delle capacità tecnologiche e delle modalità di organizzazione del lavoro messe in atto dalle varie comunità. Inoltre, si è cercato di riconoscere eventuali manufatti di particolare produzione e/o importazione.

2. Il contesto

Durante lo scavo, condotto per più di un trentennio dalla Missione Italiana nel sito di Arslantepe (Puglisi, Meriggi 1964; Palmieri 1973, 1978, 1981, 1985; Frangipane, Palmieri 1983a e b, 1987; Frangipane 1992), lungo l'alta valle dell'Eufrate nell'Anatolia orientale (Fig. 1), è stata messa in evidenza una sequenza quasi ininterrotta di insediamenti che va dal periodo Calcolitico (IV millennio a.C.) fino all'età Neo-hittita (1200-700 a.C.); sono stati individuati, inoltre, resti di epoca Romano-bizantina e Islamica.

Tale notevole continuità di occupazione deve essere messa in relazione in primo luogo con le condizioni favorevoli allo sfruttamento agricolo della piana alluvionale, abbondantemente provvista di sorgenti e di corsi d'acqua, specialmente nella zona dove è collocato il sito (Marcolongo, Palmieri 1983).

Gli scavi hanno inoltre permesso di appurare che il sito ha svolto un ruolo di centro politico ed economico nella regione, controllando – sia pure con diversa capacità di intervento a seconda dei momenti storici – il territorio circostante e gestendo i rapporti esterni, con le altre regioni del Vicino Oriente.

La prima fase della storia del sito (tabella 1) lo vede strettamente legato alle vicende mesopotamiche e partecipe di quegli orizzonti culturali. Il più antico periodo fin'ora estensivamente documentato è il Tardo Calcolitico (pe-

[1] Il progetto, di cui si presenta uno studio preliminare, è realizzato congiuntamente tra la Missione Archeologica Italiana nell'Anatolia Orientale, condotta dall'Università "La Sapienza" di Roma, e l'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali, C.N.R.-Area di Ricerca di Montelibretti, con la collaborazione della Soprintendenza Archeologica per l'Etruria Meridionale, Ministero per i Beni Culturali.

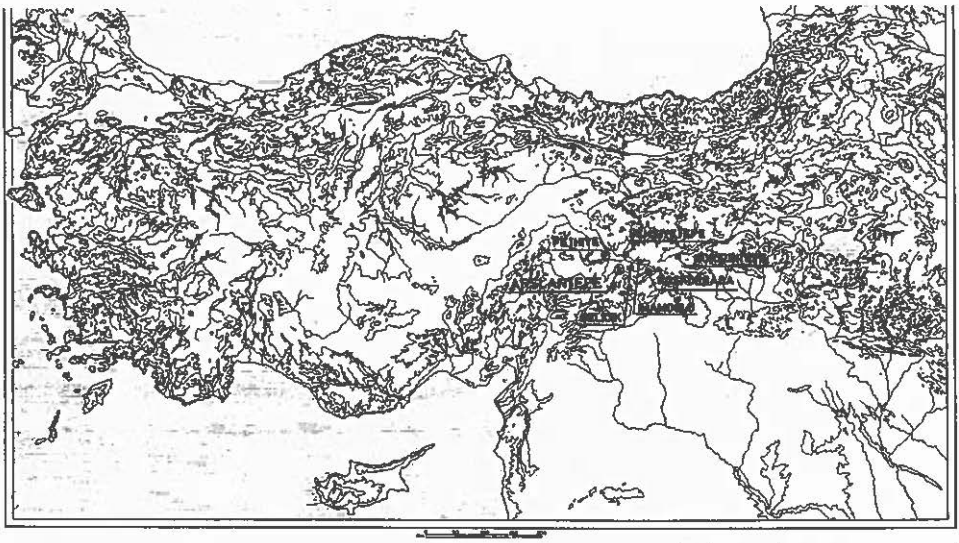


Fig. 1 – Valle dell'Eufrate in Anatolia orientale. Distribuzione degli insediamenti citati nel testo.

Periodo VII	Tardo Calcolitico	3700-3500 a.C.
Periodo VIA	Tardo Uruk	3200-3000 a.C.
Periodo VIB1	Bronzo Antico I	3000-2800 a.C.
Periodo VIB2	Bronzo Antico II	2900-2700 a.C.
Periodo VIC	Bronzo Antico II	2800-2500 a.C.
Periodo VID	Bronzo Antico III	2500-2100 a.C.
Periodo VA	Bronzo Medio	1950-1750 a.C.

Tabella 1

riodo VII), in cui si avviano quei processi di formazione di una élite locale e di organizzazione della produzione "di massa" di ceramica che vedranno il loro pieno sviluppo nel periodo successivo, quando Arslantepe giocherà un ruolo chiave nella nascita e nello sviluppo delle prime forme di organizzazione statale (fine del IV millennio a.C.; FRANGIPANE 1993a).

In questo periodo (VI A), il quadro che emerge è quello di una società stratificata, con sedi monumentali (edificio palaziale, templi) e con istituzioni pubbliche che centralizzano risorse e attività, in connessione con l'evoluzione di società statuali in Mesopotamia (periodo Tardo Uruk), ma con caratteri specifici autonomi (FRANGIPANE 1992; 1993b). Intense relazioni di scambio con le comunità del Sud dovettero essere favorite e in qualche modo gestite dalle élites, stimolando la circolazione di modelli di organizzazione e di strutturazione del potere (FERIOLI, FIANDRA 1983, 1994; FRANGIPANE 1994).

La ceramica prodotta durante questo periodo è in grande prevalenza

fatta al tornio e diviene più standardizzata e raffinata rispetto a quella della fase precedente, prospettando un possibile ambito di produzione centralizzato. A questa ipotesi si associa il grande sviluppo della "produzione in massa" di ciotole tornite, ampiamente consumate all'interno dell'area pubblica. Tale fenomeno è presente in tutti gli altri contesti protostatali del Tardo Uruk ed è probabilmente da mettere in relazione con la redistribuzione di razioni alimentari (FRANGIPANE, PALMIERI 1988-1989; FRANGIPANE 1989).

Con il crollo del sistema Tardo Uruk, si assiste in Arslantepe alla distruzione e all'abbandono degli edifici pubblici (fase VI B1), seguito da un'interruzione dei rapporti con le aree mesopotamiche e dall'avvento di gruppi di tradizione est-anatolica/transcaucasica. Scompare ogni traccia di centralizzazione caratteristica della struttura socio-economica precedente e si evidenzia una trasformazione profonda che interessa gli aspetti culturali ed economici. Cambiano radicalmente le strutture abitative, come pure la ceramica, che è ora fatta a mano e riferibile nella sua totalità alla produzione "rosso-nera" dell'Anatolia orientale e delle regioni transcaucasiche.

Successivamente (fase VI B2), i gruppi transcaucasici si ritirano dal sito, con il ritorno della popolazione locale, che riprende possesso dell'area, senza più riuscire – però – a strutturarsi politicamente in modo complesso. Sono, infatti, ormai definitivamente scomparsi gli elementi caratteristici della fase protostatale come gli edifici pubblici, i sigilli e le produzioni di massa. Tuttavia, la ceramica riprende la tradizione della produzione del periodo VI A, ricalcandone aspetti formali e metodi di manifattura.

Con il Bronzo Antico II (fase VI C), la tradizione est-anatolica/transcaucasica si riafferma ad Arslantepe, come risultato di una elaborazione locale e su questa direttrice si svilupperà fino alla fine dell'antica età del Bronzo (fase VI D), dando luogo ad aspetti regionali circoscritti. Il sito si configura ora come sede di una cultura locale e l'organizzazione socio-economica si ispira a modelli anatolici, come pure la ripresa di forme limitate di urbanizzazione totalmente scollegate dalla più antica matrice mesopotamica. In questo quadro la ceramica, pur sempre fatta a mano, si distingue in due filoni, uno domestico di produzione "rosso-nera", e uno di ceramica dipinta che sembra riferirsi ad un ambito di artigianato specializzato e come tale circola intensamente in tutta la regione di Malatya ed Elažig (CONTI, PERSIANI 1993).

3. OGGETTO DELLA RICERCA ED OBIETTIVI

Le ceramiche che sono oggetto di questo studio provengono – dunque – dalle diverse comunità che si sono succedute in questo sito nell'arco di quasi tre millenni.

Gli obiettivi finali della ricerca sono:

1. indagare, con maggiore precisione, l'organizzazione della produzione delle ceramiche;

2. comprendere se l'organizzazione della produzione ceramica rispecchi ed in qual modo entri in relazione concreta con la struttura socio-economica;
3. verificare se l'oggetto delle analisi descriva in modo sufficiente la complessità dei fattori che intervengono nel processo di produzione della ceramica;
4. verificare la verosimiglianza delle relazioni socio-economiche enunciate nella descrizione del contesto storico-culturale.

4. Nota metodologica

Sono stati selezionati, in una prima fase della ricerca, circa 700 campioni ceramici provenienti dalle strutture e dai livelli delle diverse fasi cronologiche.

La campionatura è stata effettuata in modo da ottenere una panoramica quanto più possibile completa delle classi tipologiche individuate nelle diverse fasi cronologiche. Sono state considerate, inoltre, le diverse funzioni sia delle classi ceramiche che delle strutture da cui provengono i materiali. Sono stati così selezionati manufatti anche tipologicamente e cronologicamente analoghi, ma provenienti da diversi contesti come ambienti destinati all'immagazzinamento delle derrate, aree di culto, aree di residenza. Infine, per tutte le categorie ceramiche individuate sono state campionate anche le diverse classi di impasto e di trattamento della superficie, riconoscibili attraverso un esame autoptico.

Ogni categoria è stata poi rappresentata attraverso più campioni, in modo da ottenere una serie di dati statisticamente attendibili per le elaborazioni successive.

Per confronto, sono stati inseriti anche materiali provenienti da siti coevi posti nella valle dell'alto Eufrate (Fig. 1), forzatamente in quantità inferiore. Le analisi chimico-fisiche effettuate, o ancora in corso di elaborazione, si sono svolte presso i laboratori dell'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali del C.N.R., il Dipartimento di Innovazione Meccanica e Gestionale dell'Università di Padova, l'Istituto di Petrografia dell' Università di Gant (Belgio) e l'Istituto Superiore di Sanità di Roma. Sono state elaborate, in questa prima fase, le seguenti indagini:

- fluorescenza,
- curva termogravimetrica,
- mössbauer,
- diffrazione,
- microscopia ottica su sezioni sottili
- osservazioni macro/micro sui resti botanici, conservati negli impasti,
- gascromatografia,
- prove fisiche di resistenza agli stress,
- analisi morfometriche.

Vengono presentati qui solo i risultati relativi a fluorescenze, effettuate sui primi 376 campioni. Il metodo di analisi impiegato é la fluorescenza da raggi X (XRF) che determina l'abbondanza degli elementi presi in considerazione. Usando un tubo al Rodio sono stati determinati 26 elementi (maggiori, minori e in tracce) e la perdita di peso per ciascun campione (LOI). Il metodo analitico usato è quello di LEONI e SAITTA (1976) che prende in considerazione tutti gli effetti interelementari e le linee di sovrapposizione.

5. SCELTA DEL MODELLO STATISTICO

La manifattura della ceramica, per sua stessa natura è un universo complesso alla cui realizzazione afferiscono sia elementi di carattere culturale, sia aspetti di organizzazione della produzione, sia elementi concretamante fisici, legati alla natura dell'ambiente di produzione. Se è chiara l'esistenza di una interrelazione fra questi fenomeni, non è tuttavia sempre conseguente la comprensione dei modi attraverso cui questa relazione si attua. Infatti, facendo riferimento a comunità ormai estinte da tempo, il tentativo di interpretazione della realtà passa attraverso la "misurazione" dei residui conservati e attraverso la ricostruzione dei "modelli mentali" che si ritiene possano aver indirizzato la produzione.

Il tentativo di organizzare e rappresentare questi fenomeni mediante i "passaggi logici" del linguaggio matematico permette di ridurre al minimo l'ambiguità della ricerca e di investigare sulla natura della struttura relazionale dei dati esaminati.

Nel processo di interpretazione, si è dovuto porre particolare attenzione alla scelta degli elementi descrittivi e quindi alla loro effettiva rappresentatività all'interno del modello. A tal fine si è reso necessario un processo di *normalizzazione* degli indicatori di ordine culturale (cronologia, tipo, forma, decorazione ecc.) e di quelli fisici, empiricamente osservati (impasto, degrassanti, trattamento della superficie, tipo e modo di cottura). Tale procedura è consistita fondamentalmente in un adeguamento di tipo "traduttivo", in modo da far corrispondere ad ogni elemento reale un valore legato logicamente a tutti gli altri e che fosse in grado di descrivere attributi quantitativi e/o qualitativi.

Gli altri elementi oggetto della ricerca – ossia i valori assoluti degli elementi chimici che compongono la ceramica – sono assunti, anch'essi, come "rappresentativi" quantitativamente e qualitativamente dell'universo campionato.

Il risultato è stato la realizzazione di una banca dati in cui sono presenti, quindi, due ordini di dati: quelli assoluti (descrittivi delle componenti dell'impasto, ricavati dalle fluorescenze) e quelli che qualificano ciascun frammento ceramico come oggetto significante di per sé e relativamente al suo contesto di provenienza. Tali dati, espressi in forma disaggregata, rappresentano ciascun oggetto attraverso 39 variabili.

Si è deciso, in prima istanza, di osservare il comportamento globale della campionatura, considerando contemporaneamente i materiali di tutte le fasi e di tutte le categorie. Il fine è stato quello di verificare la capacità descrittiva dei dati, anche in relazione alle categorie ceramiche empiricamente riconosciute.

È stata perciò effettuata un'analisi discriminante. Questo tipo di procedura permette di vedere in che modo una nuova unità, descritta dalle stesse variabili rilevate per tutte le unità già assegnate ai gruppi, può essere attribuita ad uno o ad un altro dei gruppi, minimizzando il rischio di un'errata classificazione (SADOCCHI 1981, 237-251).

La discriminante è stata utilizzata attraverso una matrice di correlazione fra i gruppi (NORUŠIS 1994, 1-45), considerando come variabile indipendente le classi di impasto osservate empiricamente, presupponendo che avessero un certo margine di riconoscibilità legato alle variabili dipendenti, costituite da tutti gli elementi chimici individuati (maggiori, minori e in traccia).

Il risultato non è stato soddisfacente giacché le diverse classi riconosciute dagli archeologi, non hanno ricevuto conferma da queste analisi con l'eccezione di un'unica categoria che caratterizza, come vedremo in seguito, una classe di ollette e ciotole presenti esclusivamente nella fase VI B2. Gli altri impasti hanno rivelato, invece, una tendenza piuttosto forte alla sovrapposizione.

Poiché l'esito è risultato insoddisfacente, si è ritenuto che un prevedibile "rumore di fondo", creato sia dalla quantità dei campioni in analisi, che dalla presenza di numerosi elementi in traccia presenti nell'argilla e comuni a tutti gli impasti, riducesse le possibilità interpretative dei dati. È sembrato conveniente, allora, cercare di selezionare statisticamente quelle variabili che descrivono meglio il campione, attraverso un processo di riduzione. Si è tentato, cioè, di determinare quali elementi fossero più utili alla definizione dei diversi tipi di impasto.

Per ridurre la quantità di variabili da analizzare, senza perdere in significatività nella descrizione di ciascun campione, è stata applicata l'analisi fattoriale mediante il metodo delle componenti principali.

Tale metodo consiste in una trasformazione di un sistema multivariato con il criterio di massimizzazione di porzioni di varianza, via via decrescenti. Queste porzioni o fattori, che risultano dalla determinazione delle componenti principali di un insieme di variabili, descrivono raggruppamenti omogenei fra loro (MINGO 1982b).

Dall'applicazione di questa procedura ci si aspetta che i primi fattori assorbano una buona percentuale della varianza totale del sistema originario, in modo da ridurre il numero dei parametri da considerare (MINGO 1982a, 51). Si raggiunge, in tal modo, una sorta di economia descrittiva, riducendo il numero delle variabili necessarie a descrivere ogni campo, ma limitando la perdita di informazioni.

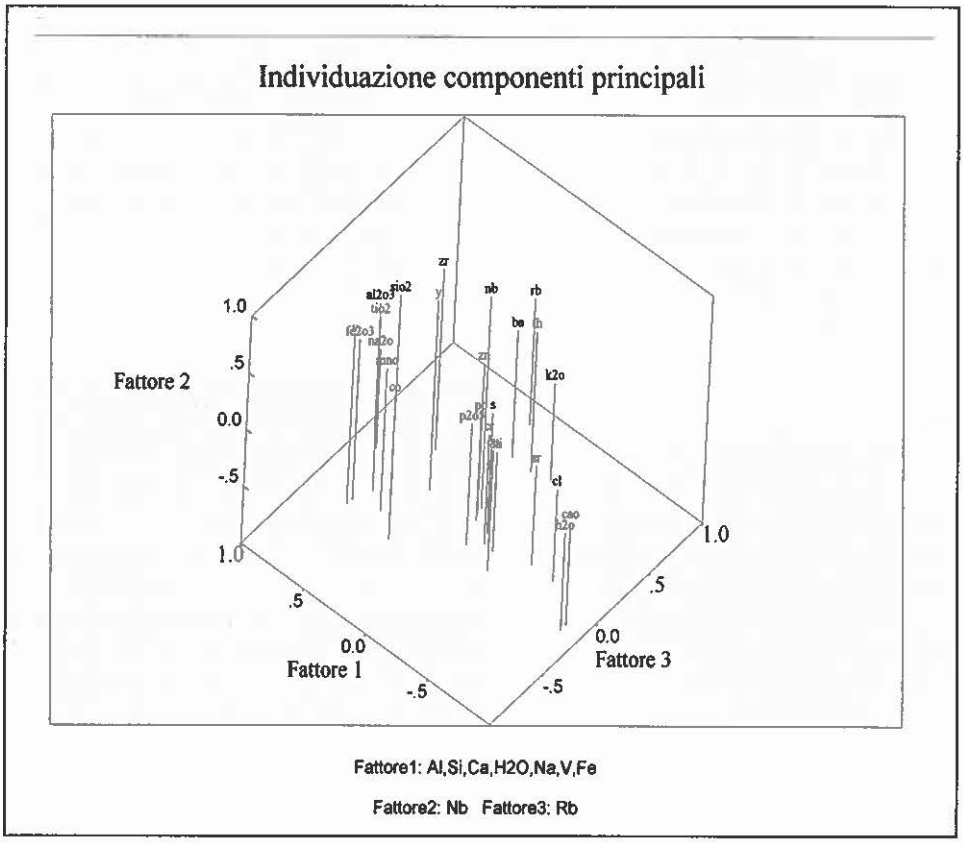


Fig. 2 – Grafico rappresentante la soluzione dei fattori con una rotazione Varimax.

L'analisi, effettuata secondo la metodica di Anderson-Rubin (Norušis 1994, 47-82) e una rotazione Varimax, ha estrapolato 7 fattori, che arrivano a spiegare il 75,6 della variabilità, livello considerato in bibliografia adeguato.

Il passaggio successivo (la matrice fattoriale) evidenzia le associazioni degli elementi per ciascun fattore[2]. In questo caso, visto l'alto punteggio di correlazione, vengono considerati i parametri che si correlano con un valore superiore a 0,7.

Pur essendo riusciti a ridurre a 15 il numero delle variabili, si rimarca, tuttavia, la forte correlazione esistente tra tutte le variabili considerate (Fig. 2), perché si tratta di elementi sempre presenti nei banchi argillosi.

Applicando nuovamente la discriminante, dopo aver ridotto il numero

[2] *Fatt. 1* (31,7% var.); Al, Si, Ca, Na, V, Fe. *Fatt. 2* (12,8% var.): Nb. *Fatt. 3* (10,1% var.): Rb. *Fatt. 4* (7,1% var.): Ni, Cr. *Fatt. 5* (5,5% var.): Pb, Cu. *Fatt. 6* (4,3% var.): P. *Fatt. 7* (4,1% var.): S.

delle variabili dipendenti, si osserva una distribuzione diversificata delle categorie di impasto (Tav. XXII, a), anche se queste mantengono alcune fasce di sovrapposizione. Si riconoscono tre concentrazioni significative: 1) il gruppo delle ceramiche "dipinte", pertinenti esclusivamente alle fasi VI C e VI D; 2) le "rosso-nere", produzione caratteristica dal Tardo Uruk fino a tutto il Bronzo Antico I-III, che mantiene una sostanziale identità; 3) il terzo gruppo, invece, associa e in parte sovrappone le classi della fase VII (tornita "chaff" e ingubbiata-lucidata) e delle fasi VI A e VI B2 (tornita fine, tornita "grit", tornita finissima).

Gli ultimi due gruppi sono dipendenti dal grado di correlazione istituito con la funzione caratterizzata dalla presenza degli elementi maggiori con Calcio fortemente negativo: le "rosso-nere" hanno una relazione positiva, mentre le tornite hanno una relazione negativa, quindi con maggiori quantità di Calcio rispetto a quantità inferiori di Alluminio e Silicio. Il gruppo delle "dipinte" si discrimina per la correlazione negativa di soli due elementi minori (Nichel e Cromo). Le differenziazioni osservate devono essere verificate attraverso lo studio petrografico, ancora in corso, tuttavia già forniscono una prima indicazione sulle diverse possibilità di selezione sulla materia prima operata in antico.

Poiché alcuni gruppi sembrano aggregarsi anche in senso cronologico, si è deciso di fare una verifica delle associazioni di impasto anche in senso diacronico, utilizzando le fasi cronologiche come variabili di raggruppamento. In questo caso, sono risultate abbastanza evidenti alcune aggregazioni (quelle relative alle produzioni delle fasi VII, VI B2, VI D, V A), constatazione che potrebbe indiziare la ricorrenza dell'uso di uno stesso tipo di argilla nell'ambito di un determinato arco cronologico (tale argomento è stato approfondito in Angle, Francaviglia, Frangipane, Palmieri c.s.).

Si è deciso di operare, allora, sui materiali divisi per fasi cronologiche e di osservare i comportamenti delle diverse categorie di impasto, tenendo conto, tuttavia, delle indicazioni emerse dalla prima analisi, che dava buone indicazioni sull'omogeneità di due produzioni attraverso il tempo: le rosso-nere e le dipinte.

6. Fase VII

La produzione di questo periodo è realizzata essenzialmente a mano con un trattamento finale mediante l'uso di un tornio lento.

Si diffondono le "produzioni di massa", caratterizzate da una lavorazione affrettata. Spesso la cottura è scadente. Nonostante l'apparente semplicità tipologica (Fig. 3), si nota – in ogni caso – una molteplicità di forme e probabilmente di funzionalità nella destinazione.

Inoltre, parte della produzione è caratterizzata dalla presenza di un marchio (Fig. 3/A,B), identificato come elemento di riconoscimento apposto

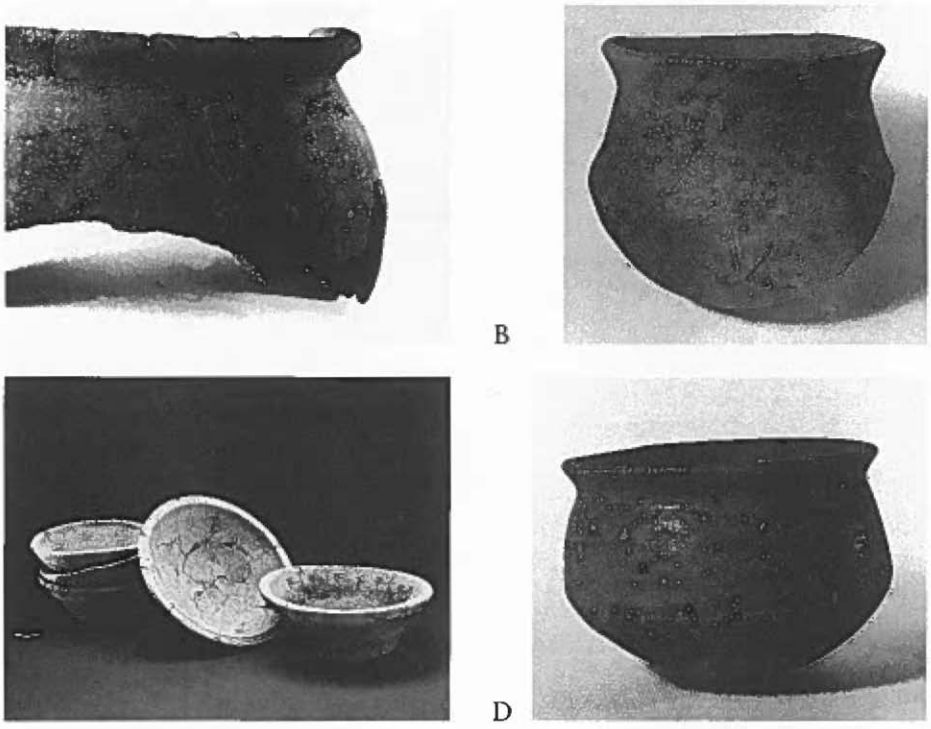


Fig. 3 – Esempi di manifatture ceramiche del Tardo Calcolitico (fase VII): A) "pentola" con marchio di vasaio (in sigla c, ct, ecc.); B) bicchiere carenato, impasto brunito e lucidato, con marchio di vasaio (in sigla rib, aib); C) ciotole "di massa", tornite, impasto "chaff" (in sigla tgc, tgc c); D) bicchiere carenato, impasto con ingubbiatura rossa brunita e lucidata (in sigla rib, aib).

dal produttore. Questa connotazione pone in risalto, sia la presenza di più di un'officina nella stessa zona, che la volontà di distinguere, nel processo di produzione, le diverse provenienze.

Tale fenomeno, che è già stato affrontato da altri Autori (TRUFELLI 1994), ai quali si rimanda, suggerisce la possibilità di forme di organizzazione collettiva del lavoro (ad esempio, in relazione alla cottura).

Un primo tentativo di distinzione degli impasti è stato fatto mediante un cluster gerarchico (Fig. 4), applicando il metodo di Ward (NORUŠIS 1994, 97-98) con la distanza di Mahalanobis, metodica utilizzata di frequente nell'ambito delle analisi che descrivono aspetti sociali (RIZZI 1985; SADOCCHI 1982).

È evidente una sostanziale affinità dei gruppi, da cui si distingue effettivamente solo un gruppo di pentole (in sigla indicate con : c, ct ecc.); mantengono tuttavia un'ottima riconoscibilità, all'interno del primo cluster, le produzioni brunite (rib, aib in sigla) come anche le ciotole tornite "chaff" (tgc c, tgc in sigla).

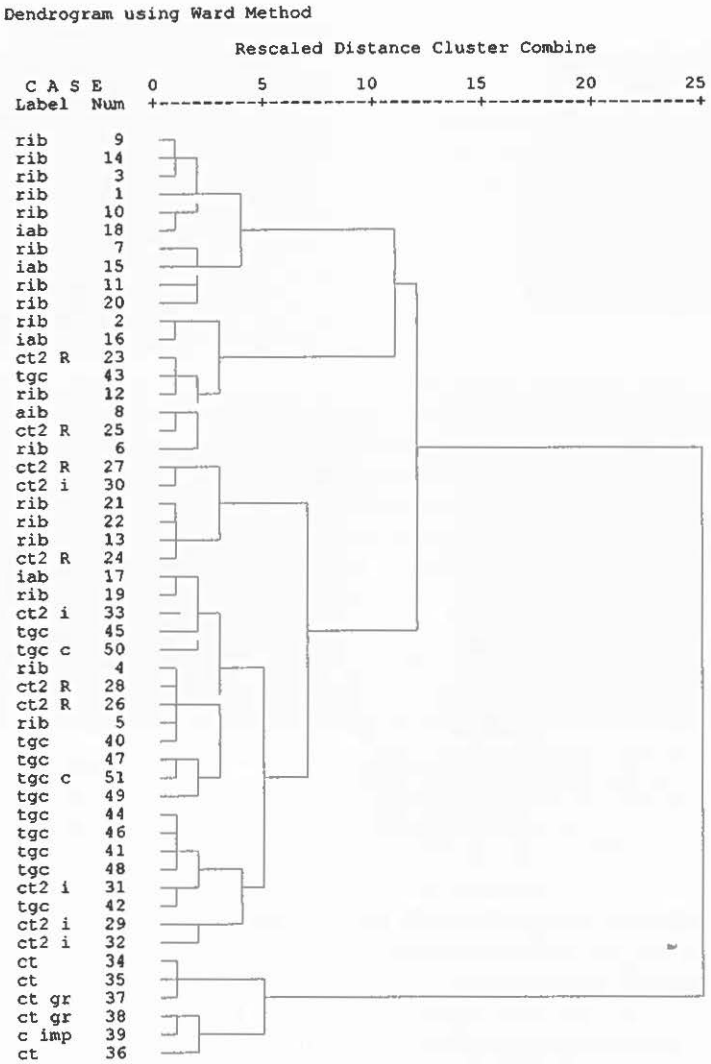


Fig. 4 – Cluster relativo alle produzioni della fase VII.

Per rappresentare, anche in questo caso, l'andamento globale dei gruppi individuati attraverso il cluster, le unità non chiaramente attribuite, le relazioni correnti tra i gruppi e soprattutto le funzioni della variabilità, si è applicata un'analisi discriminante, (in questo caso – come in tutti quelli successivi – utilizzando solo le componenti principali, estrapolate dall'analisi fattoriale).

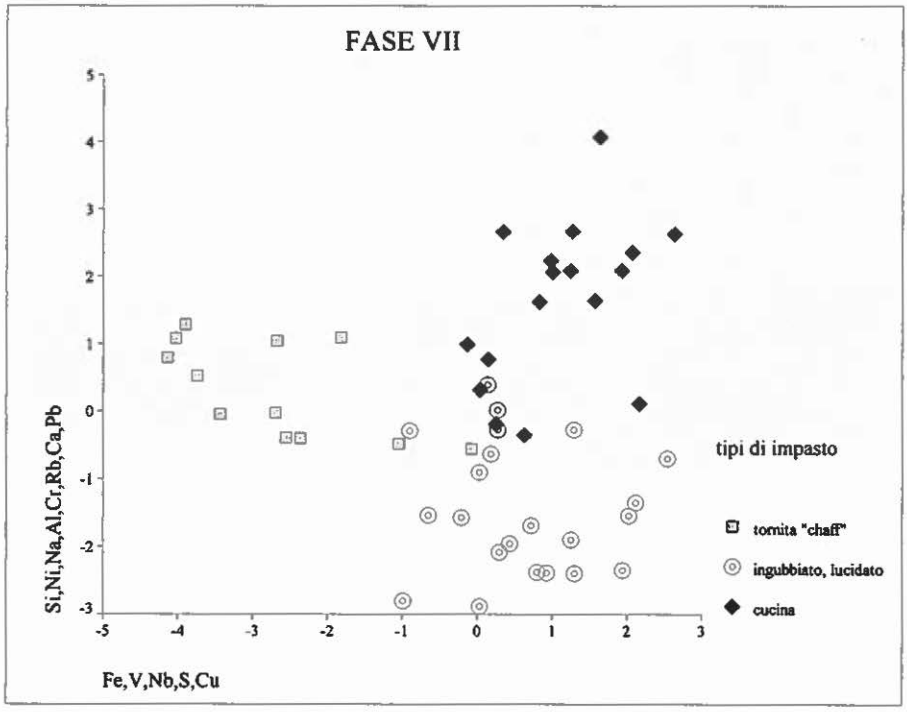


Fig. 5 – Plot dei valori della discriminante per le manifatture ceramiche della fase VII.

Risultano ben riconoscibili (Fig. 5) da un lato le produzioni da mensa (ceramiche brunite e lucidate, Fig. 3/B,D) e quelle da cucina (Fig. 3/A), dall'altro il gruppo delle tornite "chaff" (Fig. 3/C). La forte correlazione interna a ciascun gruppo è legata, tra l'altro, all'alto grado di significanza attribuito alle due funzioni che determinano la varianza osservata (54,32% e 45,68% per un valore cumulativo pari al 100%) .

La correlazione costante tra l'impasto "tgc" o tornito "chaff" e le ciotole prodotte "in massa" indica l'esistenza di una specializzazione nel processo di produzione di questa classe ceramica.

La notevole omogeneità degli impasti ceramici ben si accorda con le uniformità delle tecniche di manifattura e, unitamente allo sviluppo della produzione di massa delle ciotole, indica una tendenza alla standardizzazione e un adeguamento degli artigiani ad esigenze nuove che tendono a privilegiare la quantità rispetto alla qualità del prodotto.

Se queste esigenze possono essere scaturite in relazione alle attività e ai bisogni di una élite emergente, non vi sono evidenze tuttavia di un controllo centrale sulla manifattura, come indica anche la presenza di marchi da vasaio.

7. Fase VI A

La produzione di questa fase si caratterizza per la presenza di un uso più generalizzato del tornio veloce. Tale tecnica si accompagna, inoltre, alla standardizzazione di alcune forme e ad un ampio sviluppo della "produzione di massa" (anche in questo caso costituita da ciotole, Fig. 6/A). Parallelamente si osserva l'introduzione di una nuova produzione non tornita di ceramica "rosso-nera" di tradizione anatolica, e generalmente circoscritta a tipi di vasellame "di lusso" (Fig. 6/B).

Si nota, in generale, una forte corrispondenza tra forme e trattamenti della superficie. Ciò suggerisce una maggiore attenzione alla destinazione e alla funzionalità espletate dal contenitore.

La statistica[3] distingue per impasto le produzioni tornite da quelle fatte a mano (Fig. 7), correlandole in modo positivo o negativo alla funzione costituita dalle variabili principali (percentuale di varianza spiegata: 45,08%). Anche in questo caso, la spiegazione del fenomeno sembra correlarsi sia alla selezione operata sul materiale, che agli esiti della cottura sullo stesso.

Nell'ambito delle tornite sono distinti ulteriormente (percentuale di varianza spiegata dalla funzione: 23,35%) l'impasto riferito esclusivamente alle ciotole "di massa" (tornita "grezza") da quello fine e semifine relativo ad olle di diverse dimensioni (Fig. 8), destinate allo stoccaggio e alla mensa, categoria di vasi che raggiunge un notevole livello di standardizzazione.

La diversificazione tra fine e semifine, operata a livello empirico e non riconosciuta dalla statistica sugli elementi, è dovuta quindi unicamente a fattori esterni alla natura dell'impasto, quali le caratteristiche dimensionali dell'oggetto che si riflettono sullo spessore delle pareti e sulle dimensioni degli inclusi, e il tipo di trattamento della superficie, decorato o meno secondo la tecnica del "reserved slip", che non apporta modifiche all'impasto. Si apprezza, quindi, per le tornite, una forte correlazione tra tipi ceramici ed impasti.

L'altro gruppo di aggregazione identifica bene le produzioni non tornite, soprattutto le "rosso-nere", che vengono attribuite allo stesso gruppo con il 100% di attendibilità e si denotano quindi come una produzione dalle caratteristiche molto strette e ricorrenti. A queste si avvicina il gruppo delle pentole e dei pithoi, che presentano invece dei margini di variabilità più ampi.

È necessario ricordare che la differenziazione dell'impasto della classe "rosso-nera" si collega alla diversità di tutto il processo di produzione: quindi, materie prime, tipo di manifattura, trattamento delle superfici, modi di cottura e, probabilmente, destinazione.

[3] Le procedure statistiche sono state svolte in modo sempre uguale per tutte le fasi: prima sono stati elaborati i clusters, sempre secondo il metodo di Ward, per osservare i diversi gruppi, dopo sono state realizzate le analisi discriminanti. In questa sede, per esigenze di spazio sono state escluse le spiegazioni e le illustrazioni inerenti ai clusters. Per le elaborazioni statistiche ci si è avvalsi del software SPSS.

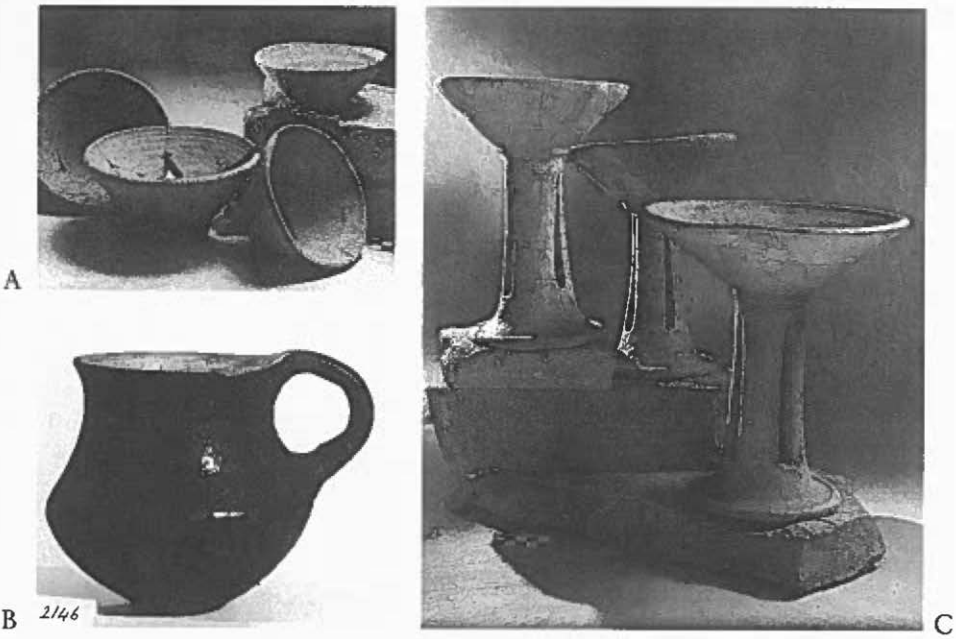


Fig. 6 – Esempi di manifatture del periodo Tardo Uruk (fase VI A): A) ciotole "di massa", chiamate "string cut", tornite, di impasto grezzo; B) boccaletto, produzione non tornita, impasto "rosso-nero" lucidato; C) Coppe cerimoniali su alto piede, tornite, impasto fine.

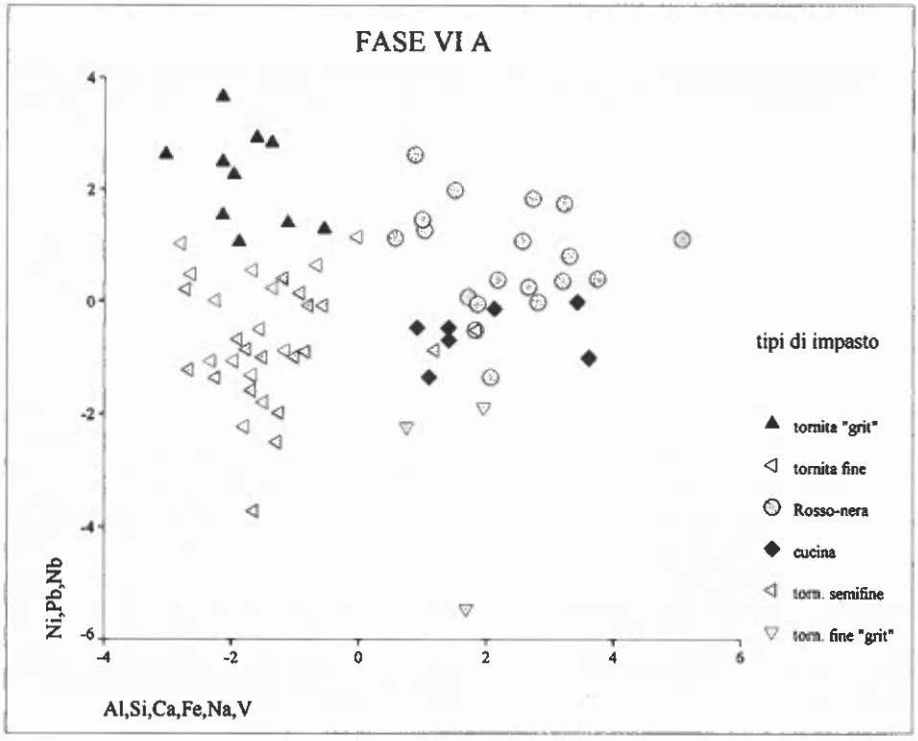


Fig. 7 – Plot dei valori della discriminante per le manifatture della fase VI A.

L'insieme di questi dati lascia delineare alcune possibilità di approfondimento:

– l'esistenza di classi di oggetti (ciotole ed olle) molto specializzate per forma, funzione, materia prima indicano la presenza di artigiani che esercitano un notevole controllo sulla produzione sia a livello di modello che di manifattura.

– la produzione di ceramica "rosso-nera", parallela alla precedente, risulta meno specializzata nella tipologia e nell'impasto, ma con tempi e accuratezza di esecuzione non inferiori alle classi tornite. Usata per la realizzazione di un numero limitato di forme e prodotta in quantità ridotta, ha probabilmente una destinazione particolare.

– la circolazione di modelli e la destinazione del vasellame era controllata dalle esigenze della committenza che richiedeva determinati prodotti in precise quantità (produzioni di massa, produzioni standardizzate, produzioni "rosso-nere").

Si ipotizzano, allora, due scenari collegati fra loro. La significativa differenza riscontrata nei tipi di produzione può essere collegata alla presenza di officine indirizzate a produzioni differenti (tornite o rosso-nere), gestite probabilmente da artigiani con livelli tecnologici differenti e non "integrati" fra loro. A queste diverse officine si indirizzano i committenti, a seconda della destinazione finale del manufatto: distribuzione di razioni (ciotole di massa), conservazione e distribuzione di derrate (olle standardizzate e bottiglie, Figg. 8 e 9/A), pratiche di culto (coppe su alto piede, Figg. 6/C e 9/B) o mensa (vari tipi di vasellame tornito e "rosso-nero"). La compresenza, quindi, di officine specializzate in modo differente si collega allora all'organizzazione della struttura economico politica del momento.

Il controllo sul lavoro da parte delle istituzioni protostatali documentato ad Arslantepe dalla intensa attività amministrativa e redistributiva, dovette determinare da un lato una richiesta più pianificata di vasellame in relazione alle varie esigenze centrali, dall'altro un probabile controllo anche sulla organizzazione delle officine ceramiche.

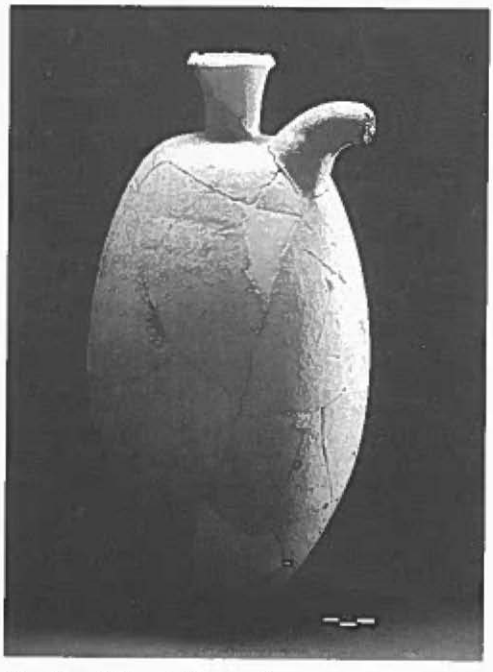
8. Fase VI B2

Dopo l'interruzione "transcaucasica" (fase VI B1), caratterizzata dalla presenza esclusiva di ceramica "rosso-nera"[4] (Fig. 10), si torna allo stesso tipo di produzione della fase VI A. Lo spettro degli impasti (Fig. 11) si delinea in maniera analoga, riproponendo il dualismo tra manifatture tornite e non.

Non si trovano più, tuttavia, produzioni di massa e nell'ambito delle tornite si perde la correlazione tra forma e impasto con l'eccezione del grup-

[4] La fase VI B1 non viene esaminata in questa sede, perché il campione a disposizione – al momento – era esiguo e statisticamente poco attendibile.

Fig. 8 – Olle tornite, alcune con decorazione "reserved slip" o "ingubbiatura risparmiata", impasto fine e semifine, fase VI A.



A

B

Fig. 9 – A) bottiglia con beccuccio, tornita, impasto fine, fase VI A; B) coppa cerimoniale su alto piede, produzione non tornita, impasto "rosso-nero", fase VI A.

Fig. 10 – Olla, non tornita. Impasto "rosso-nero", fase VI B1.

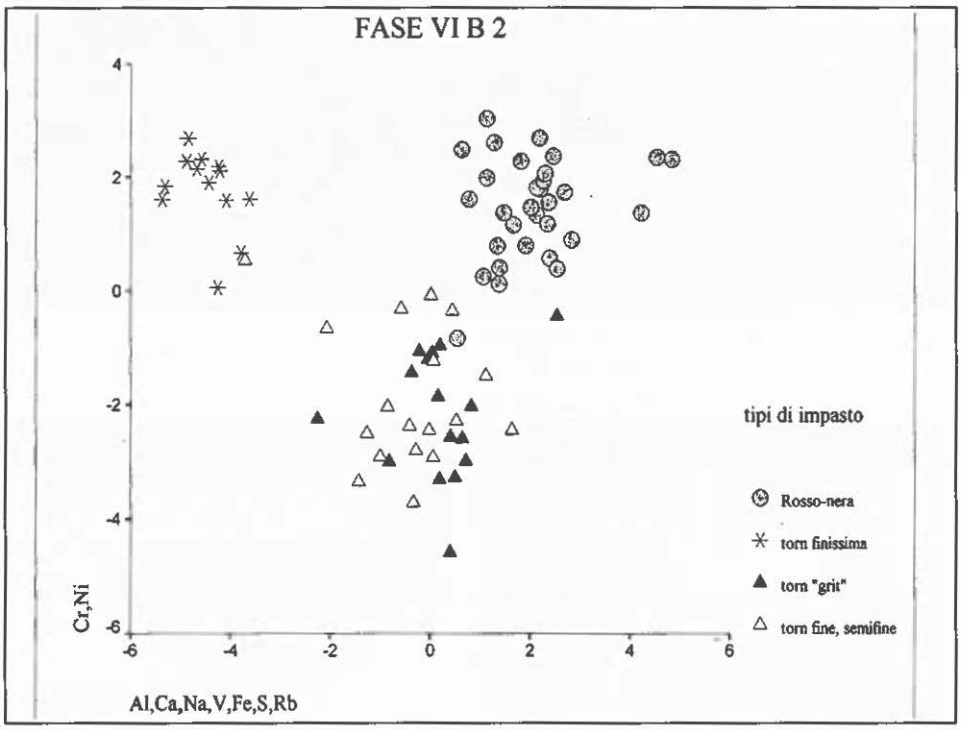


Fig. 11 – Plot dei valori della discriminante per la fase VI B2.

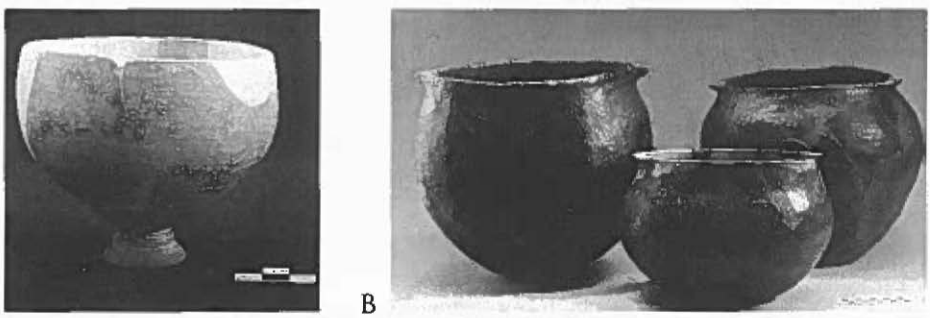


Fig. 12 – A) coppa su piede, tornita, impasto finissimo, fase VI B2; B) vasellame non tornito, impasto "rosso-nero", del Bronzo Antico II (fase VI C).

po delle ollette e ciotole "tornite finissime" (Fig. 12/A), che si enucleano in modo molto chiaro.

In attesa di una maggiore precisione per il riconoscimento delle caratteristiche di questo impasto, che può venirci solo dai risultati delle sezioni sottili, si ipotizza la presenza – per quanto concerne questa specifica classe ceramica – di una produzione notevolmente specializzata, che seleziona in maniera rigorosa un particolare tipo di materia prima e che potrebbe anche essere estranea al circuito locale.

9. Fase VI C e Fase VI D

Le produzioni delle fasi del Bronzo Antico II e III sono caratterizzate dalla presenza preponderante di ceramica non tornita "rosso-nera", prodotta con tipologie differenti rispetto alle fasi del VI A e del VI B2 (Fig. 12/B). A questa si associa una lavorazione più depurata di ceramica chiara e dipinta, anch'essa fatta a mano (Tav. XXII, b).

Gli elaborati statistici (Figg. 13 e 14) mostrano come gli impasti siano ben differenziati fra loro, con ampi margini di riconoscibilità.

La fase VI C è caratterizzata dalla presenza, delle produzioni "rosso-nere" e dipinte a cui si associa, inoltre, la manifattura, chiamata "tornita fine", presente nel sito vicino di Gelincik (Palmieri 1967) e inserita per confronto. Alle falde del complesso vulcanico di Gelincik, infatti, si trova una fascia di materiale proveniente dall'alterazione e disgregazione della formazione vulcanica, che costituisce una fonte di materia prima per la ceramica caratterizzata differentemente dai depositi neogenici fluviolacustri che circondano il sito di Arslantepe.

Anche per la successiva fase VI D si nota una precisa definizione delle classi "rosso-nere" e dipinte. A queste due classi, si associa una manifattura di scodelle tornite con ingubbiatura rossa, che si collocano tuttavia in un momento molto avanzato del periodo. Particolarmente significativa è la collocazione (Fig. 14, in alto a destra) di un frammento di probabile importazione, una tazza tipo"depas".

Risulta evidente in tutte e due le fasi, che le classi di produzione "rosso-nera" e dipinta formano clusters nettamente distinti, indicando l'esercizio di un forte controllo sulla materia prima, mentre la mancanza di associazione al loro interno tra forme e impasti si collega ad uno scarso livello di specializzazione della produzione.

La ceramica "rosso-nera", che mostra ampia discrezionalità tipologica, potrebbe rientrare nel campo dell'artigianato svolto occasionalmente. La produzione dipinta, sembra invece realizzata da artigiani specializzati, che la distribuiscono in tutto il territorio di Malatya e di Elažig. Quest'ultima osservazione è indotta dalla presenza in tutta la regione di vasellame con forme e decorazioni identiche ed è confermata dalla sovrapposizione nei clusters del-

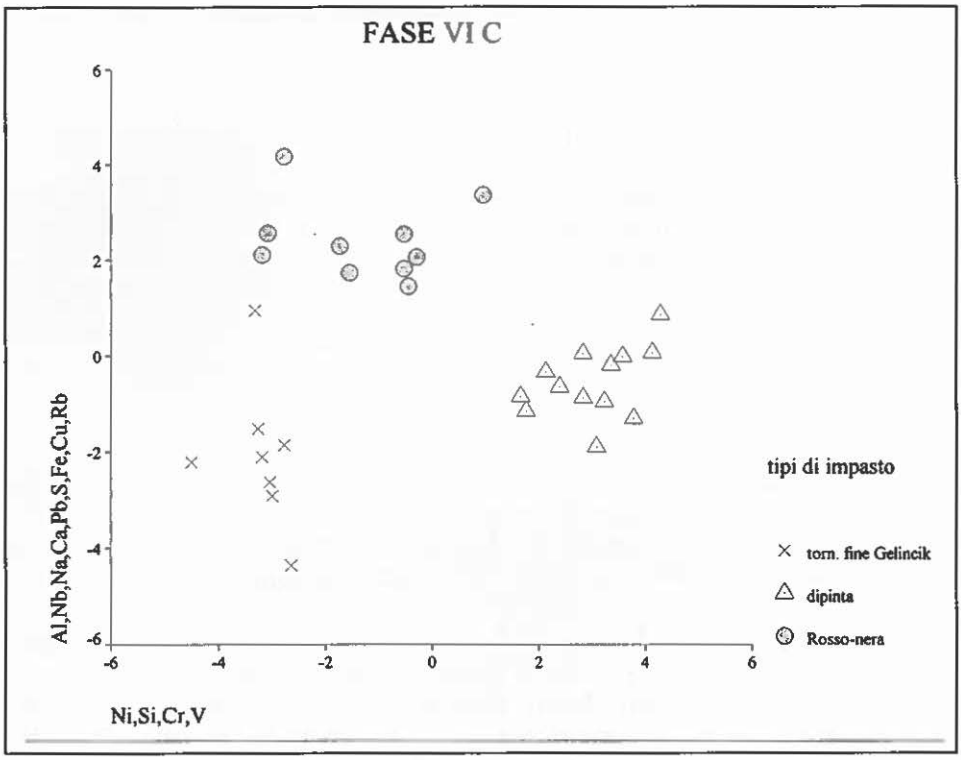


Fig. 13 – Plot dei valori della discriminante per la fase VI C.

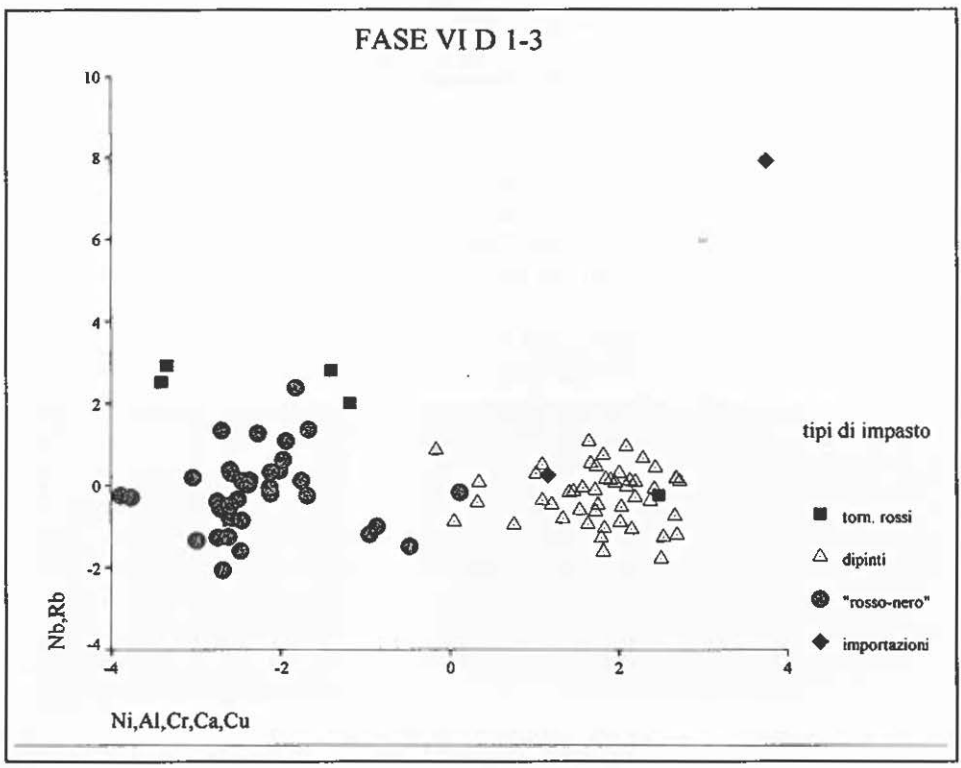


Fig. 14 – Plot dei valori della discriminante per la fase VI D.

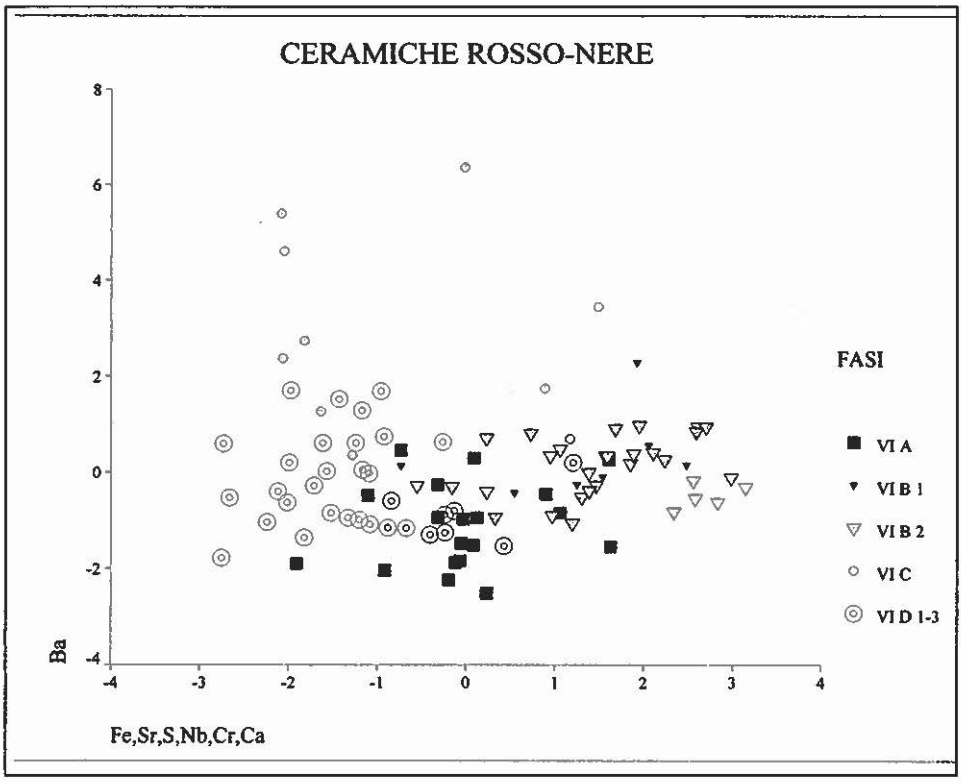


Fig. 15 – Plot dei valori della discriminante per le produzioni di ceramica "rosso-nera", nel periodo dal Tardo Uruk al Bronzo Antico III (fasi VI A, VI B1, VI B2, VI C, VI D).

le ceramiche provenienti da vari siti delle due aree (oltre ad Arslantepe: Şemşiyetepe, Koşkörbaba, Imamoglu, Fethiye, Norşuntepe, Fig. 1).

Se ne evince una stretta omogeneità culturale e tecnologica tra le due regioni di Malatya e di Elažig, in armonia con gli altri tratti della cultura materiale e con l'affinità delle strutture socio-economiche che rivelano comunità con crescente urbanizzazione, ma scarso grado di centralizzazione.

Uno degli aspetti più stimolanti da verificare, è quello relativo alla produzione delle ceramiche "rosso-nere", al cui perdurare dal Tardo Calcolitico (fase VI A) a tutto il Bronzo Antico, per un periodo di oltre un millennio, corrisponde una continuità anche sulle modalità di produzione. Osservando, infatti, il comportamento del gruppo su tutto l'arco cronologico considerato (Fig. 15), si può constatatare la notevole omogeneità dei risultati, la cui articolazione interna, pur rispettando la sequenza temporale, non può essere attribuita a significative variazioni nella manipolazione dell'impasto. Si può, quindi, confermare la sostanziale indipendenza di questa manifattura da tut-

te le altre, nell'ambito di una precisa e voluta continuità nel modo di produzione, fenomeno che potrebbe ben collegarsi alla presenza iniziale di una comunità ben distinta che mantiene a lungo la sua identità culturale adeguandosi, ma non integrandosi totalmente ai contesti socio-culturali del periodo Tardo Uruk e Bronzo Antico I, fortemente connessi con l'ambiente siro-mesopotamico, mentre diviene la componente dominante nel Bronzo Antico II e soprattutto nel Bronzo Antico III, quando si afferma completamente.

Micaela Angle
Ministero per i Beni Culturali e Ambientali
Soprintendenza Archeologica per l'Etruria Meridionale, Roma

Marcella Frangipane
Dipartimento di Scienze Antropologiche, Archeologiche e Storiche dell'Antichità, Università "La Sapienza", Roma

Alberto Maria Palmieri
Istituto per le Tecnologie applicate ai Beni Culturali
C.N.R. - Area di Ricerca di Montelibretti, Roma

BIBLIOGRAFIA

Angle M., Francaviglia V., Frangipane M., Palmieri A.M. c.s., *Analisi archeometriche su ceramiche del IV e III millennio a.C., provenienti da Arslantepe (Malatya, Turchia)*, in *Atti del I Congresso Internazionale "Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin" (Catania 1995)*, in corso di stampa.

Conti A.M., Persiani C. 1993, *When Worlds Collide. Cultural Developments in Eastern Anatolia in the Early Bronze Age*, in M. Frangipane, H. Hauptmann, M. Liverani, P. Matthiae, M. Mellink (eds.), *Between the Rivers and over the Mountains, Archaeologica Anatolica et Mesopotamica Alba Palmieri Dedicata*, Roma, 361-413.

Ferioli P., Fiandra E. 1983, *Clay Sealings from Arslantepe VIA: Administration and Bureaucracy*, in M. Frangipane, A. Palmieri (eds.), *Perspectives on Protourbanization in Eastern Anatolia: Arslantepe (Malatya). An Interim Report on 1975-1983 Campaigns*, «Origini», 12/2, 455-509.

Ferioli P., Fiandra E. 1994, *Archival Techniques and Methods at Arslantepe*, in P. Ferioli, E. Fiandra, G.G. Fissore, M. Frangipane (eds.), *Archives before Writing, Proceedings of the International Colloquium Oriolo Romano 1991*, Torino, 150-161.

Frangipane M. 1989, *Produzione di vasellame in serie e distribuzione di razioni alimentari nelle società protourbane del periodo Tardo Uruk-Gemdet Našr*, in R. Dolce, C. Zaccagnini (edds.), *Il pane del re*, «Studi di Storia Antica», 13, Bologna, 49-63.

Frangipane M. 1992, *Dipinti murali in un edificio palaziale di Arslantepe-Malatya: aspetti ideologici nelle prime forme di centralizzazione economica*, «Studi Micenei ed Egeo-Anatolici», 30.

Frangipane M. 1993a, *Local components in the development of centralized societies in Syro-Anatolian Regions*, in M. Frangipane, H. Hauptmann, M. Liverani, P. Matthiae, M. Mellink (eds.), *Between the Rivers and over the Mountains, Archaeologica Anatolica et Mesopotamica Alba Palmieri Dedicata*, Roma, 133-161.

Frangipane M. 1993b, *Arslantepe-Melid-Malatya*, in *Arslantepe, Hierapolis, Iasos, Kyme. Scavi archeologici italiani in Turchia*, Roma, Marsilio, 31-104.

Frangipane M. 1994, *The Record Function of Clay Sealings in Early Administrative Systems as Seen from Arslantepe-Malatya*, in P. Ferioli, E. Fiandra, G.G. Fissore, M.

FRANGIPANE (eds.), *Archives before Writing, Proceedings of the International Colloquium Oriolo Romano 1991*, Torino, 125-136.

FRANGIPANE M., PALMIERI A. 1983a, *A protourban centre of the Late Uruk Period*, in M. FRANGIPANE, A. PALMIERI (eds.), *Perspectives on Protourbanization in Eastern Anatolia: Arslantepe (Malatya). An Interim Report on 1975-1983 Campaigns*, «Origini», 12/2, 287-454.

FRANGIPANE M., PALMIERI A. 1983b, *Cultural developments at Arslantepe at the beginning of Third Millenium*, in M. FRANGIPANE, A. PALMIERI (eds.), *Perspectives on Protourbanization in Eastern Anatolia: Arslantepe (Malatya). An Interim Report on 1975-1983 Campaigns*, «Origini», 12/2, 523-574.

FRANGIPANE M., PALMIERI A. 1987, *Urbanization in perimesopotamian areas: the case of Eastern Anatolia*, in L. MANZANILLA (ed.), *Studies in the Neolithic and Urban Revolutions*, BAR Int. Series 349, 295-318.

FRANGIPANE M., PALMIERI A. 1988-1989, *Aspect of centralization in the Late Uruk Period in Mesopotamian periphery*, in *L'interpretazione funzionale dei dati in Paletnologia. Giornate di studio in ricordo di Salvatore Maria Puglisi*, «Origini», 14/2, 539-560.

LEONI L., SAITTA M. 1976, *X-ray fluorescence analysis of 29 trace elements in rock and mineral standards*, «Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia», 32, 2, 497-510.

MARCOLONGO B., PALMIERI A.M. 1983, *Environment, water supply and cultural development at Arslantepe (Malatya, Turkey)*, in M. FRANGIPANE, A. PALMIERI (eds.), *Perspectives on Protourbanization in Eastern Anatolia: Arslantepe (Malatya). An Interim Report on 1975-1983 Campaigns*, «Origini», 12/2, 619-628.

MINGO I. 1982a, *I modelli matematici come strumento di analisi del sociale*, in F. DI ORIO, *Modelli matematici nelle scienze sociali*, 1, Roma, La Goliardica.

MINGO I. 1982b, *Modelli matematici nelle scienze sociali*, 2, Roma, La Goliardica.

NORUŠIS M.J. 1994, *SPSS Professional Statistics 6.1*, SPSS Inc., Stati Uniti.

PALMIERI A. 1967, *Insediamento del Bronzo Antico a Gelinciktepe (Malatya)*, «Origini» 1, 117-193.

PALMIERI A. 1973, *Scavi nell'area sud-occidentale di Arslantepe. Ritrovamenro di una struttura templare dell'Antica Età del Bronzo*, «Origini», 7, 55-182.

PALMIERI A. 1978, *Scavi ad Arslantepe*, Quaderni de «La ricerca scientifica», 100, CNR, Roma, 311-373.

PALMIERI A. 1981, *Excavation at Arslantepe (Malatya)*, «Anatolian Studies», 31, 101-119.

PALMIERI A. 1985, *Eastern Anatolian and Early Mesopotamian Urbanization: Remarks on Changing Relations*, in M. LIVERANI, A. PALMIERI, R. PERONI (edd.) 1985, *Studi di Paletnologia in onore di S.M. Puglisi*, Roma, 191-213.

PUGLISI S.M., MERIGGI P. 1964, *Malatya I. Rapporto preliminare delle campagne 1961 e 1962*, «Orientis Antiqui Collectio», 3, Roma.

RIZZI A. 1985, *Analisi dei dati. Applicazioni dell'informatica alla statistica*, Roma, La Nuova Italia Scientifica.

SADOCCHI S. 1981, *Manuale di analisi statistica multivariata per le scienze sociali*, Milano, Franco Angeli.

TRUFELLI F. 1994, *Standardization mass production and potter's marks in the Late Chalcolithic pottery of Arslantepe (Malatya)*, «Origini», 18, 245-289.

ABSTRACT

This project grew out of a collaboration between the Missione Archeologica Italiana in Turchia (Università di Roma "La Sapienza") and the Istituto per le Tecnologie applicate ai Beni Culturali of the CNR. Within this project we selected over 700 ceramic samples found at Arslantepe and coming from the structures and layers of IV and III millennium

B.C. Samples were chosen in order to obtain a complete picture of the typological classes coming from the different chronological phases. Various kinds of use of the ceramic classes and of the relevant structures were also investigated, using traditional archaeometric analyses. Taking into consideration such a large period of time, our purpose was to study the socio-cultural and economic development and transformations showed by the technology of ceramic production.

The management of such an amount of data and of the relevant high number of interrelationships has required the use of a computer-based system. Statistical analyses have been carried out using the software SPSS, which specialised in the study of Social Sciences.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 469-486

STUDIO DELLE PASTE CERAMICHE DI ANFORE DELLA LAGUNA DI VENEZIA MEDIANTE UNA PROCEDURA BASATA SULLA ELABORAZIONE DI IMMAGINI

1. Introduzione

In questo lavoro presentiamo lo stato di avanzamento degli studi svolti per la classificazione di anfore spagnole ritrovate nella laguna di Venezia[1].

I materiali esaminati sono caratterizzati da una notevole frammentarietà e da una grande mescolanza tipologica e cronologica: differenti tipi di contenitori sono stati ritrovati assieme in canali, barene, paludi e presso le rive delle isole[2] (Modrzewska 1993). A causa di questa specificità dei ritrovamenti, si riscontrano notevoli difficoltà nel riconoscere i reperti, in particolare quelli a fondo piatto, che sono numerosi nella Laguna: è difficile individuare se si tratta di parti di anfore galliche, forlimpopolensi, iberiche varie o addirittura brocche.

La determinazione della provenienza di particolari reperti può risultare talvolta ambigua: ad esempio, il Dr 38 può essere o spagnolo o di imitazione francese (Jacquin, Becker *et al.* 1993, 105-141).

Inoltre, un'ulteriore difficoltà di riconoscimento è determinata dalla modifica dell'aspetto della superficie delle anfore, causata dagli agenti chimici e biologici dell'ambiente lagunare in cui sono stati ritrovati (ad es. gli ingobbi ricoperti dai molluschi ecc.).

Al fine di pervenire ad una classificazione corretta e affidabile, la ricerca è stata basata, oltre che su indagini archeologiche, anche su indagini archeometriche, consistenti in analisi fisiche e chimiche eseguite su campioni ricavati dalle anfore in precedenza studiate archeologicamente (Modrzewska *et al.* 1993, 127-135; Modrzewska 1995a): in questo modo, mediante un confronto coi dati ricavati dall'analisi di campioni di anfore classificate come archeologicamente sicure, ci proponiamo di ricavare informazioni attendibili per l'identificazione dei reperti di provenienza e attribuzione incerte (Beltrán Lloris 1977, 97-131; Peacock 1974, 234-241; Feliu Ortega *et al.* 1995, 131-133; Campano Lorenzo 1994, 135-146), anche se in questa fase della ricerca non si ritiene possibile risalire alle località di produzione delle anfore (Menantau *et al.* 1983, 39-301; Modrzewska, Oddone, Pianetti 1995, 127-130).

[1] La ricerca si svolge presso l'ISDGM CNR di Venezia e l'IEI CNR di Pisa con l'autorizzazione della Soprintendenza Archeologica del Veneto (Modrzewska *et al.* 1993).

[2] Tutte le anfore sono state ritrovate dal sig. E. Canal, studiate presso la sua casa e altre presso magazzini del Museo Archeologico di Venezia grazie al permesso della prof. B.M. Scarfì.

Per gli studi illustrati dalla presente relazione abbiamo preso, come base sperimentale e metodologica, specifici ritrovamenti lagunari di materiali di origine spagnola e contenitori, sempre spagnoli, presenti nella costa e nel retroterra veneto, dopo una loro identificazione archeologica in tutta la regione: così i ritrovamenti lagunari si possono riferire a tutto il territorio (MODRZEWSKA 1995b).

Il numero di reperti presi in esame, costituito da un gruppo di 15 frammenti di anfore varie provenienti dalla Laguna e da un frammento di anfora proveniente da Verona e presa come confronto, non è abbastanza grande per l'esecuzione di significative indagini statistiche (MODRZEWSKA, ODDONE, PIANETTI 1994, 39-51); inoltre, il materiale preso in esame non è il più caratteristico per i ritrovamenti anforici della Laguna, per cui si prevede di analizzare anche i campioni prelevati dalle anfore più caratteristiche come le Dr 2-4, Dr 6A e 6B, africane, Late Roman e lusitane.

Tuttavia, il materiale è stato sufficiente per mettere a punto le procedure di analisi e per definire le modalità e l'entità di successivi ampliamenti. I risultati dell'analisi delle paste dei materiali ceramici, correlati coi risultati delle ricerche archeologiche e archeometriche che sono state oggetto di recenti attività di studio, possono consentire sia di classificare i ritrovamenti, sia di ottenere validi indicatori della storia della zona.

2. MATERIALI

In questo studio si esaminano anfore della laguna di Venezia, già classificate come sicure archeologicamente, e frammenti di anfora di classificazione incerta.

La Fig. 1 mostra la mappa dei ritrovamenti; in tabella 1 sono elencate le località e i corrispondenti ritrovamenti di interesse per il presente lavoro[3]. Normalmente a gran parte di questi ritrovamenti si accompagnano anfore tardo-romane, adriatiche (anche a collo ad imbuto) e molti frammenti di anfore a fondo piatto. È difficile caratterizzare la natura dei ritrovamenti, praticamente senza contesto, e solo in alcuni casi è stato possibile fornire un'attribuzione sicura su base archeologica: l'attribuzione tipologica dei ri-

[3] Riportiamo qui i numeri di inventario, ove esistono, delle anfore, secondo i luoghi di ritrovamento in ordine alfabetico: San Ariano collo Dr 7-11, IG 210566, camp. P7; San Ariano ansa Dr 7-11, IG 210555, camp. P6; Canale Catena parte superiore con un'ansa, ricostruito, sn. casa Canal, camp. 14; canale Catena parte superiore incompleta Dr 20, sn. casa Canal, camp. P13; Santa Caterina collo frammentario e frammento orlo Dr 20, IG 143383, camp. P4; Santa Cateriana ansa Dr 7-11, IG 143385, camp. P5; San Felice puntale Dr 20-23, IG 70905, camp. P11; San Felice frammento collo e orlo, IG 70910, camp. P10; Fusina ansa Dr 7-11, IG 220082, camp. P2; San Lorenzo Monoxile puntale Dr 20-23, IG 70818, camp. P9; Ottagono frammento orlo Dr 20, sn. casa Canal, camp 1; canale Rigà incompleta parte superiore Dr 8, IG 142922, camp. P12, vedi (anche DORIGO 1983, 236); Sacca delle case, Tessera ansa Dr 7-11, IG 143264, camp. P3; anfore studiate per confronto; Verona deposito presso Tomba di Giulietta quasi integra Dr 7 (Beltran Ib), sn. nostro nr prov. 6, camp. P15; canale Rigà parte superiore bollata, Lamboglia 2/Dr 6A, IG 142950, camp. 16.

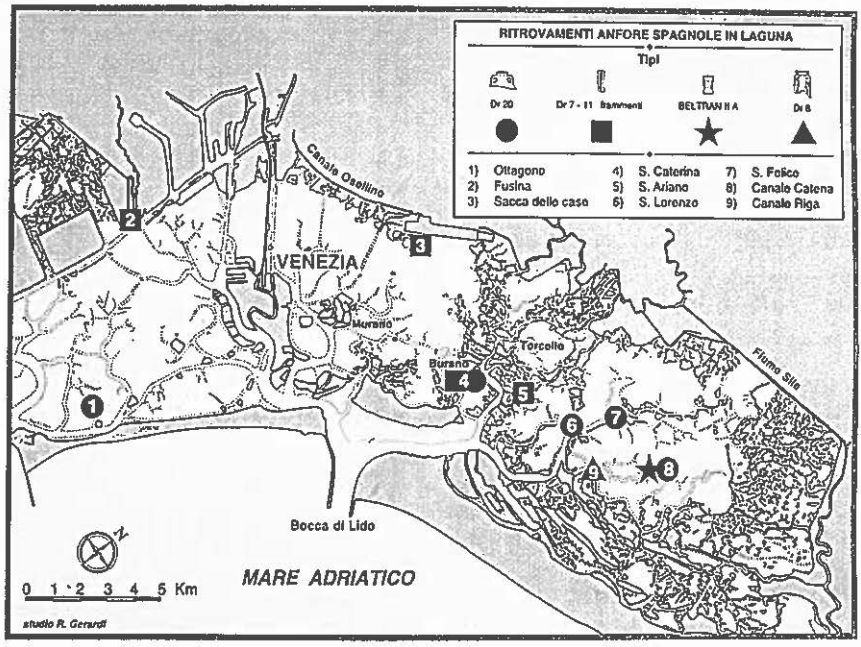


Fig. 1 – Mappa dei ritrovamenti nella laguna di Venezia.

N	Località	Ritrovamento	Tipo	C
1	Ottagono, in vicinanza dei rinforzi	framm. di orlo	Dr 20 ns	P1
2	Fusina, nelle paludi	framm. di ansa	Dr 7-11 s	P2
3	Sacca delle Case, in terra verso Tessera	ansa	Dr 7-11 ns	P3
4	S. Caterina, vicinanze di Mazzorbo	frammento	Dr 20 ns	P4
4	S. Caterina, vicinanze di Mazzorbo	ansa	Dr 7-11 ns	P5
5	S. Ariano	framm. di ansa	Dr 7-11 ns	P6
5	S. Ariano	framm. di ansa	Dr 7-11 ns	P7
5	S. Ariano	framm. di ansa	Dr 7-11 s	P8
6	S. Lorenzo Monoxile	frammento	Dr 20/23 ns	P9
7	Canale S. Felice	frammento	Dr 20/23 ns	P10
7	Canale S. Felice	frammento	Dr 20/23 ns	P11
8	Canale Catena	frammento	Dr 20 s	P13
8	Canale Catena	frammento	Dr 38 s	P14

Tabella 1 – Elenco del materiale usato per lo studio delle paste.

trovamenti è riportata in tabella 1, con la notazione s = sicuro, ns = non sicuro: in questo caso è indicata una coppia (Dr 20/23) o un insieme (Dr 7-11) di tipi.

Da ciascuno dei ritrovamenti è stata ricavata una sezione sottile, indicata col codice P e un numero d'ordine; la corrispondenza tra sezione sottile, o campione, e ritrovamento è riportata nella colonna C di tabella 1.

Riassumendo, il materiale ritrovato in laguna è costituito da:

- 5 sezioni ricavate da frammenti con sicura identificazione spagnola: P2, P8, P12 (Figg. 2, 3), P13 (Figg. 4, 5), P14 (Figg. 6, 7);
- 9 sezioni di identificazione incerta: P1; P3; P4; P5; P6, P7 (Fig. 2); P9; P10; P11.

Inoltre sono state studiate le paste di un'anfora Dr 7 (Beltran Ib) ritrovata a Verona (campione P15; Figg. 8, 9) e prodotta sicuramente in Spagna, e di un'anfora tipo Lamboglia 2/Dr 6A (campione P16; Figg. 10, 11) col bollo FUSI.SCAE, ritrovata in Canale Rigà: il luogo di produzione di questo reperto è ancora incerto[4].

3. Metodi

Per ogni ritrovamento l'identificazione del tipo di anfora è stata fatta mediante l'analisi archeologica della forma; tuttavia in alcuni casi non è stato possibile determinare il tipo con sufficiente attendibilità perché i frammenti ritrovati non permettevano un giudizio sicuro. Si è intrapreso perciò lo studio delle paste al fine di caratterizzare la loro struttura e di individuare eventuali parametri di somiglianza significativi per l'attribuzione tipologica: una classificazione per somiglianza può essere accettata per il nostro specifico studio perché la similitudine delle paste farebbe propendere per l'appartenenza degli oggetti allo stesso lotto.

[4] Il bollo impresso sul collo FUSI.SCAE forse si può riferire a *L. Scalensis* il quale segnava le olearie betiche, Remesal Rodríguez 1986, 259; per la datazione agli anni 50-100 d.C. del bollo *Scalensi* vedi Schupbach 1983, 343-361 e Fig. 17; per bolli *Scalensia* vedi anche Lyding Will 1983, 421-422, e Fig. VII, 71 bollo apparso in Corinto riferito al nome conosciuto al Testaccio e in Spagna, di provenienza poco conosciuta; esempi di varianti di questo bollo ci sono ad Alessandria e Villar de Brenes, datazione insicura dato il lungo uso di varianti di esso, vicino Cruz Verde sono state ritrovate le manifatture che usavano il nome *Scalensia* per tutto il II sec. d.C.; altri esempi di bolli composti con *Scalensia*, per es. SCALENSIAPHI riporta Chic Garcia 1985, 27 ritrovati vicino Palma del Rio, zona di Cordoba, probabilmente significano nome di Figlina che esportava fino Inghilterra, Svizzera, Olanda più i luoghi prima elencati, fra la prima metà del I e primi decenni del II sec. d.C.; variante ritrovata in Alessandria su Dr 20: SCAE.FID; questi dati ci lasciano dubbi per l'identificazione dell'anfora studiata della laguna, forma conosciuta dalle produzioni adriatiche, in pochi esemplari esportata anche in Betica; finora non sappiamo molto sulla possibilità di imitazioni delle Lamboglia 1/Dr 6A in Andalusia, anche se sembra che ci siano prove per le Dr 1, vedi Beltrán Lloris 1977, 107-108 e Fig. 17; non conosciamo questo bollo sulle anfore adriatiche, la identificazione viene suggerita dalla forma di essa.

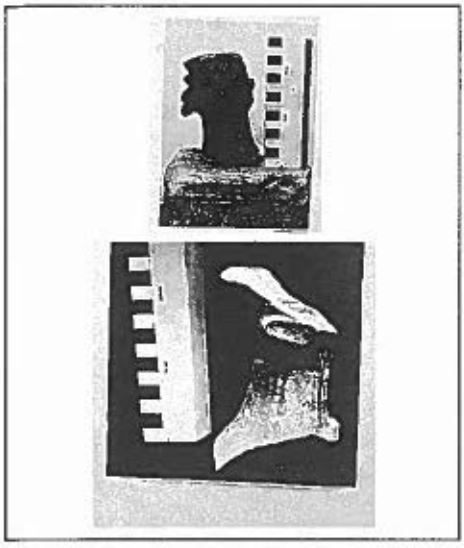


Fig. 2 – Campione P12, ritrovato in Canale Rigà (Dr 8 s).

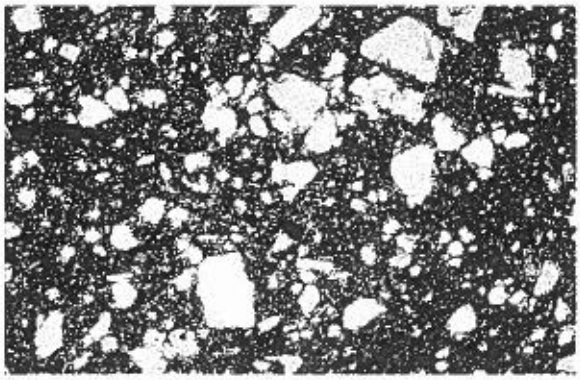


Fig. 3 – Sezione sottile di P12, illuminata con Nicols incrociati.

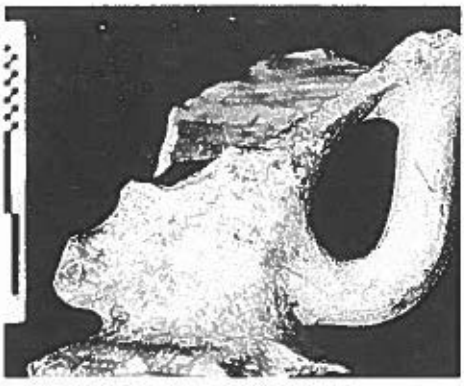


Fig. 4 – Campione P13, ritrovato in Canale Catena (Dr 20 s).
Fig. 5 – Sezione sottile di P13, illuminata con Nicols incrociati.

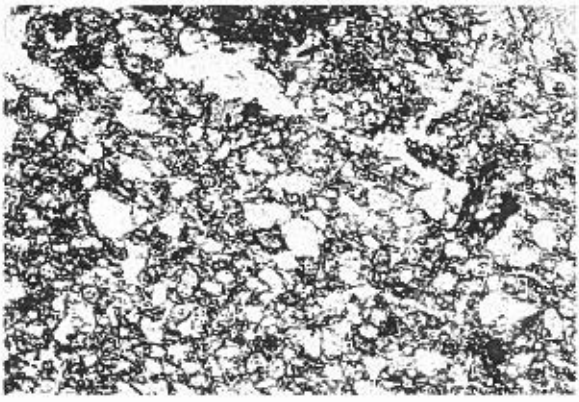


Fig. 6 – Campione P14, ritrovato in Canale Catena (Dr 38 s.).
Fig. 7 – Sezione sottile di P14, illuminata con Nicols incrociati.

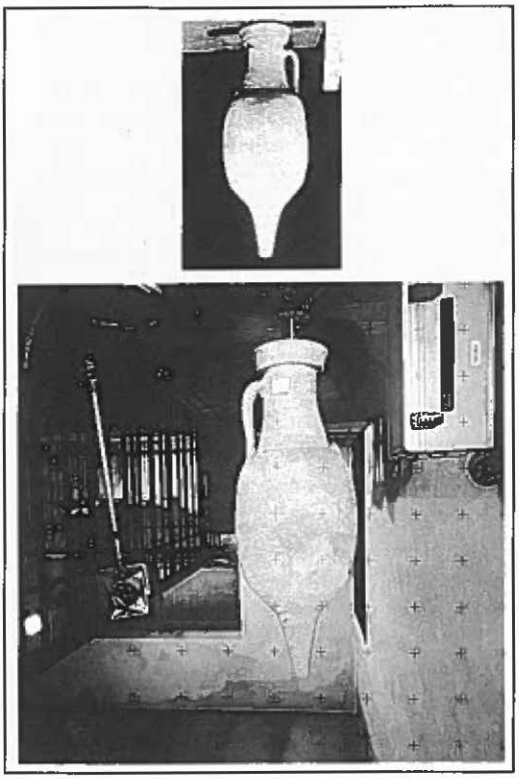


Fig. 8 – Campione P15, deposito Tomba di Giulietta, Verona (Dr 7 o Beltran Ib s.).

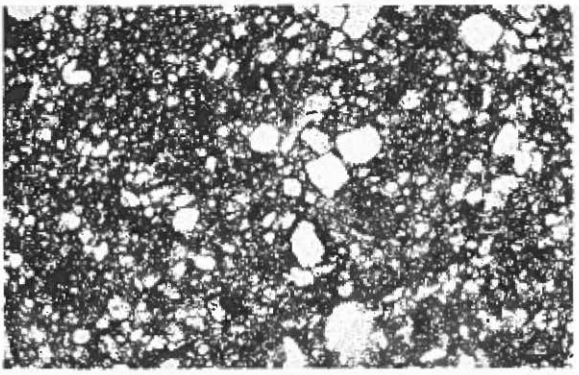


Fig. 9 – Sezione sottile di P15, illuminata con Nicols incrociati.

Fig. 10 – Campione P16, ritrovato in Canale Rigà (Lamboglia 2/Dr 1A s.).

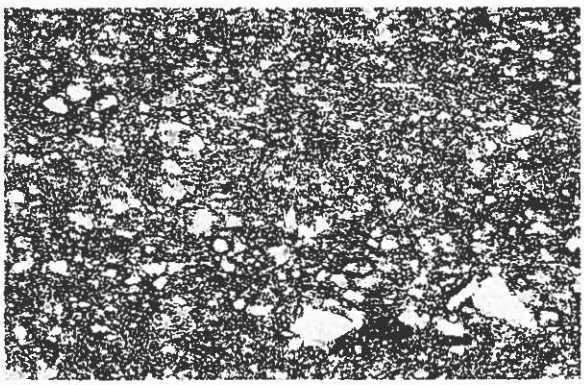


Fig. 11 – Sezione sottile di P16, illuminata con Nicols incrociati.

I metodi convenzionali di analisi delle paste consistono in analisi mineralogiche, petrografiche e chimiche; in questo lavoro vengono riportate soltanto le analisi petrografiche, che hanno del resto un'importanza fondamentale nell'indagine archeologica. Per eseguire questo tipo di analisi, dai ritrovamenti descritti in precedenza sono state ricavate sezioni sottili di circa 30 mm di spessore, con dimensioni di 1 cm×1 cm. Le sezioni sono state esaminate al microscopio ottico polarizzatore con un ingrandimento 60×; per ogni sezione sono stati individuati 1000 granuli, di cui sono state determinate le dimensioni e la specie mineralogica e petrografica; sono state infine calcolate le percentuali di massa argillosa e di quarzo.

La granulometria delle paste non ha distribuzione sistematica, per cui con la tecnica tradizionale non è stato però possibile determinare indicatori sufficienti per una classificazione delle paste e, di conseguenza, per un'attri-

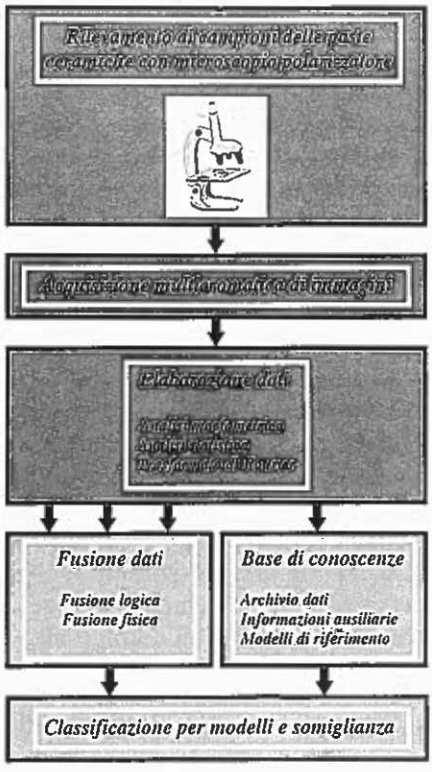


Fig. 12 – Schema a blocchi della procedura elaborativa per l'analisi di immagini delle paste ceramiche.

buzione tipologica dei reperti. Al fine di ricavare dall'esame delle sezioni sottili un maggior numero di informazioni si è fatto ricorso a metodi di elaborazione di immagini: è stata quindi impostata una procedura elaborativa (Fig. 12) che, mediante conteggi e processi di analisi e riconoscimento, consenta una valutazione più oggettiva e più completa dell'aspetto delle paste, emulando, coi mezzi attuali, il controllo visivo delle paste, che veniva effettuato in sede di produzione per l'accettazione del prodotto.

La procedura prevede l'acquisizione di immagini multicromatiche delle sezioni sottili di campioni mediante una telecamera a colori ad alta risoluzione alloggiata sul microscopio polarizzatore: in questo modo si ottiene una perfetta registrazione tra le immagini di uno stesso campo illuminato attraverso Nicols paralleli o incrociati.

Nella fase di acquisizione, da ciascun campo inquadrato si ricavano tre immagini relative alle componenti cromatiche R, G, B. Su ciascuna di queste immagini digitali vengono eseguite le seguenti elaborazioni:

- L'analisi morfometrica, che consiste nell'individuare i singoli oggetti contenuti in un'immagine mediante la segmentazione interattiva e l'estrazione automatica dei contorni; si possono così misurare i parametri caratteristici, come dimensioni o fattori di forma degli oggetti e percentuale di riempimento del campo esaminato.
- L'analisi cromatica, mediante la quale è possibile individuare ed isolare granuli caratterizzati da forme e composizione cromatica predeterminate, in modo da riconoscere e classificare alcuni dei materiali che compongono la pasta.
- L'analisi radiometrica, mediante la quale si ricavano i parametri (ad es. valore medio, varianza e momenti di ordine superiore) che caratterizzano l'istogramma dei valori di luminanza dei pixel contenuti nelle differenti immagini ricavate da uno stesso campo: si ottengono così degli indici numerici che definiscono la forma dell'istogramma e permettono di confrontarla con forme di riferimento.
- L'analisi spettrale: mediante la trasformata di Fourier bidimensionale si ricava lo spettro di potenza dell'immagine acquisita, il cui andamento dipende dalle dimensioni e dalla forma dei granuli contenuti nel campo esaminato; è possibile quindi correlare gli spettri relativi alle varie componenti cromatiche con quelli di riferimento ricavati da anfore di attribuzione sicura al fine di determinare le caratteristiche di somiglianza.

La procedura prevede due processi di fusione, che consentono di ridurre la quantità dei dati da elaborare, aumentandone al contempo la validità:

- la fusione di tipo fisico, corrispondente alla combinazione, secondo modelli matematici predefiniti, dei dati appartenenti alle componenti cromatiche delle immagini ricavate con diversa polarizzazione della luce;

– la fusione di tipo logico, che consiste nella combinazione delle informazioni estratte mediante differenti tipi di analisi dalle varie immagini ricavate dallo stesso campo.

I dati ricavati dalle acquisizioni di sezioni sottili vengono inseriti in un archivio; i dati immagine, insieme con le informazioni ricavate sia mediante le analisi di immagini, sia mediante le analisi chimiche, mineralogiche e petrografiche, costituiscono la base di conoscenze del processo elaborativo e consentono di costruire dei modelli di riferimento. Mediante questi modelli si può ottenere la classificazione della sezione sottile analizzata e conseguentemente del tipo di pasta dell'anfora esaminata; utilizzando le altre informazioni archeologiche e archeometriche si può eseguire la classificazione della sezione esaminata secondo la tipologia delle anfore.

Per realizzare e verificare l'affidabilità e l'efficienza, i moduli della procedura sono stati usati i dati ricavati dalle immagini dei campioni.

Le diapositive ottenute con ingrandimento lineare 24× sono state digitalizzate mediante uno scanner a colori: in ciascun fotogramma l'area di ~ 22 mm×32 mm è stata campionata alla risoluzione di 2230 punti per pollice (dpi); la risoluzione fotometrica per ciascuna componente cromatica è di 256 livelli di luminanza.

Le immagini ottenute con polarizzazione a Nicols incrociati e Nicols paralleli non sono registrate e non hanno punti di riferimento che consentano una registrazione digitale dei dati; di conseguenza, ci si è limitati a mettere a punto i moduli elaborativi che agiscono sulle singole immagini, senza eseguire elaborazioni su coppie di immagini e fusione di dati; in particolare, sono stati sviluppati moduli per l'analisi nel dominio delle frequenze spaziali e moduli per il calcolo di parametri statistici.

Per ricavare i parametri statistici è stato calcolato l'istogramma H(L) che definisce la popolazione N_i dei livelli di quantizzazione L_i, con i = 0,1,2,..255; sono stati poi calcolati: il valore medio m, corrispondente alla luminanza media dei pixel dell'immagine; la varianza s, che indica lo sparpagliamento dei valori di luminanza; il coefficiente di skewness, che indica l'asimmetria rispetto al livello medio; il coefficiente di kurtosis, che indica la variazione della forma dell'istogramma rispetto alla curva di distribuzione normale (gaussiana).

4. Risultati e discussione

Metà dei campioni analizzati appartiene ad anfore ben identificate tipologicamente e provenienti dalla Betica, probabilmente prodotte nella zona di Cadice dove sono state localizzate le manifatture di questi contenitori usati nei primi due secoli della nostra era per il trasporto del garum. Fra le anfore caratteristiche della Betica, una del tipo Dr 20 per l'olio, ritrovata

nella Laguna, per la conformazione dell'orlo può essere datata ai primi due decenni del II sec. d.C.; la mancanza del bollo non permette però una collocazione più precisa fra le varie produzioni olearie del Guadalquivir.

In alcuni campioni l'analisi petrografica delle paste ha mostrato la presenza di inclusi di quarzo di notevoli dimensioni, raramente arrotondati; si è inoltre notata la presenza di rocce granitiche distribuite nei diversi sottogruppi. Le metamorfiti appaiono soltanto nei campioni sicuri e non sicuri del sottogruppo Dr 7-11; rocce sedimentarie sono pure distribuite nei vari tipi, generalmente in unione alle magmatiche. Nei campioni del tipo Dr 20/23 si hanno soltanto rocce sedimentarie, con presenza di anidriti. Il campione P16 (Dr 6A) contiene clasti andesitici e trachitici: tali rocce affiorano nelle vicinanze della Laguna di Venezia (Colli Euganei), per cui si può indurre che l'anfora sia di produzione vicina. La temperatura di cottura va dai 750 agli 850 gradi; i valori più bassi si trovano nel sottogruppo delle Dr 20/23.

La Fig. 13 riporta le percentuali di massa argillosa (MA) e quarzo (Q) misurate sui campioni; la figura evidenzia una certa dipendenza fra la massa argillosa e il contenuto in quarzo, con andamento inversamente proporzionale; inoltre, i punti determinati dalle paste dei campioni appartenenti ai tipi Dr 7, Dr 8 e Dr 7-11, sicuri e non sicuri, sono raggruppati e separati dai relativi ai tipi Dr 20 e Dr 20-23, sicuri e non sicuri, che formano un altro raggruppamento.

Un analogo andamento è stato osservato per il contenuto in plagioclasi rispetto alla massa argillosa.

La Tav. XXIII, a-b mostra esempi del flusso dei risultati intermedi ottenuti con la procedura di elaborazione di immagini. Per ognuno dei 16 campioni esaminati si hanno due fotogrammi, ottenuti rispettivamente con Nicols

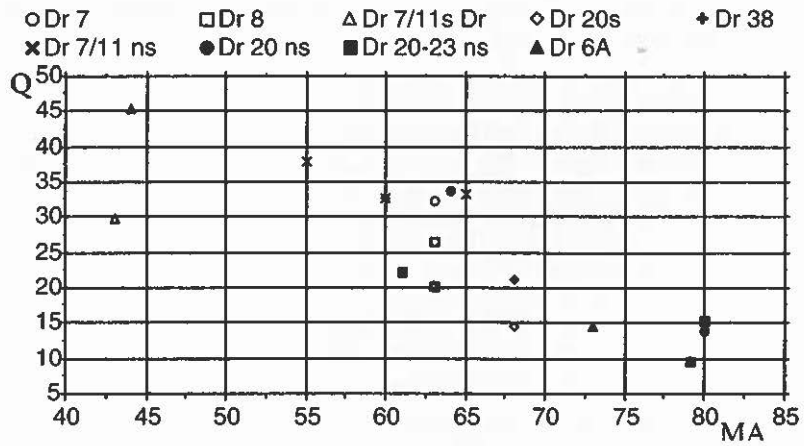


Fig. 13 – Contenuto percentuale di quarzo (Q) e massa argillosa (MA) nei campioni esaminati.

incrociati e paralleli; da ciascun fotogramma si ricavano 3 matrici, corrispondenti alle componenti cromatiche R, G e B dell'immagine sul fotogramma; per ciascuna matrice si ricavano l'istogramma H(L) e la trasformata bidimensionale $F(\omega_x, \omega_y)$.

In questa fase della ricerca è iniziata un'analisi degli istogrammi, al fine di determinare la loro somiglianza. La somiglianza di istogrammi può implicare, non necessariamente, una somiglianza di immagini. Infatti, due istogrammi identici corrispondono a due immagini costituite dagli stessi pixel; questi ultimi possono però essere disposti diversamente, in modo che le immagini non si assomiglino affatto. Viceversa, se gli istogrammi sono dissimili, anche le immagini devono avere aspetto differente: di conseguenza, il confronto di istogrammi indica una sicura diversità di immagini se il risultato è negativo e una possibile, ma non certa, somiglianza se il risultato è positivo. Poiché le immagini sono a colori, la somiglianza dev'essere valutata sulla terna di istogrammi R, G, B mediante un'analisi multivariata; il confronto di istogrammi relativi a ognuna delle componenti cromatiche può servire per escludere la somiglianza di immagini.

Al fine di eseguire correttamente delle operazioni di confronto è necessario disporre di un numero sufficientemente grande di campioni omogenei, cioè ottenuti da più ritrovamenti sicuramente dello stesso tipo archeologico, in modo da poter ricavare i valori medi e le varianze di un insieme di parametri significativi. Poiché in realtà si disponeva di un numero limitato di campioni, corrispondenti a tipi diversi e in generale di attribuzione non sicura, si è provveduto a suddividere l'immagine ricavata da ciascun campione in più regioni (ROI) e a calcolare l'istogramma per ciascuna ROI: questa procedura è servita per cercare di individuare le dimensioni ottimali della ROI e per determinare i parametri descrittivi dell'istogramma che siano significativi per le operazioni di confronto.

Le tabelle 2a, 2b, 2c riportano i risultati ricavati sulle 15 ROI di 512×512 elementi ottenute suddividendo l'immagine di ~ 3000×2000 elementi del campione P6, illuminato con Nicols paralleli; in particolare, la tabella 2a riporta i dati relativi alla componente R dell'immagine a colori del campione, la tabella 2b i dati relativi alla componente G e la tabella 2c i dati della componente B.

Per ciascuna delle componenti R, G, B e per ciascuno dei quattro parametri p riportati in tabella 3 sono stati calcolati i valori medi m(p) e i coefficienti di variazione percentuale cv(p); si sono ottenuti i risultati riportati in tabella 3.

La dispersione dei parametri m e s degli istogrammi è abbastanza contenuta, essendo inferiore al 10% per tutte le componenti cromatiche; invece, la dispersione dei parametri sk e ku risulta maggiore del 15%: in particolare, si hanno variazioni notevoli soprattutto per il parametro kurtosis, per il quale si hanno variazioni di circa il 400% nella componente B. Si può quindi affermare che non si ha somiglianza tra gli istogrammi calcolati sulle ROI in cui è stata suddivisa l'immagine ricavata dalla sezione sottile del campione

ROI	m	s	sk	ku
1	201.266	29.944	-1.531	2.977
2	204.244	27.628	-1.052	1.387
3	204.751	32.596	-1.469	2.767
4	202.584	32.206	-1.262	1.927
5	207.704	32.574	-1.409	2.473
6	198.827	31.510	-1.167	1.628
7	197.466	34.692	-1.239	1.904
8	202.625	38.091	-1.547	2.769
9	195.946	38.805	-1.181	1.337
10	200.764	33.865	-1.135	1.496
11	197.498	32.276	-1.014	1.295
12	197.992	35.520	-1.124	1.393
13	206.362	33.253	-1.173	1.494
14	200.801	34.741	-1.091	1.489
15	197.720	38.117	-1.142	1.424

Tabella 2a – Valor medio (m), deviazione standard (s), skewness (sk) e kurtosis (ku) degli istogrammi calcolati sulle ROI della componente cromatica R dell'immagine di P6.

ROI	m	s	sk	ku
1	171.276	37.329	-.768	.174
2	171.307	36.177	-.405	-.481
3	171.120	39.426	-.630	-.017
4	165.387	39.693	-.462	-.341
5	176.713	42.752	-.591	-.450
6	165.974	41.073	-.388	-.666
7	159.755	42.299	-.381	-.440
8	167.639	44.522	-.616	-.177
9	155.571	44.627	-.333	-.524
10	163.861	41.974	-.359	-.563
11	161.885	40.768	-.248	-.607
12	161.126	44.087	-.340	-.601
13	170.656	42.781	-.447	-.592
14	161.211	42.887	-.275	-.579
15	162.253	46.583	-.317	-.689

Tabella 2b – Valor medio (m), deviazione standard (s), skewness (sk) e kurtosis (ku) degli istogrammi calcolati sulle ROI della componente cromatica G dell'immagine di P6.

ROI	m	s	sk	ku
1	106.563	41.510	.645	-.538
2	99.921	41.280	.942	.072
3	98.429	41.157	1.025	.379
4	90.102	38.261	1.099	.572
5	111.557	52.664	.600	-.979
6	101.303	48.002	.822	-.521
7	87.078	41.065	1.197	.789
8	96.621	45.279	.869	-.310
9	81.002	38.995	1.339	1.277
10	90.367	43.263	1.121	.399
11	91.373	43.408	1.181	.469
12	89.438	44.722	1.127	.320
13	97.459	46.815	.871	-.384
14	84.719	41.838	1.317	1.028
15	95.386	49.136	.966	-.130

Tabella 2c – Valor medio (m), deviazione standard (s), skewness (sk) e kurtosis (ku) degli istogrammi calcolati sulle ROI della componente cromatica B dell'immagine di P6.

	m(m)	cv(m)	m(s)	cv(s)	m(sk)	cv(sk)	m(ku)	cv(ku)
R	201.1	1.8	33.7	9.1	-1.2	14.0	1.8	32.2
G	165.7	3.4	41.8	6.7	-.40	34.1	-.40	57.0
B	94.7	8.7	43.8	9.0	1.0	21.9	.16	390.0

Tabella 3 – Valori medi e coefficienti di variazione deviazione dei parametri degli istogrammi calcolati sulle ROI dell'immagine del campione P6.

P6, e che le immagini sulle singole ROI sono tra loro differenti. Analoghi risultati sono stati ottenuti con gli altri campioni.

Questo fatto è attribuibile alla dimensione troppo piccola delle ROI: con l'ingrandimento impiegato per la ripresa delle immagini, le ROI corrispondono a regioni troppo piccole dei vetrini, in modo che si mettono in evidenza variazioni microscopiche che non sono significative per quanto riguarda l'analisi della pasta.

Tuttavia, al fine di realizzare gli strumenti impiegati nella procedura di analisi indipendentemente dalla significatività dei dati a disposizione, si è proceduto ad un confronto dei valori medi dei pixel contenuti nelle ROI: il confronto fra i valori medi delle componenti R, G, B costituisce un'analisi cromatica, valida per immagini di tipo uniforme e, in prima approssimazione, per immagini non uniformi, come quelle delle paste ceramiche. A questo scopo si sono ricavati i valori di tristimolo normalizzati, definiti da:

$$t_1 = \frac{m_R}{m_R + m_G + m_B}$$

$$t_3 = \frac{m_B}{m_R + m_G + m_B}$$

$$t_3 = \frac{m_B}{m_R + m_G + m_B}$$

dove m_R, m_G, m_B sono i valori medi degli istogrammi delle tre componenti cromatiche. Poiché $t_3 = 1-(t_1+t_2)$, si possono inizialmente valutare le coordinate t_1 e t_2, rappresentabili in un diagramma bidimensionale: la Fig. 14 mostra i risultati relativi ai campioni P6, P8, P12, P15, P16, che hanno attribuzione archeologica sicura (tipo Dr 7 o Dr 6A oppure sottogruppo Dr 7-11).

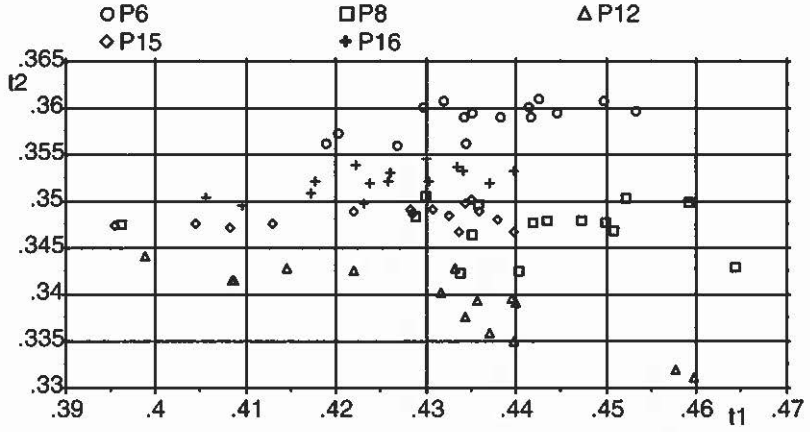


Fig. 14 – Grafico delle coordinate normalizzate di tristimolo t_1 e t_2 ricavate dai valori medi dei pixel contenuti nelle ROI in cui sono state suddivise le immagini ricavate dalle sezioni sottili di P6, P8, P12, P15 e P16.

	P6/P8	P6/P12	P6/P15
t_1	.2598	.3774	.0157
t_2	1.00E-4	1.00E-4	1.00E-4

Tabella 4 – Valori di probabilità risultanti dal test di Student applicato al confronto fra l'insieme P6 e gli insiemi P8, P12 e P15.

C	m	s	sk	ku
P1	177.710	44.975	-.982	.667
P2	142.773	57.409	.035	-1.124
P5	190.436	36.800	-1.176	1.255
P6	200.834	34.086	-1.221	1.823
P7	168.584	50.174	-.472	-.863
P8	159.614	52.108	-.243	-.863
P12	156.738	48.357	.128	-1.052
P14	185.095	51.536	-.782	-.347
P15	152.761	45.702	.245	-.856
P16	162.685	47.466	-.301	-.777

Tabella 5a – Valor medio (m), deviazione standard (s), skewness (sk) e kurtosis (ku) degli istogrammi calcolati sulle componenti cromatiche R delle immagini digitalizzate dei campioni.

C	m	s	sk	ku
P1	145.435	50.374	-.281	-.652
P2	112.479	58.541	.560	-.874
P5	161.651	40.312	-.697	-.024
P6	165.626	42.142	-.432	-.448
P7	144.389	54.912	-.094	-1.225
P8	124.691	54.744	.410	-1.059
P12	123.718	56.795	.595	-.957
P14	160.937	56.574	-.335	-1.057
P15	125.332	50.088	.655	-.663
P16	134.689	49.475	.154	-.952

Tabella 5b – Valor medio (m), deviazione standard (s), skewness (sk) e kurtosis (ku) degli istogrammi calcolati sulle componenti cromatiche G delle immagini digitalizzate dei campioni.

C	m	s	sk	ku
P1	83.749	45.061	1.041	.442
P2	69.116	46.114	1.663	1.884
P5	106.149	36.117	.370	-.249
P6	94.71	44.261	1.005	.093
P7	104.556	50.335	.640	-.908
P8	74.827	53.724	1.378	.567
P12	84.43	55.297	1.201	-.036
P14	117.472	52.837	.362	-1.152
P15	82.019	47.518	1.426	.966
P16	85.745	39.878	1.295	1.130

Tabella 5c – Valor medio (m), deviazione standard (s), skewness (sk) e kurtosis (ku) degli istogrammi calcolati sulle componenti cromatiche B delle immagini digitalizzate dei campioni.

Sul diagramma i punti appartenenti ad uno stesso campione sono sparsi in quanto, come già si è detto, essi non sono statisticamente omogenei a causa delle dimensioni delle ROI. Gli insiemi dei punti corrispondenti ai vari campioni sono separati, come si può vedere applicando il test di Student separatamente ai valori delle coordinate t_1 e t_2 degli insiemi. Ad esempio, confrontando l'insieme di P6 con gli insiemi di P8, P12 e P15 si sono ottenute le probabilità di errore dell'ipotesi di separazione riportate in tabella 4: assumendo una soglia di decisione del 5% gli insiemi risultano statisticamente separati per la coordinata t_2.

Le tabelle 5a, 5b, 5c riportano i valori dei parametri calcolati per ciascuna componente cromatica sulle intere immagini dei campioni esaminati. In accordo con le relazioni statistiche fra popolazione e insiemi da essa derivati, i valori di m riportati in tabella 5 corrispondono con buona precisione alla media dei valori m calcolati sulle ROI delle immagini di ciascun campione; inoltre, anche i parametri s, sk e ku calcolati sull'intera immagine corrispondono con discreta approssimazione alla media dei parametri calcolati sulle ROI (confronta, ad esempio, con la tabella 2, relativa al campione P6).

Analizzando le tabelle 5a, 5b, 5c si può notare che, per ciascuna delle componenti cromatiche, i campioni che sono risultati più vicini per le coordinate t_1 e t_2 (vedi ad esempio P8 e P15 in Fig. 14) hanno valori di m all'incirca eguali, mentre i campioni più distanti (ad esempio P6 e P12) hanno valori di m alquanto diversi.

In base al criterio di confronto tra istogrammi da noi adottato, considerando l'insieme dei parametri della terna di componenti cromatiche le immagini delle sezioni sottili risultano differenti e di conseguenza anche le paste ceramiche risultano diverse: questa valutazione è però da ritenersi parziale e approssimata, in quanto i dati elaborati non hanno una sufficiente validità statistica a causa del limitato numero dei campioni esaminati e della mancanza di affidabili valori di riferimento.

5. Conclusioni

Allo stato attuale, sono stati già realizzati alcuni moduli di una procedura orientata alla classificazione automatica o assistita di reperti archeologici: questi moduli sono stati sperimentati in un processo fuori linea, acquisendo ed elaborando le immagini fotografiche di sezioni sottili ricavate da un limitato numero di campioni, ed hanno fornito sia dei risultati preliminari validi per la ricerca archeologica in corso, sia delle indicazioni sui protocolli di rilevamento dei campioni, sia sulle modalità di organizzazione della ricerca.

In particolare, l'applicazione dell'analisi di tipo colorimetrico alle immagini ricavate dalle sezioni sottili di campioni classificati come sicuri dal punto di vista archeologico ha mostrato che le paste, in base ai risultati relativi ai parametri degli istogrammi, risultano differenti: questo risultato è giu-

stificato in quanto i reperti provengono sì da una stessa regione, ma hanno datazioni differenti, e quindi la qualità delle paste impiegate anche negli stessi luoghi di produzione poteva essere variata. Prima di eseguire un confronto affidabile con le paste di campioni di attribuzione tipologica non sicura è necessario determinare le soglie di discriminazione da introdurre nel processo di classificazione e definire gli intervalli di somiglianza tra i parametri interessati: ciò sarà possibile in seguito ad una opportuna raccolta di dati mediante l'acquisizione di un congruo numero di sezioni sottili

Al fine di ottenere informazioni sufficienti sulle variabilità infra-specie e intra-specie si dovranno acquisire numerose sezioni ricavate dallo stesso frammento e numerose sezioni ricavate da campioni di diversi tipi; si dovranno infine raccogliere i risultati degli altri tipi di indagine eseguite sui campioni, al fine di definire degli efficienti modelli di fusione delle informazioni da utilizzare nella classificazione per somiglianza.

Lo studio svolto ha reso inoltre evidente la necessità di sviluppare ulteriormente le tecniche di indagine e i metodi di classificazione: si ritiene infatti che, oltre che alle tecniche di analisi di tipo distruttivo finora utilizzate (analisi chimiche e petrografiche), si debba fare ricorso anche a tecniche di indagine non distruttiva che consentano l'esame di reperti integri. A questo scopo si potranno utilizzare ad esempio tecniche di indagine mediante ultrasuoni, che consentono sia di misurare lo spessore delle pareti di anfore, sia, entro certi limiti, di ricavare informazioni sulla struttura e la composizione di tali pareti.

Le tecniche di indagine non distruttiva mediante rilevamento ad ultrasuoni, radiazione nell'infrarosso e raggi X, unita alle tecniche di elaborazione di immagini possono consentire la sintesi di mappe tomografiche che, opportunamente interpretate, possono caratterizzare la composizione delle paste sia di anfore che di altri manufatti, e possono visualizzare la loro struttura interna.

Queste ulteriori tecniche aumentano il grado di interdisciplinarietà che caratterizza l'indagine archeometrica: oltre alle conoscenze di tipo geologico, chimico e spettrografico già richieste dalle tecniche convenzionali, appare evidente l'esigenza di controllare adeguatamente le tecniche relative alla elaborazione di immagini e alle indagini di tipo non distruttivo. Di conseguenza, anche per l'archeologia, appare oggi necessario lo sfruttamento delle potenzialità delle tecniche informatiche che, in altre applicazioni diagnostiche sia biomediche che industriali (ad es. il controllo di qualità di manufatti e la caratterizzazione di materiali), hanno permesso la realizzazione di sistemi integrati di multi indagine che consentono allo studioso di elaborare in maniera semplice, autonoma e completa, i risultati delle ispezioni eseguite con tecniche di indagine complesse e specializzate.

Si ritiene infine che un proseguimento della ricerca, orientato principalmente alla realizzazione di un sistema di questo genere, potrà risultare

utile anche in numerose altre applicazioni, sia di indirizzo archeologico, sia rivolte allo studio e alla conservazione di beni culturali.

Iwona Modrzewska, Franco Pianetti
Istituto per lo Studio della Dinamica
delle Grandi Masse - CNR, Venezia

Luciano Azzarelli, Sirio Cerri, Massimo Chimenti
Istituto di Elaborazione della Informazione - CNR, Pisa

Maciej Pawlikowski
Academy of Mining and Metallurgy, Cracovia

BIBLIOGRAFIA

Beltrán Lloris M. 1977, *Problemas de la morfologia y del concepto historico geografico que recube la notion tipo. Aportaciones a la tipologia de las anforas béticas*, in *Méthodes Classiques et Méthodes Formelle dans l'Etude des Amphores*, Actes du Colloque de Rome 1974, 97-131, Roma, Collection de l'Ecole Française de Rome.

Campano Lorenzo A. 1994, *De la producción des ánforas de salazon en la bahia de Cadiz. Materiales de alfar de "El Olivar de los Valencianos"*, Puerto Real, «Archivo Español de Arqueologia», 66, 135-146.

Chic Garcia G. 1985, *Epigrafia ánforica de la Bética I. Las marcas impresas en el barro sobre ánforas olearias (Dressel 19, 20, 23)*, Sevilla, Un. de Sevilla.

Dorigo W. 1983, *Venezia, origini, fondamenti, ipotesi, metodi, I*, Milano, Electa.

Feliu Ortega M. J., Martín Caleja J. 1995, *Una aproximación al estudio de las pastas cerámicas de ánforas producidas en alfares romanos de Cadiz*, in *Estudis sobre cerámica antiga, Actes de Simposi*, Barcelona, Generalidad de Catalunya, 131-133.

Jacquin J., Becker C. *et al.* 1993, *Un depot d'amphores lyonnaises sur le site de l'ilot 24*, «Revue Archéologique de l'Est et du Centre-Est», 4 (1), 105-141.

Lyding Will E. 1983, *Exportation of Olive-Oil from Baetica to the Eastern Mediterranean*, in *Producción y comercio del aceite en la Antiguedad, II Congreso Internacional 1982*, Madrid, Un. Complutense, 391-439.

Menanteau L., Vanney J.R. *et al.* 1983, *Belo II, Belo et son environnement*, Paris, Casa Velasquez (4), 39-301.

Modrzewska I. 1993, *Anfore della laguna veneta, scelta di ritrovamenti*, Tech. Rep., 168, Venezia, ISDGM-CNR di Venezia.

Modrzewska I. 1995a, *Anfore spagnole nel Veneto. Testimonianze dei contatti commerciali fra Betica e Venetia*, Pisa, CNR.

Modrzewska I. 1995b, *Anfore spagnole nella laguna e terraferma veneta (Italia)*, in *Estudis sobre ceramica antiga, Actes de Simposi*, Barcelona, Generalidad de Catalunya, 123-125.

Modrzewska I., Oddone M., Pianetti F. *et al.* 1993, *Anfore spagnole nel Veneto. Progetto di ricerca e primi prodotti*, «Archeologia e Calcolatori», 4, 127-135.

Modrzewska I., Oddone M., Pianetti F. 1994, *Una esperienza e una proposta per lo studio delle anfore. Caso della Tomba di Giulietta (Verona)*, «Archeologia e Calcolatori», 5, 39-51.

Modrzewska I., Oddone M., Pianetti F. *et al.* 1995, *Anfore spagnole nel Veneto (Italia). Analisi statistica di caratteristiche chimiche, confronto con caratteristiche mineralogiche*, in *Estudis sobre ceramica antiga, Panencies del Congres Europeu sobre ceramica antiga*, Un. de Barcelona, 127-130.

PEACOCK D. P. S. 1974, *Amphorae and the Baetican Fish Industry*, «The Antiquaries Journal», 54 (2), 97-131.

REMESAL RODRÍGUEZ J. 1986, *La Annona militaris y la exportación del aceite bético a Germania*, Madrid, Un. Complutense.

SCHUPBACH S. 1983, *Avanches, contribution à la connaissance de la chronologie des estampilles sur les amphores à huile de Betique*, in *Producción y comercio del aceite en la Antiguedad, II Congreso Internacional 1982*, Madrid, Un. Complutense, 349-361.

ABSTRACT

The present article is part of a research project covering the imported and local amphorae found in the Veneto region. The study is specifically based on fragments of Spanish amphorae found in the Venetian lagoon. Several samples could be clearly identified as fragments of the forms coming from the Baetica region (e.g., Dr 8, Dr 38, Dr 7/11, Dr 20 and Dr 20-23); other samples of very limited size could be reliably identified. In order to attempt a broad identification we have studied the composition of the pastes of a small number of fragments by means of mineralogical and petrographic analyses.

In addition we used image processing techniques: in particular, we have designed a classification procedure that will perform morphologic, chromatic, radiometric and spectral analyses on the images of thin sections of the amphorae, taken by a polarising microscope. The procedure could be completed by analysing a considerable amount of samples, that will allow to establish the decision thresholds used in the classification process; the procedure will facilitate the fusion of data and information obtained with different destructive and non destructive tests of the samples, so that it could constitute a useful tool for the archaeological research.

Archeologia e Calcolatori
1996, 7, 487-496

LE ANFORE (IV-VI/VII SEC.) RINVENUTE NEGLI *HORREA* DI S. GAETANO DI VADA (ROSIGNANO M.MO, LI): RICERCHE ARCHEOMETRICHE, MORFOLOGICHE, QUANTITATIVE

1. Indagini stratigrafiche effettuate, con cadenza annuale, a partire dal 1982 a S. Gaetano di Vada, nell'ambito di un programma di ricerca sul popolamento antico *nell'ager Pisanus* e *Volaterranus* occidentale condotto dal Dipartimento di Scienze Storiche del Mondo Antico (Università di Pisa) e diretto dalla professoressa Marinella Pasquinucci, hanno portato in luce una parte delle infrastrutture portuali di *Vada Volaterrana*, scalo marittimo di Volterra almeno fin dall'età ellenistica. Tale porto è localizzabile a Sud della foce del fiume Fine nei pressi del moderno centro di Vada (Fig. 1); il bacino di ancoraggio, a cui si accedeva mediante un canale tra le secche, si trovava nel tratto di mare immediatamente a Sud dell'area archeologica di San Gaetano (Massa 1980-81, 251 ss.; Cherubini in Pasquinucci 1987, 116). Sistematiche ricognizioni archeologico-topografiche effettuate nell'*ager Volaterranus* costiero, inoltre, hanno permesso di delineare il quadro del popolamento antico e di ricostruire le relazioni intercorrenti tra il porto e il suo retroterra.

A San Gaetano sono stati portati in luce attualmente due impianti termali, uno dei quali ancora in corso di scavo (Fig. 2, A e D), un edificio di forma quadrangolare, probabilmente un *macellum* (Fig. 2, C), e un complesso di *horrea* a pianta rettangolare con *cellae* che si affacciano su un cortile centrale porticato (Fig. 2, B). Gli edifici, costruiti tra la fine del I e gli inizi del II secolo d.C., rimasero in uso almeno fino al VI/VII secolo. Successivamente il complesso, perdute le funzioni originarie, fu (ri)occupato in maniera precaria da diversi gruppi umani; gli *horrea* e il complesso termale più vasto (Fig. 2, D) furono utilizzati come necropoli a inumazione: vecchi sterri hanno restituito, purtroppo decontestualizzati, notevoli oggetti di ornamento personale di piena età longobarda.

Lo studio, ancora in corso, dei dati risultanti dall'indagine stratigrafica ha evidenziato consistenti ristrutturazioni edilizie effettuate nel corso del IV secolo, certo non prima della metà, come si deduce anche dall'altissima percentuale di monete emesse dopo questa data e rinvenute negli strati pertinenti alle ristrutturazioni (Pasquinucci, Del Rio, Menchelli c.s.).

Per quanto riguarda il complesso degli *horrea*, l'équipe dell'Università di Pisa ha quasi ultimato l'analisi dei materiali (cfr. anche Pasquinucci, Menchelli in questo volume) e l'elaborazione dei dati di scavo, presto oggetto di una pubblicazione monografica.

L'analisi morfologica dei frammenti è stata integrata dallo studio mineropetrografico delle paste ceramiche, effettuato dal prof. T. Mannoni (Univer-

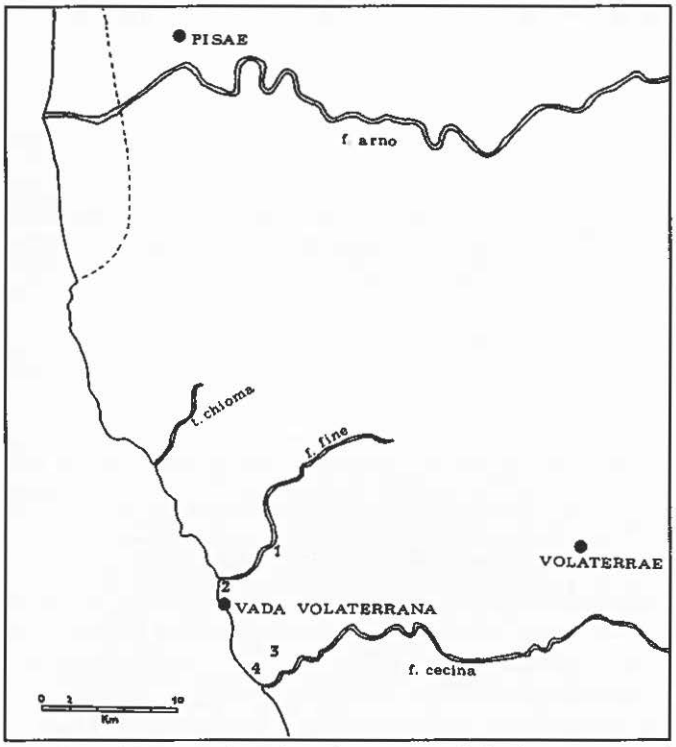


Fig. 1 – Localizzazione del porto di *Vada Volaterrana* e delle fornaci per anfore attive nel periodo considerato. 1: Poggio Fiori; 2: Galafone; 3: Podere del Pozzo; 4: La Mazzanta.

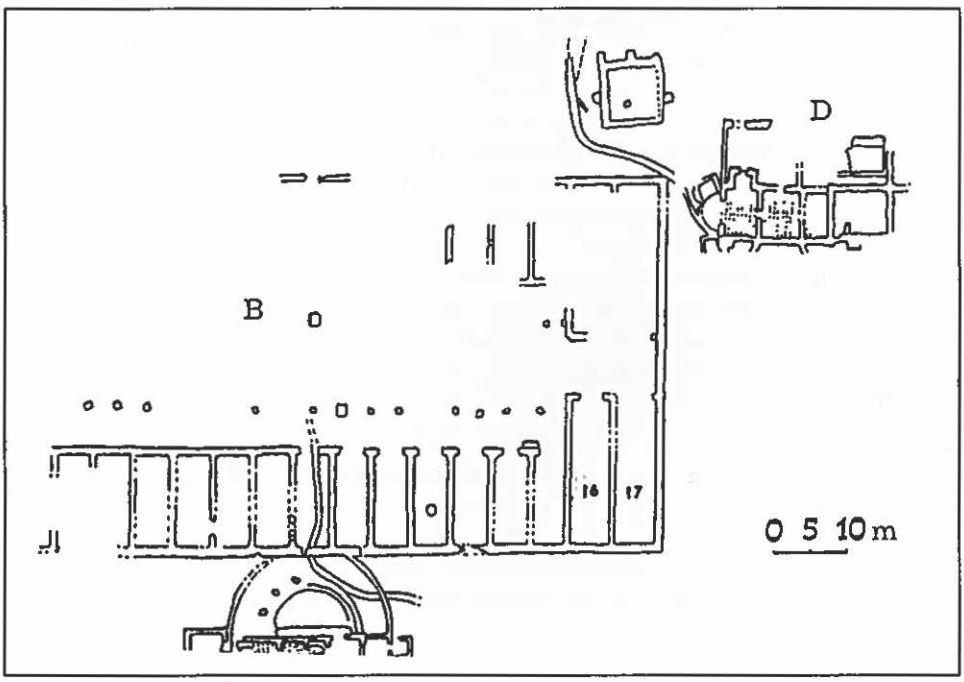


Fig. 2 – L'area archeologica di S. Gaetano.

sità di Genova), ed ha portato per il momento al riconoscimento di almeno 146 diversi tipi di paste provenienti dalle varie regioni del bacino del Mediterraneo; per l'individuazione di produzioni locali e, in generale, dell'*ager Pisanus* (per le quali cfr. anche ESPOSITO 1992), è stata fondamentale la scoperta di un cospicuo numero di fornaci (nel corso di ricerche di superficie condotte nell'ambito del programma di ricerca suddetto, cfr. MENCHELLI 1990-1991; CHERUBINI, DEL RIO 1994; DEL RIO, CHERUBINI c.s.; DEL RIO *et al.* c.s.); per le importazioni, invece, costante è stato il riferimento alla banca dati delle terre mediterranee (D'AMBROSIO, MANNONI, SFRECOLA in *Amphores romaines* 1989, 269 ss).

In questa sede affrontiamo lo studio morfologico, archeometrico e quantitativo delle anfore rinvenute negli ambienti 16 e 17 degli *horrea* (saggi I, IV, V, VL, VM, VI, XII, XIII, XIV, XVII; Fig. 2, B) e relative alla seconda delle due principali fasi di vita dell'edificio (metà IV-VI/VII secolo) le cui stratigrafie sono, come è ovvio, più conservate. Tale fase è caratterizzata, negli ambienti indagati, da profonde ristrutturazioni databili, in base ai rinvenimenti ceramici e soprattutto monetali, nell'ambiente 16 alla seconda metà del IV secolo, nell'ambiente 17 all'ultimo decennio dello stesso secolo (PASQUINUCCI, DEL RIO, MENCHELLI c.s.).

Avvalendoci dei dati risultanti dalle analisi minero-petrografiche delle paste ceramiche, abbiamo effettuato anche un confronto quantitativo tra i contenitori prodotti fino alla metà del IV secolo e quelli databili successivamente per valutare eventuali variazioni nella provenienza dei flussi commerciali; per verificare, poi, una possibile diversa destinazione d'uso dei due ambienti in questione abbiamo istituito un confronto quantitativo per provenienza tra le anfore di seconda fase recuperate nell'uno e nell'altro.

I due ambienti, in quanto scavati stratigraficamente quasi nella loro totalità, possono essere considerati rappresentativi dell'intero complesso dei magazzini (come è dimostrato dallo studio, in corso, dei materiali rinvenuti nei restanti ambienti). Riteniamo pertanto che già con lo studio di questo materiale si possa con sufficiente verosimiglianza delineare la vitalità economica di un porto della costa altotirrenica che, fino all'età tardoantica, continuò ad essere toccato da rotte commerciali a vasto raggio.

2. Le anfore relative alla seconda fase di vita degli *horrea* costituiscono il 53% del totale dei contenitori rinvenuti negli ambienti 16 e 17. I dati percentuali, sono stati calcolati in riferimento al numero minimo di esemplari documentati nei saggi suddetti. Sono stati schedati 1038 esemplari, dei quali il 7,6% allo stato attuale degli studi risulta di incerta provenienza, dato che, in attesa dei risultati finali delle analisi archeometriche ancora in corso, lo studio morfologico degli esemplari non è stato sufficiente a stabilirne il luogo di origine.

Le produzioni locali costituiscono una parte cospicua delle anfore rinvenute nei due ambienti, pari al 14,7%: si tratta di contenitori vinari (Dressel

1b, Dressel 2-4, c.d. anfore "di Spello", "di Forlimpopoli", "di Empoli"), di anfore che per la morfologia possono essere assimilate ai *cadi* e, forse, di locali imitazioni delle tipiche anfore olearie betiche di forma Dressel 20. Tutte risultano manufatte in almeno 8 delle fornaci individuate nelle basse valli del torrente Chioma e dei fiumi Fine e Cecina (CHERUBINI, DEL RIO 1994; DEL RIO, CHERUBINI c.s.; DEL RIO *et al.* c.s.) e furono utilizzate per il trasporto e la commercializzazione delle derrate alimentari prodotte nell'entroterra di Vada, non solo sul mercato locale, ma anche a più vasto raggio: anfore vinarie manufatte tra Rosignano Marittimo e Cecina sono state identificate, infatti, in più centri della Svizzera (THIERRIN, MICHAEL 1992, 50 ss.).

La consistente presenza di tali contenitori nei magazzini del porto di Vada, inoltre, indica che quasi certamente essi dovevano essere caricati anche sulle navi che qui facevano scalo. Le anfore di produzione locale attribuibili alla seconda fase di vita dell'edificio sono pari al 27,6% del totale dei contenitori manufatti localmente; al momento è stato individuato soltanto il tipo c.d. anfora "di Empoli" (caratterizzato da consistenti varianti morfologiche dell'orlo), un contenitore vinario di piccole dimensioni prodotto fino al IV-V secolo d.C. (cfr. MENCHELLI 1990-1991, p. 173 con bibliografia precedente); su base archeometrica esso risulta sicuramente fabbricato sia in 4 delle fornaci attive nei secoli precedenti rinvenute sul terreno (Fig. 1), sia in altre *figlinae* del territorio circostante *Vada Volaterrana*, di cui non è ancora stata individuata la precisa ubicazione (DEL RIO *et al.* c.s.).

Le importazioni dalla penisola rappresentano il 12,7% del totale: sono anche questi contenitori quasi esclusivamente vinari, nella maggior parte dei casi fabbricati nel limitrofo *ager Pisanus* e, in quantità più limitata, provenienti da altre regioni, soprattutto dall'area campano-laziale; ben il 44,2% di tale materiale è databile tra IV e VI secolo e consiste in anforette vinarie che dalle analisi minero-petrografiche risultano prodotte in più fornaci ubicate nella bassa valle dell'Arno (tipo 'anfora di Empoli') e in area calabro-peloritana (tipo Keay LII); questi ultimi contenitori furono utilizzati, a partire dagli ultimi decenni del IV secolo, per il trasporto di vini calabresi e siciliani, gli unici fra quelli italici ad essere in questo periodo commercializzati anche a vasto raggio (PANELLA in *Storia di Roma* 1993, 646 ss.).

Dalla Gallia giunsero a Vada anfore vinarie in numero molto limitato: esse costituiscono soltanto l'1,1% del totale; al momento non è attestata l'importazione di esemplari gallici riferibili al periodo qui preso in considerazione, cosa che ben si spiega con quanto noto riguardo alla circolazione, peraltro limitata, del vino gallico: con il IV secolo, infatti, ha termine la commercializzazione in anfore di questo prodotto, che, almeno in ambito regionale e interregionale, viaggiava già dal III secolo in botti (*cupae*), inventate proprio dai Galli; non è certo tuttavia che questo tipo di contenitore venisse utilizzato per i commerci marittimi (cfr. da ultimo PANELLA in *Storia di Roma* 1993, 621 nota 34 e 670 nota 244, con bibliografia precedente).

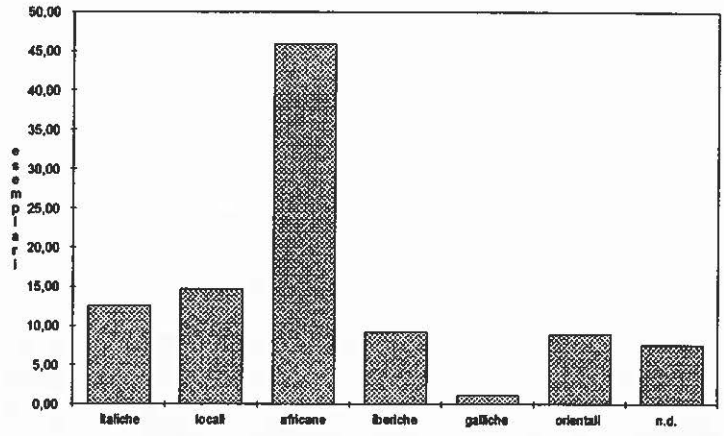


Grafico 1 – Distribuzione per aree geografiche sul totale degli esemplari

Più consistenti risultano le importazioni dalla penisola iberica (9,2% del totale): si tratta di contenitori vinari, oleari e per salse di pesce, manufatti in numerosi centri della *Baetica,* della *Tarraconensis* e della *Lusitania*; da queste regioni, anche se ridotte ad 1/3 rispetto ai secoli precedenti (grafico 2), le importazioni continuarono nei secoli in esame: sono attestate anfore olearie (tipo Dressel 23) e per prodotti ittici (Keay XIX) dalla *Baetica*, per *garum* e altre salse di pesce dalla *Lusitania* (Almagro 50 e 51c).

È ben più alta la quantità delle anfore (olearie, per olive, salse di pesce e pesce conservato, resina e, forse, vino) che giunsero a Vada dalle diverse regioni nordafricane, ben il 45,9% del totale degli esemplari rinvenuti nelle due *cellae*. La maggior parte di esse (70,2%) risulta databile proprio tra il IV e il VI secolo: i tipi più ricorrenti sono i contenitori cilindrici tardo-imperiali di medie dimensioni (Keay XXV e XXVII), che trasportavano derrate alimentari di vario tipo, come salse di pesce e pesce conservato, resina, olio e olive, etc.; molto frequenti sono anche i grandi contenitori cilindrici tardo-romani (Keay LXII), adibiti certamente al trasporto dell'olio e, forse, di altri prodotti; numerosi sono anche gli *spathia,* piccoli contenitori per olive, resina e, forse, vino. Sono attestati, generalmente con più di un esemplare, anche altri tipi: Keay X, Keay XXVIII, Keay XXXV, Keay XXXVI, Keay XXXVIII, Keay XL, Keay XLII, Keay XLV, Keay LV, Keay LVI, Keay LVII, Keay LXI, Keay LXXXIX.

Per quanto riguarda le produzioni orientali, esse costituiscono l'8,9% del totale delle anfore rinvenute nei due ambienti; in base alle indagini archeometriche (Del Rio *et al.* c.s.), sembrano arrivare a Vada da numerosi centri del bacino mediterraneo orientale; al momento non sono noti esemplari anteriori al V secolo (Pasquinucci *et al.* c.s.); le forme attestate si riferiscono ad anfore di piccole dimensioni e sono da ascrivere nella maggior parte dei casi al tipo Late Roman Amphora 1 (che, almeno in parte, era sicuramen-

te adibito al trasporto di vino), e, in misura decisamente inferiore, ai tipi Late Roman Amphora 2 (il cui contenuto rimane tuttora incerto: olio o, forse, vino), Late Roman Amphora 4 (destinato alla commercializzazione dei vini di Gaza) e, forse, Late Roman Amphora 3 (utilizzato prevalentemente per il trasporto di vino).

3. Istituendo un confronto quantitativo fra gli esemplari attribuibili alla prima e alla seconda fase di vita degli *horrea* di San Gaetano (Cfr. grafico 2), è stato possibile trarre alcune interessanti indicazioni sul ruolo svolto dal porto di *Vada Volaterrana*.

Per quanto riguarda le anfore di produzione locale, che nella seconda fase rappresentano il 7,6% del totale, vennero qui immagazzinate sia per essere poi ridistribuite negli insediamenti circostanti, sia, quasi certamente, in attesa di essere esportate verso mercati più lontani; pertanto, pur non trattandosi di una percentuale molto alta, essa è estremamente significativa della vitalità del commercio del vino ancora prodotto in loco nel IV-V secolo. La diminuzione delle attestazioni dei contenitori locali tardi rispetto a quelli della fase precedente (in cui costituivano il 26,9%), per quanto rilevante, non è tale da indicare la cessazione delle attività manifatturiere e agricole nel territorio e delle relative esportazioni, che invece continuarono con una discreta vitalità almeno fino al IV/V secolo.

In questo periodo l'unico contenitore vinario prodotto in Etruria che sembra ancora circolare, anche via mare, in area tirrenica è la c.d. anfora "di Empoli"; proprio a questa forma, come già abbiamo detto, sono attribuibili tutti gli esemplari tardi prodotti localmente. Questo tipo di anfora è attestato almeno fra Ventimiglia, Ostia e Porto Torres (Cambi in *Amphores romaines* 1989, 565); al momento, purtroppo, non sono ancora state effettuate analisi archeometriche che ci permettano di stabilire il luogo di origine degli esemplari rinvenuti in queste località, ma è probabile che una parte di essi provenga dagli *ateliers* scoperti nell'entroterra di Vada.

Osservando i dati relativi alle importazioni dall'Italia e dalle province tra IV e VI secolo (cfr. grafico 3), emerge chiaramente come le produzioni dell'Africa settentrionale siano di gran lunga le più attestate, raggiungendo il 65,8% del totale dei contenitori rinvenuti negli ambienti 16 e 17, una percentuale decisamente più alta di quella relativa alla prima fase, in cui comunque i prodotti africani risultavano già i più numerosi (47,5% delle anfore importate). Molto consistenti risultano anche le importazioni dal bacino orientale del Mediterraneo, che rappresentano il 18,1% del materiale preso in esame; tale percentuale documenta come in questo periodo i prodotti di origine orientale arrivassero nei magazzini di San Gaetano in quantità di gran lunga maggiore rispetto a quelli italici (11,4%) e, soprattutto, iberici (limitati al 4,7%); nella prima fase, invece, le importazioni dalla penisola italiana e, in maggior misura, da quella iberica erano molto più significative, raggiungendo le pri-

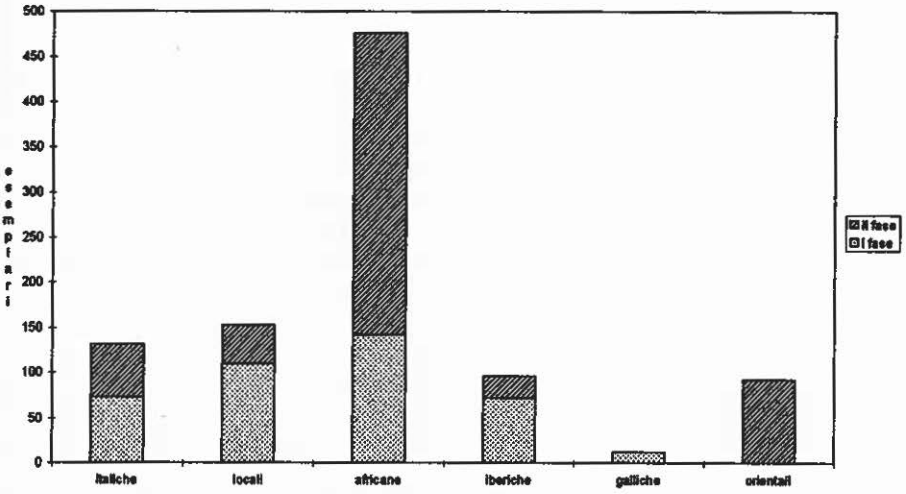


Grafico 2 – Distribuzione per aree geografiche nella I e nella II fase.

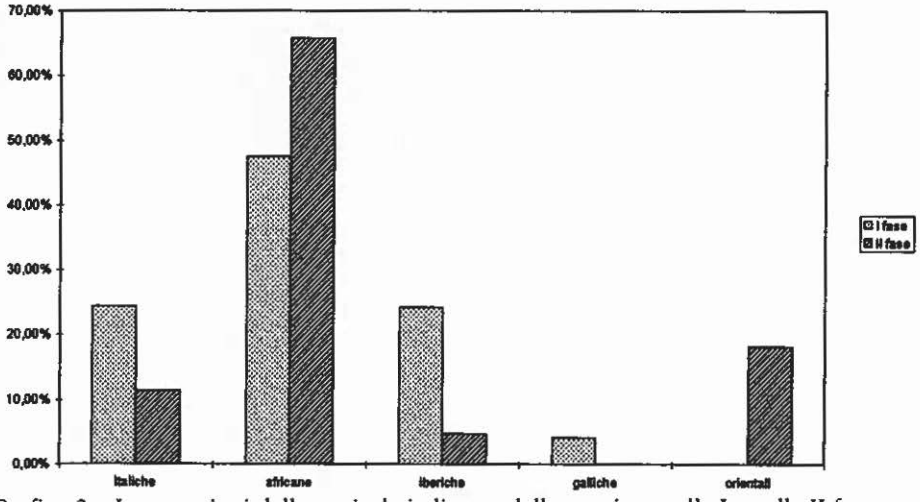


Grafico 3 – Importazioni dalla penisola italiana e dalle province nella I e nella II fase.

me il 24,4%, le seconde il 24,1 % del totale delle anfore importate. Per quanto riguarda la Gallia, come già abbiamo detto, non sono documentati arrivi posteriori al III secolo, anche se non si possono escludere eventuali traffici in contenitori che non abbiano lasciato tracce archeologicamente documentabili.

4. Anche se i dati risultanti dallo studio di una parte, per quanto rappresentativa, di una sola delle numerose classi di materiale rinvenute negli *horrea* di

Vada non ci permettono di delineare un panorama completo ed esauriente della storia economica di questo scalo marittimo, sono comunque possibili alcune interessanti osservazioni: innanzitutto la prevalenza fin dalla I fase dell'edificio delle importazioni dalle regioni nordafricane, che diventano poi schiaccianti con il IV secolo; un così cospicuo afflusso di merci africane nei magazzini del porto di Vada trova riscontro con quanto noto da stratigrafie di Ostia e in Roma, a conferma dell'egemonia africana nel Mediterraneo occidentale a partire dal III secolo (cfr. da ultimo PANELLA in *Storia di Roma* 1993, 624 ss.).

Come è noto, invece, soltanto dalla fine del IV-inizi V secolo si affermano in modo consistente nelle regioni occidentali le importazioni dall'Oriente (cfr. da ultimo PANELLA in *Storia di Roma* 1993, 639 ss.): anche a S. Gaetano, infatti, la seconda fase di vita dei magazzini è caratterizzata dall'arrivo da regioni come la Palestina, la Siria e le coste dell'Asia Minore di una grande quantità di derrate alimentari, che si collocano al secondo posto, dopo le merci africane, fra le importazioni di questo periodo. Al momento non risultano attestati contenitori orientali cronologicamente riferibili alla prima fase degli *horrea*, ma non è escluso che, una volta ultimate le analisi minero-petrografiche delle paste ceramiche, questo dato non possa essere modificato.

Anche a *Vada Volaterrana*, come accade negli altri mercati mediterranei (cfr. PANELLA in GIARDINA 1986, 438), le importazioni dalla penisola iberica, ragguardevoli nei primi tre secoli di vita dei magazzini, subiscono successivamente un calo drastico, in particolare per quel che riguarda le merci provenienti dalla Betica: le attestazioni relative alla seconda fase, infatti, sono riferibili soprattutto ai prodotti ittici della Lusitania. Nettamente inferiore rispetto a quanto attestato in altri contesti tirrenici (cfr. ad esempio Ostia e Settefinestre: ANSELMINO *et al.* in GIARDINA 1986, 75 e RICCI in GIARDINA 1986, 87) doveva essere, invece, la quantità di vino gallico che arrivava a Vada: gli indici di presenza per la prima fase sono infatti irrisori se paragonati, ad esempio, a quelli di Ostia, dove raggiungono anche punte superiori al 27% (ANSELMINO *et al.* in GIARDINA 1986, 76); per questo motivo non è sorprendente la totale assenza di attestazioni dei contenitori vinari gallici nella seconda fase di vita dei magazzini, specialmente se si considera che anche negli altri contesti tirrenici essi subiscono un drastico calo.

Per quanto riguarda le anfore importate dalla penisola italica, possiamo osservare che, se fra I e IV secolo le presenze riscontrate a Vada si presentano già in certa misura più cospicue rispetto a quelle documentate nei centri sopra ricordati, in seconda fase esse, nonostante il sensibile calo, si mantengono in ogni caso su livelli piuttosto elevati e comunque di molto superiori alla media attestata altrove sulle coste tirreniche (cfr. da ultimo PANELLA in *Storia di Roma* 1993, 619 ss. con bibliografia precedente). È però da segnalare il fatto che tra le anfore italiche una discreta percentuale (elevata in seconda fase) è costituita da esemplari manufatti nella bassa valle dell'Arno: si tratta perciò di un dato che comprova l'ampia circolazione su base regionale

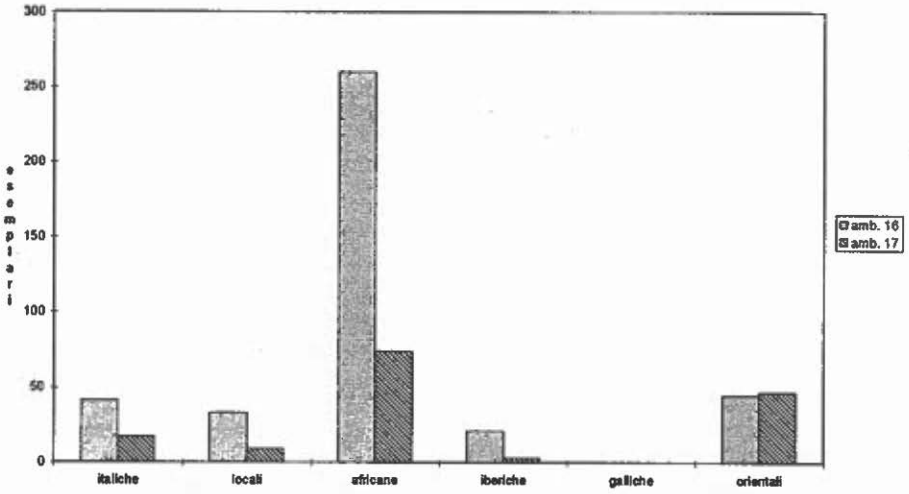


Grafico 4 – Distribuzione per aree geografiche di provenienza delle anfore di II fase nei due ambienti.

(fino al IV/V secolo) dei vini dell'*ager Pisanus,* che è logico pensare arrivassero agli *horrea* di S. Gaetano tramite i due importanti assi viari, Aurelia e Emilia, che collegavano *Vada Volaterrana* con Pisa (Pasquinucci, Ceccarelli Lemut 1991). Durante l'intero periodo in cui i magazzini di Vada furono attivi, le merci qui stoccate venivano ridistribuite nei numerosi insediamenti dell'entroterra, dove sono stati rinvenuti in gran numero i diversi contenitori in cui venivano trasportate (Del Rio in Pasquinucci 1987, 118 ss.; Cherubini, Del Rio 1994; Del Rio, Cherubini c.s.).

5. L'esito del confronto istituito fra gli esemplari di seconda fase rinvenuti nei due diversi ambienti considerati (cfr. grafico 4) non ci permette di rilevare differenze, nella quantità e nella provenienza, tali da poter supporre, almeno in questo caso, un uso diversificato delle due *cellae*: infatti gli indici di presenza sono sostanzialmente analoghi per gli esemplari di tutte le aree geografiche, con l'unica eccezione di quelli provenienti dall'Africa, attestati in numero decisamente maggiore nell'ambiente 16.

Antonella Del Rio
Marina Vallebona*
Dipartimento di Scienze Storiche del Mondo Antico
Università di Pisa

* Pur trattandosi di un lavoro realizzato in stretta collaborazione tra le due autrici, sono da attribuire a A. Del Rio i paragrafi 2 e 4, a M. Vallebona i paragrafi 1, 3 e 5. Il rilievo di Fig. 2 si deve agli allievi di Topografia antica dell'Università di Pisa, il lucido a M. Vallebona.

BIBLIOGRAFIA

Amphores romaines et histoire économique: dix ans de recherche 1989, Roma, École Française de Rome.

CHERUBINI L., DEL RIO A. 1994, *Le produzioni ceramiche delle basse valli del Fine e del Cecina*, in G. OLCESE (ed.), *Ceramica romana e archeometria: lo stato degli studi*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 217-223.

DEL RIO A., CHERUBINI L. c.s., *Appunti su fabbriche del territorio pisano e volterrano*, in Ateius *e le sue fabbriche, Atti del Convegno (Pisa, dicembre 1992).*

DEL RIO A. *et al.* c.s., *Importations et productions locales de la haute Etrurie tyrrhénienne, de la période de la romanisation jusqu'au VI^e siècle apr. J.-C.. Un exemple d'étude archéométrique*, «Revue d'Archéometrie».

ESPOSITO A.M. 1992, *Presenze etrusche nel territorio Livornese. I seminario Storia del Territorio Livornese*, Livorno, Assessorato Cultura della Provincia, 23-24.

GIARDINA A. (ed.) 1986, *Società romana e impero tardoantico III. Le merci. Gli insediamenti*, Bari, Laterza.

MASSA M. 1980-1981, *Le anfore del Museo Civico di Rosignano Marittimo (Livorno)*, «Rassegna di Archeologia», 2, 223-248.

MENCHELLI S. 1990-1991, *Una fornace per anfore Dressel 2-4 nell'*ager Pisanus *ed alcune considerazioni sui contenitori vinari prodotti nell'Etruria settentrionale in età romana,* «Opus», 9-10, 169-184.

PASQUINUCCI M. (ed.) 1987, *Terme romane e vita quotidiana*, Modena, Panini.

PASQUINUCCI M., CECCARELLI LEMUT M.L. 1991, *Fonti antiche e medievali per la viabilità del territorio pisano*, «Bollettino Storico Pisano», 60, 111-139.

PASQUINUCCI M., DEL RIO A., MENCHELLI S. c.s., *Aspetti tecnici della costruzione degli* horrea *di S. Gaetano di Vada*, in *Bonifiche e drenaggi con anfore in epoca romana: aspetti tecnici e topografici, Atti Seminario di Studi (Padova, 19-20 ottobre 1995).*

PASQUINUCCI M. *et al.* c.s., *La ceramica di VI-VII sec. da* Vada Volaterrana *(*horrea *in loc. S. Gaetano di Vada)*, in *Ceramica in Italia: VI-VII secolo, Colloquio in onore di J. Hayes* (Roma 11-16 maggio 1995).

Storia di Roma, 3. L'età tardoantica, II. I luoghi e le culture 1993, Torino, Einaudi.

THIERRIN-MICHAEL G. 1992, *Römische Weinamphoren*, Freiburg, Universität Freiburg.

ABSTRACT

This article is based on the morphologic, archeometric and quantitative study of amphoras found in room 16 and 17 of the *horrea* of S. Gaetano of Vada (Li), which form part of the port structures of *Vada Volaterrana*. Here has been studied the material belonging to the second of the two phases of the building (half of IV-VI/VII cent. a.d.); this study has allowed us to delineate commercial flows that, coming from the whole Mediterranean basin, have been related to the *Vada Volaterrana* harbour on the Northern Etrurian coast. The locally fabricated amphoras represent a great part of the finds (14,7%): used for wine, they were stored here before being commercialised. The imported amphoras came especially from North-Africa (65,8%). Very consistent was also the import from the East basin of the Mediterranean (18,1%). Few, on the contrary, were imported from the Italian peninsula (11,4%), and these above all from the Iberic peninsula (4,7%). There hasn't been noted an import of amphoras from Gallia during the second phase of existence of the building.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 497-514

IL VASELLAME DI USO COMUNE (I-VII SEC. D.C.) RINVENUTO NEGLI *HORREA* DI S. GAETANO DI VADA (ROSIGNANO M.MO, LI): RICERCHE ARCHEOMETRICHE, MORFOLOGICHE ED ANALISI QUANTITATIVE

Il vasellame di uso comune rinvenuto negli *horrea* di S. Gaetano di Vada al momento è stato studiato all'80% circa del totale; per le quantificazioni di tipo statistico si fa riferimento ai materiali ceramici provenienti dalle *cellae* 14 e 17, la cui schedatura è conclusa.

Di tale vasellame si cerca di definire, con un progetto che è in corso di svolgimento, le caratteristiche funzionali, morfologiche, tecniche ed archeometriche. Ci si propone anche di individuare i rapporti quantitativi intercorrenti con le altre classi ceramiche (pareti sottili, terre sigillate, ceramica a vernice rossa interna, vasellame africano da cucina, ceramica invetriata), evidenziandone gli usi preferenziali, e almeno alcune delle motivazioni che condizionarono la scelta di una classe in luogo di un'altra. Allo stadio attuale del lavoro non è stato possibile considerare il vasellame in vetro e in metallo perché ancora in corso di restauro; il fatto che questi materiali siano riciclabili avrebbe comunque reso poco attendibili i relativi valori di presenza.

Si ritiene che questo studio, per quanto al momento statisticamente limitato soltanto a due degli ambienti scavati, possa fornire una prima significativa "proiezione" a proposito della suppellettile presente negli *horrea* di un porto alto-tirrenico.

Il vasellame è stato recuperato e schedato nella sua globalità: cioè né durante lo scavo, né successivamente sono stati effettuati scarti intenzionali.

Per ogni classe ceramica considerata ci siamo proposti di calcolare il numero degli esemplari (*how many vessels*: ORTON, TYERS 1990): all'interno del numero complessivo dei frammenti sono stati conteggiati gli orli di individui diversi e a questi sono stati sommati tutti gli elementi (anse, fondi e pareti) che per motivi dimensionali (spessore, diametro) e/o tecnici (tipo di pasta ceramica, trattamento delle superfici, decorazioni etc.) vengono a costituire un nuovo *vessel*. Questo vuole essere un approccio intermedio e correttivo fra la quantificazione del *Minimum Number of Individuals* e quella del *Maximum Number of Individuals* (sul problema, di cui esiste ormai una vastissima letteratura cfr. da ultimi ORTON, TYERS, VINCE 1993; MILLETT 1995).

Gli esemplari a cui si fa riferimento sono 624. Lo studio morfologico del vasellame viene integrato dalle analisi minero-petrografiche effettuate da T. MANNONI (Settore di Mineralogia Applicata all'Archeologia, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Genova). Il rinvenimento, nell'*ager Volaterranus* e nel limitrofo *ager Pisanus*, di numerose fornaci di età romana (CHERUBINI, DEL RIO 1994; MENCHELLI 1994a e b) rappresenta un indispensa-

bile aiuto per le caratterizzazioni delle produzioni locali o comunque dell'Etruria settentrionale costiera; la provenienza dei prodotti di importazione viene individuata grazie ad una banca dati delle terre mediterranee (Del Rio *et al.* 1996).

Nel vasellame di uso comune al momento sono state individuate 64 paste ceramiche; i dati archeometrici evidenziano che il 65% del totale rinvenuto è costituito da produzioni dell'Etruria settentrionale costiera che, evidentemente, erano depositate negli *horrea* in attesa di una più o meno ampia commercializzazione. Al momento risulta che il vasellame utilitario pisano/volterrano fosse distribuito in un'area compresa fra Luni (ricerche inedite di T. Mannoni e L. Gambaro) e l'*ager Cosanus* (Settefinestre 1985, 331, n. 20); future ricerche, morfologiche ed archeometriche, effettuate soprattutto sui materiali rinvenuti lungo le rotte tirreniche, potranno meglio definirne l'aerale di diffusione.

Come sappiamo (Del Rio, Vallebona in questo volume), gli *horrea* furono in uso dalla fine del I sec. d.C. a tutto il VI sec. d.C., se non oltre. I materiali rinvenuti negli ambienti 14 e 17 risultano relativi soprattutto alle fasi di vita più tarde, databili a partire dalla seconda metà del IV secolo, e ben distinguibili stratigraficamente perché in tale periodo l'edificio venne coinvolto in profonde ristrutturazioni (Pasquinucci, Del Rio, Menchelli 1995).

Va inoltre segnalata la presenza di esemplari da fuoco che, per le loro caratteristiche tecniche e morfologiche, possono essere datati alla fine del VI-VII secolo: a differenza del vasellame depositato negli *horrea* per la commercializzazione, e quindi privo di tracce di uso, questi presentano il tipico annerimento da fuoco dovuto all'impiego culinario: evidentemente si tratta della suppellettile prodotta e utilizzata in loco dalle genti che (ri)occuparono l'area dopo che gli edifici romani, almeno in parte, avevano perduto la loro funzione originaria (cfr. Del Rio, Vallebona in questo volume).

Le nostre considerazioni verranno dunque scandite secondo queste tre fasi cronologiche:

prima fase: fine I - III sec. d.C.
seconda fase: IV-VI / inizi VII sec. d.C.
terza fase: fine VI-VII sec. d.C.

I fase

Il vasellame ceramico di uso comune pertinente alla prima fase di vita degli *horrea* corrisponde a circa il 31% del materiale rinvenuto.

Nel grafico 1 sono rappresentati i rapporti in atto fra le diverse classi ceramiche:

Con attestazioni al 6% fra la fine del I e il III sec. d.C. la ceramica a pareti sottili (di produzione locale, italica: aree tirreniche centro-meridionali, e provinciale: Nord-Africa; Medio-Oriente) soddisfece la richiesta di vasetti

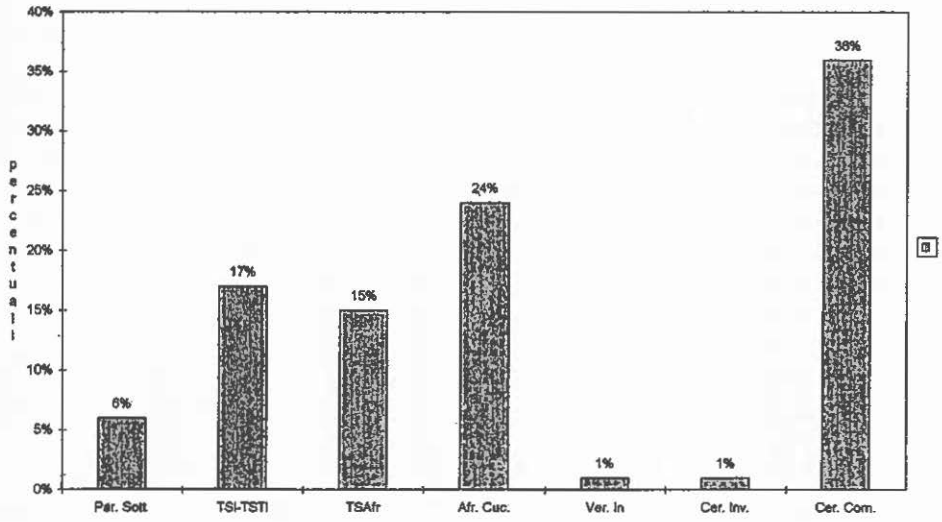


Grafico 1 – Attestazione delle varie classi ceramiche. I fase.

potori, di cui la forma più diffusa era il boccalino a collarino Ricci I/122; data la produzione specializzata, nel vasellame di uso comune non risultano imitati bicchieri e boccalini di forme simili.

Le attestazioni della terra sigillata italica/tardo-italica (17%) sono di notevole entità, soprattutto considerando che si tratta di una presenza stratificatasi nel corso di poco più di un cinquantennio, dalla fine del I sec. d.C. alla metà del II; quello di *Vada Volaterrana,* evidentemente, era uno dei porti da cui veniva commercializzata la terra sigillata nord-etrusca, di cui sono state individuate numerose manifatture in Pisa, nell'*ager Pisanus* e nell'*ager Volaterranus* costiero (Menchelli 1994a; 1994b; Cherubini, Del Rio 1994).

Percentuali grosso modo simili (15%) risultano avere la terra sigillata africana A e A/D: sono attestate soprattutto le forme di A 2 databili al III sec., quando tale classe ceramica si impose definitivamente sui mercati mediterranei. È significativo sottolineare dunque che il 32% della suppellettile ceramica è rappresentato da forme aperte verniciate da mensa (coppe, piatti, scodelle, terrine): tale fatto condizionerà le produzioni del vasellame comune che, come vedremo, per quanto riguarda la suppellettile "fine" da mensa si specializzerà nelle forme chiuse.

Molto alto (24%) è l'indice di presenza della suppellettile da cucina nord-africana, consistente soprattutto in tegami (forma **Atlante CVI 10**), casseruole (**Atlante CVII, 5-7**) e piatti/coperchi (**Atlante CIV, 1-4**); data l'ottima resa tecnica (su cui cfr. Schuring 1988) e la facilità di commercializzazione, tali prodotti si imposero fortemente sui mercati altotirrenici.

Irrisoria (complessivamente al 2%) è invece la presenza della ceramica

invetriata e a vernice rossa interna: a proposito di quest'ultima va sottolineato che tutti gli esemplari al momento rinvenuti negli *horrea* sono di provenienza campana, come rivela la pasta ricca di plagioclasi e pirosseni: si tratta di una produzione specializzata, che sui mercati alto-tirrenici nel II-III sec. d.C. aveva ormai una circolazione limitata, surclassata com'era dalle importazioni nord-africane. È nota una produzione locale di vasellame a vernice rossa interna, ben documentata negli insediamenti rurali dell'*ager Pisanus* e *Volaterranus,* di chiara imitazione campana ma caratterizzata dal rivestimento sottile e poco coprente: l'assenza negli *horrea* di tali esemplari conferma che in effetti si tratta proprio di una produzione di bassa qualità, destinata soltanto alle fasce più povere del mercato nord-etrusco.

Esaminiamo ora nel dettaglio, per mezzo dei grafici 2 e 3, il vasellame di uso comune che, come abbiamo visto, nella I fase ammonta al 36% del totale.

Dalla lettura dei grafici risulta che il vasellame da cucina rappresenta il 32% del totale: le più attestate (15%) sono le olle, come è ovvio d'altronde visto che di questa forma non sono documentate massicce importazioni nord-africane. Gli esemplari in massima parte provenivano dalle manifatture individuate nel retroterra di *Vada Volaterrana*, come rivelano le paste ceramiche contenenti gabbri. Tali esemplari (**nrr. 1-6**; Fig. 1) presentano orlo svasato a labbro arrotondato, più o meno ingrossato, collo distinto; corpo globulare, fondo piano. È attestata anche una circolazione sub-regionale, con esemplari provenienti dall'Etruria meridionale, le cui paste presentano calcari, selci e scisti cristallini.

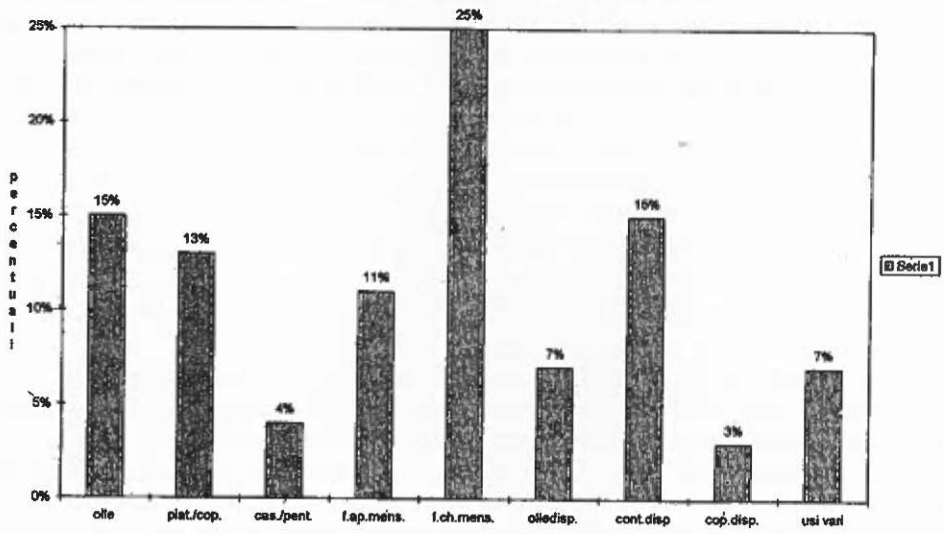


Grafico 2 – Articolazione del vasellame secondo gli usi funzionali.

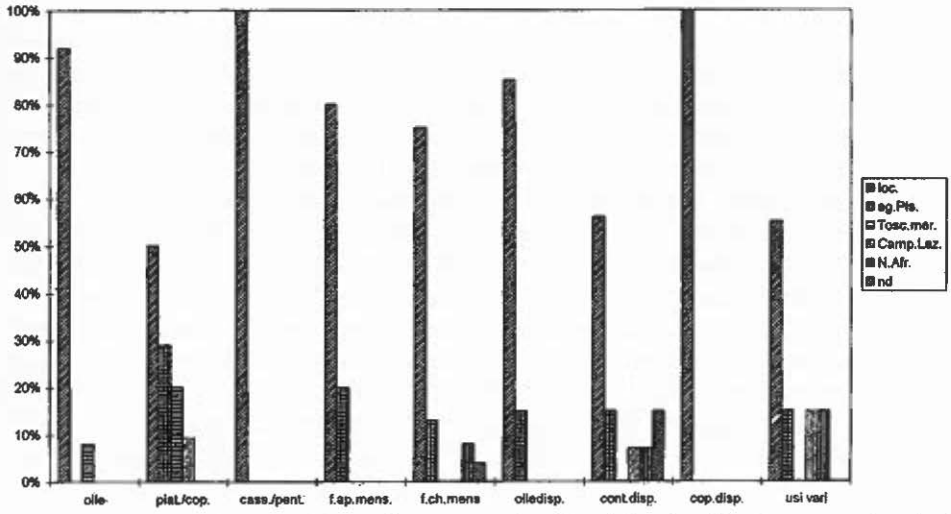


Grafico 3 – Articolazione del vasellame secondo gli usi funzionali e le caratterizzazioni minero-petrografiche.

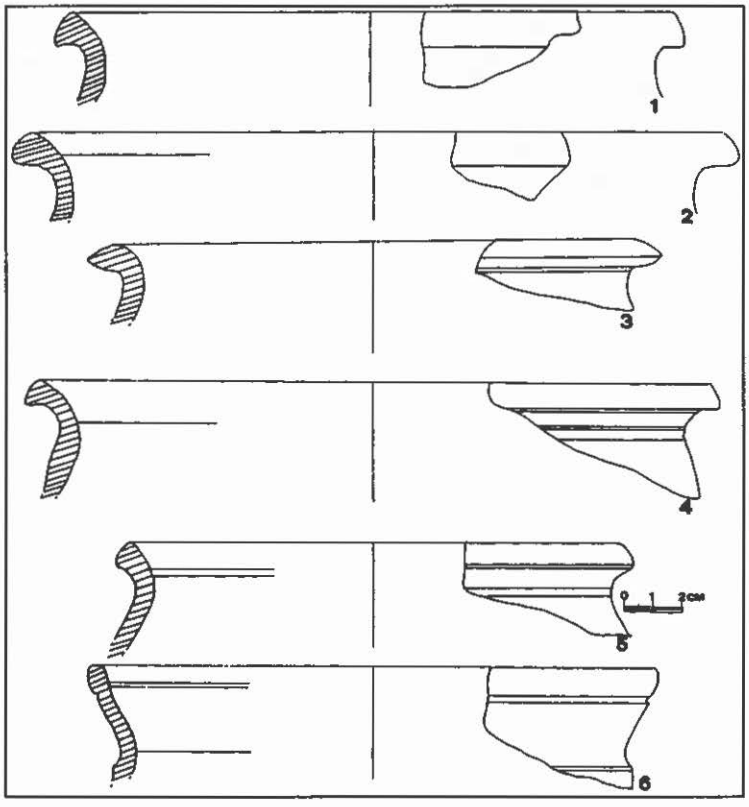


Fig. 1

Nonostante le importazioni dal Nord-Africa, il 13% del vasellame di uso comune è costituito da piatti/coperchi, in massima parte prodotti nel retroterra o nel limitrofo *ager Pisanus*; gli esemplari locali (**nrr. 7-11**; Fig. 2) presentano orlo indistinto, o appena ingrossato, mentre nei piatti/coperchi provenienti dall'Etruria meridionale (**nrr. 14-15**; Fig. 2) e dall'area campano-laziale (**nrr. 12-13**; Fig. 2) l'orlo è distinto, variamente articolato.

Le casseruole e le pentole sono scarsamente attestate (4%), dato che i prodotti nord-africani rispondevano alla maggior parte delle richieste del mercato; gli esemplari rinvenuti sono tutti di produzione strettamente locale.

Il vasellame da cucina dell'Etruria settentrionale costiera, in questa prima fase, è di buona qualità tecnica, e doveva essere particolarmente adatto all'uso culinario perché le inclusioni di gabbro presenti nelle paste ceramiche garantivano agli esemplari una ottima refrattarietà.

Per quanto riguarda il vasellame da mensa, le forme aperte (coppe, piatti), attestate all'11%, sono rappresentate esclusivamente da produzioni dell'*ager Pisanus* e *Volaterranus,* con morfologia che ricorda quella delle sigillate coeve.

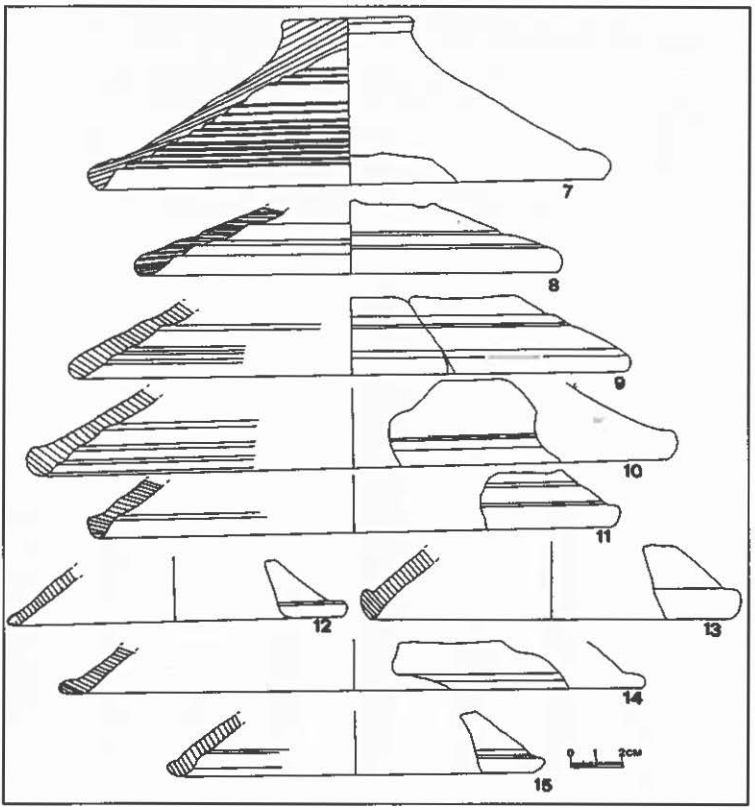


Fig. 2

Come abbiamo precedentemente detto, nel vasellame di uso comune il maggiore indice di presenza è relativo ai contenitori da mensa (brocche, bottiglie), che raggiungono il 25%; tali esemplari sono in massima parte di produzione pisano-volterrana (88%), con una bassa percentuale di arrivi dal Nord-Africa (8%), come indicano le paste a quarzo eolico arrotondato.

In questa fase cronologica nei contenitori locali sono diffuse le brocche a corpo piriforme, con orlo svasato e sagomato, e ansa a nastro impostata su di esso: tale forma (**nrr. 18, 20**; Fig. 3) risulta diffusa in tutta l'Etruria settentrionale costiera, da Luni al Cecina. Il vasellame da mensa prodotto nelle manifatture pisano/volterrane è di buona qualità tecnica, con paste particolarmente depurate, cottura uniforme e accurata lavorazione al tornio.

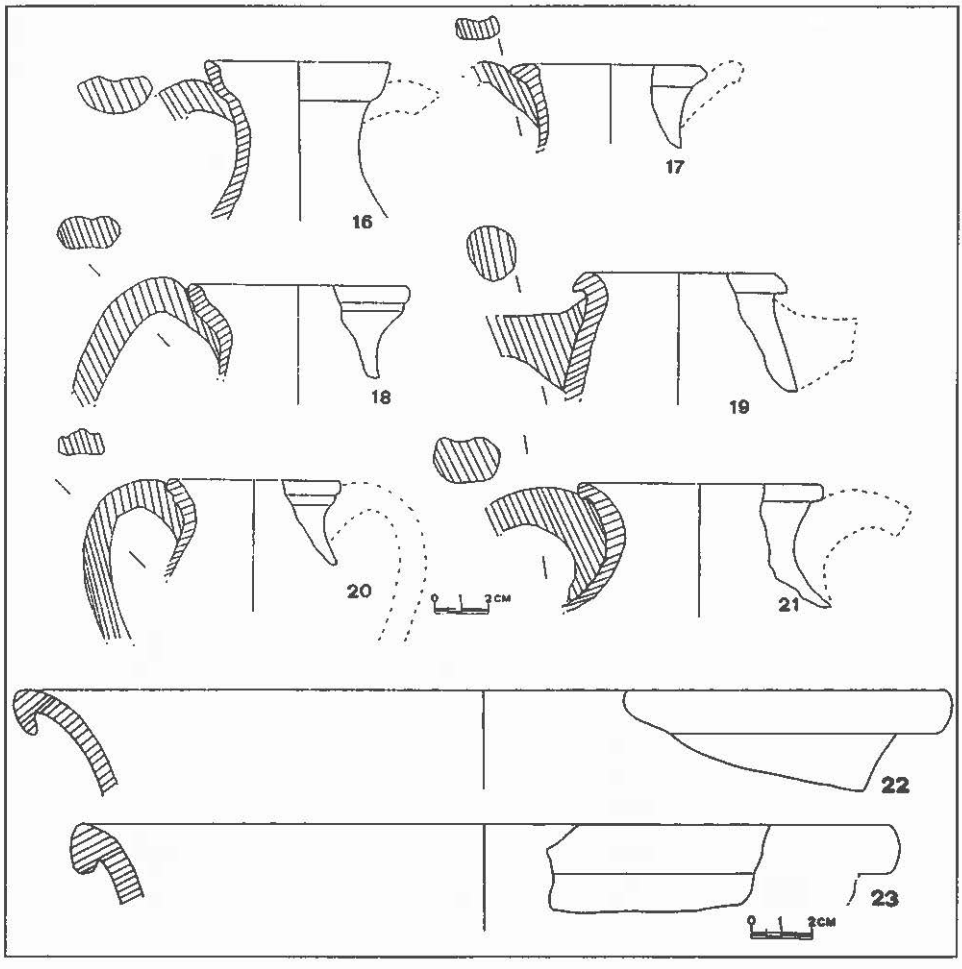


Fig. 3

Nel vasellame da dispensa si comprendono le olle e i relativi coperchi, tutti di produzione strettamente locale o comunque nord-etrusca, con indici di presenza al 10%. Morfologicamente sono simili agli analoghi esemplari da cucina, ma se ne differenziano per le paste ceramiche che, in questo caso, non contenengono evidenti inclusioni di gabbro.

Nei contenitori da dispensa, attestati al 15%, in realtà sono forse conteggiate anche numerose anforette: gli elementi morfologici, infatti, non sempre ci permettono di distinguere fra le due classi; per esemplari privi di particolari requisiti tecnici, comunque, la presenza di un contenuto giustificherebbe meglio le numerose importazioni (7% dall'area Campano-Laziale; 7% dal Nord-Africa; 15% da aree indeterminate certamente non etrusche).

Nel vasellame per usi vari, documentato al 7%, sono presenti *mortaria* con orlo ripiegato verso l'esterno, tipici della produzione campana del I-III d.C., e ormai ben noti nella letteratura archeologica (forma HARTLEY **1** e **2**): negli *horrea* ne sono stati rinvenuti esemplari di provenienza pompeiana, nord-africana e locale. Tipicamente pisano/volterrana è invece la manifattura di vasi e bacini dalle pareti svasate, orlo ingrossato e ripiegato, con pasta ceramica dura e depurata (**nrr. 22-23**; Fig. 3).

(S.M.)

II FASE

È databile alla seconda fase il 60% del totale del materiale ceramico rinvenuto. Nel grafico 4 sono rappresentati i rapporti intercorrenti fra le diverse classi ceramiche.

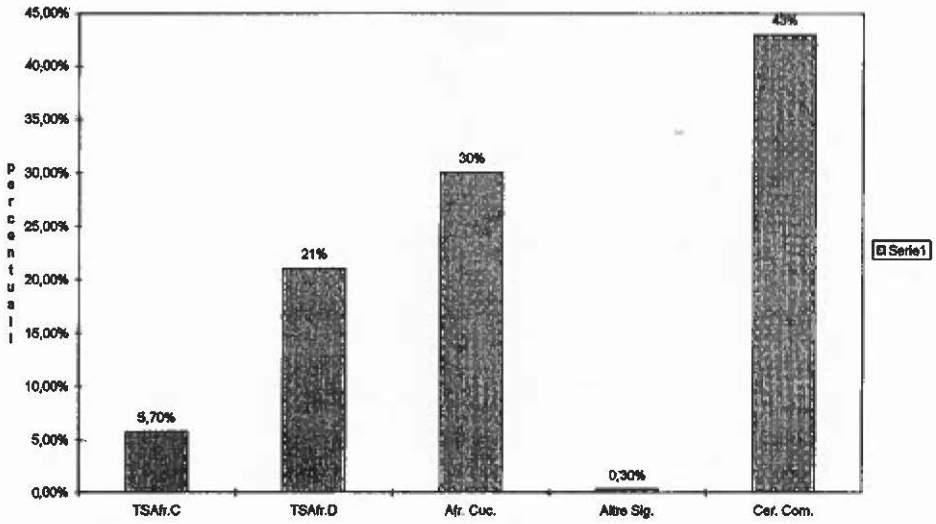


Grafico 4 – Attestazione delle varie classi ceramiche. II fase.

Il dato che emerge immediatamente dalla lettura del grafico è l'alta percentuale del materiale di provenienza nord-africana: dal IV al VI- inizi VII sec. tali importazioni costituiscono il 56,70% del totale del vasellame rinvenuto.

Dallo studio morfologico risulta che nella terra sigillata C le forme di piccole e grandi dimensioni erano presenti in quantità grosso modo analoghe (rispettivamente 48,7% e 51,3%); nella produzione D, invece, i grandi piatti e zuppiere, comunemente connessi al consumo alimentare collettivo, sono attestati all'88%, mentre le forme di piccole dimensioni (diametro inferiore a 20 cm) costituiscono il restante 12% (Alessi in PASQUINUCCI *et al.* 1995).

Negli *horrea* sono documentate anche le forme più tarde della sigillata D: scodella Hayes **103 A-B; 104 A**; coppa HAYES **102** e vaso a listello HAYES **91 C nr. 21-23**, tutte di pieno VI secolo, e la scodella HAYES **105, nr. 13,17**, datata al 580-600/660 e forse oltre (Alessi in PASQUINUCCI *et al.* 1995). Abbiamo valutazioni simili per le anfore (cfr. DEL RIO, Vallebona in questo volume), e per le lucerne, dato che nelle stratigrafie tarde le forme **Atlante VIII** e **Atlante X** sono massicciamente attestate (Bianchini in PASQUINUCCI *et al.* 1995).

Va sottolineato che risultano di scarsa utilità le quantificazioni di S. FONTANA (1991) a proposito della terra sigillata africana di *Vada Volaterrana,* poiché il campione utilizzato non costituisce una attendibile base statistica (da 50 a 100 esemplari casualmente depositati nel Museo di Rosignano M.mo (LI), in seguito a sterri e recuperi occasionali effettuati in diversi edifici romani negli anni '60-70).

Le analisi archeometriche hanno rivelato che il vasellame nord-africano proviene da molteplici centri di produzione (DEL RIO *et al.* 1996); significativa è la presenza, nella suppellettile da cucina, di esemplari di provenienza tripolitana, la cui pasta ceramica è caratterizzata da quarzo eolico arrotondato in associazione con minerali vulcanici.

Quantitativamente irrisorie, soprattutto in confronto alle importazioni nord-africane, risultano le presenze delle terre sigillate di altra provenienza (0,30%): è comunque significativa l'attestazione a *Vada Volaterrana* di alcuni frammenti di terra sigillata egiziana B (forma **Hayes 88 a**) e di sigillata grigia narbonese (forme RIGOIR **3 a, 5 a, 12**).

Passando ad esaminare il vasellame di uso comune, vediamo che nella II fase esso ammonta al 43% del totale delle ceramiche rinvenute. Il grafico 5 è relativo all'articolazione di tale vasellame secondo gli usi funzionali. Nel grafico 6 se ne evidenzia l'articolazione secondo gli usi funzionali e le caratterizzazioni minero-petrografiche.

Dai grafici si evince che il vasellame da fuoco viene a rappresentare il 38%: esso risulta tutto di produzione locale o comunque, secondo la definizione di T. MANNONI "tosco-ligure", cioè mineralogicamente riferibile all'area compresa fra i fiumi Cecina e Magra. A partire dal IV sec. d.C., come in altri settori della *Tuscia* (VALENTI 1991, gruppo b), diventano comuni le olle ovoidi o globulari con orlo verticale a sezione triangolare, con incavo interno per

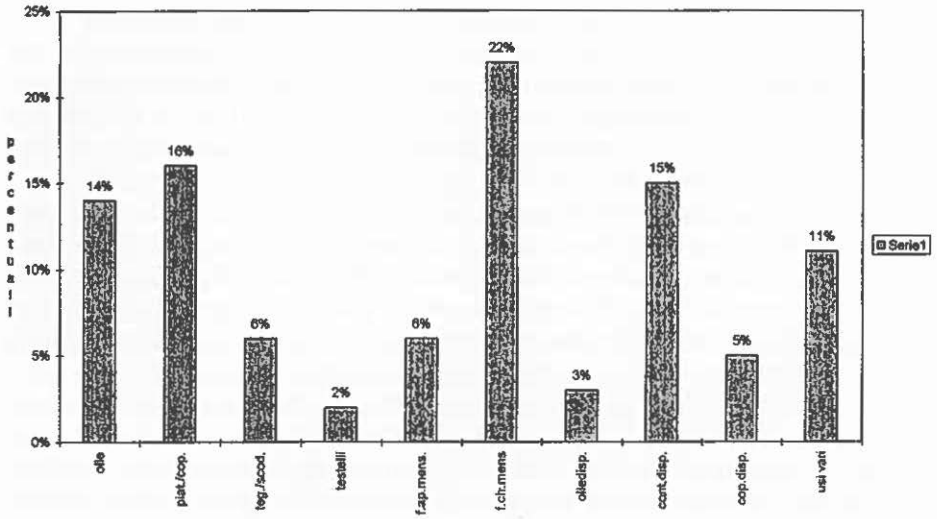


Grafico 5 – Articolazione del vasellame secondo gli usi funzionali. II fase.

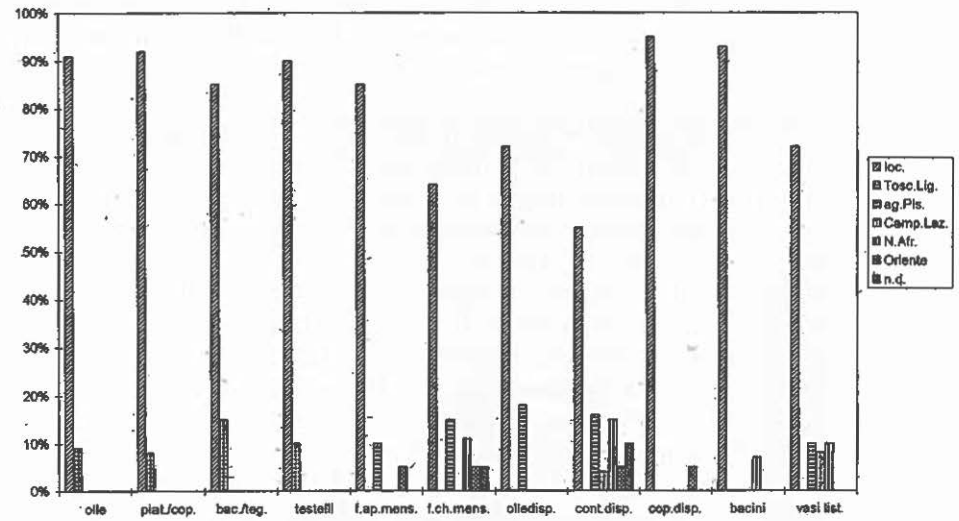


Grafico 6 – Articolazione del vasellame secondo gli usi funzionali e le caratterizzazioni minero-petrografiche. II fase.

permettere l'appoggio del coperchio; elemento quasi costante vengono ad essere le solcature esterne "a pettine" (**nrr. 24-27**; Fig. 4).

Nelle forme aperte sono attestati tegami imitanti la forma **Lamboglia 9 A** (**nr. 32**; Fig. 5) e compaiono casseruole a parete arrotondata, con prese a bugna (**nrr. 34-36**; Fig. 5), ben note in contesti di IV-VI sec. d.C., sia italici

(*Albintimilium:* Olcese 1993, nr. 167; *Luna:* Luni II, gruppo 44), sia provinciali (Cartagine: Fulford 1984, fig. 58, 19.1-20.5).

Nei piatti/coperchi, attestati al 16%, non si notano variazioni morfologiche di rilievo, mentre bisogna sottolineare che già nelle stratigrafie di V sec. d.C., per quanto scarsamente (2%), sono documentati i testelli, forma che per tutto il Medioevo sarà tipica della Toscana settentrionale.

I caratteri minero-petrografici delle paste ceramiche più attestate sono i medesimi degli esemplari di prima fase, ma con variazioni tecniche: i gabbri utilizzati come dimagrante sono di quantità e dimensioni alquanto maggiori; la cottura in fornace si fa più irregolare, con una progressiva predominanza dell'atmosfera riducente. Soprattutto nelle olle diventa comune, come dimagrante, anche la calcite spatica triturata, secondo una tradizione riscontrabile nelle produzioni lunigianesi alto e basso medievali. Gli esemplari in genere sono ancora di buona qualità tecnica, data l'utilizzazione del tornio veloce.

Per quanto riguarda il vasellame da mensa, le forme aperte rappresentano soltanto il 6% del totale; le coppe e le scodelle nord-etrusche, che ne rappresentano il 95%, imitano chiaramente prototipi della terra sigillata D (ad esempio il **nr. 30** la forma **Hayes 61, nr. 13; il nr. 31** la forma **Hayes 104 a**). Negli aspetti tecnici si continua la tradizione artigianale della prima e media età imperiale. Significativa è la presenza (al 5%) di importazioni dall'Oriente, in particolare dalle coste dell'Asia minore, a giudicare dalle paste ceramiche contenenti terre a vulcaniti associate a scisti cristallini; gli esemplari orientali sono però troppo frammentari per essere tipologizzati.

Come nella fase precedente i maggiori indici di presenza si registrano nei contenitori da mensa/dispensa, che complessivamente vengono a costituire il 45%.

Nelle forme chiuse da mensa/dispensa diventano comuni le *olpai* con orlo svasato verso l'esterno, più o meno ingrossato, e ansa complanare a nastro (**nrr. 38-40**; Fig. 5) e le grosse brocche con l'orlo estroflesso, anse a bastone e corpo piriforme o globulare (**nrr. 19, 21**; Fig. 3). Anche in questo caso la produzione continua ad essere di buona qualità tecnica, con paste ceramiche depurate, accurata modellatura al tornio e cottura ossidante uniforme.

Per quanto riguarda le olle da conserva e i relativi coperchi non si registrano particolari variazioni di ordine tecnico e/o morfologico rispetto agli esemplari della fase precedente. Ci limiteremo soltanto a segnalare la comparsa di coperchi di produzione orientale, presenti con attestazioni al 5%.

A partire dal IV sec. d.C. nelle stratigrafie diventano comuni i bacini e i vasi con listello (**nrr. 41-48**; Fig. 6); sono attestati i tipi con listello quasi orizzantale, pendente, a visiera, e con collarino. Oltre alle produzioni pisano/volterrano sono attestate importazioni dall'area campano-laziale (8 %) e dal nord-Africa (10%). Tali vasi, anche i tipi più tardi, ad esempio quelli "a collarino " (**nr. 48**) databili al VI-VII sec. d.C. (come confermano anche le strati-

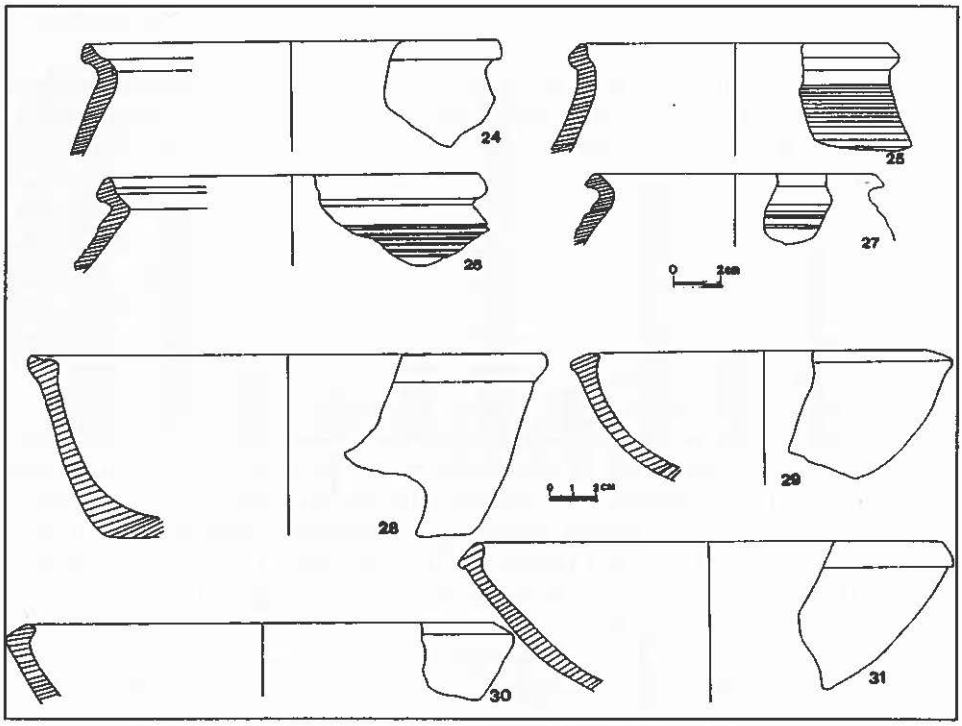


Fig. 4

grafie di *Albintimilium*: Olcese 1993, 309), conservano pienamente la tradizione artigianale della fase precedente, sia per l'accuratezza dell'esecuzione, sia per la continuità nella produzione di paste ceramiche attestate almeno dal II sec. d.C.

Alcuni dei vasi a listello (**nrr. 46-47**; Fig. 6) presentano motivi decorativi a stampo, chiaramente derivati dalle sigillate nord-africane (**Atlante, tav. LVI, nrr. 4-5**), secondo un gusto ben diffuso nel V-VI sec. d.C. (cfr. ad esempio Valenti 1991, tav. 6, nr. 3 per materiali dal territorio senese; Olcese 1993, nr. 364 da *Albintimilium*).

Bisogna segnalare che una buona percentuale del vasellame "fine" da mensa (12% nelle forme chiuse; 13% nelle forme aperte) è costituito da esemplari con rivestimento esterno rosso. Le paste ceramiche, strettamente locali e della pianura terminale dell'Arno, sono generalmente di colore rosso chiaro (Munsell 2.5. YR 6/4), molto depurate e tenere; la copertura è una vernice applicata per immersione, assai povera e diluita: di fatto sembrerebbe un ingobbio piuttosto che una vera e propria vernice sintetizzata.

Le forme aperte sono grandi coppe e scodelle, anche in questo caso di palese derivazione da prototipi nord-africani (particolarmente imitata risulta

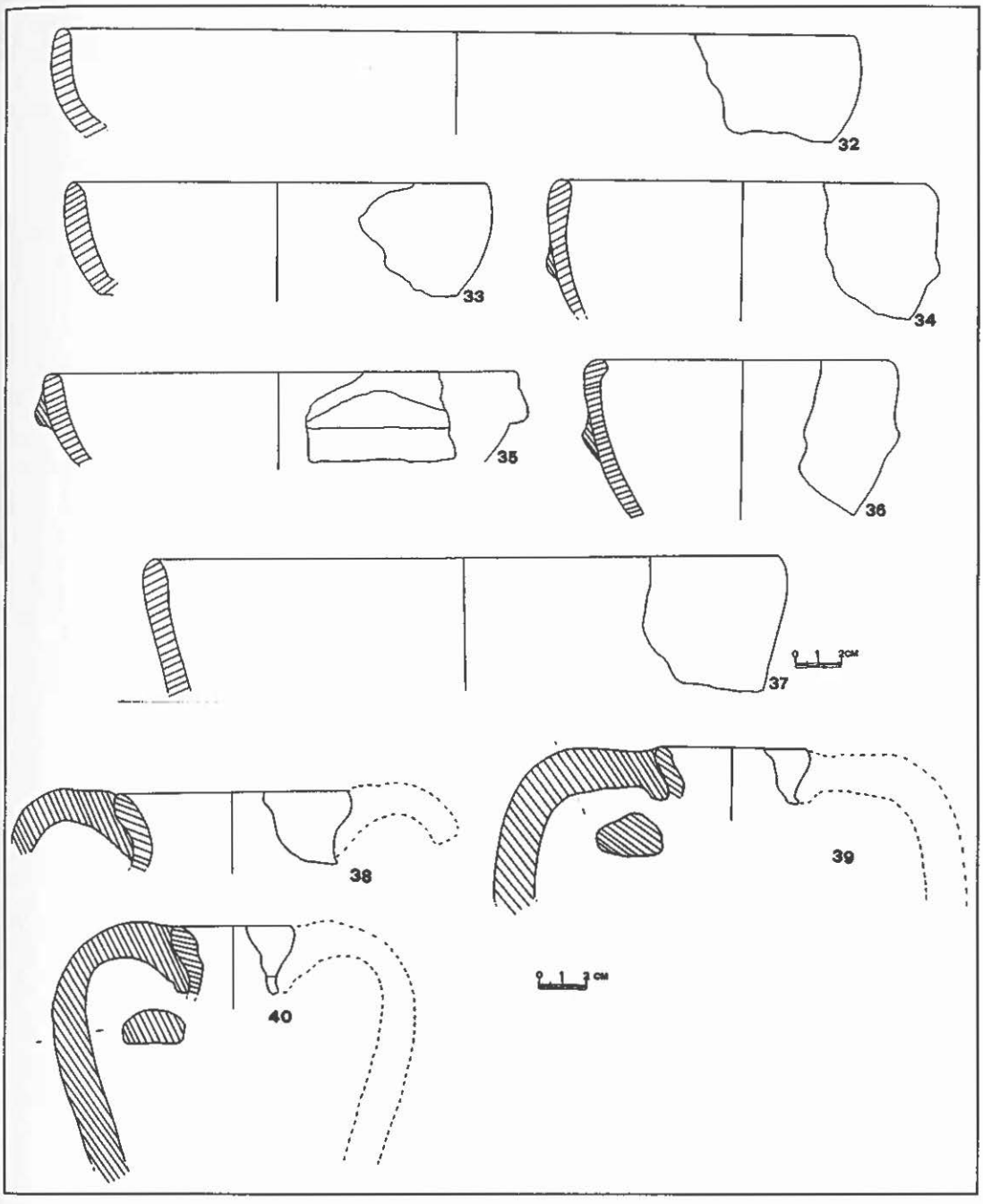


Fig. 5

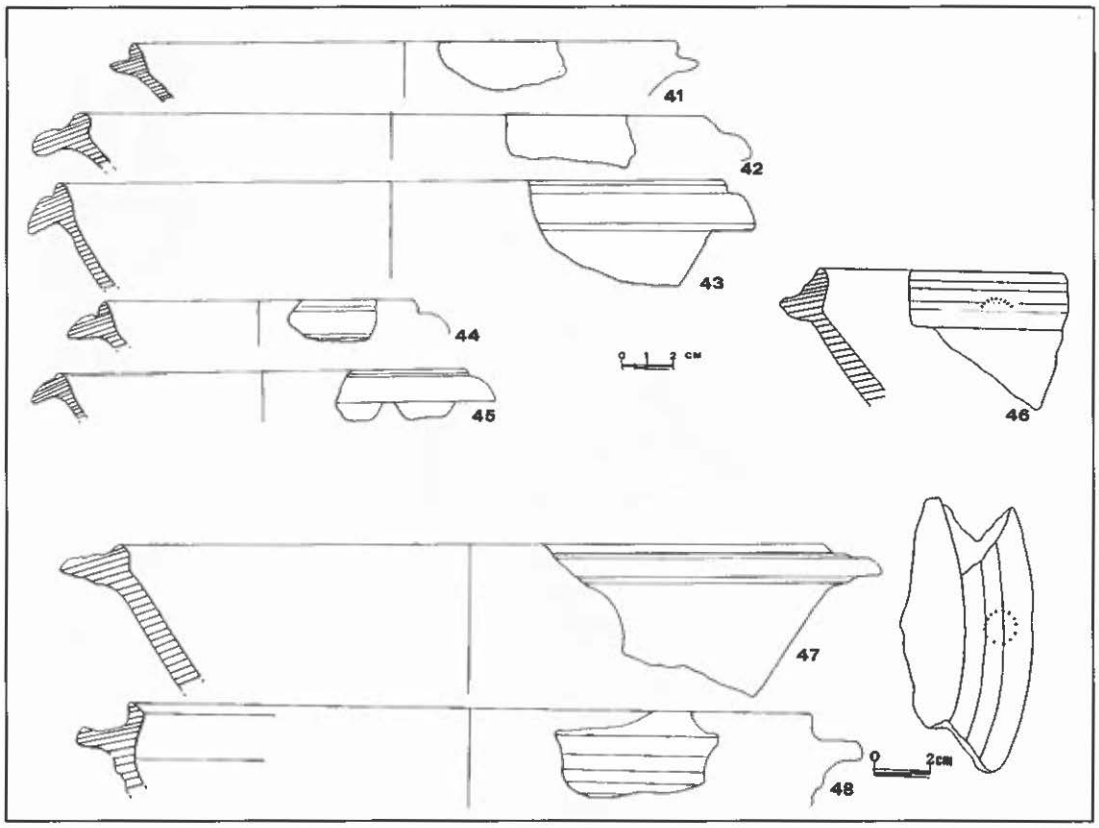


Fig. 6

la scodella **Hayes 61 a**); nelle forme chiuse sono comuni le *olpai* con orlo svasato e ansa complanare a nastro (cfr. **nr. 38**; Fig. 5).

Tale produzione, almeno in ambito pisano-volterrano, probabilmente derivò la sua origine dalle tradizioni manifatturiere proprie della terra sigillata italica/tardo-italica: già nella prima e media età imperiale, infatti, soprattutto negli insediamenti rurali individuati nel territorio (sintesi in PASQUINUCCI, MENCHELLI 1992) era presente vasellame da mensa a pasta ceramica depurata, con vernice povera, evanida e poco coprente. A partire dal IV-V sec. d.C., comunque, la produzione si intensificò notevolmente, e la suppellettile da mensa con rivestimento rosso venne a costituire una vera e propria classe ceramica imitante la terra sigillata D, con grande diffusione nella *Tuscia*, (VALENTI 1991; CIAMPOLTRINI 1995) e nell'Italia settentrionale (BROGIOLO, GELICHI 1995).

Negli *horrea* di *Vada Volaterrana* questo vasellame sembra meno diffuso rispetto ad altri siti della *Tuscia*, soprattutto interna: evidentemente sulla

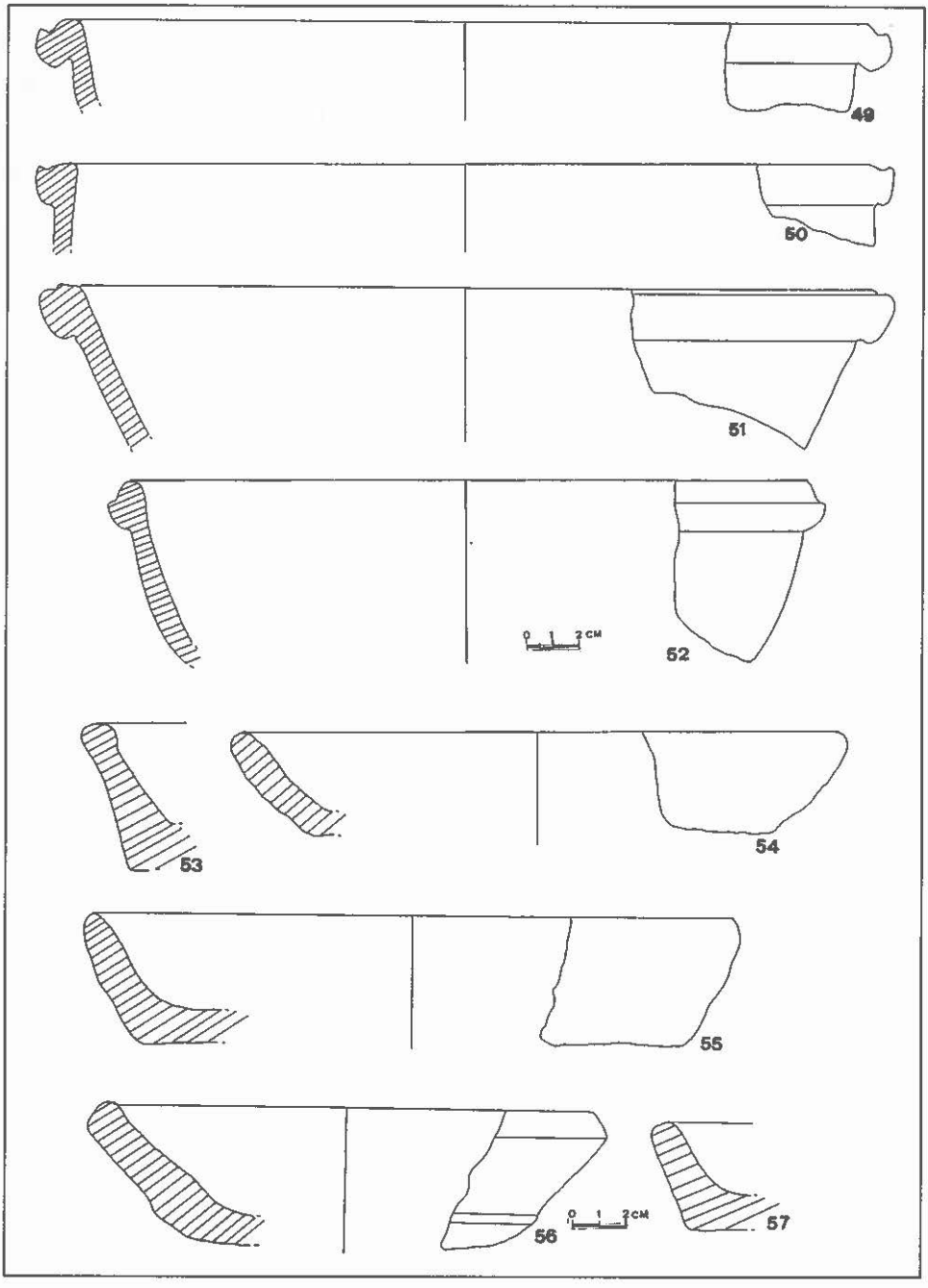


Fig. 7

costa, ove più facile era l'approvvigionamento dei prodotti nord-africani, le loro imitazioni avevano un mercato più ristretto. Le attestazioni nelle stratigrafie più tarde degli *horrea* rappresentano comunque un elemento di interesse, perché confermano che almeno sino agli inizi del VII sec. tale classe ceramica continuò ad essere commercializzata; la fine della sua produzione costituì poi un ulteriore atto del processo, diffusosi nelle manifatture del tempo, di progressivo abbandono del bagaglio culturale e tecnico "romano".

III FASE

Come detto precedentemente all'interno del vasellame di uso comune è stato enucleato un 9% di materiale che, per la presenza delle tracce d'uso e per le caratteristiche morfologiche e tecniche, si differenzia nettamente da quello delle fasi precedenti. Le forme, tutte di produzione strettamente locale, sono grandi tegami con orlo ingrossato e applicato alla parete, chiara imitazione di prototipi nord-africani (nrr. 49-52; Fig. 7), profondi recipienti dall'orlo indistinto (nr. 37; Fig. 5) e testelli (nrr. 53-57; Fig. 7). La manifattura è ben diversa da quella di tradizione romana: la lavorazione è a tornio lento, con lisciatura esterna a stecca; le paste sono grossolane con cottura a riduzione molto irregolare.

Negli *horrea* di *Vada Volaterrana* dunque, nella prima metà del VII secolo, nel volgere di alcuni decenni, si potè registrare il declino dell'economia romana a circolazione mediterranea, l'abbandono più o meno generalizzato delle tradizioni culturali e tecniche tardo-antiche e il costituirsi di nuove forme di produzione, che possiamo definire proto-medievali.

Ricerche in corso in Pisa e in altri settori dei territorio pisano/volterrano ci potranno dire se (ed eventualmente quali) aspetti dell'artigianato antico si conservarono nelle produzioni manifatturiere della Toscana settentrionale in età medievale.

(M.P.)

MARINELLA PASQUINUCCI
SIMONETTA MENCHELLI*
Dipartimento Scienze Storiche del Mondo Antico
Università di Pisa

* Per la stesura di questo contributo hanno fornito dati quantitativi: Donatella Alessi (terra sigillata africana); Susanna Bianchini (ceramica a pareti sottili; lucerne); Antonietta Pisano (ceramica africana da cucina); Paola Spinesi (terra sigillata italica) (cfr. la sintesi in PASQUINUCCI *et al.* 1995).
I disegni dei materiali sono di Rosita Desirée Bonet e di Beatrice Guiggi; i lucidi di Rosita Desirée Bonet.

BIBLIOGRAFIA

Atlante = AA.VV., *Atlante delle forme ceramiche,* I, Supplemento Enciclopedia dell'Arte Antica, Roma 1981.

Brogiolo G.P., Gelichi S. 1995, *Ceramiche, tecnologie ed organizzazione delle produzioni nell'Italia padana tra VI e X secolo, VI^e Congrès Intern. sur la Céramique Médiévale en Méditerranée, (Aix-en-Provence novembre 1995),* (in corso di stampa).

Cherubini L., Del Rio A. 1994, *Le produzioni ceramiche delle basse valli del Fine e del Cecina,* in G. Olcese (ed.), *Ceramica romana e archeometria: lo stato degli studi,* Firenze, All'Insegna del Giglio, 217-223.

Ciampoltrini G. 1995, *Ceramiche "comuni" nella Toscana centro-settentrionale fra VI e VII secolo,* in *Colloquio in onore di J. Hayes, Ceramica in Italia: VI-VII secolo,* (Roma 11-13 maggio 1995), (in corso di stampa).

Del Rio A., Mannoni T., Menchelli S., Pasquinucci M. 1996, *Importations et productions locales de la haute Étrurie tyrrhénienne , de la période de la romanisation jusqu' au VI^e siècle apr. J.-C. .Un exemple d' étude archéométrique,* «Revue d'Archéométrique», Supplément 1996, 113-118.

Fontana S. 1991, *Analisi comparata delle attestazioni della ceramica africana nel V sec. d.C.: un'indagine preliminare,* «Archeologia e Calcolatori», 2, 19-121.

Fulford M.G. 1984, *Excavations at Carthage: the British Mission. Volume I,* 2, University of Sheffield, JSOT Press.

Hartley K.F. 1973, *La diffusion des mortiers, tuiles et autres produits en provenance des fabriques italiennes,* «Cahiers d'Archéologie Subaquatique», 2, 49-60.

Hayes J.W. 1972, *Late Roman Pottery,* British School at Rome, London.

Luni II = A. Frova (ed.), *Scavi di Luni II. Relazione delle campagne di scavo 1972-1973-1974,* Roma 1977, Erma di Bretschneider.

Menchelli S. 1994a, *Da Cn. Ateius ai vasai tardo-italici: alcune considerazioni sulla terra sigillata "pisana",* «Bollettino Storico Pisano», 63, 1-29.

Menchelli S. 1994b, *Le produzioni ceramiche della Bassa Valle dell'Arno,* in G. Olcese (ed.), *Ceramica romana e archeometria: lo stato degli studi,* Firenze, Edizioni all'Insegna del Giglio, 205-215.

Millett M. 1995, *The comparison of surface and stratified artefact assemblages,* in *Pisa Populus Colloquium (Pisa dicembre 1995)* (in corso di stampa).

Munsell = *Munsell Soil Color Charts,* Baltimore 1975.

Olcese G. 1993, *Le ceramiche comuni di Albintimilium,* Firenze, Edizioni All'Insegna del Giglio.

Orton C.R., Tyers P.A. 1990, *Statistical analysis of ceramic assemblages,* «Archeologia e Calcolatori», 1, 81-110.

Orton C.R., Tyers P.A., Vince A. 1993, *Pottery in Archaeology,* Cambridge, Cambridge University Press.

Pasquinucci M., Menchelli S. 1995, *Paesaggio agrario e produzioni artigianali nell'Etruria settentrionale costiera (ager Pisanus e Volaterranus costiero),* in N. Christie (ed.), *Papers of the Fifth Conference of Italian Archaeology,* Oxford, Oxbow Book, 209-217.

Pasquinucci M., Del Rio A., Menchelli S. 1995, *I vespai sottopavimentali negli Horrea di Vada Volaterrana,* in *Seminario di Studi Bonifiche e drenaggi con anfore in epoca romana: aspetti tecnici e topografici (Padova, ottobre 1995)* (in corso di stampa).

Pasquinucci M. *et al.* 1995, *La ceramica di VI-VII sec. da Vada Volaterrana,* in *Colloquio in onore di J. Hayes, Ceramica in Italia: VI-VII secolo,* (Roma 11-13 maggio 1995), (in corso di stampa).

Ricci A., *Ceramica a pareti sottili,* in AA.VV., *Atlante delle forme ceramiche II. Ceramica fine romana nel bacino del Mediterraneo (tardo ellenismo e primo impero),* EAA Suppl., Roma 1985, 231-357.

RIGOIR J. 1968, *Le sigillées paléochrétiennes grises et orangées*, «Gallia», 26, 177-244.

SCHURING J.M. 1988, *Terra Sigillata Africana from the San Sisto Vecchio in Rome*, «Bulletin Antieke Beschaving», 63, 1-48.

Settefinestre 1985 = A. CARANDINI, A. RICCI (edd.), *Una villa schiavistica nell'Etruria romana*, Modena, Edizioni Panini.

VALENTI M. 1991, *Materiali ceramici tardoantichi dal territorio senese: contributo alla tipologizzazione della ceramica comune di produzione locale*, «Archeologia Medievale», 18, 737-754.

ABSTRACT

Morphologic and archeometric studies and quantitative analyses are carried out on the utilitarian pottery from the horrea located in the harbour quarter of Vada Volaterrana (S. Gaetano di Vada, Rosignano Marittimo, Livorno). We try to define the functional, morphologic and technical characteristics of this ware, dated I-VIIth cent. A.D.

The relations between the utilitarian pottery and the other kinds of ware (thin walled pottery, Italian terra sigillata, African terra sigillata and so on) are studied. 64 different fabric were identified; 65% of the utilitarian pottery was made in the North coastal Etruria; considerable imports from Northern Africa and, in smaller quantities, from Central-Southern Italy and Eastern Mediterranean coasts were identified.

The great trade and the local "Roman" productions continued at least up to the end of the VIth cent. A.D.

The situation changes in the first half of the VIIth cent.: Mediterranean commercial flows ended and the local coarse pottery, now far away from "Roman" traditions, changed into a protomedieval fabric.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 515-526

VISUALIZZAZIONE GRAFICA E ARCHEOMETALLURGIA: LINGOTTI DA SITI ETRUSCHI DELL'EMILIA

In questa occasione vengono presentati i risultati delle analisi chimiche effettuate su lingotti metallici dell'Etruria padana. Nella fattispecie sono stati presi in esame reperti provenienti da Parma-Fraore dove nel secolo scorso erano stati recuperati frammenti di aes rude all'interno di una tomba ad inumazione datata all'inizio del V sec. a.C. e da Parma-Quingento di S. Prospero dove il Pigorini recuperò nel 1871 parte di un ripostiglio contenente diversi pani contrassegnati dall'impronta del ramo secco (MARINI CALVANI, CATARSI DALL'AGLIO 1988; MARINI CALVANI, CATARSI DALL'AGLIO1989) e da Marzabotto (BO), dove negli scavi ottocenteschi vennero in luce due pezzi di *aes signatum* in contesti databili tra VI e V sec. a.C. (MALNATI 1988). A questi si aggiungono i materiali recentemente rinvenuti a Case Nuove di Siccomonte - Cabriolo nel Fidentino all'interno di un vasto insediamento protostorico databile tra il primo quarto del VI sec. a.C. e gli inizi del IV sec. a.C., che si viene a porre come la testimonianza più occidentale a noi nota dell'espansione etrusca in Val Padana (CATARSI DALL'AGLIO, SASSATELLI 1991-92; CATARSI DALL'AGLIO 1994).

I risultati ottenuti, abbinando le risorse dei software utilizzati dai computer ai valori ottenuti su un determinato campione, mediante analisi chimico-fisico-strutturali e metallografiche, sono stati possibili grazie ad una tecnica di campionamento derivata da un'esperienza pratica sul restauro maturata in lunghi anni di ricerca nel settore, che ha permesso di mettere a punto un metodo di prelievo che non lascia traccia sull'oggetto e che, con pochi milligrammi di campione, permette abitualmente di evidenziare la presenza di circa 15 elementi componenti la lega.

Il campione prelevato, dopo essere stato accuratamente pesato, è stato trattato chimicamente ed infine sottoposto a lettura mediante spettrofotometro ad assorbimento atomico, anche se da qualche tempo si è dato luogo ad una serie di uguali misure effettuate con la spettrofotometro a plasma. Con questo tipo di analisi si effettua una misura quali-quantitativa degli elementi costituenti la lega.

La prima serie di lingotti da noi esaminati è costituita da un nucleo proveniente da Marzabotto che ha dato i risultati riportati in tabella (Tav. XXIV, A).

I dati ottenuti sono stati trascritti utilizzando il programma Excel di Windows sia nella versione 4.0 che nella versione 5.0, essendosi svolta la ricerca in tempi diversi.

Tabella dei risultati

Ident.	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Bi	Au	Co	As	Cd	Ni	Ag
18597	97,9		0,79	0,07	0,18	0,03	0,61		0,01	0,37		0,06	0,23
4790	96,8		0,09	0,03	0,71	0,26	0,6		0,19	1,21		0,12	0,17
4791b	96,5		0,28	0,26	1,45	0,42	0,1		0,03	0,23		0,07	0,28
Rip3	98,1		0,89	0,02	0,11	0,12	1,27		0,01	0,38		0,03	0,19
1604	94,2		2,06	0,03	0,98	0,2	0,09		0,14	2,98		0,12	0,1
18578a	66		0,1	0,32	31,6	0,1	0,04		0,15	0,3		0,02	0,18
18578b	64,7		0,09	0,35	32,7	0,07	0,04		0,15	0,53		0,03	0,16
4784	61,4		0,17	0,62	35,5	0,34	0,07		0,14	0,65		0,03	0,37
4785	79,2		0,06	1,87	16,6	0,21	0,16		0,12	0,51		0,04	0,32
4786	72,5		0,03	0,24	25,1	0,07	0,04		0,15	0,19		0,02	0,2
4787	67,2		0,7	0,29	29,4	0,41			0,06	0,6		0,04	0,19
4788	64,5		0,16	0,36	31,1	0,09	0,04		0,12	0,52		0,04	0,13
4789	69		0,59	0,21	32,7	0,35			0,06	0,58		0,04	0,21
Rip1	72,7		0,33	0,33	25		0,09		0,12	0,27		0,03	0,08
18579	42,1		55,2	0,13	0,21	0,22			0,01	1,14		0,02	0,17
18580	44,1		48,3	0,01	0,23	5,27			0,01	1,61		0,6	0,76
18581	31,6		63,6	0	0,19	2,46			0,04	1,45		0,73	0,62
1601	48,6		48,3	0,03	0,03	1,77	0,04			1,52		0,42	0,21
1602	49		49	0,05	0,07	0,11	0,07			0,1		0,01	0,06
Rip4	83,5	0,2	12,7	0,59	0,1	1,38	1,27			1,14		0,02	0,19
1600	51	6,76	40,5	0,1	0,1	0,05	0,1			0,24		0,02	0,06
1603	84	12,9	0,74	0,03	0,09	0,02	0,08		0,05	0,29		0,06	0,05
Rip2	86	11,9	0,74	0,09	0,22		0,02		0,01	0,44		0,06	0,09

Fig. 1

Dall'esame della tabella è possibile vedere che tutti gli oggetti sono caratterizzati da una consistente presenza di rame; per un secondo gruppo di lingotti si evidenzia, oltre al rame, anche la presenza di piombo; per altri ancora anche la presenza di ferro.

Trasferendo i dati analitici riportati in tabella in grafico con un diagramma a barre (grafico in Tav. XXIV, a), ci rendiamo immediatamente conto non solo delle differenze evidenti che caratterizzano gli oggetti, ma, dalla nuova facilità di lettura ottenuta mediante il grafico, ci si accorge che i lingotti possono essere ulteriormente caratterizzati per il loro appartenere a tre gruppi che evidenziano non trascurabili differenze.

Aggiungendo ulteriori risultati analitici ottenuti questa volta dalle indagini condotte su lingotti dell'area parmense, trasferiti prima in tabella (Fig.

1) e poi in grafico (Tav. XXIV, b), ci si rende conto di una caratterizzazione perfettamente confrontabile con quella esaminata in precedenza.

Si assiste inoltre alla presenza di un ulteriore quarto gruppo, forse meglio osservabile nel grafico successivo (Fig. 2), caratterizzato da concentrazioni di un elemento, quale lo stagno, la cui presenza non era risultata precedentemente per gli altri lingotti indagati. Occorre sottolineare che questa presenza, che si riscontra su qualche lingotto e che sembra chiaramente indicare la presenza di un quarto gruppo di lingotti da fusione, induce seriamente a pensare a questi lingotti come ad un prodotto a rame-stagno pronto per fondere oggetti diversi.

Successivamente sono stati accorpati tutti i risultati analitici in un'unica tabella (Fig. 3) che risulta anch'essa essere costituita da tre principali gruppi compositivi (rame, rame-piombo, rame-ferro) e da un ulteriore gruppo con presenza di stagno.

In questo caso risulta ancora più evidente la caratterizzazione ottenuta dal grafico (Tav. XXV) che meglio evidenzia i gruppi e gli elementi che caratterizzano tali lingotti.

Le ulteriori e più recenti indagini sono state condotte su un campione caratterizzato da lingotti ed oggetti.

In questo caso il software utilizzato si è dimostrato uno strumento notevolmente efficace che ha permesso letture diverse utilizzando alcuni degli strumenti del programma (cfr. la tabella – Fig. 4 – in cui sono riportati in sequenza di campionamento gli esami effettuati sull'ultimo campione di oggetti).

Per leggere meglio i dati analitici si è poi realizzata una seconda tabella in cui gli oggetti erano ordinati secondo il valore decrescente del rame (Fig. 5); un'altra ancora con gli oggetti ordinati secondo i valori decrescenti del piombo (Fig. 6) ed una terza per valori decrescenti dello stagno (Fig. 7).

Se esaminiamo il grafico corrispondente (Figg. 8-10) alla tabella completa di tutti i dati, appare ancora più evidente che le forti concentrazioni di uno o due elementi (ad esempio rame e rame-piombo) corrispondono a tipologie riferibili a lingotti; le fasce intermedie e del grafico e delle tabelle con significativi contenuti di altri alliganti, quali lo stagno, si riferiscono a tipologie di oggetti, quali parti di fibule, laminette ... tanto da avvalorare ulteriormente l'ipotesi della presenza di lingotti a rame e stagno necessari per la fusione degli oggetti in bronzo.

Abbiamo poi inserito tutti i dati di queste analisi in un'unica tabella e ne abbiamo ricavato un grafico (Figg. 11-13) che, nonostante la separazione in tre videate dato il grande numero di campioni, permette di avere ulteriori conferme meglio evidenziando le presenze degli elementi a costituire quattro complessi: rame puro, rame-stagno, rame-ferro, rame-piombo.

Anche in questo caso Excel ha permesso di poter leggere in maniera diversa non solo i valori decrescenti delle concentrazioni, ma anche i relativi

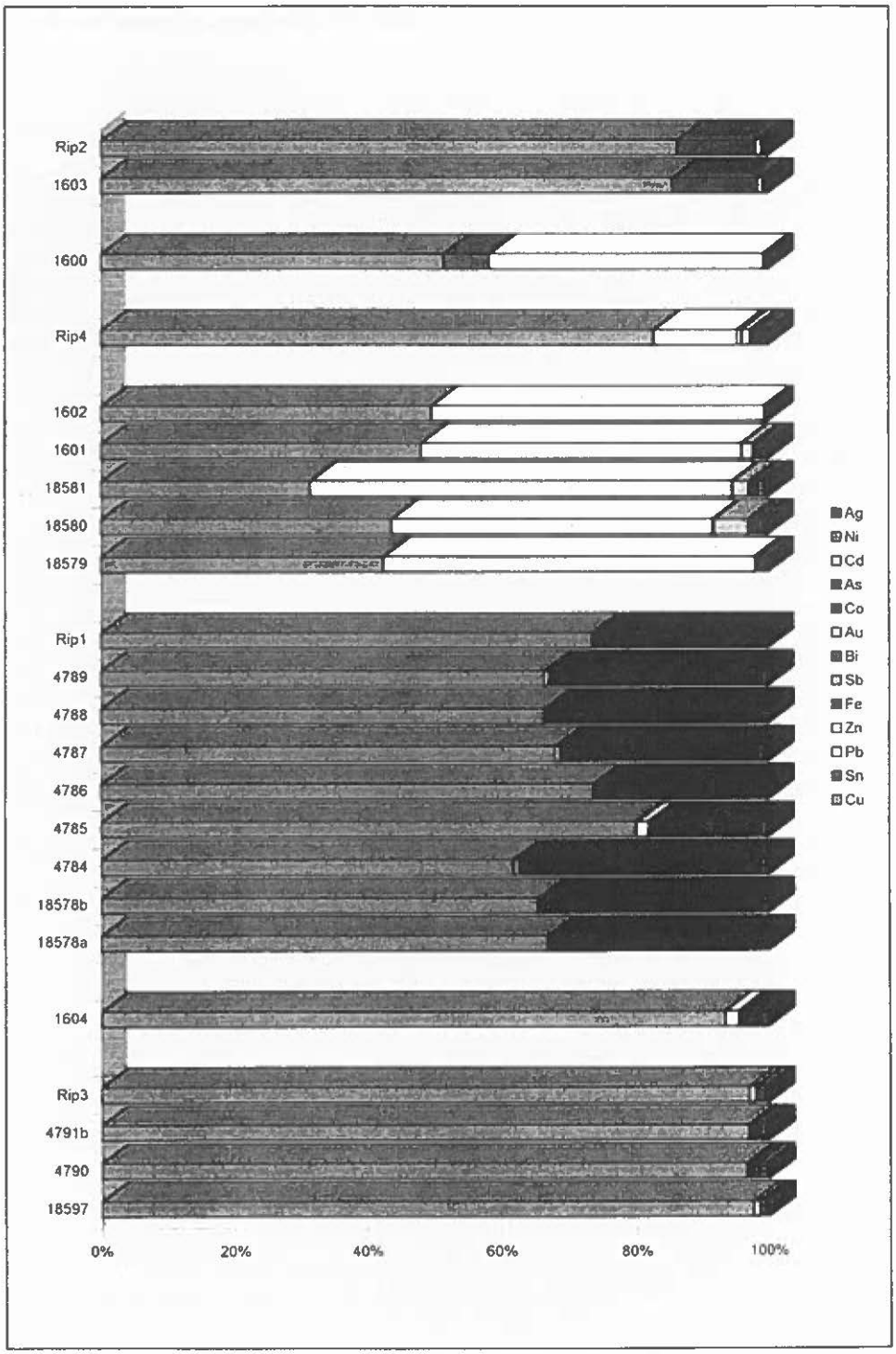

Rip2
1603
1600
Rip4
1602
1601
18581
18580
18579
Rip1
4789
4788
4787
4786
4785
4784
18578b
18578a
1604
Rip3
4791b
4790
18597
0%
20%
40%
60%
80%
100%
Ag
Ni
Cd
As
Co
Au
Bi
Sb
Fe
Zn
Pb
Sn
Cu

Fig. 2

Ident.	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Bi	Au	Co	As	Cd	Ni	Ag	Mn
354	97,83		0,28	0,001	0,19	0,2			0,007	2,85		0,005	0,04	
355	97,93		0,28	0,04	tracce	0,14			0,01	2,022		0,113	0,1	
356	97,79		1,34		0,09	0,07	0,62			0,451		0,082	0,2	
18597	97,85		0,79	0,07	0,18	0,03	0,61		0,005	0,37		0,058	0,232	
4790	96,76		0,09	0,03	0,71	0,26	0,6		0,187	1,213		0,121	0,165	
4791b	96,48		0,28	0,26	1,45	0,42	0,1		0,034	0,23		0,065	0,275	
Rip3	98,11		0,89	0,02	0,11	0,12	1,27		0,01	0,38		0,03	0,19	
1604	94,2		2,06	0,03	0,98	0,2	0,09		0,143	2,98		0,12	0,1	
18578a	65,96		0,1	0,32	31,56	0,1	0,04		0,15	0,301		0,022	0,176	
18578b	64,73		0,09	0,35	32,72	0,07	0,04		0,153	0,533		0,025	0,155	
4784	61,36		0,17	0,62	35,47	0,34	0,07		0,141	0,651		0,03	0,372	
4785	79,23		0,06	1,87	16,61	0,21	0,16		0,12	0,511		0,035	0,318	
4786	72,52		0,03	0,24	25,12	0,07	0,04		0,149	0,186		0,022	0,195	
4787	67,18		0,7	0,29	29,35	0,41			0,06	0,6		0,037	0,187	
4788	64,48		0,16	0,36	31,05	0,09	0,04		0,121	0,521		0,037	0,126	
4789	68,99		0,59	0,21	32,72	0,35			0,06	0,583		0,036	0,209	
Rip1	72,72		0,33	0,33	25,03		0,09		0,12	0,27		0,027	0,08	
350	82,52		0,21	0,45	14,71	0,52	0,11		0,109	1		0,024	0,18	
351	68,05		0,61	0,22	29,41	0,44	0,03		0,054	1,126		0,21	0,09	
353	54,74		1,33	0,93	38,62	1,46			0,007	2,147		0,083	0,13	
18579	42,11		55,2	0,13	0,21	0,22			0,013	1,143		0,023	0,17	
18580	44,12		48,34	0,009	0,23	5,27			0,013	1,612		0,6	0,756	
18581	31,62		63,63	0,001	0,19	2,46			0,041	1,449		0,73	0,62	
1601	48,62		48,29	0,03	0,03	1,77	0,04			1,52		0,42	0,21	
1602	49,01		49,04	0,05	0,07	0,11	0,07			0,1		0,01	0,06	
349	65,5		27,1	4,44	1,57	0,13	0,05		0,015	1,6		0,024	0,26	
352	87,8		4,51	0,2	4,11	1,06			0,114	1,426		0,21	0,33	
357	89,12		4,66	0,08	3,89	0,2	0,76		0,044	0,778		0,083	0,24	
Rip4	83,46	0,2	12,68	0,59	0,1	1,38	1,27			1,14		0,02	0,19	
1600	50,99	6,76	40,5	0,1	0,1	0,05	0,1			0,24		0,02	0,06	
1603	84	12,86	0,74	0,03	0,09	0,02	0,08		0,05	0,29		0,06	0,05	
Rip2	85,97	11,93	0,74	0,09	0,22		0,02		0,01	0,44		0,059	0,09	

Fig. 3

decrementi o incrementi degli altri elementi costituenti una lega.

I grafici di Excel permettono inoltre di poter meglio valutare le concentrazioni relative dei più importanti elementi costituenti una lega.

Appaiono evidenti anche le differenze nell'uso di Excel 4 ed Excel 5, sia nella fase della costruzione delle tabelle che in quella dei grafici, come è mostrato dal confronto della stessa tabella graficata in Excel 4.0 (Fig. 14) e poi in Excel 5.0 (Fig. 15).

Le analisi che sono state programmate hanno lo scopo di avere informazioni su un campione maggiormente allargato in modo da poter ulteriormente precisare la conoscenza di questo settore di studio.

L'uso della grafica computerizzata rappresenta, come è apparso da quan-

							Sic 95										
Oggetto	Ident.	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Bi	Au	Co	As	Cd	Ni	Ag	Mn	Na	K
Lingotto	Sic 18	98 600			0,020	0,020					0,580			0,050		0,018	0,016
Lingotto	Sic 51	98 360		0,080	0,030	0,100		0,040			0,790		0,020	0,230		0,026	0,027
Lingotto	Sic 16	98 300			0,100	0,040	0,290	0,370		0,021	0,660			0,300		0,047	0,034
Lingotto	Sic 41	97 670	0,650		0,020	0,050					0,490			0,120		0,019	0,017
Lingotto	Sic 25	97 280		0,210	0,030	0,040	0,070				1,170			0,170		0,019	0,013
Lingotto	Sic 48	96 730			0,080	0,330		0,050			0,610			0,150		0,029	0,029
Lingotto	Sic 34	96 710		0,110	0,760	0,100		0,200		0,054	0,660		0,020	0,330		0,026	0,035
Lingotto	Sic 17	95 950	0,950	0,440	0,160	0,770		0,070		0,075	0,780			0,370		0,023	0,019
Verghetta	Sic 30	92 230	4,530	0,680	0,020	0,050	0,190			0,039	0,870		0,200	0,670		0,014	0,011
Lingotto	Sic 49	91 760	7,400		0,090	0,100								0,050		0,034	0,024
Verghetta	Sic 39	90 250	7 280	10,660	0,260	0,270		0,070		0,028	0,600		0,030	0,210		0,035	0,018
Rastrell.	Sic 42	90 080	7,630	0,860	0,020	0,040		0,220			0,630		0,100	0,300		0,041	0,033
Barretta	Sic 37	89 370	7,470	1,390	0,005	0,170	0,005				0,500		0,100	0,280		0,022	0,017
Lingotto	Sic 47	89 210	9,460	0,090	0,050	0,080				0,026	0,540		0,370	0,980		0,033	0,036
Lingotto	Sic 50	89 060			0,006	0,180	5,360	0,050					0,210	0,160		0,037	0,024
Laminetta	Sic 40	88 670	9,810		0,020	0,090					0,560			0,020		0,018	
Oggetto?	Sic 26	88 420	6,020	2,290	0,020	0,390		0,700			0,600			0,110		0,028	0,015
Lingotto	Sic 43	86 780	10,340	0,730	0,010	0,290	0,270			0,018	0,500		0,030	0,320		0,056	0,047
Ogg.in lam	Sic 46	86 580	11,760		0,010	0,045					0,570		0,060	0,150		0,022	0,016
Lingoimpu	Sic 52	86 280	0,270	0,150	0,010	0,180		0,120			0,540		0,100	0,460		0,027	0,029
Fibula	Sic 31	86 260	10,930	0,550	0,020	0,040		0,060			0,830		0,730	2,550		0,022	0,044
Oggetto?	Sic 45	85 790	8,170	2,420	0,010	0,030	0,270	0,240		0,011	0,770		0,420	0,850		0,014	0,011
Fibula	Sic 38	85 720	11,320	1,530	0,010	0,030					0,650		0,260	0,520		0,015	0,020
Oggetto?	Sic 35	85 280	9,300	1,670	0,010	0,020	0,500				0,790		0,060	0,470		0,021	0,015
Molla fib.	Sic 44	85,070	12,250	0,810	0,020						0,700		0,040	0,250		0,015	0,011
Lingotto	Sic 33	83 950	2,890	10,740	0,020		0,120	0,070			0,600		0,210	0,150		0,038	0,021
Laminetta	Sic 23	83 310	12,000	0,050	0,020	0,320	0,580				0,740		0,350	1,580		0,025	
Spillone	Sic 32	81,820	11,000	5,440	0,020			0,310			0,530		0,040	0,290		0,030	0,020
Lingotto	Sic 27	74 560		23,990	0,060	0,040		0,080			0,500			0,170		0,021	0,024
Cavallino	Sic 36	72 090	7,040	19,430	0,040			0,070			0,660		0,020	0,170		0,032	0,017
Laminetta	Sic 15	68 710		25,520	0,070	2,000		0,260		0,046	0,960		0,260	0,820		0,650	0,001
Lingotto	Sic 24	63 890		31,030	0,010	0,040	2,430						0,730	1,030		0,044	0,072
Lamina	Sic 29	63 500	0,410	32,260	0,310	0,450	0,420	0,080		0,025	0,490		0,450	0,490		0,016	0,018
Lingotto	Sic 19	58 430		40,120	0,090	0,040		0,050			0,630		0,010	0,130		0,039	0,020
Lingotto	Sic 21	56 980		41,270	0,040	0,110				0,049	0,460			0,040		0,380	0,021
Barretta	Sic 22	0 330		97,880	0,004	0,010		0,040			0,560			0,100		0,049	0,028
Lingotto	Sic 20	51 740		39,770	0,020	0,060	2,600	0,040		0,118			1,500	3,110		0,005	0,041
Anello	Sic 28																

Fig. 4

								Sic95									
Oggetto	Ident.	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Bi	Au	Co	As	Cd	Ni	Ag	Mn	Na	K
Laminetta	Sic 15	68,710		25,520	0,070	2,000		0,260		0,046	0,960		0,260	0,820		0,650	0,001
Lingotto	Sic 16	98,300			0,100	0,040	0,290	0,370		0,021	0,660			0,300		0,047	0,034
Lingotto	Sic 17	95,950	0,950	0,440	0,160	0,770		0,070		0,075	0,780			0,370		0,023	0,019
Lingotto	Sic 18	98,600			0,020	0,020					0,580			0,050		0,018	0,016
Lingotto	Sic 19	58,430		40,120	0,090	0,040		0,050			0,630		0,010	0,130		0,039	0,020
Lingotto	Sic 20	51,740		39,770	0,020	0,060	2,600	0,040		0,118			1,500	3,110		0,005	0,041
Lingotto	Sic 21	56,980		41,270	0,040	0,110				0,049	0,460			0,040		0,380	0,021
Barretta	Sic 22	0,330		97,880	0,004	0,010		0,040			0,560			0,100		0,049	0,028
Laminetta	Sic 23	83,310	12,000	0,050	0,020	0,320	0,580				0,740		0,350	1,580		0,025	
Lingotto	Sic 24	63,890		31,030	0,010	0,040	2,430						0,730	1,030		0,044	0,072
Lingotto	Sic 25	97,280		0,210	0,030	0,040	0,070				1,170			0,170		0,019	0,013
Oggetto?	Sic 26	88,420	6,020	2,290	0,020	0,390		0,700			0,600			0,110		0,028	0,015
Lingotto	Sic 27	74,560		23,990	0,060	0,040		0,080			0,500			0,170		0,021	0,024
Anello	Sic 28																
Lamina	Sic 29	63,500	0,410	32,260	0,310	0,450	0,420	0,080		0,025	0,490		0,450	0,490		0,016	0,018
Verghetta	Sic 30	92,230	4,530	0,680	0,020	0,050	0,190			0,039	0,870		0,200	0,670		0,014	0,011
Fibula	Sic 31	86,260	10,930	0,550	0,020	0,040		0,060			0,830		0,730	2,550		0,022	0,044
Spillone	Sic 32	81,820	11,000	5,440	0,020			0,310			0,530		0,040	0,290		0,030	0,020
Lingotto	Sic 33	83,950	2,890	10,740	0,020		0,120	0,070			0,600		0,210	0,150		0,038	0,021
Lingotto	Sic 34	96,710		0,110	0,760	0,100		0,200		0,054	0,660		0,020	0,330		0,026	0,035
Oggetto?	Sic 35	85,280	9,300	1,670	0,010	0,020	0,500				0,790		0,060	0,470		0,021	0,015
Cavallino	Sic 36	72,090	7,040	19,430	0,040			0,070			0,660		0,020	0,170		0,032	0,017
Barretta	Sic 37	89,370	7,470	1,390	0,005	0,170	0,005				0,500		0,100	0,280		0,022	0,017
Fibula	Sic 38	85,720	11,320	1,530	0,010	0,030					0,650		0,260	0,520		0,015	0,020
Verghetta	Sic 39	90,250	7,280	10,660	0,260	0,270		0,070		0,028	0,600		0,030	0,210		0,035	0,018
Laminetta	Sic 40	88,670	9,810		0,020	0,090					0,560			0,020		0,018	
Lingotto	Sic 41	97,670	0,650		0,020	0,050					0,490			0,120		0,019	0,017
Rastrell.	Sic 42	90,080	7,630	0,860	0,020	0,040		0,220			0,630		0,100	0,300		0,041	0,033
Lingotto	Sic 43	86,780	10,340	0,730	0,010	0,290	0,270			0,018	0,500		0,030	0,320		0,056	0,047
Molla fib.	Sic 44	85,070	12,250	0,810	0,020						0,700		0,040	0,250		0,015	0,011
Oggetto?	Sic 45	85,790	8,170	2,420	0,010	0,030	0,270	0,240		0,011	0,770		0,420	0,850		0,014	0,011
Ogg.in lam	Sic 46	86,580	11,760		0,010	0,045					0,570		0,060	0,150		0,022	0,016
Lingotto	Sic 47	89,210	9,460	0,090	0,050	0,080				0,026	0,540		0,370	0,980		0,033	0,036
Lingotto	Sic 48	96,730			0,080	0,330		0,050			0,610			0,150		0,029	0,029
Lingotto	Sic 49	91,760	7,400		0,090	0,100								0,050		0,034	0,024
Lingotto	Sic 50	89,060			0,006	0,180	5,360	0,050					0,210	0,160		0,037	0,024
Lingotto	Sic 51	98,360		0,080	0,030	0,100		0,040			0,790		0,020	0,230		0,026	0,027
Lingoimpu	Sic 52	86,280	0,270	0,150	0,010	0,180		0,120			0,540		0,100	0,460		0,027	0,029

Fig. 5

Oggetto	Ident.	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Bi	Au	Co	As	Cd	Ni	Ag	Mn	Na	K
Barretta	Sic 22	0,330		97,880	0,004	0,010		0,040			0,560			0,100		0,049	0,028
Lingotto	Sic 21	56,980		41,270	0,040	0,110				0,049	0,460			0,040		0,380	0,021
Lingotto	Sic 19	58,430		40,120	0,090	0,040		0,050			0,630		0,010	0,130		0,039	0,020
Lingotto	Sic 20	51,740		39,770	0,020	0,060	2,600	0,040		0,118			1,500	3,110		0,005	0,041
Lamina	Sic 29	63,500	0,410	32,260	0,310	0,450	0,420	0,080		0,025	0,490		0,450	0,490		0,016	0,018
Lingotto	Sic 24	63,890		31,030	0,010	0,040	2,430						0,730	1,030		0,044	0,072
Laminetta	Sic 15	68,710		25,520	0,070	2,000		0,260		0,046	0,960		0,260	0,820		0,650	0,001
Lingotto	Sic 27	74,560		23,990	0,060	0,040		0,080			0,500			0,170		0,021	0,024
Cavallino	Sic 36	72,090	7,040	19,430	0,040			0,070			0,660		0,020	0,170		0,032	0,017
Lingotto	Sic 33	83,950	2,890	10,740	0,020		0,120	0,070			0,600		0,210	0,150		0,038	0,021
Verghetta	Sic 39	90,250	7,280	10,660	0,260	0,270		0,070		0,028	0,600		0,030	0,210		0,035	0,018
Spillone	Sic 32	81,820	11,000	5,440	0,020			0,310			0,530		0,040	0,290		0,030	0,020
Oggetto?	Sic 45	85,790	8,170	2,420	0,010	0,030	0,270	0,240		0,011	0,770		0,420	0,850		0,014	0,011
Oggetto?	Sic 26	88,420	6,020	2,290	0,020	0,390		0,700			0,600			0,110		0,028	0,015
Oggetto?	Sic 35	85,280	9,300	1,670	0,010	0,020	0,500				0,790		0,060	0,470		0,021	0,015
Fibula	Sic 38	85,720	11,320	1,530	0,010	0,030					0,650		0,260	0,520		0,015	0,020
Barretta	Sic 37	89,370	7,470	1,390	0,005	0,170	0,005				0,500		0,100	0,280		0,022	0,017
Rastrell.	Sic 42	90,080	7,630	0,860	0,020	0,040		0,220			0,630		0,100	0,300		0,041	0,033
Molla fib.	Sic 44	85,070	12,250	0,810	0,020						0,700		0,040	0,250		0,015	0,011
Lingotto	Sic 43	86,780	10,340	0,730	0,010	0,290	0,270			0,018	0,500		0,030	0,320		0,056	0,047
Verghetta	Sic 30	92,230	4,530	0,680	0,020	0,050	0,190			0,039	0,870		0,200	0,670		0,014	0,011
Fibula	Sic 31	86,260	10,930	0,550	0,020	0,040		0,060			0,830		0,730	2,550		0,022	0,044
Lingotto	Sic 17	95,950	0,950	0,440	0,160	0,770		0,070		0,075	0,780			0,370		0,023	0,019
Lingotto	Sic 25	97,280		0,210	0,030	0,040	0,070				1,170			0,170		0,019	0,013
Lingoimpu	Sic 52	86,280	0,270	0,150	0,010	0,180		0,120			0,540		0,100	0,460		0,027	0,029
Lingotto	Sic 34	96,710		0,110	0,760	0,100		0,200		0,054	0,660		0,020	0,330		0,026	0,035
Lingotto	Sic 47	89,210	9,460	0,090	0,050	0,080				0,026	0,540		0,370	0,980		0,033	0,038
Lingotto	Sic 51	98,360		0,080	0,030	0,100		0,040			0,790		0,020	0,230		0,026	0,027
Laminetta	Sic 23	83,310	12,000	0,050	0,020	0,320	0,580				0,740		0,350	1,580		0,025	
Lingotto	Sic 18	98,600			0,020	0,020					0,580			0,050		0,018	0,016
Lingotto	Sic 16	98,300			0,100	0,040	0,290	0,370		0,021	0,660			0,300		0,047	0,034
Lingotto	Sic 41	97,670	0,650		0,020	0,050					0,490			0,120		0,019	0,017
Lingotto	Sic 48	96,730			0,080	0,330		0,050			0,610			0,150		0,029	0,029
Lingotto	Sic 49	91,760	7,400		0,090	0,100								0,050		0,034	0,024
Lingotto	Sic 50	89,060			0,006	0,180	5,360	0,050					0,210	0,160		0,037	0,024
Laminetta	Sic 40	88,670	9,810		0,020	0,090					0,560			0,020		0,018	
Ogg.in lam.	Sic 46	86,580	11,760		0,010	0,045					0,570		0,060	0,150		0,022	0,016
Anello	Sic 28																

Fig. 6

Oggetto	Ident.	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Bi	Au	Co	As	Cd	Ni	Ag	Mn	Na	K
Molla fib.	Sic 44	85,070	12,250	0,810	0,020						0,700		0,040	0,250		0,015	0,011
Laminetta	Sic 23	83,310	12,000	0,050	0,020	0,320	0,580				0,740		0,350	1,580		0,025	
Ogg.in lam.	Sic 46	86,580	11,760		0,010	0,045					0,570		0,060	0,150		0,022	0,016
Fibula	Sic 38	85,720	11,320	1,530	0,010	0,030					0,650		0,260	0,520		0,015	0,020
Spillone	Sic 32	81,820	11,000	5,440	0,020			0,310			0,530		0,040	0,290		0,030	0,020
Fibula	Sic 31	86,260	10,930	0,550	0,020	0,040		0,060			0,830		0,730	2,550		0,022	0,044
Lingotto	Sic 43	86,780	10,340	0,730	0,010	0,290	0,270			0,018	0,500		0,030	0,320		0,056	0,047
Laminetta	Sic 40	88,670	9,810		0,020	0,090					0,560			0,020		0,018	
Lingotto	Sic 47	89,210	9,460	0,090	0,050	0,080				0,026	0,540		0,370	0,980		0,033	0,038
Oggetto?	Sic 35	85,280	9,300	1,670	0,010	0,020	0,500				0,790		0,060	0,470		0,021	0,015
Oggetto?	Sic 45	85,790	8,170	2,420	0,010	0,030	0,270	0,240		0,011	0,770		0,420	0,850		0,014	0,011
Rastrell.	Sic 42	90,080	7,630	0,860	0,020	0,040		0,220			0,630		0,100	0,300		0,041	0,033
Barrella	Sic 37	89,370	7,470	1,390	0,005	0,170	0,005				0,500		0,100	0,280		0,022	0,017
Lingotto	Sic 49	91,760	7,400		0,090	0,100								0,050		0,034	0,024
Verghetta	Sic 39	90,250	7,280	10,660	0,260	0,270		0,070		0,028	0,600		0,030	0,210		0,035	0,018
Cavallino	Sic 36	72,090	7,040	19,430	0,040			0,070			0,660		0,020	0,170		0,032	0,017
Oggetto?	Sic 26	88,420	6,020	2,290	0,020	0,390		0,700			0,600			0,110		0,028	0,015
Verghetta	Sic 30	92,230	4,530	0,680	0,020	0,050	0,190			0,039	0,870		0,200	0,670		0,014	0,011
Lingotto	Sic 33	83,950	2,890	10,740	0,020		0,120	0,070			0,600		0,210	0,150		0,038	0,021
Lingotto	Sic 17	95,950	0,950	0,440	0,160	0,770		0,070		0,075	0,780			0,370		0,023	0,019
Lingotto	Sic 41	97,670	0,650		0,020	0,050					0,490			0,120		0,019	0,017
Lamina	Sic 29	63,500	0,410	32,260	0,310	0,450	0,420	0,080		0,025	0,490		0,450	0,490		0,016	0,018
Lingoimpu	Sic 52	86,280	0,270	0,150	0,010	0,180		0,120			0,540		0,100	0,460		0,027	0,029
Laminetta	Sic 15	68,710		25,520	0,070	2,000		0,260		0,046	0,960		0,260	0,820		0,650	0,001
Lingotto	Sic 16	98,300			0,100	0,040	0,290	0,370		0,021	0,660			0,300		0,047	0,034
Lingotto	Sic 18	98,600			0,020	0,020					0,580			0,050		0,018	0,016
Lingotto	Sic 19	58,430		40,120	0,090	0,040		0,050			0,630		0,010	0,130		0,039	0,020
Lingotto	Sic 20	51,740		39,770	0,020	0,060	2,600	0,040		0,118			1,500	3,110		0,005	0,041
Lingotto	Sic 21	56,980		41,270	0,040	0,110				0,049	0,460			0,040		0,380	0,021
Barretta	Sic 22	0,330		97,880	0,004	0,010		0,040			0,560			0,100		0,049	0,028
Lingotto	Sic 24	63,890		31,030	0,010	0,040	2,430						0,730	1,030		0,044	0,072
Lingotto	Sic 25	97,280		0,210	0,030	0,040	0,070				1,170			0,170		0,019	0,013
Lingotto	Sic 27	74,560		23,990	0,060	0,040		0,080			0,500			0,170		0,021	0,024
Anello	Sic 28																
Lingotto	Sic 34	96,710		0,110	0,760	0,100		0,200		0,054	0,660		0,020	0,330		0,026	0,035
Lingotto	Sic 48	96,730			0,080	0,330		0,050			0,610			0,150		0,029	0,029
Lingotto	Sic 50	89,060			0,006	0,180	5,360	0,050					0,210	0,160		0,037	0,024
Lingotto	Sic 51	98,360		0,080	0,030	0,100		0,040			0,790		0,020	0,230		0,026	0,027

Fig. 7

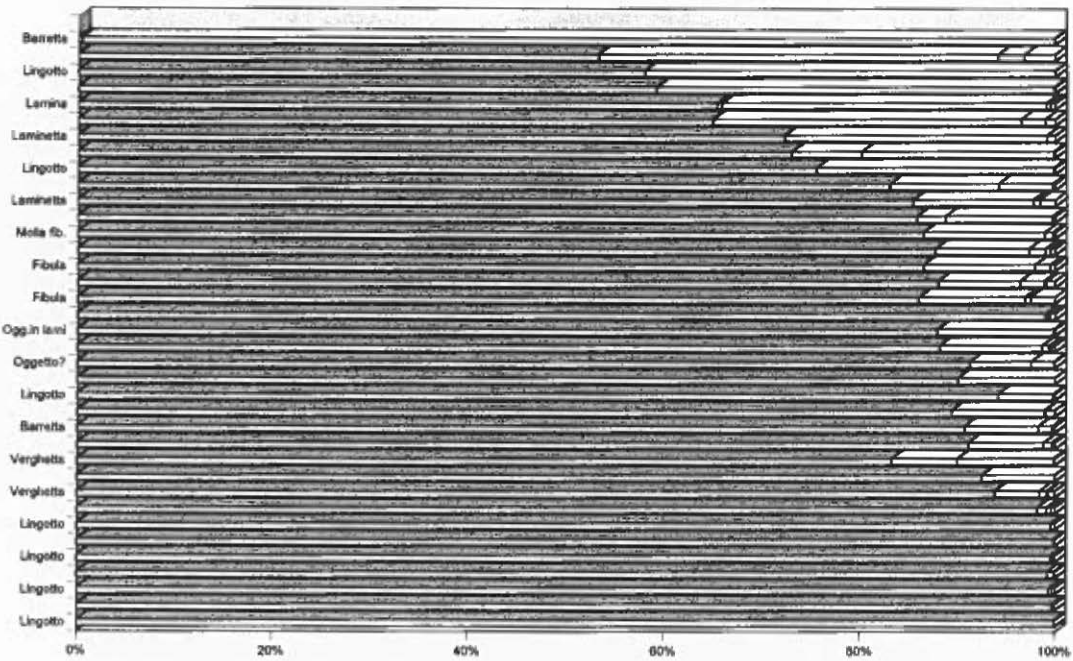

Barretta
Lingotto
Lamina
Laminetta
Lingotto
Laminetta
Molla fib.
Fibula
Fibula
Ogg.in lavo
Oggetto?
Lingotto
Barretta
Verghetta
Verghetta
Lingotto
Lingotto
Lingotto
Lingotto
0%
20%
40%
60%
80%
100%

Fig. 8

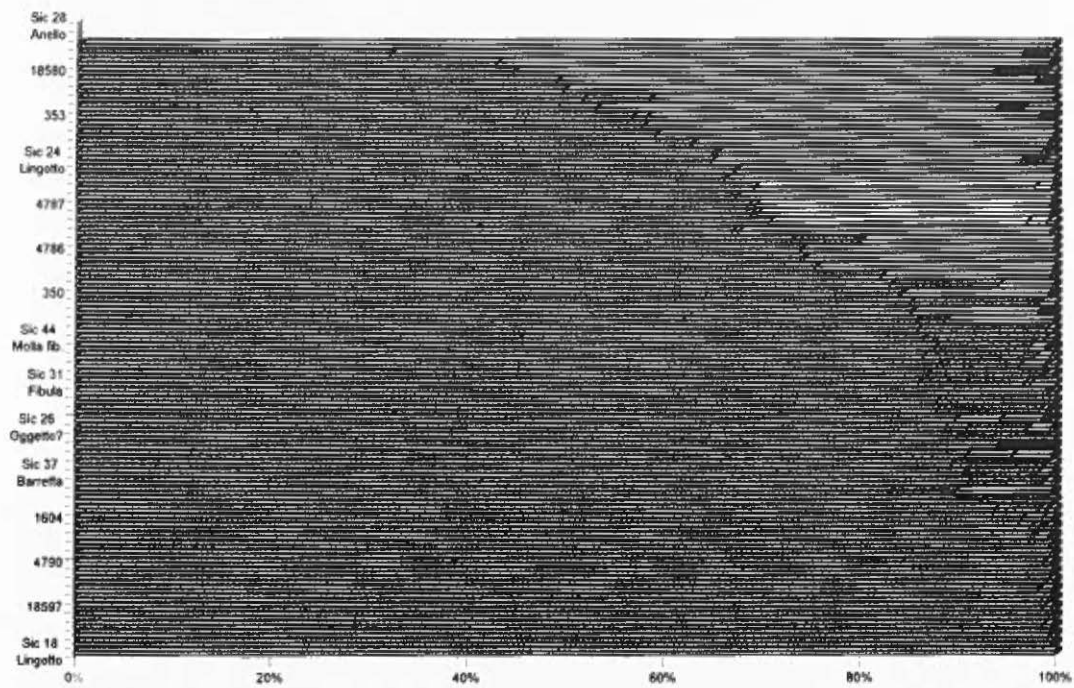

Sic 28
Anello
18580
353
Sic 24
Lingotto
4787
4786
350
Sic 44
Molla fib.
Sic 31
Fibula
Sic 26
Oggetto?
Sic 37
Barretta
1604
4790
18597
Sic 18
Lingotto
0%
20%
40%
60%
80%
100%

Fig. 9

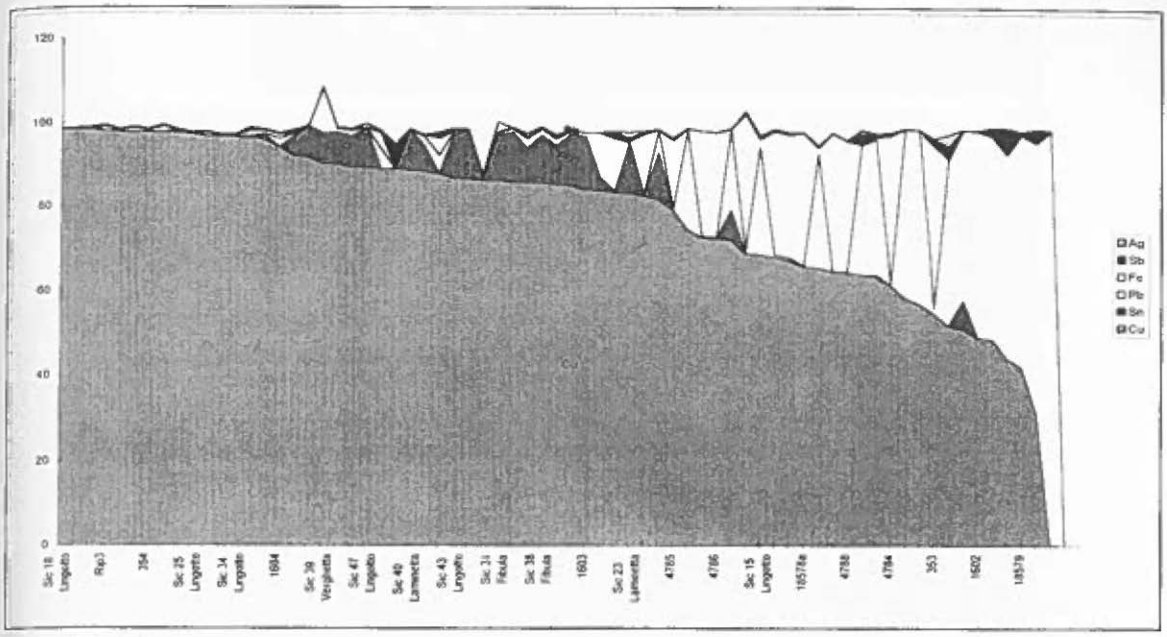

120
100
80
60
40
20
0
Ag
Sb
Fe
Pb
Sn
Cu
Sic 18 Lingotto
Rip3
354
Sic 25 Lingotto
Sic 34 Lingotto
1604
Sic 39 Vergiata
Sic 47 Lingotto
Sic 49 Lamoretta
Sic 43 Lingotto
Sic 31 Fibula
Sic 38 Fibula
1603
Sic 23 Lamoretta
4785
4786
Sic 15 Lingotto
16578a
4788
4784
353
1602
18579

Fig. 10

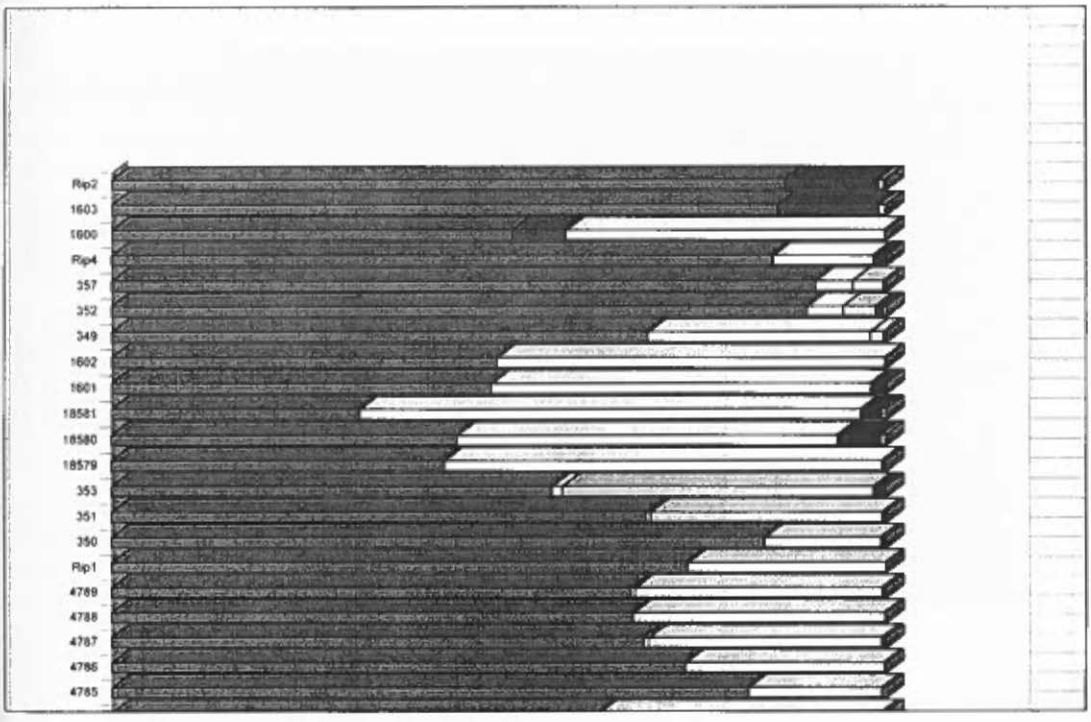

Rip2
1603
1600
Rip4
357
352
349
1602
1601
18581
18580
18579
353
351
350
Rip1
4789
4788
4787
4786
4785

Fig. 11

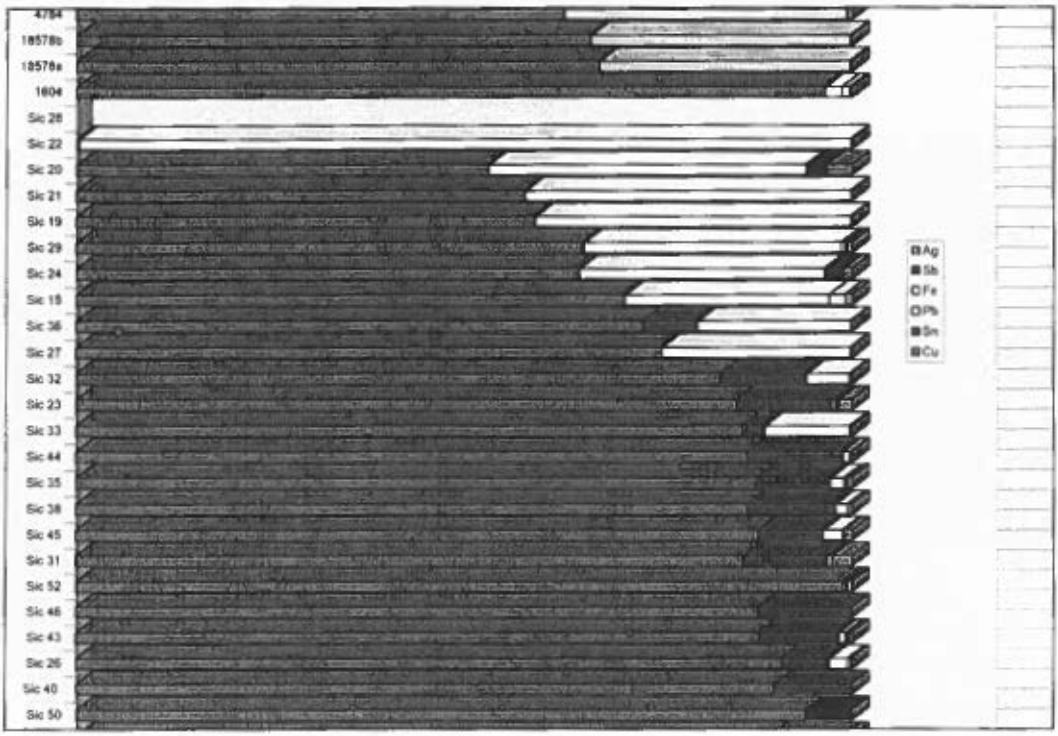

4784
18578b
18578a
1604
Sic 28
Sic 22
Sic 20
Sic 21
Sic 19
Sic 29
Sic 24
Sic 15
Sic 36
Sic 27
Sic 32
Sic 23
Sic 33
Sic 44
Sic 35
Sic 38
Sic 45
Sic 31
Sic 52
Sic 46
Sic 43
Sic 26
Sic 40
Sic 50
Ag
Sb
Fe
Pb
Sn
Cu

Fig. 12

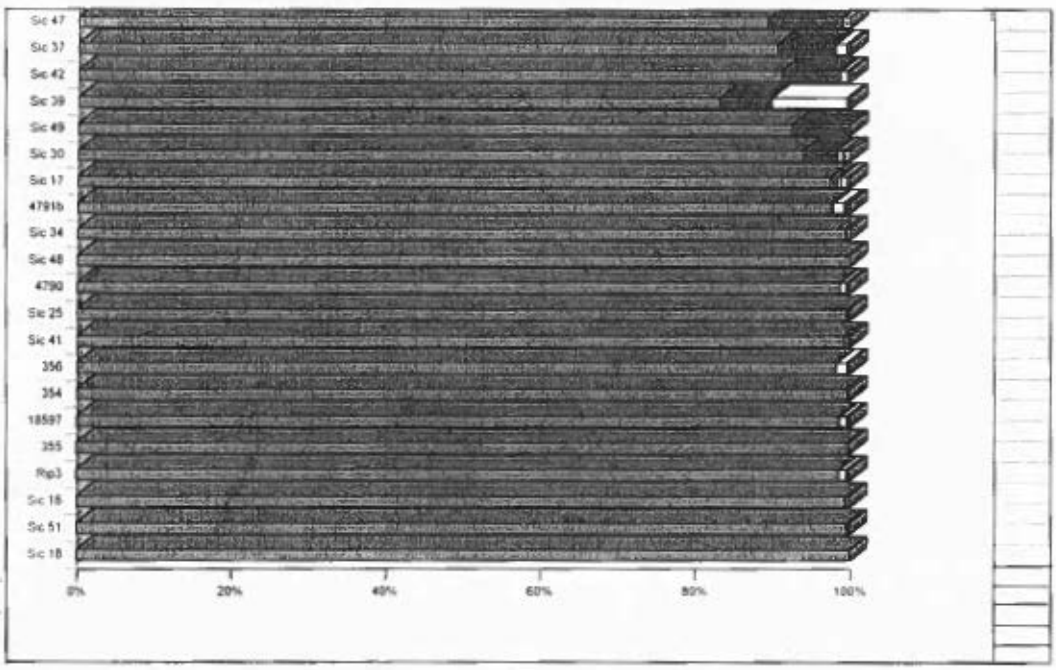

Sic 47
Sic 37
Sic 42
Sic 39
Sic 49
Sic 30
Sic 17
4791b
Sic 34
Sic 48
4790
Sic 25
Sic 41
356
354
18597
355
Rip3
Sic 18
Sic 51
Sic 16
0%
20%
40%
60%
80%
100%

Fig. 13

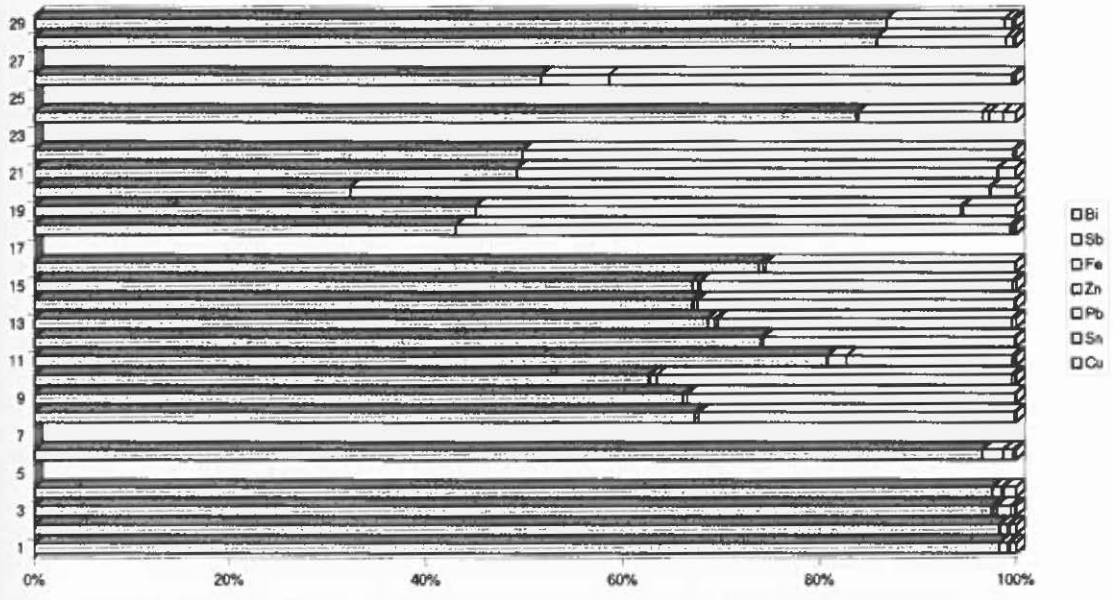

29
27
25
23
21
19
17
15
13
11
9
7
5
3
1
0%
20%
40%
60%
80%
100%
Bi
Sb
Fe
Zn
Pb
Sn
Cu

Fig. 14

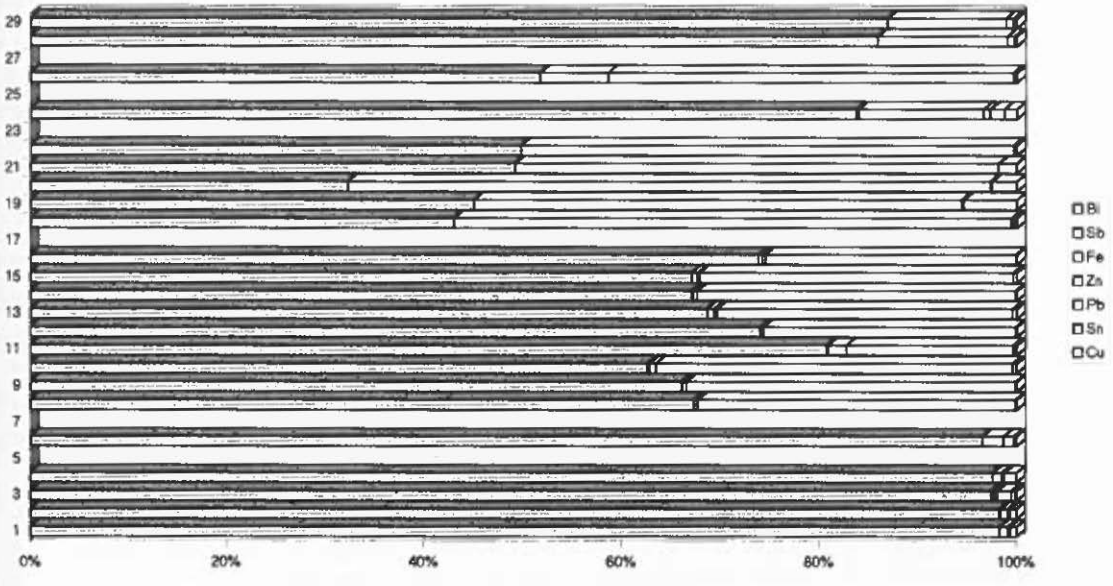

29
27
25
23
21
19
17
15
13
11
9
7
5
3
1
0%
20%
40%
60%
80%
100%
Bi
Sb
Fe
Zn
Pb
Sn
Cu

Fig. 15

to mostrato, uno strumento che permette non solo una facile lettura delle presenze di elementi costituenti una lega, ma permette anche di meglio evidenziare le differenze compositive caratterizzanti diverse classi di oggetti metallici.

Manuela Catarsi Dall'Aglio
Soprintendenza Archeologica dell'Emilia-Romagna
Museo Archeologico Nazionale, Parma

Luigi Malnati
Soprintendenza Archeologica del Veneto
Padova

Elena Antonacci
Foggia

Livio Follo
Laboratorio di Archeometallurgia e Conservazione
Bologna

BIBLIOGRAFIA

Catarsi Dall'aglio M. 1994, *Il territorio fidentino nell'antichità*, in *Fidenza*, Milano, 12-55.

Catarsi Dall'Aglio M., Sassatelli G. 1990-91, *Fidenza (PR), Cabriolo, loc. Case Nuove di Siccomonte*, «Studi e Documenti di Archeologia», 7, Bologna, 120-122.

Malnati L. 1988, *Marzabotto (Bologna)*, in *Aes signatum – Un aspetto dell'economia nell'Emilia preromana*, Reggio Emilia, 85-87.

Marini Calvani M., Catarsi Dall'Aglio M. 1988, *Quingento di San Prospero (Parma) e territorio parmense*, in *Aes signatum - Un aspetto dell'economia dell'Emilia preromana*, Reggio Emilia, 29-38.

Marini Calvani M., Catarsi *Dall'Aglio* M. 1989, *I pani di rame di Quingento di San Prospero*, in *Quingento di S. Prospero fra II e I Millennio a.C.*, Parma, 123-134.

ABSTRACT

Metallic ingots from the Etruria Padana have been studied. They come from either old excavations or recent ones. The samples have been exposed to chemical-physical-structural and metallographic analysis; the withdrawal, resulting from a setting-up after a lot of years of restoration, does not leave any trace on the object, it concerns a few milligrams of sample and it usually allows us to notice about 15 elements in the alloy. The sample has been drawn after an accurate weighing and a series of chemical treatments, and then it is exposed to a strumental analysis through Atomic Absorption Spectrometry. With this type of analysis a qualitative and quantitative measurement of the elements of the alloy is made. The results of the analysis are transferred to tables through Excel; then, through these tables, we have a series of graphics giving a better opportunity to evaluate the concentration of the most important elements of the alloy. The computer allows us also to organize, in the same table, the study of one or more elements in comparison with the others, in order to give different meanings to the results obtained. For example, producing a decreasing movement in the concentration of an element; so we have some graphics that can better point out the differences. The use of the computer graphics consents not only an easy reading of the elements of the alloy, but also a better evidence of the differences regarding the composition that are particular to some different classes of metal objects.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 527-535

I DEPOSITI ARCHEOLOGICI IN AMBIENTE ARIDO: IL CONTRIBUTO DELL'ANALISI DI IMMAGINE AL SITO ANTICO OLOCENICO DI UAN AFUDA (SAHARA LIBICO)

1. Decodifica dei depositi archeologici in ambienti aridi: posizione del problema [1]

L'analisi dei processi formativi dei depositi archeologici è un campo di alta potenzialità informativa (e.g. Nash, Petraglia 1987; Schiffer 1987; Leonardi 1992), e sembra esserlo in misura notevole nei contesti relativi ad ambienti aridi. Nell'ambito dei depositi olocenici centro-Sahariani, la scarsità di precipitazioni e, più in generale, la quasi totale assenza di scorrimento di acque hanno fortemente limitato i chimismi: in questo modo vengono a mancare processi tipici dei depositi archeologici in ambienti umidi, quali, ad esempio, la lisciviazione, l'eluviazione, l'illuviazione e la rubefazione.

La straordinaria conservazione che tali contesti sedimentari mostrano, sembra essere di particolare interesse per analisi più approfondite dei processi formativi; inoltre, anche i problemi specifici legati alle frequentazioni umane possono essere utilmente investigati attraverso questa prospettiva di analisi: differenti strategie economiche e *patterns* insediativi, sono ovviamente in relazione con le specifiche modalità di occupazione del sito, che sono riflesse nei caratteri specifici di formazione del deposito archeologico.

In realtà, tale orientamento di studi non è particolarmente diffuso nell'ambito della preistoria Sahariana, e in generale Nord Africana: ciò sembra particolarmente in contrasto con le potenzialità che un'analisi di questo tipo ha in queste aree. Infatti, oltre a fornire interessanti angolazioni per la comprensione di problemi quali la caratterizzazione paleoclimatica, le dinamiche di accumulo e di smantellamento di ogni specifico deposito archeologico, lo studio dei processi formativi aiuta a estrapolare i processi postdeposizionali (e.g. Wood, Johnson 1978; Burillo 1993), che risultano particolarmente attivi in sedimenti generalmente sabbiosi: fenomeni gravitativi di manufatti archeologici o rielaborazioni anche consistenti di orizzonti archeologici, come ad esempio il *dung*, dovrebbero necessariamente essere tarati in questa prospettiva di analisi.

Il contributo dell'informatica a questo dominio di studi è assai ampio, spaziando dalla gestione quantitativa di informazioni multidimensionali, alla possibilità di integrare numerose metodiche provenienti da differenti discipline.

[1] Savino di Lernia ha redatto i paragrafi 1, 2, 3, 4; Luca Trombino i paragrafi 2, 4; Mauro Cremaschi i paragrafi 2, 3. Il paragrafo conclusivo (5) è frutto della discussione di tutti gli autori.

In questa direzione, l'analisi di immagine di depositi archeologici può rappresentare un utile campo di indagine; essa, infatti, è stata utilizzata generalmente per estrapolare caratteri più nascosti nelle configurazioni spaziali dei depositi o dei siti nella loro totalità, ricorrendo frequentemente a manipolazioni di vario tipo (e.g. GOTTARELLI 1987; ANGLE *et al.* 1988; GUIDAZZOLI, FORTE 1992; DI LERNIA, MANZI 1992).

In un senso più ampio, l'interfaccia calcolatore – immagine archeologica ha avuto un notevole impulso in relazione allo sviluppo di periferiche dedicate alla velocizzazione di rilievi e documentazioni grafiche (GOTTARELLI 1992), seguito dalla crescita di modelli ricostruttivi in 3D di contesti archeologici, fino alla realizzazione di paesaggi virtuali, integrando nei GIS immagini di vario tipo e formato correlate a informazioni generali (per es. FORTE, questo volume).

La messa a punto di sistemi di riconoscimento automatico o interattivi di forme o soggetti sembra essere al contrario nelle fasi embrionali, con particolari campi di applicazione (per es. sulle tracce d'uso sui manufatti litici: BIETTI, questo volume). D'altra parte lo sviluppo di *software* dedicati permette l'esecuzione di calcoli e operazioni assai complessi, fornendo un approfondita lettura del record archeologico preso in esame.

Scopo del presente lavoro è quindi quello di fornire strumenti analitici per effettuare alcune indagini su depositi archeologici utilizzando le metodiche tipiche della micromorfologia pedologica e più in generale della scienza del suolo interfacciata al calcolatore (nello specifico utilizzando il contributo dell'analisi di immagine). Il successivo passaggio a differenti valori di scala, come ad esempio un intero deposito archeologico, fornisce ulteriori sistemi speditivi di analisi, che garantiscono la possibilità di analizzare un alto numero di contesti, e quindi un miglioramento sensibile dei rapporti costi – benefici.

2. ASPETTI TEORICI E LINEE METODOLOGICHE: IL CONTRIBUTO DELL'INFORMATICA

L'importanza di un approccio geopedologico nell'ambito della ricerca archeologica è stato più volte affermato negli ultimi anni (e.g. CREMASCHI 1989); in generale, questo tipo di approccio riveste un ruolo da non sottovalutare sia sul piano dell'acquisizione dei dati, sia su quello della loro interpretazione (CREMASCHI, RODOLFI 1991): i suoli infatti si comportano come archivi capaci di conservare al loro interno tracce degli eventi ambientali del passato.

In questo senso, uno studio geopedologico dei depositi archeologici e dei paleosuoli ad essi connessi non può prescindere da uno dei principali strumenti della paleopedologia quale è lo studio micromorfologico di sezioni sottili, metodo in grado di rivelare al massimo dettaglio le singole fasi evolutive attraverso le quali si è sviluppato un suolo (KUBIËNA 1971).

Durante i primi 25 anni della sua storia, la micromorfologia è stata essenzialmente uno studio di tipo qualitativo, ma questa tendenza ha subito una evoluzione all'inizio degli anni sessanta, con i primi lavori quantitativi concernenti studi sulle dimensioni, distribuzioni e orientazioni di corpi discreti (KUBIËNA 1967).

Un salto di qualità definitivo è stato possibile grazie allo sviluppo di metodi di analisi elettronici (Analisi di Immagine), che hanno permesso approcci quantitativi estremamente più veloci e precisi, affiancando al microscopio (ottico o elettronico) computer con *software* dedicati a questo tipo di misurazioni (JONGERIUS *et al.* 1972). La diffusione di una cultura informatica, lo sviluppo di applicazioni di Analisi di Immagine anche in altre discipline e la relativa semplicità di reperimento degli strumenti hanno consentito, in questi ultimi anni, un notevole sviluppo degli studi e della divulgazione di dati (PROTZ *et al.* 1987).

Da un punto di vista metodologico, le caratteristiche più comunemente esaminate in uno studio di Analisi di Immagine risultano essere: frequenze (numero di elementi per unità di superficie), dimensioni (lunghezze, perimetri), aree, orientazioni. I limiti di applicabilità riguardano essenzialmente il passaggio da due a tre dimensioni e la rappresentatività dei risultati, quest'ultima legata sia al carattere eterogeneo dei campioni studiati, sia a possibili errori statistici e/o metodologici. Un terzo ordine di problemi è legato alle limitazioni qualitative allo studio quantitativo, ovvero la scelta e l'identificazione degli elementi da misurare, ed il loro reale significato nel contesto esaminato.

La micromorfologia quantitativa e l'Analisi di Immagine applicate alla scienza del suolo nascono come studio di sezioni sottili al microscopio, ma spostandosi da una scala microscopica ad una macroscopica, l'approccio resta pur sempre valido e scientificamente rilevante, pur con alcuni limiti di applicabilità.

3. Il caso studio: la grotta di Uan Afuda (Tadrart Acacus centrale, Sahara libico)

Accanto alle tradizionali finalità che uno studio micromorfologico offre, l'applicazione di tecniche quantitative di analisi di immagine sembra essere promettente per problemi di carattere specificatamente archeologico.

La grotta di Uan Afuda, posta nel Tadrart Acacus centrale (Fig. 1), è un caso emblematico di una successione stratigrafica rappresentativa, sul piano dei processi formativi, di profondi cambiamenti nell'ambiente e nelle differenti modalità di occupazione (CREMASCHI, DI LERNIA 1995).

La serie stratigrafica (Fig. 2) evidenzia, a partire dal basso, un imponente ciclo di sabbie eoliche (Unità 3), indicatore di un clima iperarido, nella cui parte intermedia sono attestate frequentazioni riferibili al Paleolitico Medio

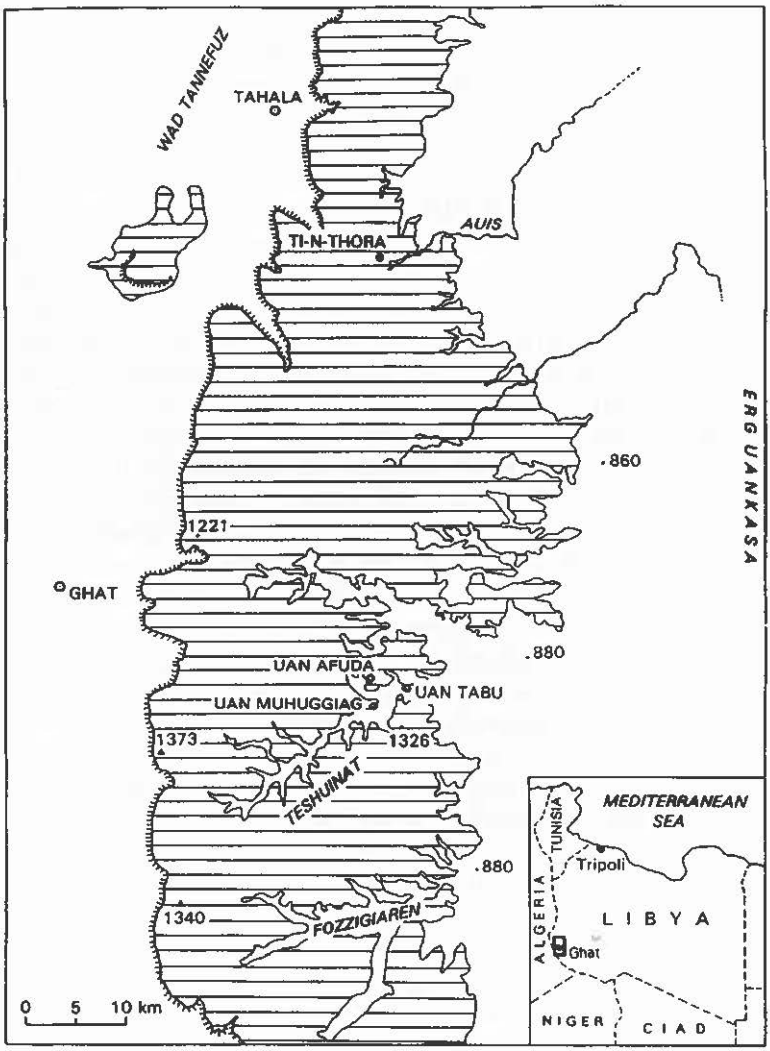


Fig. 1 – Il massiccio del Tadrart Acacus (Sahara Libico) e la localizzazione della grotta di Uan Afuda (Uadi Kessan).

(Ateriano?). La parte superiore di questa duna è interessata da importanti fenomeni pedogenetici (bioturbazioni, etc): si sviluppa quindi l'Unità 2, che è rappresentata da sabbie colluviali, indicatrici di maggiore umidità. In questa fase la grotta è abitata da gruppi di cacciatori – raccoglitori epipaleolitici, dedicati prevalentemente alla caccia di *Ammotragus lervia:* tale occupazione è datata al C14 tra 9800 e 9000 anni BP. La serie prosegue con un pacco di sedimenti spesso circa 1 metro (Unità 1), con presenza di sostanza organica

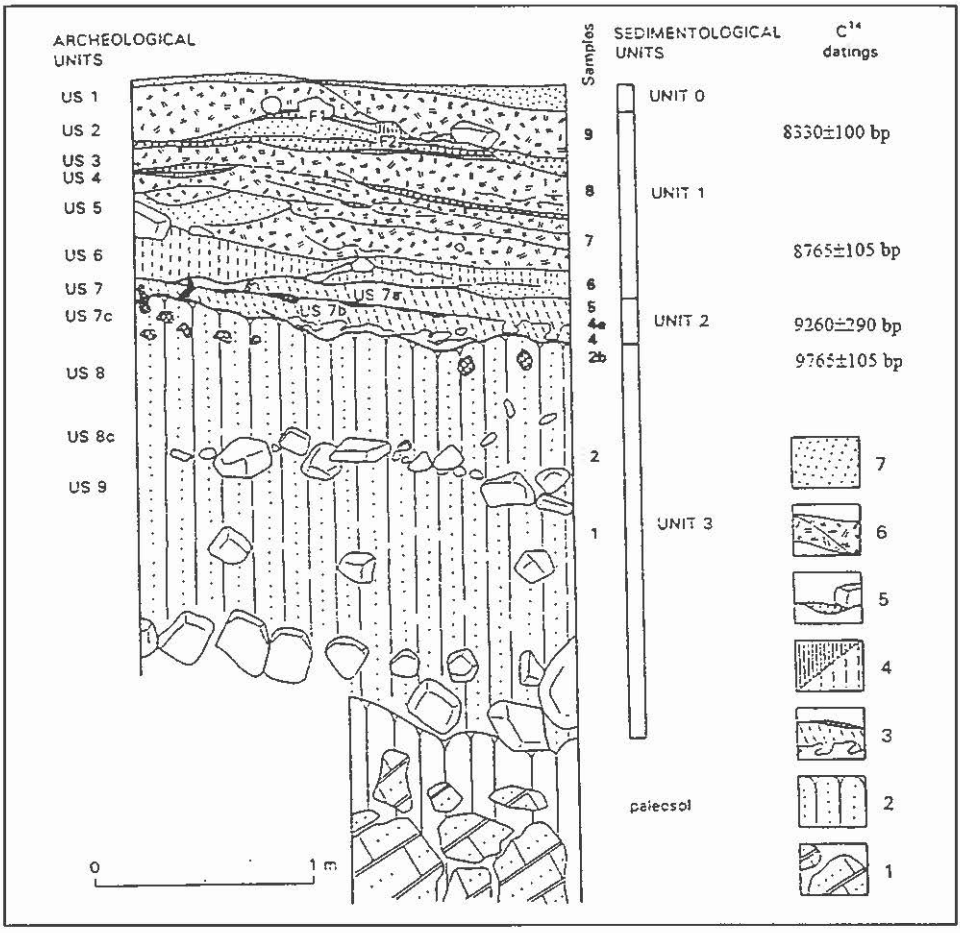


Fig. 2 – La serie stratigrafica del deposito archeologico di Uan Afuda. *Legenda*: 1) blocchi della volta crollati, con concrezioni di gesso; 2) Unità 3 "Sabbie eoliche", pedogenizzata al tetto; 3) Unità 2 "Sabbie colluviate", con concrezioni di gesso; 4) "Unità organica" 1: sedimento sabbioso ricco in carboni e sostanza organica; 5) "Unità organica" 1: lenti cinerose e focolari; 6) "Unità organica" 1: accumuli di vegetali; 7) Unità 0: sabbie eoliche recenti.

non umificata, caratterizzati essenzialmente da notevoli accumuli di vegetali, alternati a strutture antropiche (concentrazioni di pietre; focolari); i sedimenti che si riferiscono a questa occupazione, definita preliminarmente "Mesolitica" (9000-8000 BP), sono troncati al tetto dall'erosione eolica. Tutte e tre le macro unità sono ben espresse alla lettura micromorfologica in sezione sottile (Tav. XXVI, a-c).

In realtà, il problema che si vuole affrontare in questa sede è proprio l'accumulo dei resti vegetali, valutando la possibilità di discriminare, qualitativa-

mente e quantitativamente, determinati fattori utilizzando filtri colorimetrici e morfologici. Ciò viene tentato essenzialmente sulla base di valutazioni bidimensionali, con i limiti di applicabilità prima descritti; l'inferenza su un piano tridimensionale è certamente da integrare con ulteriori, sistematici campionamenti.

La possibilità di "contare" le componenti del deposito, sulla base di rilievi fotografici mirati e integrati da analisi delle sezioni sottili di suolo, fornisce un ulteriore elemento per la comprensione delle modalità di accumulo di questi vegetali, le relazioni interne tra le componenti specifiche (legno incombusto; carboni), e il contributo della parte sabbiosa del suolo.

4. Applicazione

Lo studio del deposito archeologico di Uan Afuda attraverso l'analisi di immagine è stato realizzato utilizzando il *software* dedicato OPTIMAS 5.1a (Optimas Corporation); il *software* lavora in ambiente MS Windows™ su un personal computer debitamente attrezzato con un secondo monitor di qualità televisiva, direttamente collegato alla scheda di acquisizione.

L'acquisizione delle immagini da microscopio ottico in luce trasmessa (Leitz Laborlux 12 pol) è stata effettuata tramite telecamera CCD Sony interfacciata con una scheda *frame grabber* VISIONPLUS AT, mentre per le immagini fotografiche (Tav. XXVI, d) si è utilizzato uno scanner piano a colori AGFA (risoluzione della scansione 1200 dpi).

Il *software* gestisce e permette un controllo completo di tutte le fasi di trattamento dell'immagine e della quantificazione su di esse operata: in questo senso è possibile agire su parametri di luminosità e contrasto (per i singoli canali di colore) sin dal momento dell'acquisizione; l'immagine acquisita risulta memorizzabile e viene quindi gestita come un normale *file*, seppur di notevoli dimensioni (generalmente > 2 Mega Byte). Sono possibili ulteriori trattamenti di miglioramento dell'immagine acquisita, attraverso filtri e *macro* che permettono l'eliminazione di disturbi e distorsioni oppure di disomogeneità dello sfondo, piuttosto che, più semplicemente, incrementare nitidezza e contrasto di tutta l'immagine o di particolari elementi rilevanti; sono anche applicabili vari filtri colorimetrici. All'immagine può essere attribuita una scala, attraverso lo strumento di calibrazione, in modo da ottenere i risultati nelle unità di misura desiderate. Tutti questi processi sono in linea di massima già configurati e presenti come funzioni *macro* o *utility*; l'operatore può comunque in ogni momento intervenire e modificare i parametri secondo le proprie esigenze ed eventualmente salvare le modifiche apportate al processo.

Terminata questa fase di pre-trattamento si può passare ad uno dei passi fondamentali di questo tipo di approccio, ovvero l'identificazione corretta di specifiche figure: tale operazione, soprattutto in situazioni complesse, assume una rilevanza fondamentale per l'intero lavoro. L'identificazione può avvenire manualmente, attraverso marcature di punti, tracciamento di linee,

aree o limiti, oppure in modo automatico, attraverso la determinazione di una o più soglie, sia a colori, sia in toni di grigio; anche l'identificazione automatica è un processo altamente configurabile passo dopo passo. In ogni caso, anche le figure, una volta identificate, possono subire ulteriori manipolazioni, in particolare per risolvere i problemi spaziali e geometrici che potrebbero fornire dati imprecisi.

L'ultima fase dell'approccio è quella quantitativa, realizzata attraverso la misura delle grandezze densitometriche, dei parametri di forma e dimensionali, del conteggio e della classificazione delle figure sulla base delle misure effettuate. Le funzioni matematiche e/o statistiche disponibili sono estremamente numerose (sono possibili anche elaborazioni sofisticate, quali analisi volumetriche) ed i dati possono venire elaborati prima ancora della loro esportazione. Esportazione che avviene direttamente ed automaticamente su un qualsiasi foglio elettronico, attraverso *links* di grande gestibilità.

5. Risultati preliminari: discussione e possibili sviluppi

L'analisi al microscopio ottico in luce trasmessa delle sezione sottili interfacciata al calcolatore ha permesso di distinguere le seguenti componenti del suolo archeologico:

1. il carbone di legno [colore nero];
2. i vegetali incombusti [colore bruno-rossiccio] (Tav. XXVII, b);
3. lo scheletro di sabbia quarzosa [incolore].

Tale caratterizzazione è stata mantenuta nel trattamento della fotografia della sezione stratigrafica (in luce riflessa), in cui sono rappresentati gli accumuli di vegetali alternati a lenti cinerose e focolari (Tav. XXVII, a). I risultati quantitativi ottenuti, sebbene preliminari, sembrano evidenziare la validità del metodo, come espresso nella Tabella 1:

	Sezione Sottile	Sezione Stratigrafica
Carbone	4.6 %	12.9 %
Vegetali incombusti	16.0 %	17.2 %
Scheletro del sedimento	79.4 %	69.8 %

Tab. 1 – Valori percentuali delle aree riconosciute

Gli scarti nei valori relativi all'incidenza dei carboni richiedono un commento specifico; le differenze nei rapporti percentuali sono infatti imputabili alla possibilità di discriminare il carbone dai vuoti anche nell'immagine fotografica: mentre in luce trasmessa qualsiasi corpo particellato amorfo è evidentemente identificabile, in luce riflessa le zone d'ombra possono interferire nella leggibilità degli elementi più scuri, portando quindi ad una loro possibile sovrastima.

L'applicabilità di tali trattamenti, se effettuati sistematicamente su un numero maggiore di campioni stratigrafici, e utilizzando metodi statistici di correzione più raffinati, potrebbe indicare specifici caratteri di valenza archeologica nell'ambito degli studi di depositi legati per esempio alla gestione di animali (aree complessive; volumi degli accumuli vegetali; etc.). Questi ultimi possono essere relazionati a determinati fattori e integrati da ulteriori analisi (per esempio, specie animale; biomassa relativa; numero presunto di animali o capacità di foraggiamento fornite da specifici accumuli di vegetali). In questa direzione, il contributo di analisi archeobotaniche consentirebbe un'ulteriore discriminazione tra differenti specie vegetali o differenti parti anatomiche dei vegetali presenti.

La consistenza dei risultati ottenuti apre quindi nuove prospettive di analisi per la comprensione dei processi formativi in ambienti aridi ed alle problematiche culturali ad essi sottese, fornendo un utile strumento di lavoro, esportabile anche in altri contesti di ricerca.

Savino di Lernia
Dipartimento di Scienze Storiche
Archeologiche e Antropologiche dell'Antichità
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

Luca Trombino
Dipartimento di Scienze della Terra
Sezione di Geologia e Paleontologia
Università degli Studi di Milano

Mauro Cremaschi
CNR, Centro per lo Studio della Geodinamica
Alpina e Quaternaria - Milano

Ringraziamenti

Tale progetto rientra nell'ambito della Missione Congiunta Italo-Libica nel Sahara Libico (Tadrart Acacus e Messak Settafet), diretta da Fabrizio Mori (Università di Roma). Cogliamo l'occasione per ringraziare lo staff della Missione ed i colleghi libici, in particolare Ebrahim Azzabi a Abib Ben Aun, che hanno collaborato all'attività di scavo.

L'analisi di immagine è stata effettuata utilizzando le attrezzature CNR – Centro per lo Studio della Geodinamica Alpina e Quaternaria di Milano diretto da Pietro Mario Rossi, e quelle del C.I.R.S.A., Centro Interuniversitario di Ricerca sulla Civiltà e l'Ambiente del Sahara Antico (sedi consorziate Roma, Milano, Modena), diretto da Fabrizio Mori.

BIBLIOGRAFIA

Angle *et al.* 1988, *Il computer nello strato: integrazione di tecniche informatiche alla ricerca archeologica*, «Quaderni dei Dialoghi di Archeologia», 4, 83-124.

Burillo F. (ed.) 1993, *Procesos postdeposicionales*, «Arqueología Espacial», 16-17.

Cremaschi M. 1989, *Gli apporti delle scienze della terra in archeologia per la ricostruzione degli ambienti del passato*, in *Atti XXVII Riunione Scientifica Istituto Italiano Preistoria e Protostoria* (Ferrara 17-20 novembre 1987), 339-356.

CREMASCHI M., DI LERNIA S. 1995, *The transition between Late Pleistocene and Early Holocene in the Uan Afuda cave (Tadrart Acacus, Libyan Sahara). Environmental changes and human occupation*, «Quaternaire», 6, (3-4), 173-189.

CREMASCHI M., RODOLFI G. (edd.), 1991, *Il Suolo*, Roma, La Nuova Italia Scientifica.

GOTTARELLI A. 1987, *Tecniche di documentazione dello scavo archeologico: introduzione alla videometria digitalizzata*, in F. D'ANDRIA (ed.), *Informatica e Archeologia Classica, Atti del Convegno Internazionale (Lecce 1986)*, Galatina.

GOTTARELLI A. 1992, *La video-documentazione elettronica dello scavo archeologico (V.M.D.). Studi ed esperienze per il progetto di una periferica dedicata*, «Archeologia e Calcolatori», 3, 77-99.

GUIDAZZOLI A., FORTE M. 1992, *Archeologia e tecniche di eidologia informatica*, «Archeologia e Calcolatori», 3, 37-76.

KUBIËNA W.L. 1967, *Die Mikromorphometrische Bodenanalyse*, Stuttgart, Ferd. Enke Verlag.

KUBIËNA W.L. 1971, *Discussion at the Symposium on the Age of Parent Materials and Soils (Amsterdam, Netherlands, August 10-15, 1970)*, in D.H. YALOON (ed.), *Paleopedology: Origin, Nature and Dating of Paleosols*, Jerusalem, Israel Universities Press.

JONGERIUS A., SCHOONDERBEEK D., JAGER A. 1972, *The application of Quantimet 720 in Soil Micromorphology*, «Microscope», 20, 243-254.

LEONARDI G. 1992 (ed.), *Processi formativi della stratificazione archeologica*, «Saltuarie dal Laboratorio del Piovego», 3, 13-47.

DI LERNIA S., MANZI G. 1992, *La sepoltura preistorica presso Uan Muhuggiag (H2) e le nuove ricerche nel Tadrart Acacus (Sahara libico)*, «Origini», XVI, 161-180.

NASH D.T., PROTZ M.D. (edd.) 1987, *Natural Formation Processes and the Archaeological Record*, BAR International Series 352.

PROTZ R., SHIPTALO M.J., MERMUT A.R., FOX C.A. 1987, *Image Analysis of Soils: Present and Future*, «Geoderma», 40, 115-125.

SCHIFFER M.B. 1977, *Toward a unified science of the cultural past*, in S. SOUTH (ed.), *Research Strategies in Historical Archaeology*, New York, Academic Press, 13-50.

WOOD W.R., JOHNSON D.L.J. 1978, *A survey of disturbance processes in archaeological site formation*, «Advances in Archaeological Method and Theory», 1, 315-381.

ABSTRACT

Analysis of site formation processes is a field research which can be potentiated by means of computer applications. In this paper, the authors suggest the use of image analysis applied to the study of soil micromorphology and to archaeological deposits, aimed at the qualitative and quantitative evaluation of the soil components. The presence of specific devices and software allow us to face these problems in a fast and friendly way, thanks to the Windows™ interface. The case study is the Uan Afuda cave in the Tadrart Acacus (Libyan Sahara), and namely the sediments related to the Mesolithic occupation (8900-8000 BP), which is characterised by vegetable accumulations alternating to ashes layers. The application let us weigh the specific components of the layers, from both a microscopic (soil thin sections) and macroscopic (excavated stratigraphic section) level. Consistence of results opens new perspective of analysis for the comprehension of the formation processes in arid environments and for the cultural problems linked to them.

Archeologia e Calcolatori
7, 1996, 537-558

THE VEGETATION FROM THE GUADIX-BAZA (GRANADA, SPAIN) DURING THE COPPER AND BRONZE AGES BASED ON ANTHRACOLOGY

1. Introduction

Vegetal carbon is present at most archaeological sites, especially from sedentary times and the beginning of agriculture, even in desert and subdesert regions such as the southeastern Iberian Peninsula. Given that in all the periods the primary material for combustion has been wood (other combustible materials have been manure, straw, bamboo, etc.), a woody-plant supply was fundamental to the economy. Almost all the remains of these woody plants, which we have found in the form of vegetal carbon, come from trees and shrubs available in the surroundings of the sites. Inferences, therefore, can be made regarding the palaeo-vegetation of the environment during the time of the occupation.

The identification of botanical remains in archaeological contexts dates from the middle of the 19th Century. In the southeastern Iberian Peninsula the first references concerning vegetal remains are for the Cueva de los Murciélagos (Gongora 1868), referring to fabrics, poppy seeds (*Papaver somniferum*), items made of esparto (*Stipa tenacissima*), and various objects made of oak (*Quercus* sp.). Later, at Copper- and Bronze-Age sites, the Siret brothers excavated a great number of seeds, vegetal fibers (such as esparto and flax) and remains of wood and carbon (Siret, Siret 1890).

In the present century, the recovery of vegetal remains from archaeological excavations on the Iberian Peninsula continues to be meager and without palaeo-ecological inferences. In Spain the identification of wood and vegetal carbon did not begin until the 1980s, although in other parts of Europe the first analyses were made at the end of the last century and the beginning of this: Switzerland (Heer 1866), Germany (Prejawa 1896), France (Breuil 1903), and Hungary (Hollendonner 1926).

Not until the 1950s or 60s did interest in vegetal carbon strengthen with the use of ^{14}C radiocarbon dating and with the development of new excavation methods. Afterwards, the development of new techniques for examining carbon (Western 1963, 1971; Stieber 1967; Vernet 1973), with the abandonment of the thin layers and the use of the reflexion microscope, offered new reliability, speed, and efficiency for studying the numerous samples. Since this time, anthracological studies have proliferated in the United States, the Near East, and the Mediterranean region, including northern Portugal and Spain.

All these studies showed anthracology to be a useful palaeo-ecological

discipline, and in fact many researchers insist on such data for a palaeo-ethnobotanical interpretation.

2. Methods

The appearance and frequency of a specific taxon at archaeological sites depends on various factors: the degree of carbonization, the technique of collecting samples during excavation, the selection of the species by the prehistoric man, the frequency and availability of the different trees and shrubs in nature during ancient times, etc. This last factor is perhaps the most important to evaluate. To address these problems of representation, we have proceeded both in the field and in the laboratory as follows:

2.1 *Method followed at the archaeological site*

The carbon found at archaeological sites may appear in various forms, and therefore in each case the collection of samples required a specific treatment:
a) *Direct collection of materials* – all visible artifacts and vegetal materials were collected and numbered either by piece or by lot.
b) *Screening of sediments* – the soil or mineral sediment recovered in the excavation was screened by sifting with various grid sizes, depending on the materials to be collected.
c) *Flotation* – the carbonizations of organic material reduces the density and thereby encourages flotation, whereas the other materials, having greater density, sink; thus, using the principle of differential density, we submerged samples in water to separate the carbonized elements.

2.2 *Method followed in the laboratory*

a) *Taxon determination.* The study of a fragment of vegetal carbon first requires three planar orientations: transverse, longitudinal-tangential and longitudinal-radial. Each of these orientations allows the identification of particular elements of the internal structure of the wood, where form, size and disposition vary according to the species. The carbon fragments are identified by comparison with various atlases of wood anatomy (e.g. Geguss 1959; Huber, Rouschal 1954; Jacquiot 1975; Jacquiot *et al.* 1973; Schweingruber 1978) and with a reference collection of present-day carbonized wood. Many Mediterranean woody taxa can be identified to the species level, although in some cases only the genus can be determined, as in *Juniperus, Erica, Cistus* and *Acer* (Heinz *et al.* 1988).

b) *Determination of the analysis units.* There are two basic analysis units:
– *Determination of the spatial-scale unit:* the ethnological and ecological inferences from the anthracological analysis vary according to the scale used in the study. The studies can be of micro scale (comparing different zones

within a site), of semi-micro scale (comparing results from different sites of the same district) or of macro scale (comparing results from a broad region).
– *Determination of a temporal-comparison unit:* the definition of a temporal unit varies in relation to the questions posed at each site. There is no definite minimum temporal unit which enables us to make simple correlations between the sites. These limits, unclear in many cases, can be defined by radiocarbon dating, especially for recent prehistory, facilitating correlations between the different regional sequences. In the present work, we used ^{14}C data for correlation.

c) *Determination of the units of measurement.* Anthracology has used the number of carbon fragments as the base for the quantitative study, from which the palaeo-ecological data have been inferred. Although this unit of measurement (the fragment) has been questioned by some researchers, who believe vegetal biomass best represents the relative importance of the different species at the same level (CASTELLETTI 1975; KRAUSS-MARGUET 1981; THINON1979), in the present work the fragment has been used as the unit of measurement, or unit of comparison, following the terminology of CHABAL (1991,47).
d) *Determination of the sample.* The great number of carbons at some archaeological sites require making a selection from the total sample, using the following methods:
– *Random division of the sample:* generally, once the sample is divided into four parts, a sample is selected at random (WILCOX 1974), or a handful of carbon samples is gathered, in which there is a range of sizes and forms (MILLER 1985).
– *Systematic study of the first samples or lots:* the present study enabled us to draw taxonomic curves, or using the terminology of CHABAL (1991, 103), the effort-return curve, in which the point of inflexion indicates the number of identifications necessary to find all the taxa of a sample. If the curves of different samples are similar, then the number of fragments identified at the point of inflexion determines the number to study in the remaining samples. The percentage curve is used to find the point at which a population quantitatively stabilizes (BADAL 1988).

2.3 *Botanical studies*

Present-day vegetation has been studied according to the phyto-sociological method of the Zurich-Montpellier school; the bio-climate, biogeography and the vegetal dynamics have been established on the basis of our own studies (VALLE, GÓMEZ-MERCADO 1990) and those of RIVAS MARTINEZ (1987 and 1990) and RIVAS MARTINEZ *et al.* (1992).

2.4 *Correspondence Analysis*

Correspondence analysis is a multi-variant technique of analysing data, which, though originally conceived to study contingency tables, other re-

searchers have applied to wider contexts: complete disjunctive tables, qualitative variables, multi-state qualitative variables, binary tables, etc. (ESCOFIER PAGÉS 1988). The objectives of correspondence analysis are to obtain a typology of units, a typology of variables and to relate both typologies, breaking the link between variables (and between units) in a sum of simple and interpretable tendencies – that is, to obtain information of the "system of associations" (sic.) between the elements belonging to two groups (GREENACRE 1984).

From a mathematical perspective, correspondence analysis extends other multi-variate analyses (Analysis in Principal Components, Multidimensional Scaling) to quantitative data, even when the differences between these are substantial (KRZANOWSKI 1988).

The statistical foundation is the following: let a group of data be defined by two qualitative variables I and J, and the values k_{ij}, which quantify the number of times that the category iŒI and the category jŒJ are observed simultaneously in the group. The raw data is transformed into profiles dividing each k_{ij}, of the line i (or column j) by its marginal frequency $f_{i.}$ (or $f_{.j}$); in this way, each line (column) of the table is transformed into a profile which can be represented in space R^j (each column in space R^i) and, using the statistical chi-square to define a distance between line (column) profiles according to:

$$d_x(\textit{línea, línea l}) = \sum_j \frac{1}{f_{.j}} \left(\frac{f_{ij}}{f_{i.}} - \frac{f_{lj}}{f_{l.}} \right)^2$$

$$dx(\textit{columna j, columna k}) = \sum_j \frac{1}{f_{i.}\ f_{.j}\ f_{.k}} \left(f_{ij} - f_{ik} \right)^2$$

(BENZECRI 1973).

Given that the distances thus defined have the properties of a Euclidean distance (ESCOFIER, PAGÉS 1988), these give R^I and R^J a structure of Euclidean space. The following process is already geometric and consists of finding the sub-spaces defined by the principal axes which maximize the inertia between the cloud of points; that is, the spatial variation with respect to the centroids of the file and column profiles (GREENACRE 1984; JAMBU, LEBEAUX 1983), thus obtaining their own values, inertia axes, unit inertias and subject variables at the hyper-plane and each axis, contribution of units and variables subject to the hyper-plane and to each axis, principal planes, groups, etc. These mathematical results, in a overall sense, must be interpreted according to the particular context in order to obtain reliable and rigorous conclusions.

3. THE ARCHAEOLOGICAL SITES AND PRESENT-DAY VEGETATION

3.1 *The archaeological sites*

The sites studied (Table 1) span the second half of the third millennium and virtually all the second millennium BC (2500 to 1400 BC), a period

marked in southeastern Spain by the successive development of important cultures: The Los Millares Culture (2500 to 1800 BC), at the sites of El Malagón and the first two phases of Cerro de la Virgen (I-II); and the Argar Culture, within the framework of the Middle Bronze Age (1700 to 1400 BC), at the sites of Castellón Alto, Fuente Amarga, Loma de la Balunca and Terrera del Reloj. Between the two ages, the Early Bronze Age occurred, with chronological variation in the different zones and characteristics of a prelude to the following stage. Thus, in the upper strata of Cerro de la Virgen (III) we found evidence of the acculturation of the populations of the Los Millares Culture, which adopted the rituals and the Argaric typology, although conserving the earlier socio-economic structure.

These sites belong to a natural district within eastern Andalusia, the Guadix-Baza Basin, in the north of the province of Granada. This is one of the basins in High Andalusia forming the so-called Intrabetic trough, running in a rough diagonal between the Sierra Nevada and the Sierra de Baza to the South and southeast, and the Subbetic chains to the northeast and southeast (Fig. 1).

3.2 *The present-day vegetation*

Most of the archaeological sites studied here are at the upper meso-Mediterranean bio-climatic level, with an Ti (thermal index) of 257 to 210, and a semi-arid to dry umbro-climate (P 350-400; P = precipitation); biogeographically, the zone pertains to the Guadiciano-Baztetano sub-sector (Guadiciano-Bacense sector, Betic Province). The dominant vegetation association in the *Rhamno-lycioidis-Querceto cocciferae S.*, which in the Betic zone appears with *Ephedra fragilis*.

At present, the entire Baza Basin shows a high degree of desertification, having a vegetation characteristic of the last stage of regression (Patizal) of the meso-Mediterranean communities, with *Stipa tenacissima, Lygeum spartum* and *Brachypodium ramosum* as representative bio-indicators of the association cited above.

Fig. 2 provides a catena of the vegetation in this region and situates the different sites in their bio-climatic and syn-dynamic contexts. In the centre of the zone, along a band situated on both sides of the Orce-Galera River, the salt and gypsum content is extremely high in some Tertiary loams, and halophilous vegetation is prominent (Esteve, Varo 1975).

4. The application of correspondence analysis to the anthracological study of the archaeological sites of Guadix-Baza

The distribution analysis of the taxa from the sites shows that the information can be summarized by three factors, which carry 43.27%, 25.12% and 11.12%, respectively (79.50% in total); the first two factors are mark-

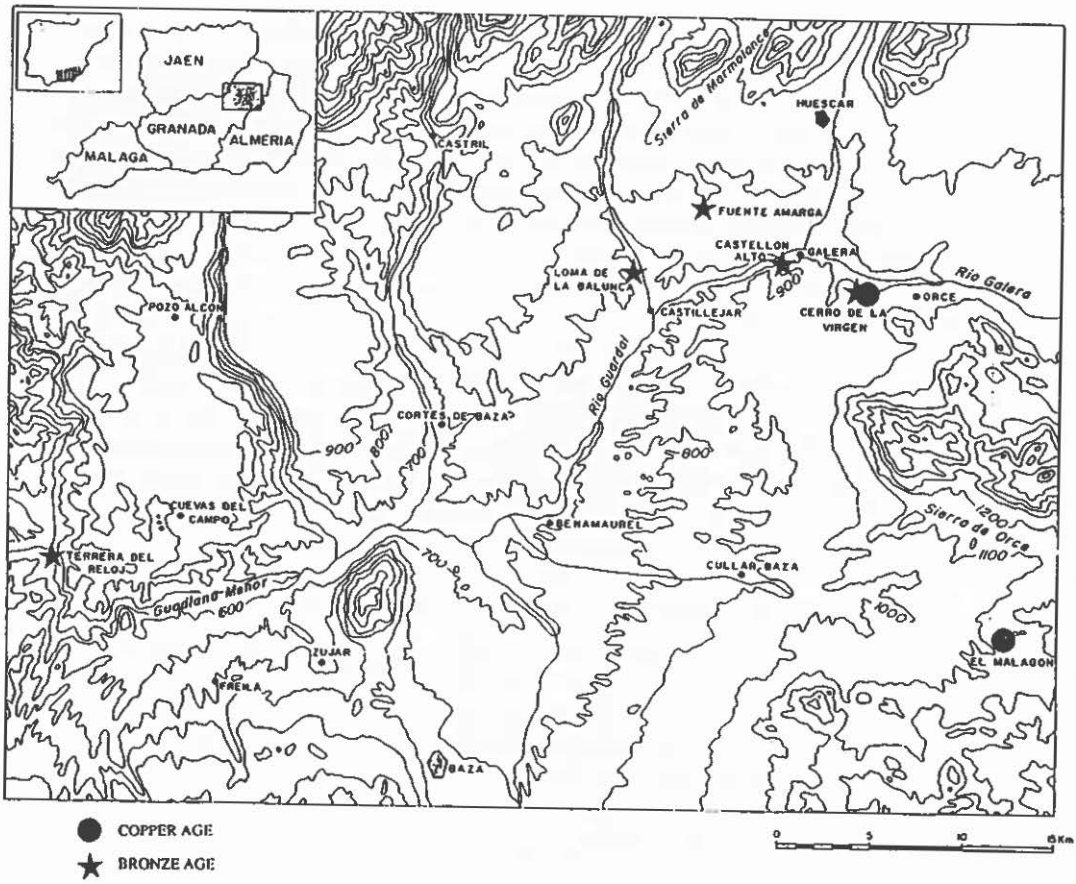


Fig. 1 – Plan of the Depression of Baza showing sites.

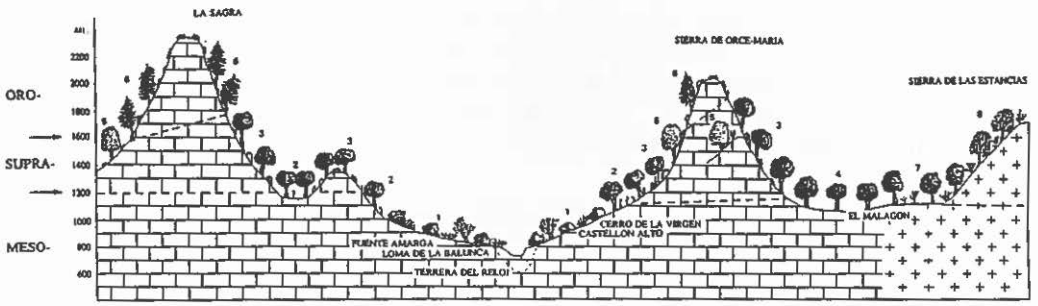


Fig. 2 – Altitudinal Catena of vegetation for the Depression of Baza (1. *Rhamno lycioid-Querceto cocciferae sigmetum*; 2. *Paeonio-Querceto rotundifoliae sigmetum*; 3. *BerbeAdi hispanicae-Querceto rotundifoliae*; 4. *Buplellro-Querceto rotundifolias sigmetum*; 5. *Daphno latifoliae-Acereto granatensis*; 6. *Daphno oleoidi-Pineto sylvestris sigmetum*; 7. *Adenocarpo decorticanti-Querceto rotundifoliaesigmetum*; 8. *Adenacarpo-Querceto pyrenaicae sigmetum*).

CULTURAL SEQUENCE		COPPER AGE				EARLY B. A.		MIDDLE BRONZE AGE							
SITES		El Malagón		C. Virgen I-II		C. Virgen III		Castellón Alto		Fuente Amarga		Loma Balunca		Terrera Reloj	
TAXONES		Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Pinus halepensis	(PHA)	65	35.44	145	24.81	531	48.09	1840	53.89	281	62.16	558	66.24	848	63.04
Pinus nigra	(PNI)	-	-	-	-	-	-	34	1.00	13	2.87	-	-	1	0.08
Pinus sylvestris	(PSY)	-	-	-	-	-	-	1	0.05	-	-	-	-	-	-
Pinus nigra-sylvestris	(PNS)	-	-	-	-	-	-	15	0.14	9	1.99	2	0.24	8	0.59
Pinus sp.	(PSP)	8	0.43	3	0.15	-	-	5	0.16	8	1.77	1	0.12	4	0.29
Juniperus sp.	(JSP)	-	-	-	-	-	-	7	0.23	-	-	-	-	1	0.08
Quercus ilex-coccifera	(QIC)	807	43.73	1111	51.45	349	31.61	338	9.92	87	19.34	84	9.97	64	4.75
Quercus faginea	(QFA)	83	4.49	14	0.64	35	3.17	32	0.94	1	0.23	21	2.49	4	0.29
Quercus suber	(QSU)	7	0.38	-	-	-	-	7	0.23	-	-	1	0.12	1	0.08
Quercus caducifolios	(QHC)	61	3.3	2	0.1	1	0.1	1	0.05	5	1.1	-	-	1	0.08
Acer sp.	(ASP)	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.23	1	0.12	-	-
Atriplex halimus	(ATH)	-	-	-	-	-	-	117	3.14	-	-	-	-	-	-
Cistus sp.	(CIS)	83	4.51	25	1.15	29	2.62	4	0.14	-	-	-	-	1	0.08
Crataegus sp.	(CRS)	-	-	1	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ephedra sp.	(EPS)	-	-	4	0.2	-	-	19	0.56	-	-	-	-	2	0.16
Cf. *Erica* sp.	(ERS)	1	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Juglans regia	(JUR)	-	-	1	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Leguminosae	(LEG)	12	0.65	75	3.47	40	3.62	65	1.91	32	7.07	61	7.24	136	10.11
Monocotiledoneae	(MON)	-	-	-	-	-	-	22	0.65	-	-	-	-	-	-
Phyllirea sp.	(FIS)	-	-	1	0.05	-	-	1	0.05	-	-	-	-	-	-
Pistacia lentiscus	(PIL)	-	-	27	1.25	10	0.9	2	0.08	-	-	-	-	-	-
Rhamnus sp.	(RSP)	-	-	7	0.32	4	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-
Rhamnus-Phillyrea	(RPH)	-	-	2	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Retama sp.	(RES)	-	-	-	-	-	-	124	3.64	-	-	-	-	-	-
Rosaceae	(ROC)	-	-	2	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rosmarinus officinalis	(ROO)	10	0.54	136	6.29	71	6.43	124	3.64	3	0.67	-	-	16	1.18
Spartium junceum	(SPJ)	-	-	-	-	-	-	1	0.05	-	-	-	-	-	-
Stipa tenacissima	(STT)	-	-	-	-	-	-	8	0.24	-	-	-	-	-	-
Cf. *Alnus* sp.	(ALG)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.08
Fraxinus sp.	(FSP)	1	0.06	15	0.69	3	0.28	8	0.24	-	-	2	0.24	1	0.08
Nerium oleander	(NEO)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.08
Populus sp.	(POS)	42	2.27	2	0.1	-	-	117	3.43	-	-	1	0.12	25	1.85
Salix sp.	(SAS)	7	0.37	1	0.05	1	0.1	18	0.53	3	0.67	101	12	13	0.96
Salix-populus	(SAP)	12	0.65	-	-	-	-	3	0.1	-	-	1	0.12	-	-
Sambucus sp.	(SBS)	2	0.12	3	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tamarix sp.	(TAS)	3	0.18	86	3.98	3	0.28	420	12.31	-	-	1	0.12	198	14.72
Vitis sp.	(VIS)	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.23	-	-	-	-
Undetermined	(IDT)	1	0.06	12	0.55	7	0.63	18	0.53	-	-	-	-	2	0.16
Indeterminable	(IDB)	51	2.76	93	4.3	20	1.81	63	1.85	8	1.77	7	0.83	14	1.04
Nº CHARCOAL FRAGMENTS		1845	100	2159	100	1104	100	3414	100	452	100	842	100	1345	100
Nº OF TAXA		16		21		12		26		12		13		21	

Table 1 – Absolute and relative frequencies of taxa identified at Bronze Ages sites in the Depression of Guadix-Baza with abbreviations used in the text.

edly significant, given that Factor 3 carries only half of the inertia of Factor 2 and a quarter of the inertia of Factor 1 (Table 2c). As a result, the analysis centres both on summarizing the distribution in a tridimensional space which contains 79.50% of the total information, and, in this space, on considering the bidimensional hyper-plane formed by Factor 1 and 2.

With respect to the tridimensional hyper-plane, the sites of Castellón Alto (CA) and Loma de la Balunca (LB) carry the most relative inertia, although Cerro de la Virgen I-II (CVA), El Malagón (MA) and Terrera del Reloj (TR) are also quite important, Cerro de laVirgen III (CVB) offering the least inertia to the

N°	Var	QLT	WEIG	INR	1»F	COR	CTR	2»F	COR	CTR	3»F	COR	CTR
1	CVIII	499	143	60	340	494	62	-29	4	4	-5	1	7
2	CA	928	143	192	-479	301	120	654	560	366	226	67	110
3	FA	758	143	100	-139	49	12	-260	171	61	-461	537	439
4	LB	977	143	190	-431	248	98	-663	585	377	328	143	225
5	TR	721	143	142	-582	600	176	162	47	25	-203	73	90
6	CVI	755	143	162	668	695	232	188	55	33	-49	4	12
7	MA	669	143	157	620	619	157	-50	5	5	164	44	62

a

	CVIII	CA	FA	LB	TR	CVI	MA
FACTOR 1	-0.378	-0.377	-0.378	-0.378	-0.378	-0.378	-0.378
FACTOR 2	0.260	-0.365	-0.106	-0.329	-0.443	0.510	0.473
FACTOR 3	-0.029	0.654	-0.260	-0.663	0.162	0.188	-0.050

b

	Eigenvalues	% Variance	% Accumulated var.
FACTOR 1	0.246	43.266	43.266
FACTOR 2	0.143	25.120	63.386
FACTOR 3	0.063	11.120	79.506

c

Table 2 –Correspondence analysis of the sites in the Baza Depression: a) contribution of variables; b) eigenvectors; c) eigenvalues and variance.

distribution and being substantially less represented in the tridimensional space.

With regard to the taxa, those most influencing the determination of the tridimensional space are *Tamarix* sp. (TAS), *Salix* (SAS), *Quercus ilex-coccifera* (QIC), and *Pinus halepensis* (PHA) (all together these determine 55.3% of the total inertia). The most significant are *Pinus halepensis* and *Quercus ilex-coccifera*.

4.1 *Factor 1*

This factor, determined by the 43.27% of the total variance (Table 2c), derives from the sites Cerro de la Virgen I-II and E1 Malagón, on the one hand, and, on the other, forming two clearly determined groups (Fig. 3) constituted by:

TR, CA, LB and FA----------CVIII, MA and CVI

very different from one another in terms of taxa and the appearance frequency of these taxa.

The differentiation between the two groups is based on the predominant types in one group or the other, and even exclusivity in one of the groups; therefore, the type and the frequency of taxon appearance at a site

determines the association of the taxon with the group defined by Terrera del Reloj or with the group defined by Cerro de la Virgen I-II and El Malagón.

Within these general groups, it is necessary to specify that Fuente Amarga is associated less with Terrera del Reloj than with Castellón Alto and Loma de la Balunca in terms of Factor 1, due to the fact that over half of the taxa (25) do not appear in the Fuente Amarga group and those which do appear show rather small frequencies in almost all the species except *Pinus halepensis* and, to a lesser degree, *Quercus ilex-coccifera*. Similarly, the association of Cerro de la Virgen III with E1 Malagón is of lesser intensity than that of

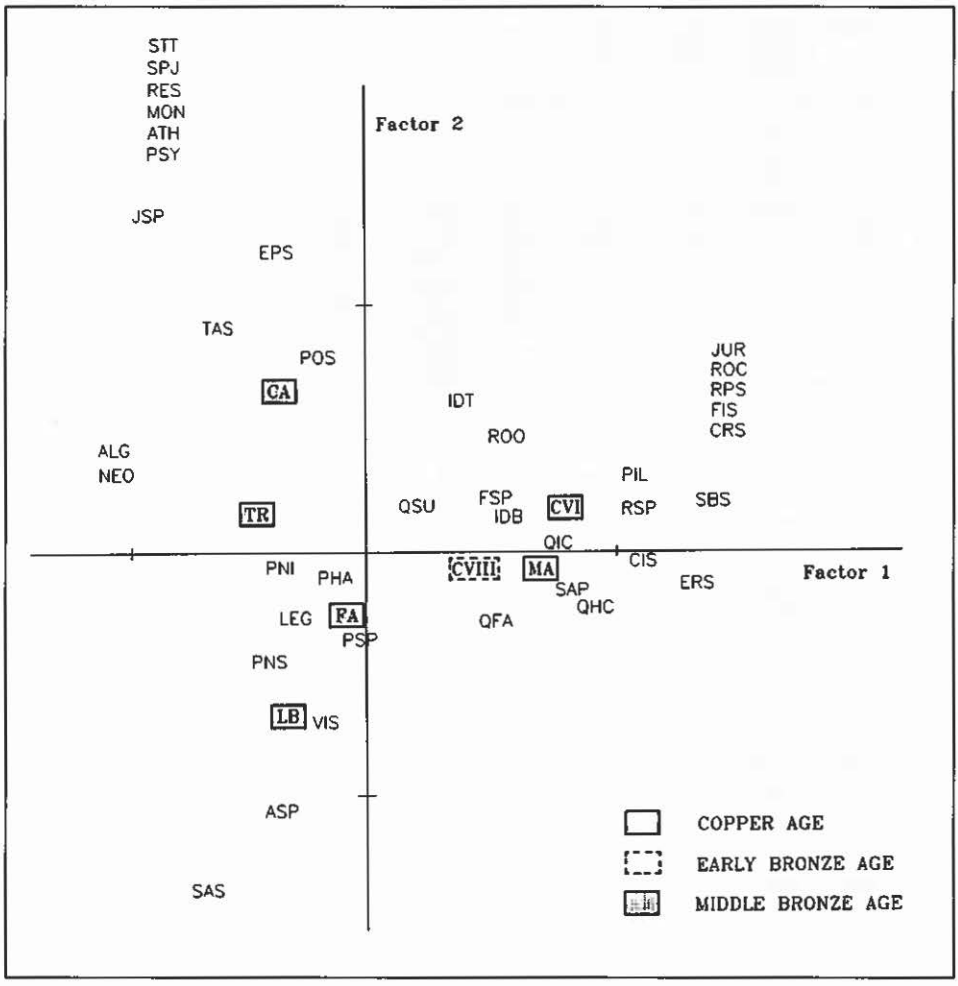


Fig. 3 – Correspondence analysis of the settlements of the Depression of Guadix-Baza. Factors 1 and 3.

N°	Var	QLT	WEIG	INR	1»F	COR	CTR	2»F	COR	CTR	3»F	COR	CTR
1	PHA	942	506	73	-256	807	126	-98	119	33	-36	16	14
2	PNI	474	6	32	-472	71	7	-53	1	3	-1121	401	92
3	PSY	790	1	1	-967	157	2	1732	499	4	900	135	7
4	PNS	816	5	19	-538	116	7	-437	77	8	-1246	622	86
5	PSP	622	5	14	-121	9	2	-346	65	6	-1003	547	57
6	JSP	963	1	3	-1021	313	4	1396	585	8	459	64	7
7	QIC	982	245	205	682	978	430	34	3	5	4	1	6
8	QFA	664	18	24	422	234	14	-269	95	11	505	335	60
9	QSU	384	2	3	67	4	2	212	34	3	676	345	12
10	QHC	260	7	34	820	242	19	-218	17	5	21	1	6
11	ASP	677	1	3	-482	82	2	-1054	391	7	-758	203	10
12	ATH	790	5	48	-967	156	18	1732	499	86	900	135	50
13	CIS	663	13	38	1031	602	51	6	1	3	322	59	21
14	CRS	353	1	1	1348	304	2	497	42	3	-194	7	6
15	EPS	895	2	5	-500	117	3	1237	714	15	365	63	8
16	ERS	337	1	1	1250	261	2	-132	3	3	654	72	6
17	FIS	353	1	1	1348	304	2	497	42	3	-194	7	6
18	LEG	790	49	36	-411	413	33	-251	154	22	-302	223	60
19	MON	790	1	10	-967	156	5	1732	499	20	900	135	15
20	PIL	471	4	14	998	425	14	310	41	5	-84	4	6
21	RSP	418	1	5	998	397	6	194	15	3	-102	5	6
22	RPS	353	1	2	1348	304	3	497	42	3	-194	7	6
23	RES	790	6	56	-967	156	20	1732	499	99	900	135	57
24	ROC	353	1	2	1348	304	3	497	42	3	-194	7	6
25	ROO	471	27	44	452	223	23	475	247	40	5	1	6
26	JUR	353	1	1	1348	304	2	497	42	3	-194	7	6
27	SPJ	790	1	1	-967	156	2	1732	499	4	900	135	7
28	STT	790	1	4	-967	156	3	1732	499	9	900	135	9
29	ALG	370	1	2	-1174	230	2	429	31	3	-807	109	7
30	FSP	311	3	4	417	197	3	216	53	4	229	60	7
31	NEO	370	1	2	-1174	230	2	429	31	3	-807	109	7
32	POS	471	27	44	-337	84	7	807	478	48	414	126	29
33	SAS	936	21	139	-795	170	52	-1377	509	249	978	257	249
34	SAP	357	2	7	703	158	4	-142	7	3	772	191	15
35	SBS	704	1	2	1305	670	4	218	19	3	183	14	6
36	TAS	837	46	136	-744	326	96	929	509	244	-42	2	7
37	VIS	656	1	4	-280	14	2	-688	80	4	-1835	563	19
38	IDT	547	3	5	284	90	3	624	434	10	139	22	7
39	IDB	803	21	11	436	681	17	182	119	7	-28	3	6

Table 3 – Correspondence analysis of the sites in the Baza Depression: contribution of elements.

Fig. 4 – Anthracological histogram of the settlements from the Copper and Bronze Ages in the Depression of Guadix-Baza (on the opposite page).

CULTURAL SEQUENCE	COPPER AGE		EARLY BRONZE A.	MIDDLE BRONZE AGE (Argar)			
ARCHAEOLOGICAL SITES	EL MALAGON	CERRO DE LA VIRGEN I-II	CERRO DE LA VIRGEN III	PUENTE AMARGA	LOMA DE LA BALUNCA	TERRERA DEL RELOJ	CASTELLON ALTO
^{14}C DATINGS (B.P.)	3870 :60 4020 :60	3920 :70	3735 :55	3580 :100		3490 :50	3370 :100
NUMBER OF CHARCOAL FRAGMENTS STUDIED	1845	2159	1104	452	842	1345	3414
Pinus halepensis 10 20 30 40 50 60 %							
Pinus nigra 5 %							
Pinus nigra-sylvestris 5 %							
Pinus sp. 5 %							
Juniperus sp.							
Quercus ilex-coccifera 10 20 30 40 50 %							
Quercus faginea 5 %							
Quercus suber							
Quercus deciduous							
Acer sp.							
Cistus sp. 5 %							
Ephedra sp.							
Leguminosae 10 %							
Phillyrea sp.							
Pistacia lentiscus 5 %							
Rhamnus sp.							
Rosmarinus officinalis 5 %							
Fraxinus sp.							
Populus sp. 5 %							
Salix sp. 10 %							
Sambucus sp.							
Tamarix sp. 10 %							
PS *Pinus sylvestris* AT *Atriplex halimus* C *Chaetopogon* sp. E *Cf. Ephedra* sp. J *Juncbus regia* M *Monocotiledoneae* RP *Rhamnus-Phillyrea* R *Resina ete* RO *Rosmarinus officinalis* SJ *Spartium junceum* ST *Stipa tenacissima* AG *Cf. Allium ghotmasa* N *Nerium oleander* SP *Salsola-Peganum* V *Vitis* sp.	E SP	C RP	J	V	SP	AG N	PS AT M R SJ ST SP

Cerro de la Virgen I-II with E1 Malagón, given that over half the taxa (25) do not appear, and those that do show a high frequency in Cerro de la Virgen III but low in El Malagón or vice versa – *Salix* sp., *Tamarix* sp., Undetermined (IDT), *Cistus* sp. (CIS), *Rosmarinus officinalis* (ROO). In addition, there is a certain number of species which appear at E1 Malagón or in Cerro de la Virgen I-II, or in both, but not at Cerro de la Virgen III – *Sambucus* sp. (SBS), *Phillyrea* sp. (FIS), *Crataegus* sp. (CRS), *Juglans regia* (JUR), *Rhamnus-Phillyrea* (RPS), Rosaceae (ROS), *Salix-Pupulus* (SAP), *Quercus suber* sp. (QSU), *Pinus* sp. (PSP), *Populus* sp. (POS) and *Ephedra* sp. (EPS).

The considerations above determine a gradient between the sites, which, maintaining the general format cited earlier, takes the form:

Taxa exclusive or nearly so to TR y CA	Taxa abundant in or exclusive to LB, FA, TR o CA	Taxa very abundant in CVB y CVA o MA	Taxa exclusive to CVA
Alnus glutinosa	*Salix* sp.	Undetermined	*Rhamnus* sp.
Nerium oleander	*Tamarix* sp.	*Fraxinus* sp.	*Erica* sp.
Pinus sylvestris	*Leguminosae*	*Quercus faginea*	*Sambucus* sp.
Spartium junceum	*Populus* sp.	Indeterminable	*Crataegus* sp.
Stipa tenacissima	*Pinus halepensis*	*Rosmarinus officinalis*	*Phillyrea* sp.
Monocotiledoneae	*Pinus* sp.	*Quercus ilex-coccifera*	*Juglans regia*
Atriplex halimus		*Salix-Populus*	*Rhamnus-Philly*
Retama sp.	*Pinus nigra-sylvestris*	*Quercus deciduous*	*Rosaceae*
Juniperus sp.	*Ephedra* sp.	*Pistacia lentiscus*	
	Acer sp.	*Cistus* sp.	
	Pinus nigra		
	Vitis sp.		

The end sites on the gradient (Terrera del Reloj, on the one hand, and Cerro de la Virgen I-II on the other) show a great quantity of taxa, although those which appear at one end do not occur at the other, or the frequency has an opposite sign (taxa with great frequency in one of these sites shows little frequency in the other, and vice versa). The sites of the intermediate zone have substantially fewer taxa than have the previous (approximately half of the taxa do not appear in the zone), but approach the taxonomic characteristics one or the other end, according to the taxa contained (Fig. 5; Table 4).

4.2 *Factor 2*

This factor carries (once the effect of Factor 1 is eliminated) 25.12% of the total inertia (Table 2c) and is determined fundamentally by the sites Castellón Alto and Loma de la Balunca, very well represented in the factor and which provide the greatest part of the inertia (36.6% and 37.7%, respectively) (Table 2a and 2b); the rest of the sites appear with much less significance in relation to Factor 2. In this way, Factor 2 shows a gradient which goes from CA to LB, or vice versa and which is characterized by a clear contrast between the two sites, insisting on the presence of taxa in one and

	TR	CA	LB	FA	CVIII	MA	CVI
ALG	100						
NEO	100						
JSP	25.80	74.20					
PSY		100					
SPJ		100					
STT		100					
MON		100					
ATH		100					
RES		100					
SAS	6.54	3.60	81.70	4.56	0.68	2.52	0.34
TAS	46.60	38.97	0.38		0.88	0.57	12.60
PNS	19.90	4.73	8.11	67.23			
EPS	17.39	60.87					21.74
ASP			34.28	65.71			
PNI	2.02	25.32		72.66			
LEG	29.67	5.60	21.25	20.75	10.62	1.91	10.18
POS	23.81	44.14	1.54			29.21	1.29
VIS				100			
PHA	17.82	15.24	18.73	17.58	13.6	10.02	7.01
PSP	9.93	5.48	4.11	60.62		14.73	5.14
QSU	9.88	28.40	14.81			46.91	
IDT	8.29	27.46			32.64	3.11	28.50
FSP	5.03	15.09	15.09		17.61	3.77	43.40
QFA	2.37	7.67	20.33	1.88	25.88	36.65	5.22
IDB	7.24	12.88	5.78	12.33	12.60	19.22	29.94
ROO	6.29	19.41		3.57	34.29	2.88	33.55
QIC	2.78	5.81	5.84	11.33	18.51	25.61	30.13
SAP		11.49	13.79			74.70	
QHC	1.69	1.06		23.26	2.11	69.77	2.11
RSP					52.94		47.06
PIL		3.59			40.34		56.10
CIS	0.94	1.65			30.82	53.06	13.53
ERS						100	
SBS						44.44	55.56
CRS							100
FIS							100
JUR							100
RPS							100
ROC							100

Table 4 – Sb Taxa in each settlement ordered by Factor 1.

not appearing in the other, or vice versa. From top to bottom, the gradient is determined by the presence of taxa, and on descending the gradient the number of absences increases until reaching FA and LB, which have the greatest quantity of taxa. Together with this fact, the movement along the gradient is defined by taxa which dominate the group formed by CA and TR, and which have low frequencies in FA and LB, and vice versa, with CVA, CVB and MA marking the transition between the two tendencies. One graphic form might be as shown in Fig. 6.

Therefore, with respect to the taxa, this factor, within Groups 1 and 2 defined by Factor 1, makes a distinction between those associated with Castellón Alto and Terrera del Reloj, on the one hand, and those associated with Loma de la Balunca, on the other. This is defined in the following form:

Associated with CA and TR	Associated with LB and FA
Pinus sylvestris	*Salix* sp.
Spartium junceum	*Leguminosae*
Stipa tenacissima	*Pinus halepensis*
Monocotiledoneae	*Pinus nigra-sylvestris*
Atriplex halimus	*Acer* sp.
Retama sp.	*Pinus nigra*
Juniperus sp.	*Vitis* sp.
Tamarix sp.	*Also appearing at El Malagón*
Ephedra sp.	*Quercus faginea*
Alnus glutinosa	*Salix-Populus*
Neriurn oleander	*Quercus deciduous*
Populus sp.	

4.3 *Plane 1-2*

The plane formed by Factors 1-2 (Fig. 3) is formed as the hyper-plane which carries the greatest part of the distribution inertia (63.4%), making the results markedly significant.

Plane 1-2 shows a triangular cloud with respect both to the taxa and the sites; that is, it shows a general tendency which is afterwards divided into two clearly determined and opposing branches, both for the taxa and for the sites, summarizing the characteristics shown in Factors 1 and 2 to be evaluated in the following section.

4.4 *Evaluation of the anthraco-analysis using correspondence analysis*

Correspondence analysis has provided a series of groupings of sites and associated taxa (Fig. 3), indicating two important groups of sites:

1. Cerro de la Virgen I-II, El Malagón and Cerro de la Virgen III are close in chronological/cultural attributions, the first two sites attributable to the Middle to Late Copper Age, while the third belongs to the Early Bronze Age of Cerro de la Virgen. At these sites, a group of taxa are associated exclusively

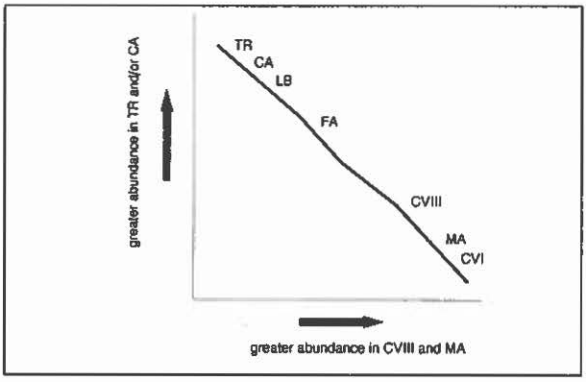


Fig. 5

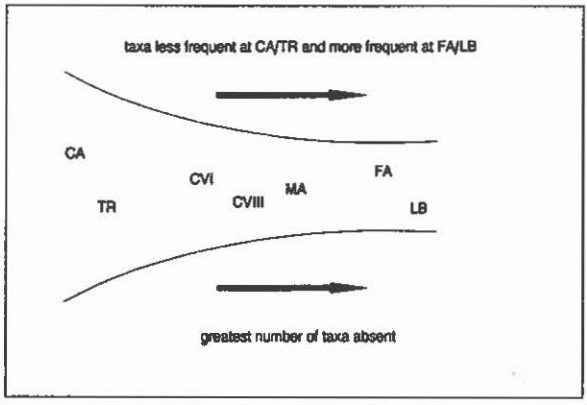


Fig. 6

with certain sites, or the appearance frequency is substantially higher than in the rest (at least in relative terms). Thus there are some taxa specific to Cerro de la Virgen I-II (*Phillyrea* sp., *Juglans regia*, *Rhamnus Phillyrea* and Rosaceae) and to E1 Malagón (*Erica* sp.), or to both (*Sambucus* sp.) and others with greater abundance in the group of the three sites than in the rest (*Cistus* sp., *Pistacia lentiscus*, *Rhamnus* sp., *Quercus* deciduous, *Salix-Populus, Quercus ilex-coccifera, Rosmarinus officinalis, Fraxinus* sp., Indeterminable, Indeterminate and *Quercus faginea*).

This group of taxa includes species of the Mediterranean forest, formed by *Quercus ilex-coccifera, Quercus faginea* and *Quercus* cf. *pyrenaica* as an arboreal layer, these two last indicating greater humidity, and of the shrubby layer are: *Crataegus* sp., *Cistus* sp., *Phillyrea* sp., Rosaceae, *Rhamnus* sp. and *Rosmarinus officinalis*, together with clearly thermophilous species such as: *Phillyrea* sp. and *Pistacia lentiscus*, indicating somewhat higher temperatures than at present. The most notable among the riverbank trees are *Sambucus*

sp. and *Fraxinus* sp., which need a high phreatic level, testifying to substantial water courses in this period.

Between Group 1 and 2 is *Quercus suber*, which shows an equilibrium between the two general groups of sites and taxa.

2. This group is formed by Terrera del Reloj, Castellón Alto, Loma de la Balunca and Fuente Amarga, which have similar archaeological records, culturally attributable to the Argar Culture (Middle Bronze Age) and dating from 1700 to 1400 BC. This group contain two subgroups, defined by Factor 2 and distinctly separate and opposite from each other, with taxa and sites associated in terms of appearance frequency of the taxa:

– The group formed by Terrera del Reloj and Castellón Alto show two clearly thermophilous species, such as *Alnus glutinosa* and *Nerium oleander*, and which developed within the thermo-Mediterranean level, in possible relation to the lesser altitude of Terrera del Reloj (600 m. a.s.l.) and which appears to indicate that the thermo-Mediterranean vegetation level was not far away. The group of taxa formed by *Stipa tenacissima*, *Atriplex halimus* and *Ephedra* sp., characteristic of open or saline areas, indicate steppe zones near the sites at this time, though not with the present extension, since taxa such as *Retama* sp. and *Juniperus* sp. indicate shrubby areas of the degrading oak groves mentioned above. As in the previous group, taxa associated with the riverside appear: *Tamarix* sp., *Populus* sp. and, apparently, Monocotyledoneae (possibly *Arundo donax*) although with more xeric implications. The noteworthy member of this group, *Pinus sylvestris* (at present appearing in the Oromediterranean vegetation level; Figs. 1 and 2) occurred in Castellón Alto as construction material. This pine possibly appeared in the Sierra de Orce, Sierra de Baza and La Sagra – a straight-line distance of 10 to 40 km. from Castellón Alto, implying a search expressly for this species.

– In the group formed by Loma de la Balunca and Fuente Amarga, *Pinus halepensis* is prominent, which, together with Leguminosae, indicates a more or less open area where species from the Kermes-oak grove appear sparsely or not at all. In addition, there is a notable presence of *Pinus nigra* and *Pinus nigra-sylvestris*, which, as in the case of *Pinus sylvestris* in the previous group, here occurring nearer the settlements, at some S to 10 km. from the southern foothills of La Sagra and Sierra de Castril (Figs. 1 and 2). *Salix* sp. is associated with the Loma de la Balunca, used for constructing ceilings in the huts. The appearance at these sites, of taxa such as Acer sp., *Quercus faginea* and deciduous *Quercus*, with sub-humid umbroclimate demands, could indicate either firewood collection in the same micro-environment, probably in the shade of the valley floors, where there was more wetness than in the rest of the territory, or else the existence of this type of woodland in areas relatively near the sites, such as the Sierra de Segura to the north (VALLE *et al.* 1989).

The nexus of the union between the subgroups Castellón Alto/Terrera del Reloj, on the one hand, and Fuente Amarga/Loma de la Balunca on the other, is determined by such taxa as *Pinus nigra* and *Pinus halepensis*, quite abundant in all the sites and with less frequency in Group 1.

Summarizing, the general form of the gradient in the hyper-plane 1-2 is shown in Fig. 7.

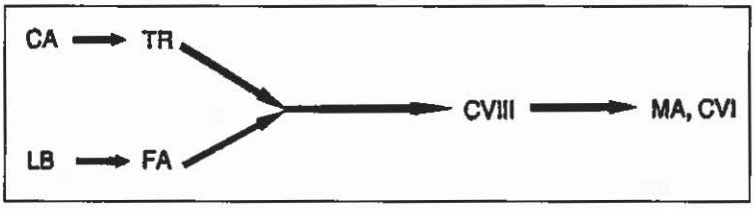


Fig. 7

5. The prehistoric vegetation of the Baza-Huescar depression

5.1 *The Chalcolithic vegetation (2500 to 1800 BC)*

The data obtained from the two sites studied from this period, El Malagón and Cerro de la Virgen I-II (Fig. 4), offer an image of the vegetation where human impact began to be felt, although each site, having different bio-climatic coordinates (Fig. 2), presents certain peculiarities.

The vegetation of the surroundings of the sites studied, during the Copper Age in the Guadix-Baza Depression, corresponded to an open wooded area of *Quercus coccifera* and *Quercus rotundifolia*, with clearings containing heliophilous shrubbery. The pine grove of *Pinus* HALEPENSIS was relegated to more or less marginal topographic positions. The bases of the massifs surrounding the Hoya de Baza (El Malagón) appears to have been wetter, since, despite the difficulty in differentiating *Quercus coccifera* from *Quercus rotundifolia*. the latter is more abundant, and mesophytic species are highly significant, such as *Quercus faginea*, *Quercus suber* and probably *Quercus pyrenaica*, these latter two taxa over siliceous substrate of the Sierra de las Estancias.

The riverbank vegetation is sparsely represented in the two sites, notable species being *Fraxinus* sp. and *Tarnarix* sp. In addition, there are *Salix* sp., *Populus* sp. and *Sambucus* sp. (Fig. 4). The archaeological and carpological data indicate a vigorous development of agriculture at this time, although not reaching the developmental rate of the following phase. Thus, it might be assumed that around the settlement the land was cultivated in strips, interspersed with natural vegetation.

5.2 *The vegetation of the Early Bronze Age (1800-1600 BC)*

The levels of the Early Bronze Age of the Cerro de la Virgen present a vegetation much more associated with that of the Copper Age than to that of the Middle Bronze Age, although the sharp decrease in the frequency of *Quercus ilex-coccifera*, concomitant with the rise of *Pinus halepensis*, which acquires greater frequencies in the following phase (Fig. 4), indicates that the degradation process of the natural vegetation was progressive and linked to the socio-economic conditions of the inhabitants of this zone.

5.3 *The vegetation of the Bronze Age (1700-1400 BC)*

The results of the anthracological study of the sites of the Bronze Age in the Guadix-Baza Depression indicate the dominance of a pine woodland of *Pinus halepensis*. In addition, all the sites contain shrub-land species typical of degradation, such as Leguminaceae, foremost, and *Rosmarinus officinalis* and *Cistus* sp., next in importance – these reflecting human impact on the environment (Fig. 4). In effect, the ploughing of the oak groves (of which remains are still found together with those of the shrub-lands) for cultivation, together with the expansion of goat and sheep husbandry, entailed the regression of the oaks and advance of the Aleppo pines and legumes. Open-ground species such as *Ephedra* sp. appear in the Terrera del Reloj, while *Atriplex halimus*, characteristic of saline soils, appears in the Castellón Alto site. Finally, *Stipa tenacissima* (esparto), dominating the driest areas, is present at all the sites, used in making cord, footwear, and baskets – these representing important crafts, though still insufficiently studied (Fresneda, Rodríguez-Ariza 1992).

The Carpological studies of these sites (presently under way) reveal a quantitative and qualitative leap in agriculture at this time, with respect to the Copper Age, contributing, by the ploughing of new terrain, the degradation of the environment near the settlements.

In addition, riparian vegetation is well developed, including *Fraxinus*, *Nerium*, *Salix*, *Populus* and *Tamarix*. Apparently abundant along the rivers, this vegetation was not widely used as a wood source at these sites, except in very specific cases (e.g. for framing the roofs of huts).

The presence of thermophilous elements such as *Pistacia lentiscus*, *Phillyrea* sp., *Quercus suber* and even *Nerium oleander*, as well as mesophytic elements (*Quercus faginea*, *Quercus suber*, *Quercus pyrenaica*) now absent at the sites, suggests that the vegetation corresponded to middle to low meso-Mediterranean and that the climate then differed somewhat from the present-day climate; we postulate that the Ti could have been from 50 to 75 points higher than today, and annual precipitation higher by 100 to 200 mm (dry upper umbroclimate). This dryness is also suggested by the disappearance of species such as *Sambucus* sp. from the riverbanks.

6. Conclusion

The Copper Age plant association *Rhamno lycioidis-Querceto cocciferae sigmetum* present at the sites of the Guadix-Baza Basins during the Copper Age, is, based on the edaphic characteristics of the zone (and until we have further studies on the preceding period) considered by us to be potential vegetation. The association evolved in the Bronze Age towards an open shrub-land where *Pinus halepensis* attained a strong presence, favoured by agriculture and animal husbandry. With *Pinus halepensis* more abundant than *Quercus ilex-coccifera*, this plant formation did not resemble a forest, and the progressive degradation gave rise to an open shrub-land dominated by shrubby legumes, as found in the Iberian levels of Fuente Amarga (Rodríguez-Ariza, Ruiz 1993).

The sites studied here fit within the last anthracological phase defined by Vernet and Thiébault (1987) for the western Mediterranean, which in southern France is characterized by *garrigues* of *Quercus ilex*, *Quercus coccifera* and *Buxus*, together with a strong presence of *Pinus halepensis*. In the thermo-Mediterranean zones of the Spanish Levante (Cova de Cendres and Recambra) the vegetation is represented by shrub-lands of *Rosmarino-Ericion* (Badal 1990; Badal *et al.* en prensa; Grau 1984), an association represented in the Cueva de Nerja at the Neolithic levels (Badal 1990). In Los Millares there is the association of *Querco-Lentiscetum*, with a strong presence of *Olea* and *Pistacia*, together with the shrub-lands of *Rosmarino-Ericion* (Rodríguez-Ariza, Vernet 1991; Rodríguez-Ariza 1992). Meanwhile, in the zones of the meso-Mediterranean level of the region of Murcia, the associations develop from the degradation of the continental Holm-oak groves (*Bupleurum rigidi-Quercetum rotundifoliae sigmetum*), as may be the case with the *Rhamnus lycioidis-Querceto cocciferae sigmetum* (Grau 1990).

These results suggest a regional similarity in vegetation, with significant change between the Copper and Bronze Ages; in this respect, we find a gradual change at the Cerro de la Virgen. In the western Mediterranean, the beginnings of human impact on the environment differ chronologically between zones. In southern France (Vernet Thiébault 1987) and the eastern Iberian Peninsula (Vernet, Badal, Grau 1983, 1987; Badal 1990) this process begins in the middle Neolithic, whereas in the Ronda Basin the opening of the vegetation does not appear to occur until the beginning of the first millennium (Rodríguez-Ariza *et al.* 1991). In view of these chronologies, the changes in the vegetation appear to be associated with different economic strategies, based fundamentally on the raising of crops and animals. Thus, the different degree of development of these activities between human communities inhabiting the different zones produces uneven impact on the vegetation. Therefore, although the influences of climatic change cannot be discarded, and until advances are made in palaeo-ecological studies of our re-

gion, we consider these influences minimal compared to human intervention in the environment.

M.O. Rodriguez-Ariza, J.A. Esquivel
Department of Prehistory and Archaeology
University of Granada

F. Valle
Department of Vegetal Biology
University of Granada

BIBLIOGRAPHY

Badal Garcia E. 1988, *Resultados metodológicos del estudio antracológico de la cova de les cendres (Alicante, España)*, in *Actas do Encontro "Paleoecologia e Arqueologia"*, Câmara Municipal de Vila Nova de Famalicao (Portugal).

Badal Garcia E. 1990, *Aportaciones de la Antracología al estudio del paisaje vegetal y su evolución en el quaternario reciente, en la costa mediterránea del Pais valenciano y Andalucia (18.000 - 3.000 B.P.)*, Universidad de Valencia, Tesis doctoral.

Badal E., Bernabeu J., Dupre M., Fumanal M.P., en prensa, *Secuencia cultural y paleoambiente en el yacimiento neolítico de la Cova de les Cendres (Moraira-Teulada, Alicante)*, in *2ª Reunión del Cuaternario Ibérico, Madrid 1989*.

Benzécri J.P. *et al.* 1973, *L'Analyse des données*, Tome 1: *La Taxinomie*, Tome 2: *L'Analyse des correspondences*, Paris, Dunod .

Breuil H. 1903, *Les fouilles dans la grotte du Mas d'Azil (Ariège)*, «Bull. archéologique», 421-436.

Castelletti L. 1975, *Deposito mesolitico del passo della Comunelle (Reggio E.), Appennino Tosco-Emiliano*, «Preistoria Alpina», 11, 148-154.

Chabal L. 1991, *L'homme et l'évolution de la végétation méditerranéenne, des âges des métaux à la période romaine: Recherches anthracologiques théoriques, appliquées principalement à des sites du Bas-Languedoc*, Thèse de Doctorat, USTL, Montpellier.

Douguedroit A. 1976, *La notion de climax appliqué à la Basse Provence calcaire*, «Méditerranée», 25, 55-71.

Escofier B., Pagés J. 1988, *Analyses factorielles simples et multiples: objetifs, méthodes et interpretation*, Paris, Dunod.

Fresneda E., Rodríguez-Ariza Mª O. 1992, *El trabajo del esparto en el yacimiento arqueológico del Castellón Alto (Galera, Granada, España)*, in *Congreso Internacional de Etnobotánica, Córdoba 1992*, en prensa.

Gongora M. 1868, *Antigüedades prehistóricas de Andalucía, monumentos, inscripciones, armas, utensilios y otros importantes objetos pertenecientes a los tiempos más remotos de su población*, Madrid, 25-56.

Grau Almero E. 1984, *El hombre y la vegetación del Neolítico a la Edad del Bronce valenciano en la Safor (provincia de Valencia) según el análisis antracológico de la Cova de la Recambra*, Memoria de Licenciatura, Valencia.

Greenacre M.J. 1984, *Theory and Applications of Correspondense Analysis*, London, Academic Press.

Greguss P. 1955, *Identification of living gymnosperms on the basis of xylotomy*, Budapest.

Greguss P. 1959, *Holzanatomie der europäischen Laubhölzer und Straücher*, Budapest.

Heer O. 1866, *Pflanzen der Pfahlbauten*, «Neujbl. naturf. Ges. Zürich auf das Jahr 1866», 1-54.

Heinz C., Badal-Garcia E., Figueiral I., Grau Almero E., Thiébault S., Vernet J.L. 1988,

Identification des charbons de bois préhistoriques méditerranéens, chronologie et répartition, «PACT», 22-IV.3, (= *Wood and Archeology, First European Conference, Louvain-La-Neuve, 1987*, edited by T. HACKENS, A.V. MUNAUT, CL. TILL), 161-172.

HOLLENDONNER F. 1926, *Mikroskopiche Untersuchungen der ungarländischen prähistorischen Hölzer und Holzkohlen (ungarisch mit deutscher Zusammenfassung)*, «M.Tud.»

HUBER B., ROUSCHAL C. 1954, *Mikrophotographischer Atlas mediterraner Hölzer*, Berlin-Grunewald, Fritz Haller Verlag.

JACQUIOT C. 1955, *Atlas d'anatomie des bois des conifères*, Paris, Editions du Centre technique du Bois.

JACQUIOT C., TRENARD Y., DIROL D. 1973, *Atlas d'anatomie des bois des angiospermes*, Paris, Editions du Centre technique du Bois.

JAMBU M., LEBEAUX M O. 1983, *Cluster Analysis and Data Analysis*, North-Holland, Amsterdam.

KRAUSS-MARGUET I. 1981, *Analyse anthracologique du gisement post-glaciare de la Poujade (Millau, Aveyron)*, «Paléobiologie continentale», X, 1, 93-110.

KRZANOWSKI WJ. 1988, *Principles of Multivariate Analysis*, Oxford, Oxford University Press.

MILLER N.F. 1985, *Paleoethnobotanical evidence for deforestation in ancient Iran: A case study of urban Malyan*, «Journal of Etnobiology», 4 (1),15-28.

PREJAWA H. 1896, *Die Ergebaisse der Bohlweguntersuchungen im Grenzmoor zwischen Oldenburg und Preussen und in Mellinghausen in Kreise Sulingen*, «Mitt. Ver. Gesch. Landeske. Osnabrück», 21, 98-178.

RIVAS MARTINEZ S. 1987, *Memoria del mapa de Series de vegetación de España 1:400.000*, Madrid, ICONA.

RIVAS MARTINEZ S. 1990, *Bioclimatology and Biogeography of West Europe*, «Publ. Biologia Vegetal», II, 4-12.

RIVAS MARTINEZ S., ASENSI A., MOLERO-MESA J., VALLE F. 1992, *Biogeografía de Andalucía*, en prensa.

RODRÍGUEZ-ARIZA Mª O. 1992, *Las relaciones hombre-vegetación en el Sureste de la Península Iberica durante las Edades del Cobre y Bronce a partir del análisis antracológico de siete yacimientos arqueológicos*, Tesis doctorales de la Universidad de Granada microfilmadas, Granada.

RODRÍGUEZ-ARIZA Mª O., VERNET J.L. 1991, *Etude paléoecologique du Gisement Chalcolithique de Los Millares (Santa Fé de Mondujar, Almerfa). Etude Anthracologique*, «BAR International Series», 573, 1-16.

RODRÍGUEZ-ARIZA Mª O., RUIZ SÁNCHEZ V. 1993, *Acción antrópica sobre el medio natural en el Sureste de Andalucía durante la Prehistoria Reciente y Época Romana*, in *Investigaciones arqueológicas en Andalucía 1985-1992 (Proyectos)*, Consejería de Cultura y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Huelva, 417-428.

RODRÍGUEZ-ARIZA Mª O., AGUAYO P., MORENO F. 1993, *The environment in the Ronda Basin (Malága, Spain) based on an anthracological study of Old Ronda*, «Societé Botanique de Franse-Actualites botaniques», 1993-2 (= *Actas del Coloquio internacional sobre: Les Charbons de bois, les anciens écosystèmes et le role de l'homme, Montpellier 1991*).

SCHWEINGRUBER F. 1978, *Mikroskopische Holzanatomie*, Zug, Zürcher A.G.

SIRET E., SIRET L. 1890, *Las primeras edades del metal en el S.E. de España*, I , Barcelona.

STIEBER J. 1967, *A Magyaroszági Felsöpleisztocén vegetáció törteénete az anthrakotómiai eredmények Tükreben*, «Földtani Közlony», 97, 308-317.

THINON M. 1979, *Incidence écologique des reboisements du mont Ventoux (Vaucluse). Aspects floristiques et pédologiques*, Thèse de 3ème cycle, Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille.

VALLE F., GOMEZ MERCADO F. 1990, *Vegetación de la hoja 6-10 Baza*, in R. DE LA TORRE

(ed.), *Mapa forestal de España a escala 1:200.000*, Publicaciones del ICONA, 55-84.

VALLE F., GOMEZ F., MOTA J. F., DIAZ C. 1989, *Parque natural de Cazorla, Segura y las Villas. Guía botánico-ecológica*, Madrid, Editorial Rueda.

VERNET J.L. 1973, *Etude sur l'histoire de la végétation du Sud-est de la France au Quaternaire, d'après les charbons de bois principalement*, Paléobiologie continentale, IV, Montpellier.

VERNET J.L., BADAL GARCIA E., GRAU E. 1983, *La végétation néolithique du sud-est de l'Espagne (Valencia, Alicante) d'après l'analyse anthracologique*, «C.R. Acad. SC. Paris», 296, III, 669-672.

VERNET J.L., BADAL GARCIA E., GRAU E. 1987, *L'environnement végétal de l'homme au Néolithique dans le sud-est de L'Espagne (Valence, Alicante), première synthese d'après l'analyse anthracologique*, in *Actes du colloque "Premières communautés paysannes en Mediterranée occidentale", Montpellier, 1983*, CNRS, 131-134.

VERNET J.L., THIÉBAULT S. 1987, *An approach to northwestern Mediterranean recent prehistoric vegetation and ecologic implications*, «Journal of Biogeography», 14, 117-127.

WESTERN A.C. 1963, *Wood and Charcoal in Archaeology*, «Science in Archaeology», 150-160.

WESTERN A.C. 1971, *The ecological interpretation of ancient charcoals from Jericho*, in *Levant III*, British school of archaeology in Jerusalem, 31-40.

WILLCOX G.H. 1974, *A history of deforestation as indicated by charcoal analysis of four sites in Eastern Anatolia*, «Journal of British Institute of Archaeology at Ankara», 117-133.

ABSTRACT

The data from an anthracological study of vegetal carbon from six archaeological sites in the Guadix-Bàza district (Betic province, Guadiciano-Bastetano), dating from 2500 to 1400 BC, have been submitted to Correspondence Analyses in order to define relationships between taxa, to associate taxa with the sites, and to identify patterns of species appearance.

The vegetation identified by anthraco-analysis for the Copper Age is the kermes-oak grove (*Quercus coccifera* association), probably includable in the present-day *Rhamno lycioidis-Quercetum cocciferae* association, with Aleppo-pine groves (*Pinus halepensis* community) occupying the most marginal zones. This pine grove gradually replaced the oak grove during the Bronze Age, for a variety of causes, principally anthropic, such as the cultivation of new lands, farming and the cutting of trees.

Human knowledge of plants is reflected in the uses of certain species for specific functions: construction materials for huts, firewood for the hearth and for metal working, and raw materials for making utensils. The use of materials depended on species availability and the socio-economic organization of the human communities inhabiting the southeastern Iberian Peninsula during the Copper and Bronze Ages.